



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

LUCAS FLORENTINO GONÇALVES SANTOS

**APRIMORAMENTO DO MECANISMO PARA CONTROLE DE POSIÇÃO DE ATUADOR
ELÉTRICO DA SÉRIE E-MY2**

Recife
2024

LUCAS FLORENTINO GONÇALVES SANTOS

**APRIMORAMENTO DO MECANISMO PARA CONTROLE DE POSIÇÃO DE
ATUADOR ELÉTRICO DA SÉRIE E-MY2**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador(a): Prof. Dr. Douglas Contente Pimentel Barbosa

Recife
2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Gonçalves Santos, Lucas Florentino.

Aprimoramento do mecanismo para controle de posição de atuador elétrico da série E-MY2 / Lucas Florentino Gonçalves Santos. - Recife, 2024.

78p. : il., tab.

Orientador(a): Douglas Contente Pimentel Barbosa

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia de Controle e Automação - Bacharelado, 2024.

Inclui referências, apêndices.

1. Atuador. 2. Controle de posição. 3. Encoder. 4. Micrologix. 5. Posição. I. Barbosa, Douglas Contente Pimentel . (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

LUCAS FLORENTINO GONÇALVES SANTOS

**APRIMORAMENTO DO MECANISMO PARA CONTROLE DE POSIÇÃO DE
ATUADOR ELÉTRICO DA SÉRIE E-MY2**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Aprovado em: 18/03/2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Douglas Contente Pimentel Barbosa (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

MSc. Valdemar Moreira Cavalcante Junior (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. MSc. Artur Muniz Szpak Furtado (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Este trabalho é dedicado à minha família, parceira e amigos que exerceram papel fundamental para que fosse possível chegar onde estou. Desejo corresponder às expectativas de todos.

RESUMO

Este trabalho aborda o desenvolvimento de um sistema de controle de posição para um atuador da marca E-MY2B da SMC, utilizando um *MicroLogix* 1100 como controlador e um encoder para realizar a leitura da posição. A interface homem-máquina (IHM) é implementada por meio de um *PainelView*. O objetivo principal do trabalho é otimizar o controle preciso da posição do atuador inicialmente funcionando com uma configuração de paradas fixas em 5 pontos, dois extremos e 3 intermediários, aumentando o seu *range* de operação permitindo o deslocamento e parada em qualquer ponto do seu curso, desde que o deslocamento mínimo esteja dentro de seu *range* de atuação.

A comunicação entre o *MicroLogix* 1100 e o encoder é essencial para garantir a leitura precisa da posição do atuador. O encoder fornece feedback em tempo real, permitindo que o controlador ajuste a saída para manter a posição desejada. Isso proporciona uma resposta dinâmica e adaptativa às variações nas condições de operação. A implementação da IHM no *PainelView* oferece uma interface amigável para os operadores monitorarem e controlarem o sistema. Através dela, é possível visualizar dados relevantes, o que facilita a interação e o gerenciamento do sistema, contribuindo para uma operação mais eficiente.

Palavras-chave: Atuador; Controle de posição; *Encoder*; *MicroLogix*; Posição.

ABSTRACT

This work addresses the development of a position control system for an E-MY2B actuator from SMC, using a MicroLogix 1100 as the controller and an encoder for position reading. The human-machine interface (HMI) is implemented through a PanelView. The main goal of the work is to optimize the precise control of the actuator's position initially operating with a configuration of fixed stops at 5 points, two extremes and 3 intermediates, increasing its operating range allowing displacement and stopping at any point of its stroke, as long as the minimum displacement is within its operating range.

The communication between the MicroLogix 1100 and the encoder is essential to ensure accurate reading of the actuator's position. The encoder provides real-time feedback, allowing the controller to adjust the output to maintain the desired position. This provides a dynamic and adaptive response to variations in operating conditions. Implementation of the HMI on the PanelView provides a user-friendly interface for operators to monitor and control the system. Through it, relevant data can be visualized, facilitating interaction and system management, contributing to more efficient operation.

Keywords: Actuator; Position control; Encoder; MicroLogix; Position.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Atuador com haste pneumático.....	19
Figura 2 - Atuador sem haste de rosca.	20
Figura 3 - Sinal analógico.....	21
Figura 4 - Exemplo de aplicação para sinal digital.	23
Figura 5 - Discos de <i>encoders</i> absolutos.	25
Figura 6 - <i>Encoder</i> de quadratura com sensores defasados.	26
Figura 7 - <i>Encoder</i> de quadratura com janelas defasadas.	26
Figura 8 - Defasagem dos sinais para os dois sentidos de movimento.	27
Figura 9 - Forma básica do acoplador óptico.	28
Figura 10 - Visão frontal do <i>Micrologix</i> 1100.	31
Figura 11 - Visão lateral do <i>Micrologix</i> 1100.	32
Figura 12 - Função HSC do RSLogix 500.	34
Figura 13 - Atuador E-MY2B.	36
Figura 14 - Cabo de entradas e saídas digitais.	37
Figura 15 - Cabo de alimentação geral.	39
Figura 16 - Cabo do <i>encoder</i>	40
Figura 17 - Circuito de integração.	42
Figura 18 - Esquemático do circuito de integração.....	42
Figura 19 - Osciloscópio SIGLENT usado no primeiro teste do circuito.....	43
Figura 20 - Fonte ICEL usada para alimentar terminal de saída do circuito.	44
Figura 21 - Formas de onda de entrada e saída do circuito para teste isolado.	44
Figura 22 - Sinais de entrada do circuito para atuador se movendo para a direita. ..	45
Figura 23 - Sinais de entrada do circuito para atuador se movendo para a esquerda.	46
Figura 24 - Sinais de entrada e saída em deslocamento para a direita.	47
Figura 25 - Sinais de entrada e saída em deslocamento para esquerda.	47
Figura 26 - Sinais de saída do circuito para atuador se movendo para a esquerda.	48
Figura 27 - Configurações geris do CLP	49
Figura 28 - Configuração dos filtros das entradas digitais do CLP.	49
Figura 29 - Registrador do modo de funcionamento do HSC.	51
Figura 30 - Modos de funcionamentos aplicáveis ao HSC.	51

Figura 31 - Registradores de sub-rotina do HSC e erro.	52
Figura 32 - Criação de nova sub-rotina.	52
Figura 33 - Registradores de acionamento da função e contagem.....	52
Figura 34 - Código para teste de deslocamento padrão do atuador.	54
Figura 35 - Condição de parada de emergência do atuador.....	54
Figura 36 - Tabela de bits das entradas digitais do <i>Micrologix</i> 1100.	55
Figura 37 - Manipulação dos dados do HSC.....	56
Figura 38 - Condições de parada do atuador.	57
Figura 39 - Condições de movimento do atuador.....	58
Figura 40 - Gráfico inicial de comportamento do atuador.	59
Figura 41 - Novo comportamento do atuador.	60
Figura 42 - Tendência do novo comportamento do atuador para primeiro intervalo de deslocamento.....	61
Figura 43 - Tendência do novo comportamento do atuador para segunda etapa de deslocamento.....	62
Figura 44 - Tendência do novo comportamento do atuador para terceira etapa de deslocamento.....	62
Figura 45 - Tela de seleção de dispositivos do projeto.....	64
Figura 46 - Tabela de <i>tags</i> da IHM.....	65
Figura 47 - Tela inicial da IHM.	66
Figura 48 - Tela de controle padrão da IHM.....	66
Figura 49 - Tela de controle por HSC da IHM.	67
Figura 50 - Tela de configuração da IHM.	68
Figura 51 - Tela de especificações elétricas do sistema.	68
Figura 52 - Tela de especificações mecânicas do sistema.....	69
Figura 53 - Sistema operando.....	69
Figura 54 - Tela de controle padrão em operação.....	70
Figura 55 - Tela de controle por HSC em operação.	71
Figura 56 - Precisão do atuador.....	71
Figura 57 - Gráfico do erro obtido em função do deslocamento desejado.....	72
Figura 58 - Gráfico do erro pós implementação do controle obtido em função do deslocamento desejado.	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tabela de características do <i>Micrologix</i> 1100.....	32
Tabela 2 - Tabela verdade dos sinais de entrada digital do atuador.....	38
Tabela 3 - Tabela verdade dos sinais de saída digital do atuador.	38
Tabela 4 - Especificações do fotoacoplador.	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CLP	Controlador Logicamente Programável
CP	Controlador Programável
CCW	Connected Components Workbench
DEE	Departamento de Engenharia Elétrica
HSC	High-Speed Counter
LED	Light Emitting Diode
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS	14
1.1.1	Geral	14
1.1.2	Específicos	14
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	ATUADORES	16
2.1.1	Atuadores elétricos.....	16
2.1.2	Atuadores lineares.....	17
2.1.2.1	<i>Atuadores com haste.....</i>	<i>18</i>
2.1.2.2	<i>Atuadores sem haste.....</i>	<i>19</i>
2.2	SENSORES	20
2.2.1	Sensores analógicos	21
2.2.2	Sensores digitais	22
2.2.2.1	<i>Encoder.....</i>	<i>24</i>
2.3	ACOPLADOR ÓPTICO	27
2.4	CONTROLADORES LÓGICO PROGRAMÁVEIS.....	29
2.4.1	Micrologix 1100	30
2.5	HIGH-SPEED COUNTER.....	32
2.6	RSLOGIX 500	35
3	DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	36
3.1	ESTUDO DO ATUADOR E-MY2B.....	36
3.2	CIRCUITO DE INTEGRAÇÃO.....	40
3.2.1	Validação do circuito de integração isolado.....	43
3.2.2	Validação do circuito de integração conectado ao atuador	45
3.3	HIGH-SPEED CONTER	48
3.3.1	Configuração das entradas digitais.....	48
3.3.2	Configuração da função HSC	50
3.4	LÓGICA DE CONTROLE	53
3.4.1	Controle padrão através do CLP	53
3.4.2	Leitura com HSC	55
3.4.3	Estudo de comportamento do atuador com uso do HSC e parada externa .	56
3.4.4	Estudo de comportamento do atuador com função de correção da posição	60
3.5	CONFIGURAÇÃO DA IHM.....	63
3.6	RESULTADOS	69
4	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE.....	74
	REFERÊNCIAS.....	75

APÊNDICES	77
------------------------	-----------

1 INTRODUÇÃO

No contexto da automação industrial, o controle preciso de posição é uma peça fundamental para o desempenho eficiente de diversos processos. Nesse sentido, o presente Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) se propõe a explorar e aprimorar o mecanismo de controle de posição de um atuador elétrico que trabalhava previamente com posições fixas, tornando o seu funcionamento limitado. Um novo sistema de controle foi, então, implementado para aumentar a resolução do equipamento utilizando como fonte de dados a posição fornecida pelo *encoder* (sensor de posição) do equipamento, implementando um circuito de integração entre o sensor e o CLP.

Este estudo se insere em um cenário no qual a demanda por precisão e velocidade nas operações industriais é crescente, impulsionada por uma busca constante por eficiência e competitividade.

Na aplicação de atuadores lineares, não somente o acionamento do motor, mas também a medição da posição em que ele se encontra é de extrema valia para determinar seu controle (CASTRUCCI, BITTAR e SALES, 2018). E a integração entre o *encoder* do atuador ao CLP, emerge como um componente-chave nesse contexto, permitindo o processamento dos sinais de entrada em altas frequências, viabilizando o monitoramento e controle preciso do posicionamento do atuador elétrico em tempo real (KOVACHEVA, STOIMENOV e YAKIMOV, 2014). Essa abordagem não apenas potencializa a resposta dinâmica do sistema, mas também abre portas para melhorias significativas na eficiência operacional e grau de liberdade, pois o atuador passa a poder se deslocar para qualquer ponto em seu curso e não mais apenas as 5 posições fixas pré-estabelecidas em suas configurações de fábrica.

Ao longo deste trabalho, será abordada a integração entre sensor e controlador, o estudo comportamental do atuador antes e após a implementação do novo sistema de controle, a configuração e programação adequada do *High-Speed Counter* (HSC), explorando suas capacidades e limitações, e as dificuldades identificadas. Além disso, serão investigados casos de estudo práticos, nos quais o aprimoramento do mecanismo de controle de posição resulta em ganhos palpáveis de desempenho.

Este TCC visa contribuir no estudo e instrução das teorias de instrumentação e controle, fornecendo uma nova ferramenta didática ao departamento, destacando a

importância de seus fundamentos na implementação de estratégias de controle. Ao final deste estudo, espera-se não apenas oferecer uma visão abrangente do potencial do trabalho com sensores de posição e *High-Speed Counter* em um contexto de controle de posição de um atuador elétrico, mas também motivar a exploração contínua de aprimoramentos do sistema de controle e de soluções inovadoras que impulsionem a eficiência do mesmo.

1.1 Objetivos

A seguir, serão apresentados os objetivos geral e específico deste trabalho.

1.1.1 Geral

Implementar um sistema de controle e supervisão, fazendo-se uso de um CLP *Micrologix 1100* e uma IHM *PainelView 800*, com o objetivo de aprimorar o mecanismo de controle de um atuador da linha E-MY2 fazendo uso dos dados de posição provenientes de um *encoder* absoluto acoplado ao eixo do motor de passo.

1.1.2 Específicos

Em caráter específico, os objetivos são:

- Compreender o funcionamento do atuador elétrico linear da série E-MY2;
- Realizar estudo para controle do atuador com auxílio do controlador lógico programável (CLP) *Micrologix 1100*;
- Projetar um circuito para condicionamento de sinal do *encoder*, possibilitando o uso do mesmo em conjunto do CLP;
- Realizar estudo e compreender a função HSC do *Micrologix 1100*;
- Desenvolver o código para leitura do *encoder* e controle de posição do atuador linear;

- Validar a utilização de um fotoacoplador para o controle de posição do E-MY2B fazendo-se uso do *Micrologix* 1100 como meio de controle.

1.2 Organização do Trabalho

O texto será separado em quatro tópicos principais com seus respectivos subtópicos. Esses tópicos são, os objetivos para o desenvolvimento deste trabalho, a fundamentação teórica, o desenvolvimento do trabalho e por último as conclusões e propostas de continuidade do projeto deste TCC.

No primeiro tópico foi apresentado as motivações e objetivos que levaram a desenvolver este trabalho. No segundo tópico, fundamentação teórica, são apresentados os conceitos básicos necessário para que seja compreendida a proposta e execução do trabalho proposto. O terceiro tópico aborda todo o desenvolvimento do trabalho. No quarto e último tópico encontram-se a conclusão e propostas para a continuidade do trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo expõe a fundamentação teórica usada para a construção do presente trabalho, introduzindo conhecimentos sobre atuadores, sensores de posição, optoacopladores e controladores lógicos programáveis necessários para a compreensão do que será desenvolvido.

2.1 Atuadores

Atualmente, observa-se que a indústria moderna tem demandado um alto grau de automação, nos mais diversos tipos de aplicações e serviços, desde o controle de válvulas ao transporte e controle da posição de cargas. O objetivo disso, é dominar e automatizar os processos de produção, os quais muitas vezes envolvem trabalhos que exigem precisão, velocidade e força, de modo a substituir ou realocar o trabalho humano para funções mais adequadas. Assim, alcança-se um maior nível de economia e eficiência da produção. Posto isso, o atuador torna-se um componente vital para que esse processo de automação se torne possível.

De modo conciso, um atuador pode ser descrito como um equipamento que converte energia em movimento. Para a automação, trata-se de um dispositivo que recebe sinais provenientes de um controlador e atua sobre um sistema, modificando uma variável controlada. Com relação aos tipos, o atuador pode ser classificado de acordo com a forma de movimento induzido pelo mesmo, podendo ser linear ou rotativo. Além disso, outra maneira de classificá-lo diz respeito a origem da energia que é convertida em movimento, podendo ser esta hidráulica, pneumática ou elétrica (ANDERSON, 1998).

2.1.1 Atuadores elétricos

Um atuador elétrico é um dispositivo mecânico utilizado para gerar movimento linear ou rotativo por meio de energia elétrica. Ele converte a energia elétrica em movimento mecânico, permitindo controlar a posição ou deslocamento de um objeto de forma precisa e eficiente (NORGREN, 2022).

Os atuadores elétricos representam uma escolha fundamental em diversas aplicações industriais, destacando-se pela sua capacidade de oferecer alta precisão, controle avançado e baixo nível de ruído. Composto por um motor elétrico acoplado a um mecanismo de transmissão ou conversão, esses dispositivos convertem o movimento rotativo do motor em movimento linear ou rotativo, conforme necessário para a aplicação específica. Controlados por sinais elétricos, os atuadores elétricos proporcionam uma ampla variedade de configurações e possibilidades de controle, tornando-os versáteis e adaptáveis a diversas situações.

Uma das principais vantagens dos atuadores elétricos é a sua precisão e controle fino do movimento, permitindo ajustes precisos de posição e velocidade. Além disso, eles são mais silenciosos e limpos em comparação com atuadores pneumáticos ou hidráulicos, não exigindo o uso de fluidos para o seu funcionamento.

2.1.2 Atuadores lineares

Um atuador linear é um dispositivo mecânico projetado para gerar movimento linear em uma direção específica, ou seja, movimento ao longo de uma linha reta. Ele converte energia em movimento mecânico linear, permitindo controlar a posição de um objeto, deslocá-lo de um ponto para outro ou aplicar força em uma direção linear (MOROZOVA, 2020).

As funções básicas de um atuador linear incluem deslocamento, que é mover objetos ao longo de uma trajetória linear definida; posicionamento, que controla e mantém objetos em uma posição específica com alta precisão; força, aplicando uma força linear em uma determinada direção, sendo útil para levantar, empurrar ou puxar objetos; e controle de movimento, permitindo regular a velocidade e aceleração do movimento linear conforme necessário.

Esses atuadores têm uma ampla variedade de aplicações em diversos setores industriais e domésticos. São utilizados na automação industrial, movimentando peças e produtos em diferentes etapas de processos de produção; na robótica industrial, fornecendo movimento preciso aos braços robóticos e outras partes móveis; em equipamentos médicos, ajustando a posição de pacientes ou componentes; na indústria automotiva, em sistemas de controle de portas, janelas e assentos; em

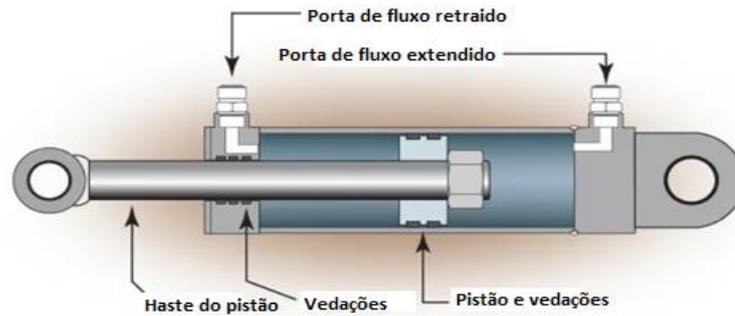
sistemas de transporte e logística, como esteiras transportadoras e portões automáticos; no setor aeroespacial, em sistemas de controle de voo e superfícies de aeronaves; e também em eletrônicos e automação residencial, como em portas automáticas, janelas inteligentes e sistemas de abertura e fechamento remotos.

A escolha do atuador linear apropriado para uma aplicação específica depende de fatores como a carga que será movida, a distância do deslocamento, a velocidade necessária, a precisão requerida e o ambiente em que o atuador será utilizado. Cada aplicação possui demandas e características próprias, o que requer diferentes tipos de atuadores lineares para atender a essas necessidades específicas.

2.1.2.1 *Atuadores com haste*

Ainda dentro da categoria dos atuadores lineares, é possível subdividi-los em duas categorias. O termo atuador com haste (*rod-style actuator*) e atuador sem haste (*rodless actuator*) referem-se a dois tipos distintos de atuadores lineares utilizados em sistemas automatizados. Ambos são dispositivos capazes de gerar movimento linear em uma direção específica, mas apresentam diferenças significativas em sua estrutura e modo de funcionamento (JHFOSTER, 2022). O atuador com haste é um tipo comum de atuador linear que possui uma haste que se estende e retrai em linha reta. Ele é composto por um cilindro externo e um pistão interno que se move ao longo de uma trajetória linear. A haste está conectada ao pistão e se estende a partir dele quando o pistão é acionado pelo fluido hidráulico ou ar comprimido, dependendo do tipo de atuador (hidráulico ou pneumático). A Figura 1 ilustra um exemplo desse tipo de atuador.

Figura 1 - Atuador com haste pneumático.



Fonte: (CPI).

Na figura é possível observar um atuador que possui uma haste que se estende e retrai conforme se alimenta as entradas do cilindro. Faz-se uso de uma válvula solenoide para alternar a alimentação das portas.

Esse tipo de atuador é amplamente utilizado em sistemas industriais para mover cargas lineares pesadas e realizar tarefas que exigem alta força e deslocamento. É comum encontrar atuadores com haste em prensas industriais, máquinas de moldagem, prensas de estampagem e outros equipamentos que requerem movimento linear robusto e potente.

2.1.2.2 Atuadores sem haste

O atuador sem haste, é um tipo de atuador linear que não possui uma haste externa que se estende. Em vez disso, ele utiliza um design interno especial para realizar o movimento linear. Em geral, esse atuador emprega um mecanismo de acionamento interno, como um sistema de roldanas e cabos, ou uma combinação de trilhos e rolamentos, para mover a carga linearmente (JHFOSTER, 2022).

A principal vantagem deste atuador é a economia de espaço, pois não requer a projeção de uma haste externa. Isso permite que ele seja aplicado em ambientes onde o espaço é limitado ou quando é necessário evitar a interferência com outras partes do sistema. Eles são frequentemente encontrados em aplicações de automação industrial, como em robôs cartesianos, sistemas de manipulação e linhas de produção automatizadas.

A Figura 2 mostra um exemplo de atuador sem haste, onde o movimento da carga é realizado através de uma rosca interna e trilhos. Dependendo do sentido de giro da rosca, a carga se desloca em um sentido ou em outro.

Figura 2 - Atuador sem haste de rosca.



Fonte: (FABER, 2021).

Em resumo, a principal diferença entre os atuadores com e sem haste está na presença ou ausência de uma haste externa. O primeiro possui uma haste que se estende para realizar o movimento linear, enquanto o segundo utiliza mecanismos internos para obter o deslocamento linear, economizando espaço e permitindo maior versatilidade em certas aplicações. A escolha entre esses tipos de atuadores dependerá das especificações e requisitos da aplicação em questão.

2.2 Sensores

Têm-se como definição de sensor, o instrumento sensível a estímulos e sinais externos, o qual transmite um impulso ou sinal mensurável e que por sua vez é associado a uma grandeza que se deseja obter informação (temperatura, posição, velocidade, etc.). Esses estímulos, podem ser luminosos, térmicos, cinéticos, elétricos, entre outros (AGUIRRE, 2013).

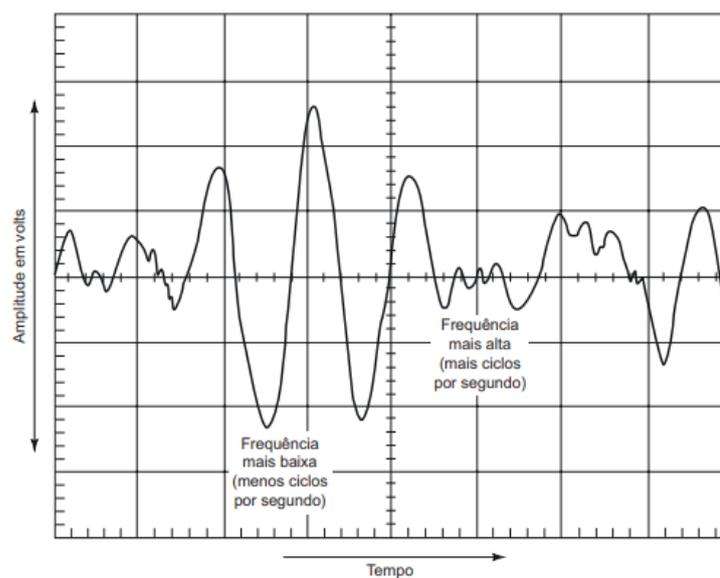
Na área de controle e automação, o sensor é peça fundamental. É através das informações provenientes do mesmo para o controlador que é possível a implementação de um sistema em malha fechada (DORF e BISHOP, 2001).

De maneira simples, é possível separar os sensores em duas categorias a depender dos valores que o mesmo pode assumir.

2.2.1 Sensores analógicos

Caso o sinal de saída gerado consiga assumir qualquer valor contínuo em um dado intervalo de tempo qualquer, o dispositivo é classificado como analógico (TOCCI, 2011). A Figura 3 mostra um exemplo de sinal analógico, onde pode-se observar a leitura de um sinal de tensão variando no tempo.

Figura 3 - Sinal analógico.



Fonte: (TOCCI, 2011).

Um sinal analógico é um tipo de sinal que representa uma grandeza física de forma contínua, ou seja, seu valor varia de maneira suave e gradual ao longo do tempo ou espaço. Esse tipo de sinal é caracterizado por transmitir informações através de uma gama infinita de valores, não se restringindo a níveis discretos como ocorre com os sinais digitais. Em um sinal analógico, as variações de amplitude, frequência ou fase carregam a informação sobre a grandeza que está sendo medida, como temperatura, pressão, tensão elétrica, entre outras.

A representação de um sinal analógico geralmente ocorre por meio de ondas contínuas, como as ondas senoidais, onde a amplitude e a frequência variam proporcionalmente à grandeza física que está sendo monitorada. Essa característica contínua permite que os sinais analógicos sejam capturados com alta precisão e

fidelidade, sendo especialmente úteis em aplicações que requerem medições detalhadas e contínuas.

A transmissão de sinais analógicos é comum em diversas áreas, desde a comunicação de dados e áudio até o controle de processos industriais e instrumentação científica. No entanto, é importante notar que, com o avanço da tecnologia digital, muitos sistemas estão migrando para o uso de sinais digitais, que oferecem vantagens de imunidade a ruídos e possibilidades de processamento mais sofisticadas. Na maioria dos casos, os sensores analógicos requerem uma fonte de alimentação externa e algum tipo de amplificação adicional ou filtragem do sinal, a fim de produzir um sinal elétrico adequado, que possa ser medido ou utilizado. Apesar disso, os sinais analógicos ainda têm um papel relevante em diversas aplicações, mantendo-se como uma forma confiável e precisa de transmitir informações sobre variáveis físicas.

2.2.2 Sensores digitais

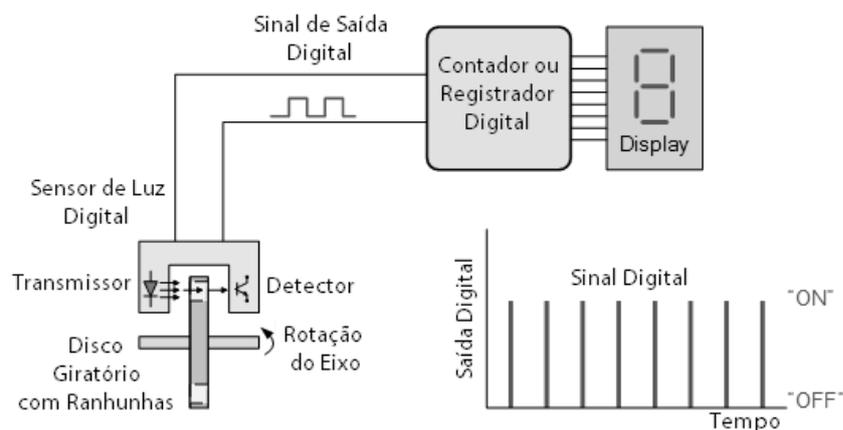
Sensores digitais são dispositivos que só podem assumir um sinal de saída binário, sendo esses sinais interpretados como 0 ou 1 (THOMAZINI e ALBUQUERQUE, dez, 2020).

Um sinal digital é um tipo de sinal que representa informações em forma de valores discretos ou dígitos binários. Diferentemente dos sinais analógicos, os sinais digitais não variam continuamente, mas sim em níveis distintos. Cada dígito binário no sinal digital, também conhecido como bit, carrega uma informação específica, como um estado ligado/desligado ou um valor numérico. Além disso, um sinal digital pode ser transmitido como um único “bit”, para o caso de transmissão em série, ou combinando os bits para gerar uma única saída (byte), comumente denominado de transmissão em paralelo.

A representação digital é amplamente utilizada em sistemas de comunicação, computação e eletrônica, devido à sua facilidade de processamento e maior imunidade a ruídos e interferências, como já mencionado. Além disso, a natureza discreta dos sinais digitais permite que sejam facilmente armazenados, transmitidos e processados por meio de dispositivos eletrônicos, tornando-os fundamentais para a

era digital em que vivemos. O processamento digital de sinais possibilita uma ampla gama de aplicações, desde a codificação e decodificação de informações até o controle preciso de sistemas automatizados, garantindo maior eficiência e confiabilidade em muitos aspectos de nossa vida cotidiana. Na Figura 4 pode-se observar um exemplo de aplicação onde os pulsos emitidos pelo sensor de luz são registrados e exibidos em um display.

Figura 4 - Exemplo de aplicação para sinal digital.



Fonte: (SOARES, 2014).

As aplicações de sinais digitais são diversas e encontram-se presentes em várias áreas da tecnologia e da vida cotidiana. As tecnologias de comunicação modernas, como a internet, telefonia celular e redes de computadores, são baseadas em sinais digitais. O uso de dígitos binários permite a rápida transmissão e processamento de dados, tornando possível o compartilhamento de informações em todo o mundo. Além disso, dispositivos eletrônicos de consumo utilizam sinais digitais para processar e exibir informações. Esses sinais são convertidos em som, imagem e outros dados visíveis e audíveis para os usuários. Além disso, os sinais digitais também são amplamente empregados no controle de sistemas automatizados, como em automação industrial, robótica e automóveis.

2.2.2.1 Encoder

Na automação industrial, os *encoders* são usados para medir o movimento de máquinas, determinar a posição de peças e assegurar a precisão do controle de movimento, sendo um exemplo clássico o uso desse sensor para medir e controlar a posição e a velocidade de um eixo em uma máquina CNC.

Aprofundando-se mais no estudo do dispositivo, um *encoder*, também conhecido como codificador, é um dispositivo utilizado para medir a posição, velocidade e movimento de eixos ou objetos rotativos em sistemas de automação e controle industrial. Ele converte o movimento mecânico em sinais elétricos ou digitais que podem ser interpretados por controladores, CLP's ou outros dispositivos eletrônicos.

O funcionamento básico de um *encoder* é baseado na geração de pulsos elétricos ou digitais à medida que o eixo ou objeto se movimenta (THOMAZINI e ALBUQUERQUE, dez, 2020). Cada pulso representa um incremento de movimento, e a frequência desses pulsos está diretamente relacionada à velocidade de rotação. Quando combinado com informações sobre a resolução do sensor, é possível calcular a posição angular ou linear do eixo com alta precisão.

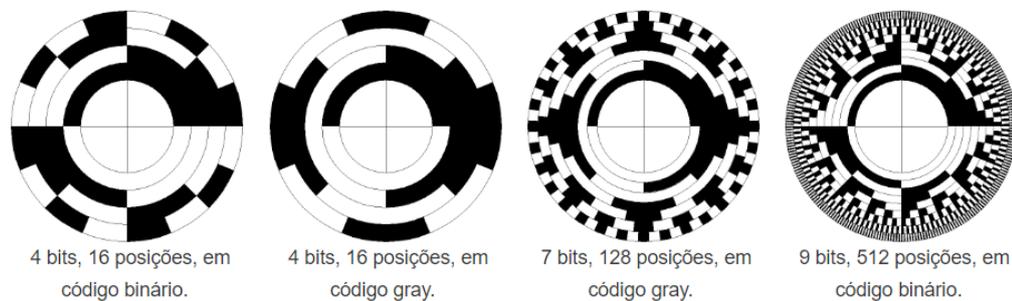
Os *encoders* podem ser classificados de diversas maneiras. Uma das maneiras é a classificação a partir do tipo de movimento realizado pelo mesmo, podendo ser rotativo ou linear.

Outra forma leva em consideração o meio empregado no sensor para detectar o movimento e gerar os pulsos elétricos, podendo ser indutivo, capacitivo, óptico, etc. Os sensores indutivos geram sinais através da variação de sua indutância, geralmente empregados quando se trabalha com equipamentos metálicos. Os capacitivos, analogamente aos indutivos, operam através da variação de sua capacitância e são empregados quando se trabalha com equipamentos não-metálicos. Já os ópticos, operam por meio padrões ópticos, como faixas ou discos codificados, em conjunto com sensores fotodetectores para medir o movimento e gerar sinais elétricos proporcionais à posição.

Além disso, os *encoders* rotativos ainda podem ser subdivididos em duas categorias principais, o absoluto e o incremental (THOMAZINI e ALBUQUERQUE, dez, 2020). O absoluto fornece uma saída única para cada posição em sua faixa

completa de rotação, permitindo que a posição seja conhecida mesmo quando o dispositivo é desligado e ligado novamente, não perdendo sua referência. Alguns exemplos de disco para um *encoder* absoluto podem ser observados na Figura 5.

Figura 5 - Discos de *encoders* absolutos.

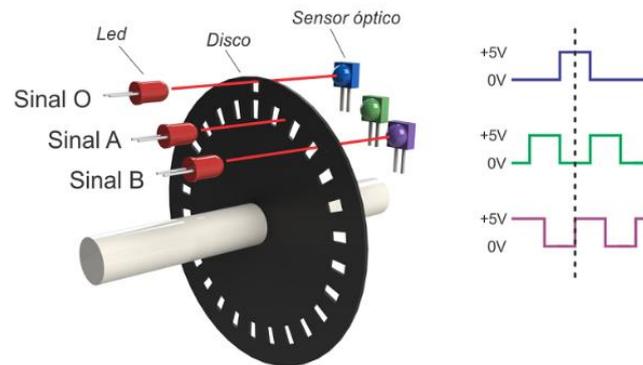


Fonte: (ALMEIDA, 2018)

Por outro lado, o *encoder* incremental gera pulsos em resposta ao movimento e a posição é determinada contando os pulsos desde um ponto de referência inicial. Caso o dispositivo seja desligado, o ponto de referência inicial passa a ser o atual ponto em que se encontra o sensor. Além disso, este sensor pode apresentar outra característica que concede a ele outra nomenclatura: o *encoder* de quadratura.

O *encoder* de quadratura, normalmente, possui dois canais de saída (canal A e canal B) com sinais defasados em 90 graus um do outro. Essa defasagem pode ser obtida de duas formas: devido à uma diferença angular entre os sensores ópticos dos canais, denominado quadratura em série, ou o próprio disco do sensor possuir dois cursos (um para cada canal), onde as janelas dos cursos se encontram defasadas em 90 graus, denominado quadratura em paralelo (RAUTEON, 2021). A Figura 6 expõe um exemplo de sensor com quadratura em série.

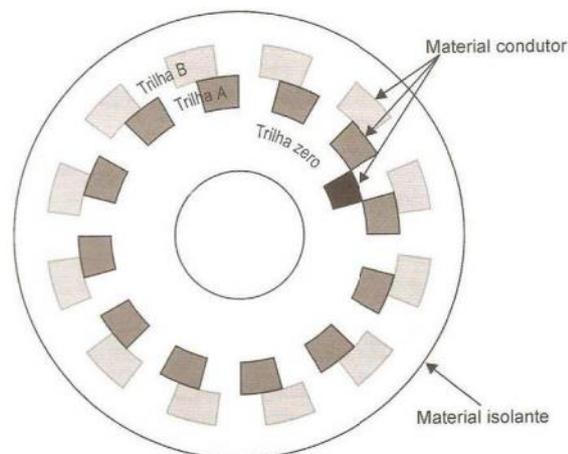
Figura 6 - Encoder de quadratura com sensores defasados.



Fonte: (ALMEIDA, 2018)

Já a Figura 7 traz um exemplo de quadratura em paralelo.

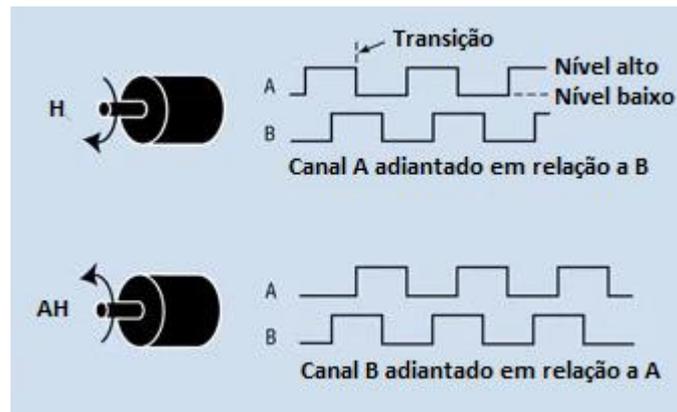
Figura 7 - Encoder de quadratura com janelas defasadas.



Fonte: (THOMAZINI e ALBUQUERQUE, dez, 2020).

Essa defasagem entre os sinais permite que o sistema obtenha informações não apenas sobre a contagem de pulsos, mas também sobre a direção e o sentido do movimento do eixo. Isso pode ser observado na Figura 8, onde é possível observar que para o eixo do atuador se movendo no sentido horário o sinal A encontra-se adiantado em relação ao B, já para o caso anti-horário é o sinal B que se encontra adiantado. Essa funcionalidade é de extrema relevância para a análise dos dados e o controle preciso dos sistemas em que o sensor está sendo empregado.

Figura 8 - Defasagem dos sinais para os dois sentidos de movimento.



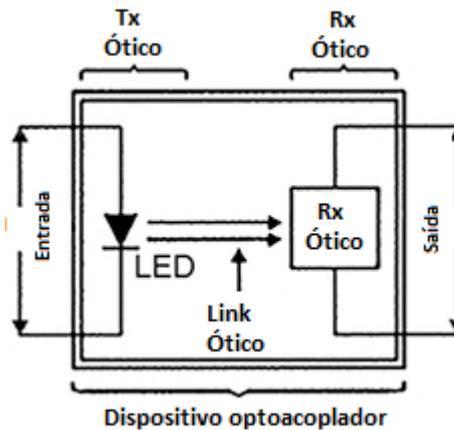
Fonte: (VARGAS)

Alguns ainda possuem um terceiro canal que emite um sinal indicativo de que uma revolução foi completada. Esse canal, que pode ser visto na Figura 6 como sinal “O”, é bastante como um sinal de referência para atuadores que, para completar o seu curso, necessitam de mais de uma revolução do encoder.

2.3 Acoplador óptico

O termo optoeletrônica ganhou mais força na década de 70 como um termo usado para descrever a área da eletrônica mais voltada para a aplicação prática de dispositivos ópticos. Esses dispositivos, de maneira sucinta, tem a função de atuar dentro de uma faixa do espectro eletromagnético (MARSTON, 1999). Um desses dispositivos que possui grande aplicação na atualidade é o acoplador óptico, muitas vezes referido como optoacoplador ou fotoacoplador, e seu circuito fundamental está representado na Figura 9.

Figura 9 - Forma básica do acoplador óptico.



Fonte: (MARSTON, 1999).

Ele é usado para isolar eletricamente circuitos, protegendo-os contra interferências elétricas, ruídos e tensões excessivas, além de possibilitar a transferência de sinais entre sistemas com diferentes níveis de tensão ou impedância.

O funcionamento do acoplador óptico é baseado na interação entre um emissor (LED - *Light Emitting Diode*) e um receptor (fototransistor ou fotodiodo) localizados em compartimentos distintos dentro do dispositivo. Quando um sinal elétrico é aplicado à entrada do LED, ele emite luz infravermelha, que é captada pelo fototransistor ou fotodiodo presente na saída. Essa luz atua como uma ponte entre os dois circuitos, permitindo que o sinal seja transmitido de forma isolada e sem contato elétrico direto.

As principais aplicações do optoacoplador incluem a proteção de circuitos, onde é utilizado para isolar eletricamente circuitos sensíveis ou de baixa tensão de sinais de alta tensão, prevenindo danos e interferências elétricas. No controle de relés e chaves, o optoacoplador aciona esses componentes de potência, permitindo que um circuito de controle seja isolado de um circuito de alta potência. Também é usado no acionamento de dispositivos de potência, como motores e lâmpadas, proporcionando isolamento seguro entre o circuito de controle e o circuito de potência.

Outras aplicações incluem o acionamento de tiristores e TRIAC's, a proteção contra surtos e ruídos em sistemas sujeitos a interferências eletromagnéticas, a detecção de sinais e sensores para interfaces com sensores diversos, como sensores de proximidade, sensores ópticos e sensores de temperatura. Além disso, é empregado em interfaces de comunicação entre diferentes dispositivos ou circuitos, adaptando níveis de tensão e garantindo a segurança da comunicação.

2.4 Controladores lógico programáveis

Dentre as grandes inovações da era moderna menciona-se os Controladores Programáveis (CPs), também conhecidos por Controladores Lógico Programáveis (CLPs), que surgem na década de 60 em resposta às demandas advindas da indústria automotiva. Os antigos painéis eletromecânicos empregados para o controle, apresentavam maiores dificuldades para modificação e regulagem da sua lógica de operação. Essa realidade, trazia prejuízos às montadoras, que passavam a despender de mais tempo e dinheiro a cada nova mudança efetuada na linha de produção (ZANCAN, 2011). Os controladores surgiram com uma proposta de facilitar o controle dos sistemas e substituir os relés eletromecânicos que apresentavam as seguintes desvantagens: mau contato, necessidade de instalação de inúmeros dispositivos, desgaste dos contatos, alto custo de reposição e manutenção, complexidade de alteração de sua sequência de operação e a necessidade de manutenção periódica.

Amplamente ligados ao ramo da automação industrial, os CLPs basicamente, são computadores responsáveis pela execução de funções específicas como, os comandos elétricos, através de programas criados para tal fim. Esses controladores são capazes de comandar variados processos industriais, desde os mais simples aos mais complexos, automatizar máquinas ou até mesmo uma linha inteira de montagem.

Os CLPs são dispositivos digitais que permitem controlar o processo fabril graças a uma memória programável que reúne as instruções que devem ser repassadas para as máquinas responsáveis pela produção industrial. À medida que o CLP foi incorporado nas indústrias, evoluiu e adquiriu novas funções e é hoje capaz de executar sequenciamento, temporização, contagem, energização/desenergização e manipulação de dados, regulação PID, lógica fuzzy, entre outras funções. Os CLPs podem ser programados por meio de computadores, são adequados para os ambientes industriais – muitas vezes inóspitos – e possuem linguagem amigável (GOEKING, 2010).

Por se tratar de um computador industrial em que hardware e software foram especialmente projetados e adaptados para o ambiente das indústrias e das técnicas elétricas (STENERSON, 2003), é válido destacar que a vantagem trazida pelos CLP's foi justamente a possibilidade de se estabelecer a reprogramação, permitindo a transferência das modificações de hardware em modificações de software (MARTINS, 2012), de forma compatível com as aplicações industriais.

Conforme é possível identificar, o CLP possui uma ampla versatilidade de programação e fácil manuseio, o que viabiliza o aprimoramento contínuo dos procedimentos. Pois o mesmo permite mudanças na automação dos processos de forma ágil, flexível e adaptável às diferentes circunstâncias do ambiente. Por exemplo, em funções simplificadas podem ser empregados CLP's de menor capacidade e custo, executando comandos mais simples. Já para as atividades com maior nível de complexidade, se torna adequado o uso de CLP's mais aprimorados, efetuando controles mais complexos.

2.4.1 Micrologix 1100

O *Micrologix 1100* é um CP da família *Micrologix*, fabricado pela *Rockwell Automation*. Projetado para aplicações de automação industrial em máquinas e sistemas, ele oferece um equilíbrio entre recursos, desempenho e usabilidade.

Este CLP possui várias características que o tornam uma solução popular para controle de automação. Possui uma CPU integrada que executa o programa de controle e gerencia operações do sistema, permitindo a execução de algoritmos e lógica de controle personalizada. O controlador oferece uma variedade de entradas e saídas digitais. As entradas digitais permitem a conexão de sensores e dispositivos de entrada, enquanto as saídas digitais possibilitam o controle de atuadores e dispositivos de saída, como solenoides, sirenes e LED's. Isso permite a interação com o ambiente e a realização de ações com base na lógica de controle.

O catálogo do dispositivo inclui quatro modelos: 1763-L16AWA, 1763-L16BWA, 1763-L16BBB e 1763-L16DWD. Cada modelo tem variações no número de entradas e saídas, portas de comunicação e suporte a recursos adicionais. O modelo 1763-L16BWA é usado neste TCC e possui 10 entradas digitais de 24V (sendo 4 rápidas), 2 entradas analógicas de 10V e 6 saídas digitais isoladas. A comunicação é via Ethernet, com uma porta serial adicional (ALLEN BRADLEY, 2009).

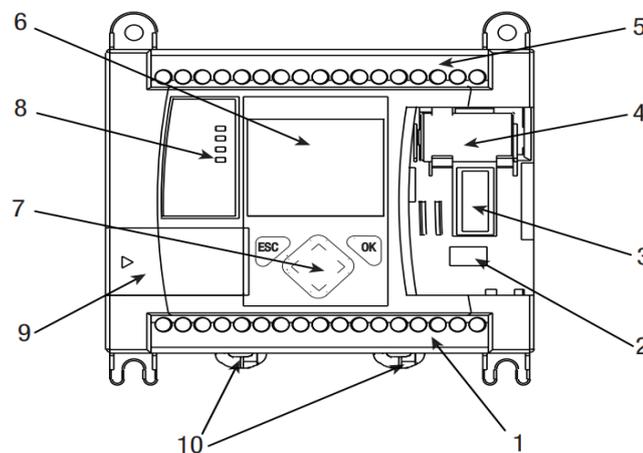
Além disso, o *Micrologix 1100* oferece a flexibilidade de expansão através de módulos adicionais. Esses módulos podem incluir entradas e saídas digitais extras, entradas e saídas analógicas, recursos de comunicação (como módulos Ethernet/IP) e até mesmo módulos especializados, como controladores de movimento. Essa

expansibilidade permite adaptar o controlador às necessidades específicas de cada aplicação, oferecendo ainda mais flexibilidade e funcionalidades.

Essas variações e opções de expansão permitem que o *Micrologix 1100* seja adaptado a uma ampla variedade de aplicações industriais, desde o controle de máquinas até sistemas de produção mais complexos. A escolha do modelo apropriado e a adição dos módulos de expansão certos dependem das especificações da aplicação e das funcionalidades desejadas.

A Figura 10 ilustra a visão frontal do hardware do controlador e suas características.

Figura 10 - Visão frontal do *Micrologix 1100*.



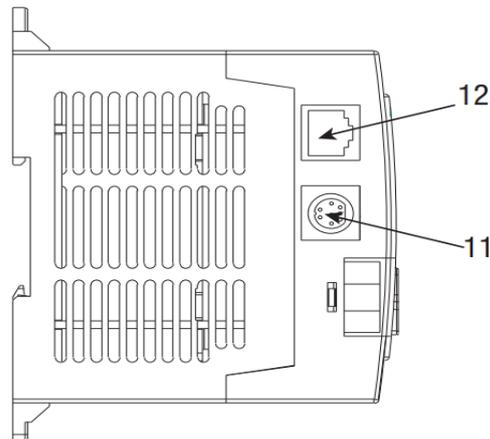
Fonte: (ALLEN BRADLEY, 2009).

Pode-se observar que o mesmo possui um display, indicado pelo número 6, normalmente com uma tela alfanumérica, que é usado para mostrar informações importantes do CLP, como mensagens de status, valores de variáveis, diagnósticos, alarmes, entre outros. Ele permite que os operadores e técnicos visualizem dados relevantes sobre o funcionamento do sistema controlado pelo equipamento.

Junto ao display, também se encontram os botões, utilizados para realizar a interação com o PLC. Eles podem variar em quantidade e funcionalidades, mas, neste caso, estão presentes os de navegação (utilizado para percorrer os menus do display), “OK” (botão de confirmação) e o “ESC” (oposto ao de confirmação). Os mesmos são representados pelo número 7 na Figura 10.

As entradas, localizadas na parte superior do controlador são representadas pelo número 5, enquanto as saídas, na região inferior são indicadas pelo número 1. Na Figura 11, é possível observar a vista lateral esquerda do controlador.

Figura 11 - Visão lateral do *Micrologix 1100*.



Fonte: (ALLEN BRADLEY, 2009).

Pode-se constatar as duas entradas de comunicação do dispositivo, a de comunicação via Ethernet/ip (número 12) e a serial (número 11). Os demais números que não foram mencionados estão descritos na Tabela 1 a seguir, retirada do manual do equipamento.

Tabela 1 - Tabela de características do *Micrologix 1100*.

RECURSO	DESCRIÇÃO	RECURSO	DESCRIÇÃO
1	Bloco terminal de saída	7	Teclado do LCD
2	Conector de bateria	8	LED's indicadores de status
3	Interface do conector de barramento para expansão de E/S	9	Módulo de memória
4	Bateria	10	Fixadores de trilho DIN
5	Bloco de terminal de entrada	11	Porta de comunicação RS-232/485
6	LCD	12	Porta Ethernet

Fonte: Adaptado de (ALLEN BRADLEY, 2009).

2.5 High-speed counter

A função *High-speed counter* (HSC) do *Micrologix 1100* é um recurso integrado que permite a contagem precisa de sinais de alta velocidade. O HSC é projetado para

capturar e contar pulsos rápidos, geralmente gerados por dispositivos como *encoders* ou sensores de alta frequência.

O HSC consiste em um conjunto de contadores rápidos de 32 bits. Esses contadores podem ser configurados para operar em diferentes modos de contagem, como contador ascendente, contador descendente, contador bidirecional e contador de alta velocidade, dependendo do equipamento disponível e da aplicação empregada a ele.

Para utilizar esta função, é necessário configurar as entradas específicas do controlador para reconhecer os pulsos a serem contados. O *Micrologix* 1100 possui entradas de alta velocidade dedicadas ao HSC, que são projetadas para lidar com pulsos rápidos de maneira eficiente, permitindo diminuir o período em que essas entradas realizam suas leituras.

Ao configurar o HSC, é possível definir os parâmetros de contagem, como a direção da contagem, a frequência de pulso máxima suportada e o modo de contagem desejado. Esses parâmetros podem ser ajustados para atender às necessidades da aplicação desejada.

Uma vez configurada, a função passa a realizar a contagem dos pulsos recebidos pelas entradas de alta velocidade. Ela executa a contagem dos pulsos com precisão e atualiza o valor do contador correspondente, atualizando o acumulador da função. Isso permite que o usuário acompanhe e monitore a quantidade de pulsos recebidos ao longo do tempo.

Além da contagem básica de pulsos, o HSC também pode ser configurado para gerar interrupções ou acionar saídas digitais em determinadas condições de contagem. Essa funcionalidade pode ser utilizada para executar ações específicas quando uma contagem atinge um valor pré-determinado.

A configuração e programação do HSC do *Micrologix* 1100 são realizadas por meio do software de programação *RSLogix* 500. O software fornece ferramentas específicas para configurar e utilizar o HSC, permitindo que o usuário defina os parâmetros de contagem, modo de operação, monitore o status e acesse os valores contados.

Figura 12 - Função HSC do RSLogix 500.

The screenshot shows the 'Function Files' window in RSLogix 500. The 'HSC' tab is selected, and a tree view on the left shows 'HSC:0' expanded. The main area displays a table with three columns: 'Address', 'Value', and 'Description'. The table lists various HSC parameters and their current values.

Address	Value	Description
HSC:0	{...}	
- PFN - Program File Number	3	
- ER - Error Code	0	
- UIX - User Interrupt Executing	0	
- UIE - User Interrupt Enable	0	
- UIL - User Interrupt Lost	0	
- UIP - User Interrupt Pending	0	
- FE - Function Enabled	0	
- AS - Auto Start	1	
- ED - Error Detected	0	
- CE - Counting Enabled	1	
- SP - Set Parameters	0	
- LPM - Low Preset Mask	1	
- HPM - High Preset Mask	1	
- UFM - Underflow Mask	1	
- OFM - Overflow Mask	1	
- LPI - Low Preset Interrupt	0	
- HPI - High Preset Interrupt	0	
- UFI - Underflow Interrupt	0	
- OFI - Overflow Interrupt	0	
- LPR - Low Preset Reached	0	
- HPR - High Preset Reached	0	
- DIR - Count Direction	0	
- UF - Underflow	0	
- OF - Overflow	0	
- MD - Mode Done	0	
- CD - Count Down	0	
- CU - Count Up	0	
- MOD - PLS file (bits 15-8) HSC Mode (bits 7-0)	6 (h)	
- ACC - Accumulator	0	
- HIP - High Preset	2147483647	
- LOP - Low Preset	-2147483648	
- OVF - Overflow	2147483647	
- UNF - Underflow	-2147483648	
- OMB - Output Mask Bits	0	
- HPD - High Preset Output	0	
- LPD - Low Preset Output	0	

Fonte: Próprio autor (2024).

Na Figura 12 é possível observar a estrutura da função no software. Verifica-se que é composta por 32 bits, como já mencionado, e que os mesmos podem ser configurados de acordo com a aplicação desejada, estabelecendo limites superiores e inferiores para contagem, interrupções, modo de contagem, tipo de *encoder*, além de outros parâmetros. Adicionalmente, é através das informações contidas em dois desses bits que se torna possível obter os dados de rotação e sentido de giro do equipamento.

2.6 RSLogix 500

O *RSLogix* é uma suíte de *software* (conjunto ou pacote de programas de software relacionados que compartilham uma interface de usuário comum, padrões de design e integração) que inclui várias versões, como *RSLogix 500*, *RSLogix 5000* e *Studio 5000* (uma evolução do *RSLogix 5000*). Cada versão é voltada para diferentes séries de controladores *Allen-Bradley* e oferece recursos específicos para essas plataformas. O *Studio 5000*, por exemplo, é uma solução de engenharia integrada que abrange controladores *Logix* e oferece maior flexibilidade de programação.

Uma das características proeminentes do *RSLogix* é a capacidade de trabalhar com lógicas em linguagem de programação *ladder*, texto estruturado (ST) e em bloco funcional. Ele oferece uma variedade de ferramentas e bibliotecas que agilizam o processo de programação e permitem a reutilização de código. Além disso, o software suporta simulações virtuais, permitindo a validação de programas antes da implementação física.

O *RSLogix* também é conhecido por sua interoperabilidade com outros softwares da família *Rockwell Automation*, como o *FactoryTalk*, que possibilita a integração de dados e a supervisão de sistemas. Além de programação, o software oferece recursos de diagnóstico, rastreamento de erros e monitoramento em tempo real.

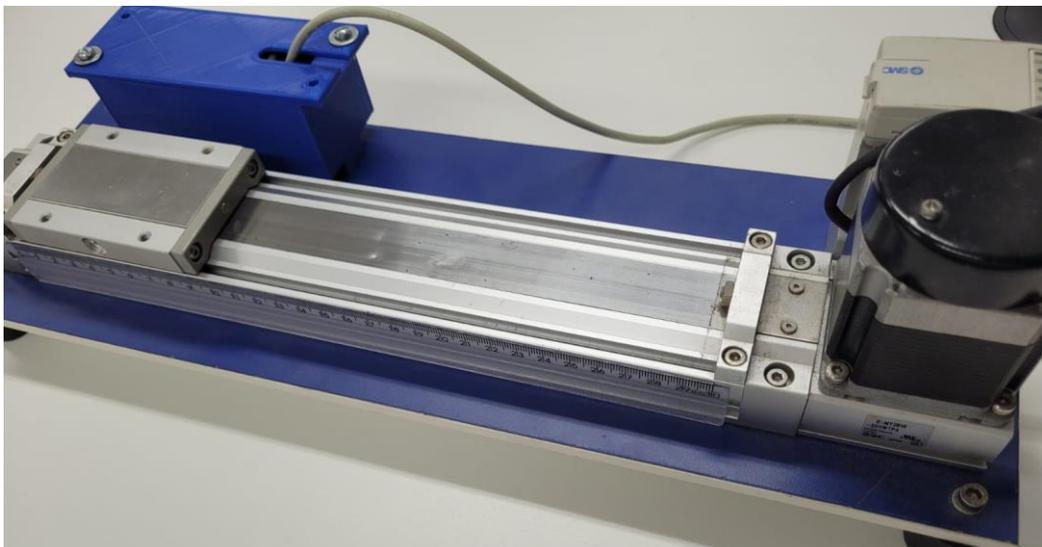
3 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

A metodologia deste estudo envolve a criação de um circuito eletrônico utilizando fotoacopladores para a leitura de um *encoder* e sua integração com um Controlador Lógico Programável, *Micrologix 1100*, com o objetivo de controlar a posição de um atuador elétrico da série E-MY2. A função HSC (*High-speed counter*) do CLP é essencial neste contexto, pois permite a contagem precisa de pulsos gerados pelo sensor, fornecendo informações sobre a posição do atuador.

3.1 Estudo do atuador E-MY2B

É importante ressaltar que o atuador E-MY2B presente no departamento de engenharia elétrica (DEE) é um modelo base de atuador linear sem haste com 5 pontos de parada (dois extremos e 3 intermediários), ou seja, como mencionado anteriormente, o eixo que gera seu movimento não se projeta para fora do corpo do equipamento. Dito isso, esse modelo tem deslocamento somente em um eixo e nos dois sentidos de movimento, podendo ser alterado a velocidade e aceleração com a que ele desloca sua carga para a direita e para a esquerda individualmente. O mesmo pode ser observado na Figura 13.

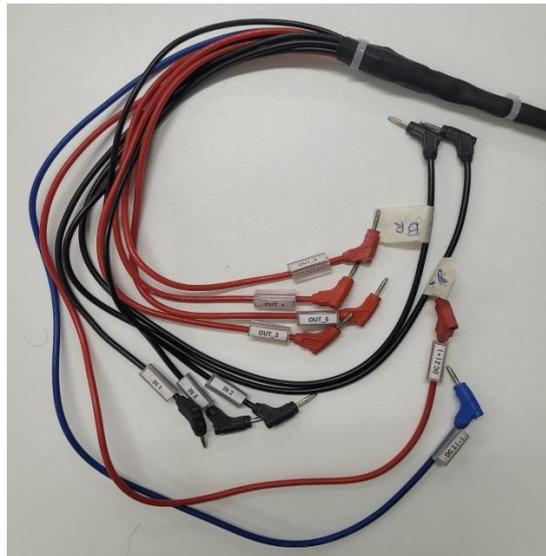
Figura 13 - Atuador E-MY2B.



Fonte: Próprio autor (2024).

O atuador, por padrão, possui um sistema de posicionamento onde, a depender da combinação de entradas energizadas, ele irá se deslocar para umas das cinco posições preestabelecidas, poderá realizar uma parada externa ou executar uma parada de emergência. Na Figura 14 é possível observar o cabo de entradas e saídas digitais e todas as suas vias.

Figura 14 - Cabo de entradas e saídas digitais.



Fonte: Próprio autor (2024).

As entradas digitais são somente 4 das 11 vias existentes no cabo de entradas e saídas. Das 7 remanescentes, 2 são vias de força e as outras 5 são referentes às saídas digitais do atuador.

Quanto as combinações de sinais para mover o atuador, as mesmas podem ser observadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Tabela verdade dos sinais de entrada digital do atuador.

Comando	Símbolo		
	IN1	IN2	IN3
Instrução de atuação para o lado do motor	0	-	-
Instrução de atuação para o fim de curso	-	0	-
Instrução de atuação para posição intermediária 1	-	-	0
Instrução de atuação para posição intermediária 2	0	-	0
Instrução de atuação para posição intermediária 3	-	0	0
Instrução de parada externa	0	0	-

Fonte: Adaptado de (SMC, 2008).

Nota-se que a entrada 4 não está descrita na Tabela 2, mas isso se deve ao fato dessa entrada ser dedicada à parada de emergência, devendo sempre estar energizada para o atuador poder operar normalmente.

As saídas nada mais são que sinais de *feedback* retornados pelo atuador para determinadas condições de operação. A Tabela 3 demonstra o significado de cada combinação de saídas energizadas existente de forma similar à tabela de entradas.

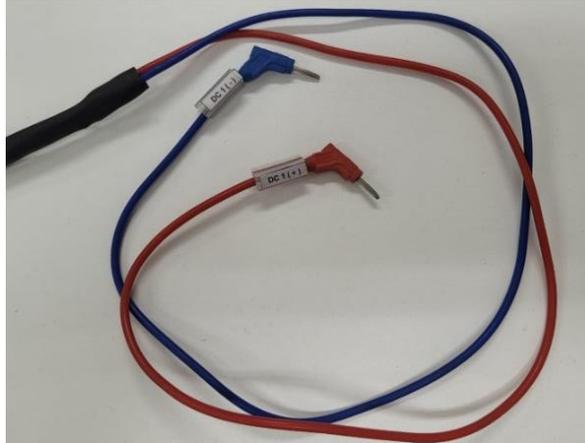
Tabela 3 - Tabela verdade dos sinais de saída digital do atuador.

Status do atuador	Símbolo			
	OUT1	OUT2	OUT3	OUT4
Deslocamento para fim-de-curso do motor completo	0	0	-	-
Deslocamento para fim-de-curso do motor completo	0	-	0	-
Deslocamento para posição intermediária 1 completa	0	-	-	0
Deslocamento para posição intermediária 2 completa	0	0	-	0
Deslocamento para posição intermediária 3 completa	0	-	0	0
Parada externa realizada	0	0	0	-

Fonte: Adaptado de (SMC, 2008).

O segundo cabo existente é o de força, nele podem ser encontradas duas vias que por padrão são as de 24 V (volts) e o GND, Figura 15.

Figura 15 - Cabo de alimentação geral.



Fonte: Próprio autor (2024).

Esse cabo é essencial para o funcionamento do atuador. Já o terceiro cabo está conectado entre o dispositivo de controle do atuador e o motor de passo, esse cabo é denominado na documentação do equipamento como cabo do motor e possui seis vias referentes à configuração das bobinas do motor.

Por último, e indispensável para este trabalho, tem-se o cabo do *encoder*, Figura 16. Este por sua vez possui 4 vias, duas dessas responsáveis pelos sinais das duas fases do sensor e as outras duas pela sua alimentação. É importante ressaltar, também, que o mesmo pode ser enquadrado nas categorias de rotativo incremental, pois encontra-se acoplado ao eixo do atuador e não guarda a posição atual caso o mesmo seja desenergizado, e na categoria de *encoder* de quadratura, já que existem dois canais cujo os sinais encontram-se defasados em 90 graus.

No entanto, não existe uma via direta entre atuador e CLP para os sinais do *encoder*, assim como existem com as entradas e saídas digitais, e para que o CLP seja capaz de interpretar os sinais emitidos pelo sensor corretamente fez-se necessário um componente de integração entre os equipamentos.

Figura 16 - Cabo do *encoder*.

Fonte: Próprio autor (2024).

Nesta primeira etapa, os primeiros testes de funcionamento do atuador foram realizados visando comprovar o funcionamento correto de todos os seus componentes. A validação de funcionamento inicial consistiu em alimentar as entradas digitais com 24 V de acordo com as combinações da Tabela 2 para se certificar que o atuador estaria se comportando de acordo com o que é previsto. Já os sinais de saída, só foi necessário conectá-las ao CLP para conseguir identificar quais memórias de entradas do dispositivo estavam sendo acionadas e, novamente com auxílio de uma das tabelas, validar se o sinal corresponde ao *feedback* corretamente.

3.2 Circuito de integração

O próximo passo consistiu na integração do sensor do atuador ao CLP. Os sinais gerados pelo sensor possuem uma amplitude de 5 V o que impossibilita a sua leitura, caso seja conectado diretamente, pelas entradas digitais do *MicroLogix* que requerem um sinal com 24 V.

Considerando a diferença de níveis de tensão e corrente entre as saídas do *encoder* (fase A e fase B) e o sinal de tensão que as entradas digitais do CLP conseguem interpretar a melhor alternativa para a integração se reflete na implementação de um circuito de chaveamento através de fotoacopladores.

Os fotoacopladores foram selecionados, pois são dispositivos que possuem uma entrada óptica e uma saída elétrica, permitindo o isolamento elétrico entre o circuito do sensor e o circuito do CLP, garantindo a integridade do circuito de controle do

atuador elétrico ao mesmo tempo que fornece a tensão necessária para a entrada digital do controlador lógico programável. Ao utilizar os fotoacopladores, é possível obter um sinal de saída com intensidade suficiente para ser interpretado, garantindo uma comunicação adequada e estável entre os componentes do sistema e viabilizando a continuidade do projeto.

Porém, o acoplador óptico não pode ser escolhido sem antes ser realizado um estudo de suas especificações, tendo em vista que é necessário garantir que ele seja compatível com a frequência de pulsos emitida pelo *encoder*. Caso isso não ocorra, os sinais que chegarão ao *Micrologix* não representarão corretamente os emitidos pelo sensor.

O dispositivo escolhido foi o PC 817 da Sharp, com as especificações que podem ser vistas na Tabela 4.

Tabela 4 - Especificações do fotoacoplador.

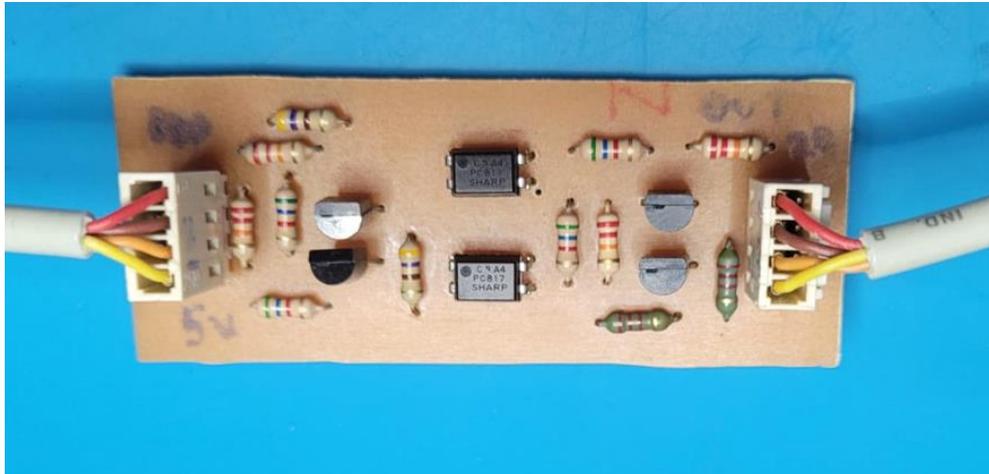
PARÂMETRO		SÍMBOLO	CONDIÇÕES	MIN	TIPO	MAX	UNID	
ENTRADA	Tensão direta	V_F	$I_F = 20 \text{ mA}$	-	1,2	1,4	V	
	Pico de tensão direta	V_{FM}	$I_{FM} = 0,5 \text{ A}$	-	-	3	V	
	Corrente inversa	I_R	$V_R = 4 \text{ V}$	-	-	10	μA	
	Capacitância terminal	C_t	$V = 0, f = 1 \text{ kHz}$	-	30	250	pF	
SAÍDA	Corrente escura do coletor	I_{CEO}	$V_{CE} = 20 \text{ V}$	-	-	10^{-7}	A	
CARACTERÍSTICAS DE TRANSFERÊNCIA	* 4 taxa de transferência da corrente		CTR	$I_F = 5 \text{ mA}, V_{CE} = 5 \text{ V}$	50	-	600	%
	Tensão de saturação coletor-emissor		$V_{CE(sat)}$	$I_F = 20 \text{ mA}, I_C = 1 \text{ mA}$	-	0,1	0,2	V
	Resistência de isolamento		R_{ISO}	DC 500 V, 40 a 60% RH	$5 \cdot 10^{10}$	10^{11}	-	Ω
	capacitância flutuante		C_f	$V = 0, f = 1 \text{ MHz}$	-	0,6	1	pF
	Frequência de corte		f_c	$V_{CE} = 5 \text{ V}, I_C = 2 \text{ mA}, R_L = 100 \Omega, -3 \text{ dB}$	-	80	-	kHz
	Tempo de resposta	Tempo de subida	t_r	$V_{CE} = 5 \text{ V}, I_C = 2 \text{ mA}, R_L = 100 \Omega$	-4		18	μs
Tempo de descida		t_f	-3			18	μs	

Fonte: Adaptado de (SHARP, 1995).

É possível observar que a corrente necessária para o funcionamento do dispositivo é de 20 mA (miliampère) e a frequência de operação é de 80 kHz (quilohertz). Por requisitar uma corrente muito baixa para operar, o circuito não interfere prejudicialmente na corrente necessária para o funcionamento adequado do atuador. Além disso, a frequência de operação máxima de 80 kHz é maior que a frequência dos pulsos emitidos, não prejudicando a transmissão dos sinais do encoder.

O circuito criado para amplificar o sinal gerado pelo encoder pode ser observado na Figura 17.

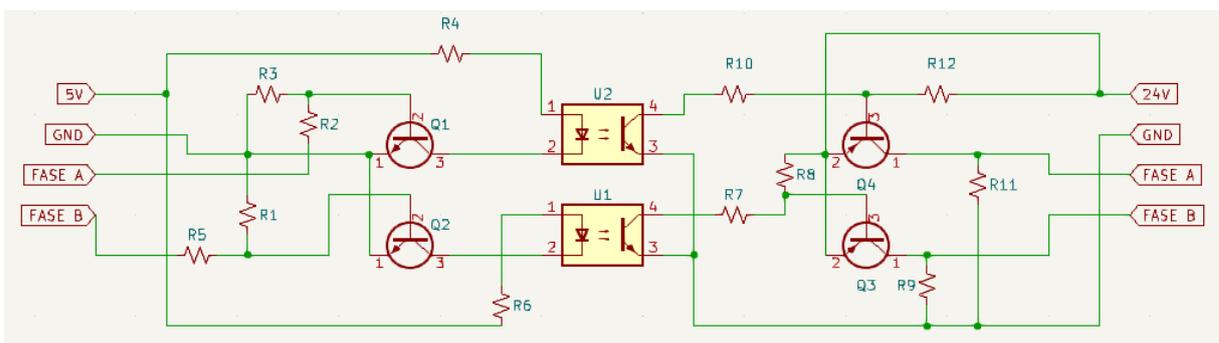
Figura 17 - Circuito de integração.



Fonte: Próprio autor (2024).

Já o seu diagrama elétrico pode ser observado na Figura 18 a seguir.

Figura 18 - Esquemático do circuito de integração.



Fonte: Próprio autor (2024).

3.2.1 Validação do circuito de integração isolado

Criado o circuito de integração, a próxima etapa consiste em sua validação. Com o auxílio de um gerador de sinal em conjunto com um osciloscópio e uma fonte de tensão externa, é possível testar a funcionalidade desse circuito. Com o gerador de sinais simula-se os pulsos emitidos pelo sensor através de um sinal de onda quadrada, com um *duty cicly* (ciclo de trabalho) de 50%, amplitude de 5 volts (V) entre picos e com uma frequência de 1 quilohertz (KHz), Figura 19.

Figura 19 - Osciloscópio SIGLENT usado no primeiro teste do circuito.



Fonte: Próprio autor (2024).

Como o circuito necessita de uma fonte de tensão externa para gerar o sinal de saída, utilizou-se uma fonte de tensão da ICEL para gerar o sinal adequado de 24 V. Tal escolha se deu em virtude da necessidade deste componente operar com um sinal de tensão dessa amplitude alimentando a entrada coletora do seu fototransistor de maneira a possibilitar a correta replicação do sinal da entrada do acoplador, proveniente do encoder, porém com a amplitude desejada. A fonte de tensão da ICEL demonstrou-se confiável e capaz de fornecer uma tensão estável, o que garantiu o funcionamento eficiente do CI, cumprindo sua função crucial no circuito desenvolvido para o projeto em questão. A mesma pode ser observada na Figura 20.

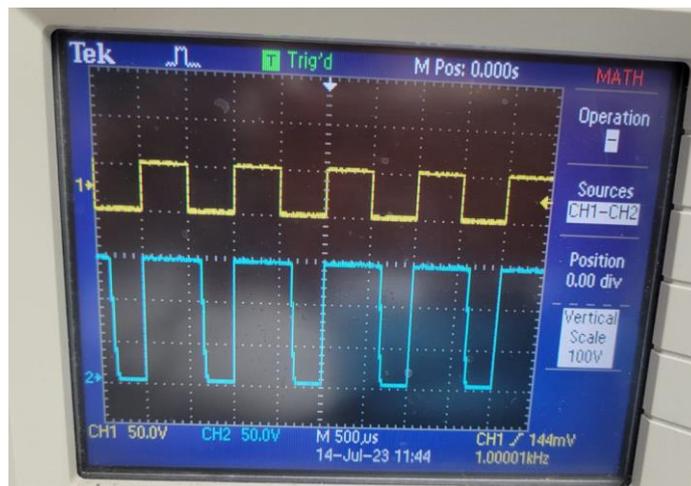
Figura 20 - Fonte ICEL usada para alimentar terminal de saída do circuito.



Fonte: Próprio autor (2024).

Com o apoio de um osciloscópio, analisou-se a relação entre o sinal de entrada do circuito e sua saída. O resultado disso pode ser observado na Figura 21.

Figura 21 - Formas de onda de entrada e saída do circuito para teste isolado.



Fonte: Próprio autor (2024).

O sinal amarelo e de menor amplitude representa o sinal da entrada do circuito de integração, já o azul e de maior amplitude corresponde à saída do circuito. Nota-se que os sinais de entrada e saída estão em fase, porém com amplitudes distintas. Além disso, percebe-se uma característica capacitiva na borda de descida do sinal de saída, porém como a leitura é realizada sobre a borda de subida, esse comportamento não interfere em nada no decorrer do estudo. Dessa forma, comprovando que o

circuito obteve sucesso em amplificar o sinal com a frequência desejada, atendendo aos requisitos básicos do projeto.

3.2.2 Validação do circuito de integração conectado ao atuador

Como próximo passo para a validação do circuito, realizado em laboratório do DEE, conecta-se o mesmo à saída do sensor com o objetivo de registrar os sinais gerados ao mover o atuador.

Liga-se o atuador à fonte de 24 V da bancada, não sendo mais necessário a fonte de 5V, pois o próprio circuito do atuador realiza a redução da tensão que é direcionada ao *encoder*. Em seguida, aplica-se um sinal de 24 V nas entradas IN1 e IN2 do atuador (alternadamente), fazendo o mesmo mover o seu bloco guiado para a direita e para a esquerda.

Para confirmar que os sinais emitidos pelo sensor estão chegando às entradas do circuito de integração, novamente com o auxílio do osciloscópio, verifica-se os dois terminais de entrada do circuito, conectando-se uma das pontes do equipamento à entrada referente à fase A e a outra à entrada referente à fase B. O resultado dessa avaliação pode ser observado na Figura 22 e Figura 23.

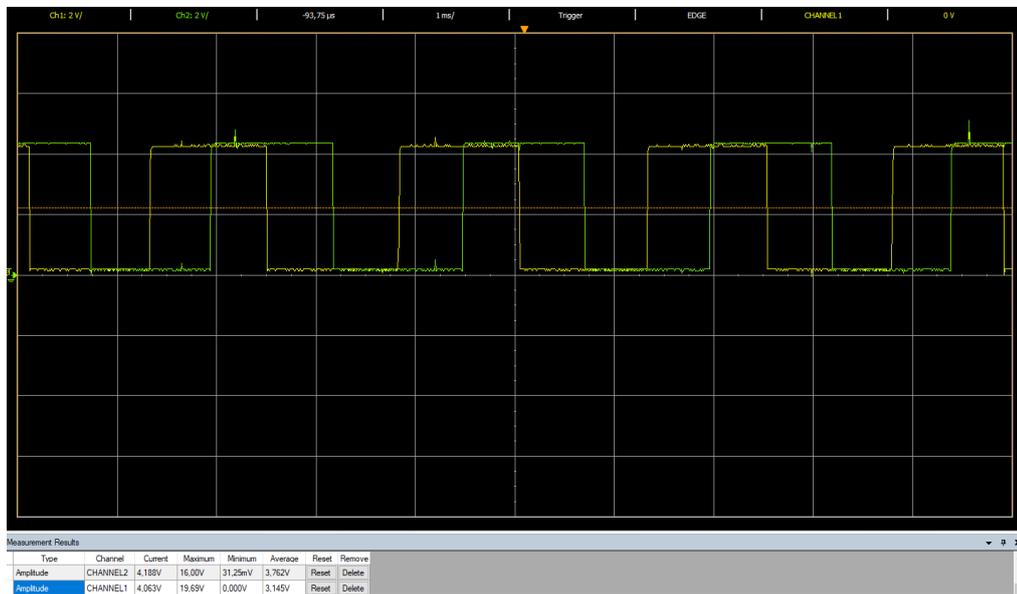
Figura 22 - Sinais de entrada do circuito para atuador se movendo para a direita.



Fonte: Próprio autor (2024).

Na Figura 22 pode-se observar o sinal do canal 2, em verde, adiantado em relação ao canal 1, em amarelo. Como o canal 1 está conectado ao canal A do sensor, esta configuração de sinais indica um movimento do atuador para a direita.

Figura 23 - Sinais de entrada do circuito para atuador se movendo para a esquerda.

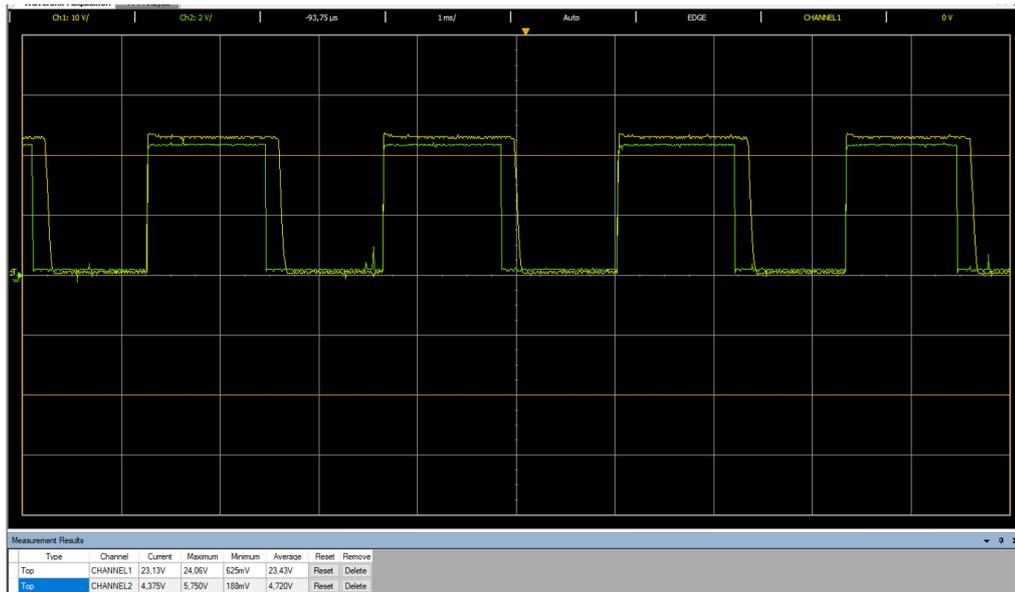


Fonte: Próprio autor (2024).

Novamente, é possível ver o mesmo comportamento apresentado na Figura 23, porém, desta vez, o sinal que se encontra adiantado é o do canal 1 em relação ao 2. Isso indica que o atuador está se movendo no sentido oposto ao da primeira figura, confirmando a integridade dos sinais na entrada do circuito do fotoacoplador.

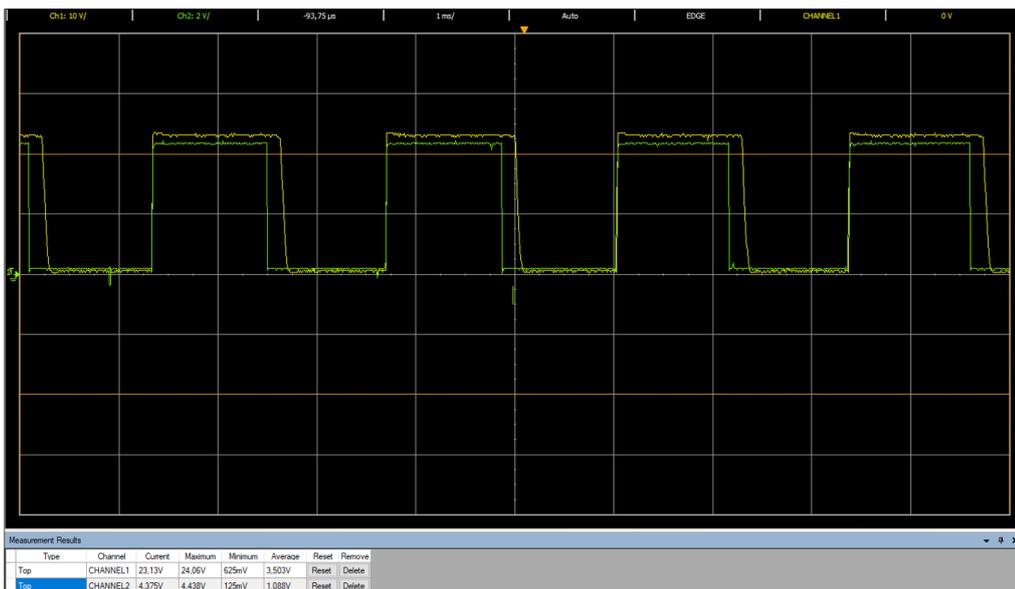
Confirmando a integridade de ambos os sinais das entradas, segue-se, então, para a etapa seguinte, validar a amplificação adequada desses sinais. Conectando uma das ponteiros do osciloscópio à uma das entradas do circuito e a outra ponteira à saída correspondente, analisa-se os sinais obtidos ao realizar movimento com o atuador. Dessa forma é possível observar o sinal original e o amplificado simultaneamente e analisar se ambos possuem o mesmo comportamento. A Figura 24 e a Figura 25 são resultados dessa etapa de validação, sendo a primeira figura correspondente aos sinais obtidos da entrada e saída correspondente do circuito quando o atuador move a carga para a direita, enquanto a segunda figura é referente à entrada e saída para a carga sendo movimentada para a esquerda (direção do motor).

Figura 24 - Sinais de entrada e saída em deslocamento para a direita.



Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 25 - Sinais de entrada e saída em deslocamento para esquerda.

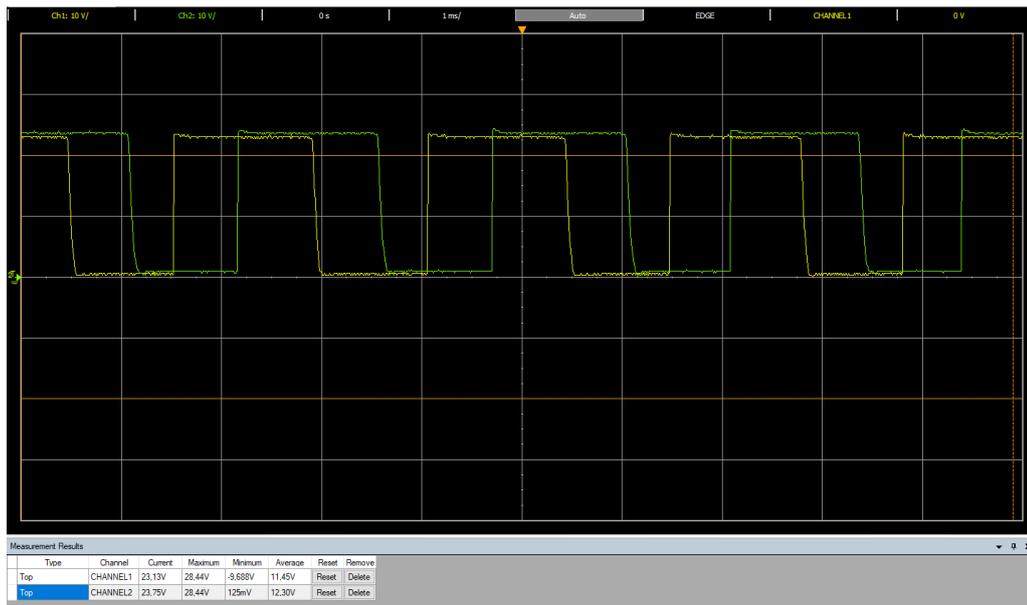


Fonte: Próprio autor (2024).

É possível observar ambos os sinais em fase, porém com amplitudes distintas, sendo a entrada com uma amplitude de 5 volts e a saída com amplitude de 24 V.

E por último, compara-se os dois sinais de saída do sensor o comportamento mostrado na Figura 26 pode ser observado.

Figura 26 - Sinais de saída do circuito para atuador se movendo para a esquerda.



Fonte: Próprio autor (2024).

Na figura acima pode-se constatar que os sinais apresentam um comportamento igual aos sinais observados na Figura 22, porém com uma amplitude de 24 volts, validando o funcionamento do circuito.

3.3 High-speed conter

Validando o circuito físico, a etapa seguinte consiste no estudo da função HSC do CLP e sua configuração. Essa função desempenha um papel fundamental na leitura dos pulsos emitidos pelo *encoder*. O equipamento utilizado neste estudo possui duas fases, o que permite distinguir a direção de giro do eixo que está sendo monitorado.

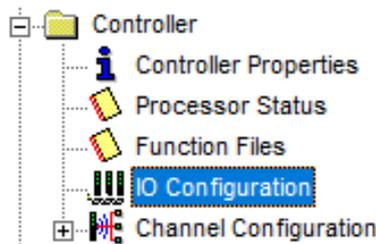
3.3.1 Configuração das entradas digitais

Para configurar a função HSC, é necessário seguir alguns passos. Primeiramente, após criar um novo projeto no RSLogix, é preciso selecionar o modelo do CLP. O mesmo pode ser observado na carcaça do controlador. A depender do modelo, pode-se alterar a velocidade de leitura das entradas que se deseja conectar

as fases do *encoder*. O modelo utilizado em questão trata-se do 1763-L16BWA, disponível no laboratório de CLP 2 do DEE, como já mencionado.

Em seguida, é necessário configurar a velocidade de leitura das entradas utilizadas para o dispositivo. Isso é possível através do acesso às configurações de entradas e saídas do RSLogix, Figura 27.

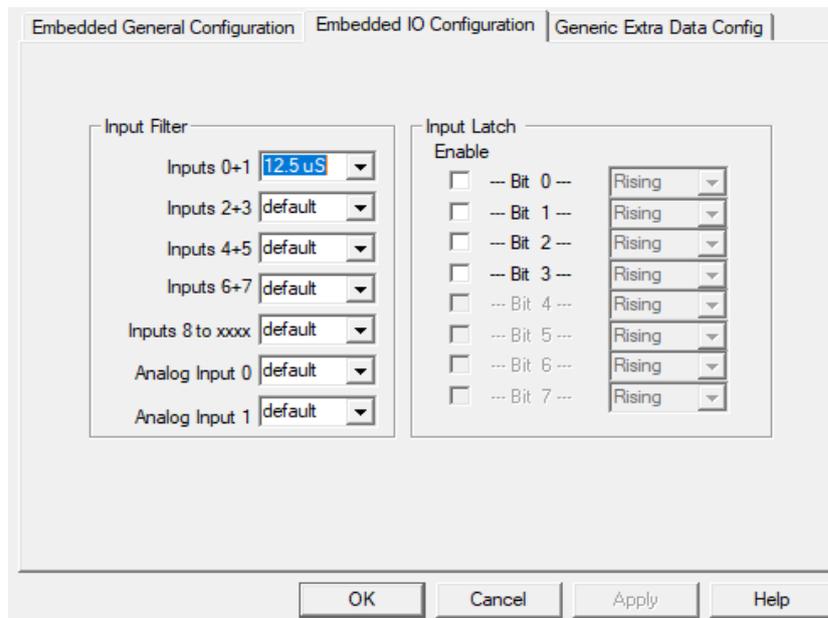
Figura 27 - Configurações gerais do CLP



Fonte: Próprio autor (2024).

Acessando as configurações é possível encontrar a aba de configurações de entradas e saídas embarcadas, Figura 28.

Figura 28 - Configuração dos filtros das entradas digitais do CLP.



Fonte: Próprio autor (2024).

Na janela de filtros de entrada é possível selecionar os possíveis valores para o tempo de leitura. Vale ressaltar que as configurações são feitas para cada par de

entrada. Porém, as entradas do HSC são predefinidas de fábrica como as duas primeiras entradas digitais. Pode-se observar na Figura 28 que o período selecionado do filtro das duas primeiras entradas onde são conectadas as fases do *encoder* foi de 12,5 μ s.

Para encontrar a frequência máxima que o controlador consegue interpretar basta utilizar a Equação (1), que expressa frequência em função do período, a seguir.

$$f = \frac{1}{T} \quad (1)$$

Substituindo o valor do período pelo escolhido para o filtro, encontra-se o seguinte valor para a frequência máxima que o CLP consegue registrar.

$$f = \frac{1}{1,25 \cdot 10^{-5}} = 80 \text{ kHz}$$

É configurado o menor período de leitura possível, pois, caso a frequência dos sinais do *encoder* fosse muito elevada, falhas de leitura poderiam ocorrer, onde o CLP não conseguiria registrar alguns pulsos emitidos pelo sensor e apresentaria um dado errado no acumulador. Essa falha na leitura dos pulsos resultaria em uma perda de precisão no controle da posição do bloco movimentado pelo atuador.

3.3.2 Configuração da função HSC

Para as configurações seguintes é necessário o acesso às funções do CLP. As funções podem ser acessadas através dos arquivos de funções (*Function Files*), na pasta do controlador. Ao selecionar a tela das funções, encontram-se dispostas todas as utilizáveis, dentre elas está o HSC. Selecionando a função, todos os registradores referentes às configurações da mesma ficarão visíveis. Essa tela pode ser vista na Figura 29.

O modo de contagem é uma das, se não a configuração mais importante que deve ser feita (Figura 29). No caso de um *encoder* com duas fases, a opção mais comum é o modo de contagem em quadratura, modo que leva em consideração a fase entre os sinais para indicar a direção do movimento e a posição do eixo. Retornando à tabela de configuração do HSC, é preciso configurar o registrador MOD com o valor 6, o que indicará seu modo de operação.

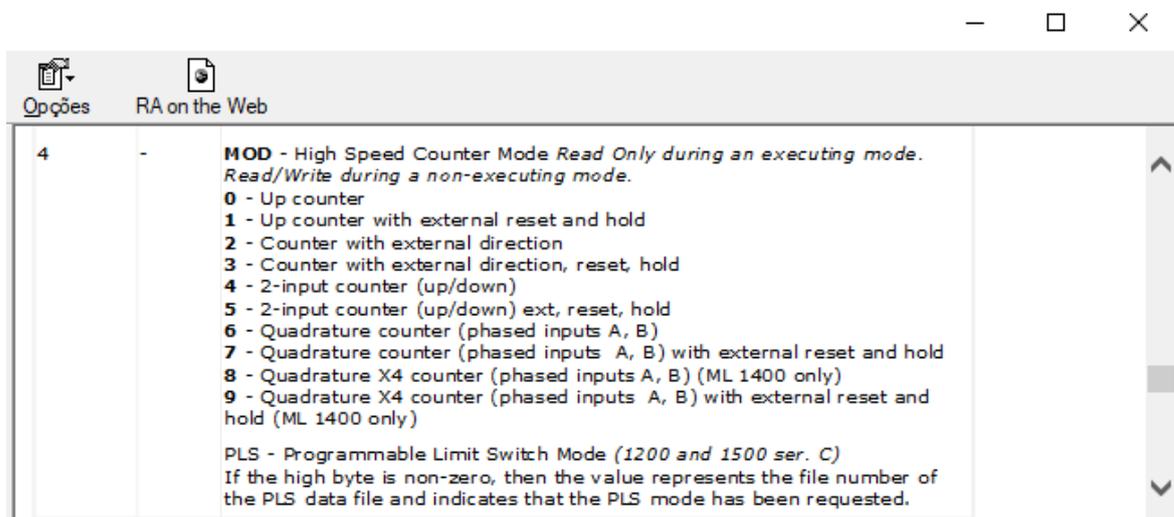
Figura 29 - Registrador do modo de funcionamento do HSC.

- MD - Mode Done	0
- CD - Count Down	0
- CU - Count Up	0
- MOD - PLS file (bits 15-8) HSC Mode (bits 7-0)	6 (h)
- ACC - Accumulator	0
- HIP - High Preset	2147483647
- LOP - Low Preset	-2147483648

Fonte: Próprio autor (2024).

Esse valor define que o modo de quadratura será utilizado com um *encoder* de duas fases (usualmente denominadas de fase A e fase B) sem *reset* externo. Por padrão esse registrador inicia configurado como 4. Mais informações sobre os modos podem ser vistas na Figura 30.

Figura 30 - Modos de funcionamentos aplicáveis ao HSC.



Fonte: Próprio autor (2024).

O próximo passo trata-se da implementação de uma sub-rotina e associá-la ao registrador PFN (*Program File Number*) da função HSC esse endereço é o responsável por definir a sub-rotina que será chamada quando a função atinge o valor máximo ou mínimo. Caso não seja definido nenhum valor para esse endereço, a função entrará em estado de erro e o registrador ER (*Error Code*) indicará o valor 1 (referente a ausência de uma sub-rotina para o PFN). O registrador pode ser visto na Figura 31.

Figura 31 - Registradores de sub-rotina do HSC e erro.

☐ HSC:0	{...}
- PFN - Program File Number	3
- ER - Error Code	0
- UIX - User Interrupt Executing	0
- UIE - User Interrupt Enable	1

Fonte: Próprio autor (2024).

A nova sub-rotina pode ser criada nos arquivos do programa (*program files*), no *RSLogix*. O número associado a essa sub-rotina deverá ser inserido no registrador já mencionado. A sub-rotina sendo criada pode ser observada na Figura 32.

Figura 32 - Criação de nova sub-rotina.

Program File

Number: Enter file number(s) or range(s) separated by commas. For example: 5,6,8-12

Name:

Description:

OK Cancel

Fonte: Próprio autor (2024).

Os próximos registradores a serem configurados são o FE e o CE, respectivamente ativação da função (*function enable*) e ativação da contagem (*counting enable*). O FE define se a função está em operação ou não. Já o CE, habilita ou desabilita a contagem do HSC, guardando o último valor lido ao ser desabilitado e reiniciando a contagem caso seja reativado. Ambos os registradores podem ser vistos na Figura 33.

Figura 33 - Registradores de acionamento da função e contagem.

- UIP - User Interrupt Pending	0
- FE - Function Enabled	1
- AS - Auto Start	1
- ED - Error Detected	0
- CE - Counting Enabled	1
- SP - Set Parameters	0

Fonte: Próprio autor (2024).

Com base nas transições dos sinais das duas fases do *encoder*, o CLP é capaz de determinar se o eixo está girando no sentido horário ou anti-horário. Essa informação é importante para calcular a posição atual do atuador elétrico.

Por último, configura-se o registrador AS (*Auto Start*). O mesmo define se a função será habilitada caso o CLP entre em modo de *Run* ou teste. Além dessa configuração, para este projeto, não se fez necessário realizar nenhuma outra alteração dos registradores, mantendo os mesmos em suas configurações padrão.

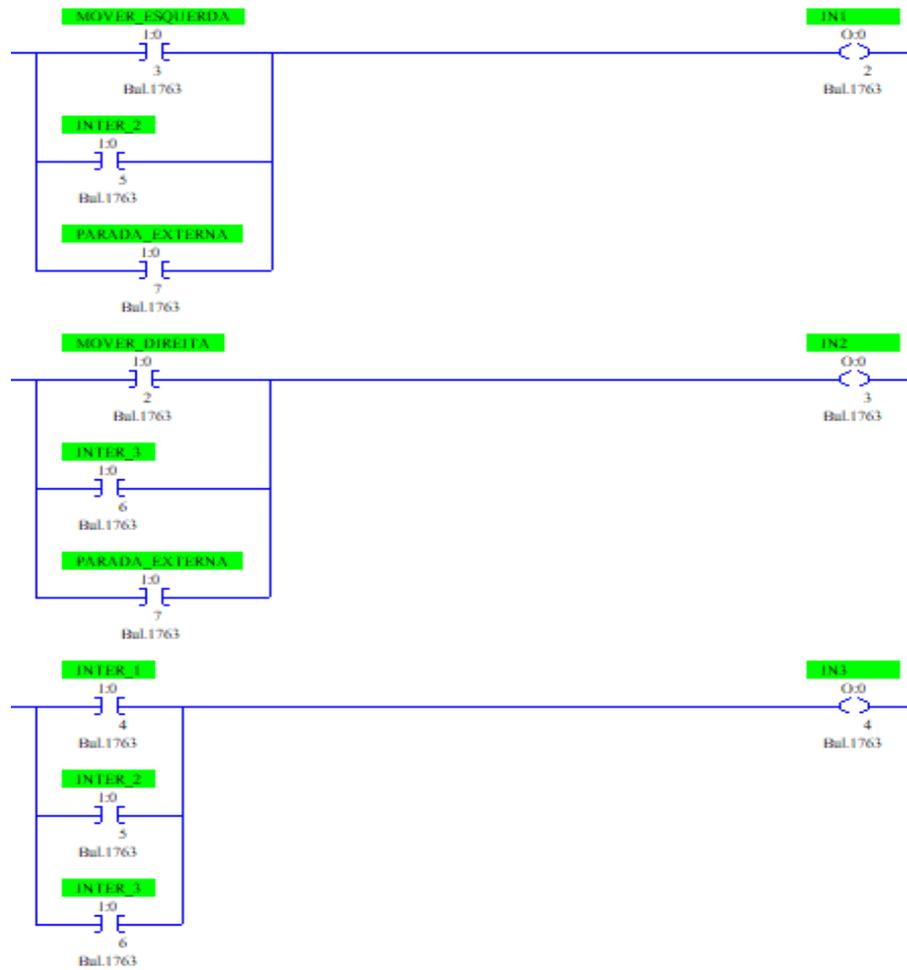
3.4 Lógica de controle

Realizado todas as configurações necessárias na função, dá-se continuidade ao trabalho. Como próximo foco, tem-se a implementação do código do CLP para operar o atuador. Porém, durante a implementação do código, foi optado por particionar esse processo em etapas, garantindo assim o pleno funcionamento de todos os componentes do sistema.

3.4.1 Controle padrão através do CLP

O primeiro teste durante a implementação da lógica consistiu na operação do atuador da sua forma padrão, fazendo uso da tabela verdade para realizar os movimentos da sua carga e analisando os seus feedbacks através dos status das entradas digitais do CLP. Na Figura 34, é possível ver o trecho da lógica em LADDER utilizado para movimentar o atuador.

Figura 34 - Código para teste de deslocamento padrão do atuador.



Fonte: Próprio autor (2024).

A princípio, fez-se necessário o uso dos botões da bancada, pois a IHM ainda não havia sido implementada.

O segundo trecho do código, Figura 35, é referente ao acionamento do sinal de emergência. Optou-se por um contato normalmente fechado para energizar a bobina associada à entrada que aciona o sinal de emergência.

Figura 35 - Condição de parada de emergência do atuador.



Fonte: Próprio autor (2024).

Porém, devido à limitação quanto ao número de entradas digitais do controlador, para o monitoramento dos sinais de feedback, um código padrão foi utilizado e, ao invés do *Micrologix* comandar o atuador, o controle da posição foi feito energizando diretamente as entradas do atuador com 24 V provenientes da fonte de tensão da bancada. Os sinais podem ser observados diretamente pelo display do CLP ou pelo arquivo de entradas digitais do RSLogix (Figura 36).

Figura 36 - Tabela de bits das entradas digitais do *Micrologix* 1100.

Offset	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
I:0.0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
I:0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I:0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I:0.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I:0.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
I:0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0

Below the table, the window shows a search field with 'I:0/33', a Radix dropdown set to 'Binary', and a Columns dropdown set to '16'. At the bottom, there are buttons for 'Properties', 'Usage', 'Forces', and 'Help'.

Fonte: Próprio autor (2024).

3.4.2 Leitura com HSC

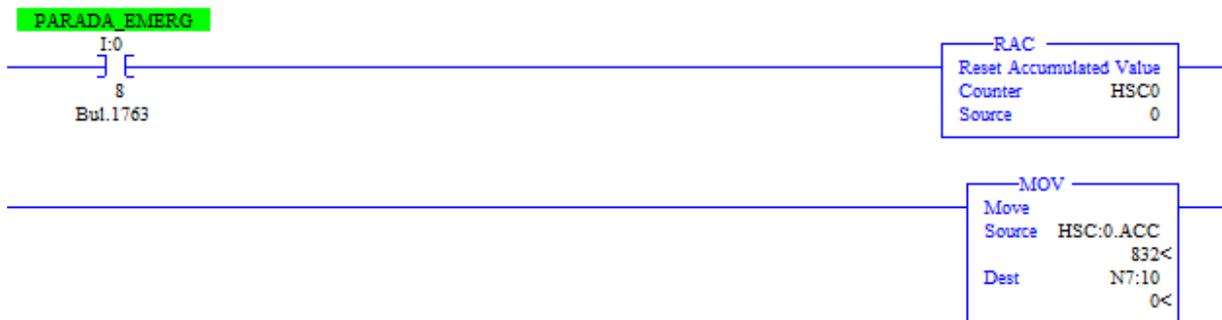
Confirmando o funcionamento dos demais sinais de entradas e saídas entre CLP e atuador, segue-se para o próximo teste, a leitura dos sinais provenientes do *encoder*.

Testado o equipamento externamente, é chegado o momento de confirmar se os sinais provenientes do sensor de posição estão sendo registrados de maneira correta pelo CLP.

Essa informação é acessível através do acumulador de pulsos da função HSC, o HSC:0.ACC, esse registrador é responsável por registrar os pulsos do *encoder* conforme o eixo do atuador se move, caso o atuador se mova em um sentido será realizada a soma dos pulsos e caso se mova no sentido oposto será feita a subtração

de cada pulso do valor do registrador. Na Figura 37 é possível observar o bloco MOV transferindo o valor do acumulador, isso foi feito caso fosse necessária qualquer manipulação do dado. Porém, pode-se ver também o bloco RAC, sendo esse responsável pelo reset do registrador (isso é feito ao realizar a parada de emergência). Essa condição de reset foi implementada, pois, em caso de uma queda na alimentação do sistema, o registrador perde a referência, sendo necessário retornar o atuador à origem e zerar o acumulador.

Figura 37 - Manipulação dos dados do HSC.



Fonte: Próprio autor (2024).

Feita a implementação das novas linhas de código ao programa, registra-se a quantidade de pulsos emitidos pelo sensor ao realizar o deslocamento do atuador por todo o seu percurso com o objetivo de obter a relação entre o curso do atuador e a quantidade de pulsos totais registrados de um fim de curso a outro. O valor registrado foi de 832 pulsos. De posse desse valor, torna-se possível realizar o controle da posição com um maior grau de liberdade.

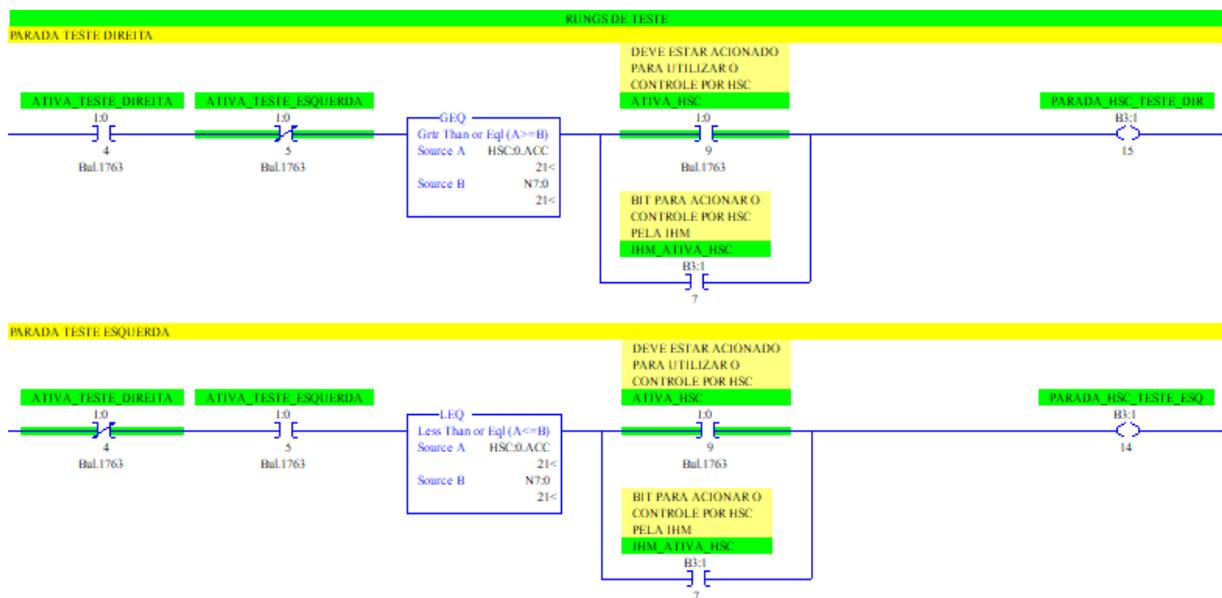
3.4.3 Estudo de comportamento do atuador com uso do HSC e parada externa

De posse dos dados de posição, pode-se dar início aos estudos do comportamento do atuador. Fazendo uso da condição de parada externa, implementa-se um código onde é realizado o deslocamento do atuador para uma posição desejada e só ao atingir tal posição a parada externa é acionada. Feito isso, registra-se a diferença entre a posição solicitada e a posição que foi atingida pelo atuador. Dessa maneira é possível descobrir se a inercia interfere significativamente no valor obtido.

Além disso, o teste buscou descobrir o comportamento do atuador para deslocamentos de amplitudes e origens diferentes, isto é, os deslocamentos não têm como origem a posição zero do atuador (um dos fim-de-cursos), partem de pontos diferentes. Dessa forma, seria possível validar a confiabilidade dos resultados e do equipamento, pois estando o equipamento em boas condições, independentemente da posição de origem do deslocamento, para deslocamentos iguais o comportamento do atuador deverá ser constante.

Na Figura 38 e Figura 39 estão os trechos do código implementado para o estudo de comportamento. Nas duas primeiras linhas de código estão as condições que acionam os bits de parada do atuador.

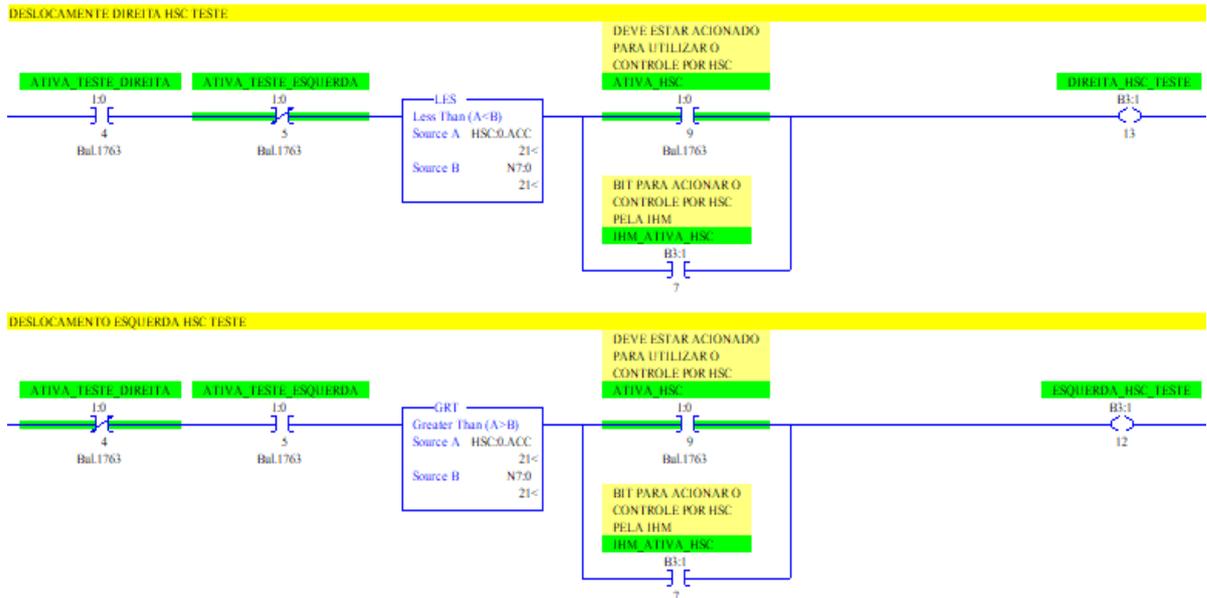
Figura 38 - Condições de parada do atuador.



Fonte: Próprio autor (2024).

Já nas duas últimas é possível ver as condições responsáveis pelo deslocamento para direita ou para a esquerda do equipamento.

Figura 39 - Condições de movimento do atuador.

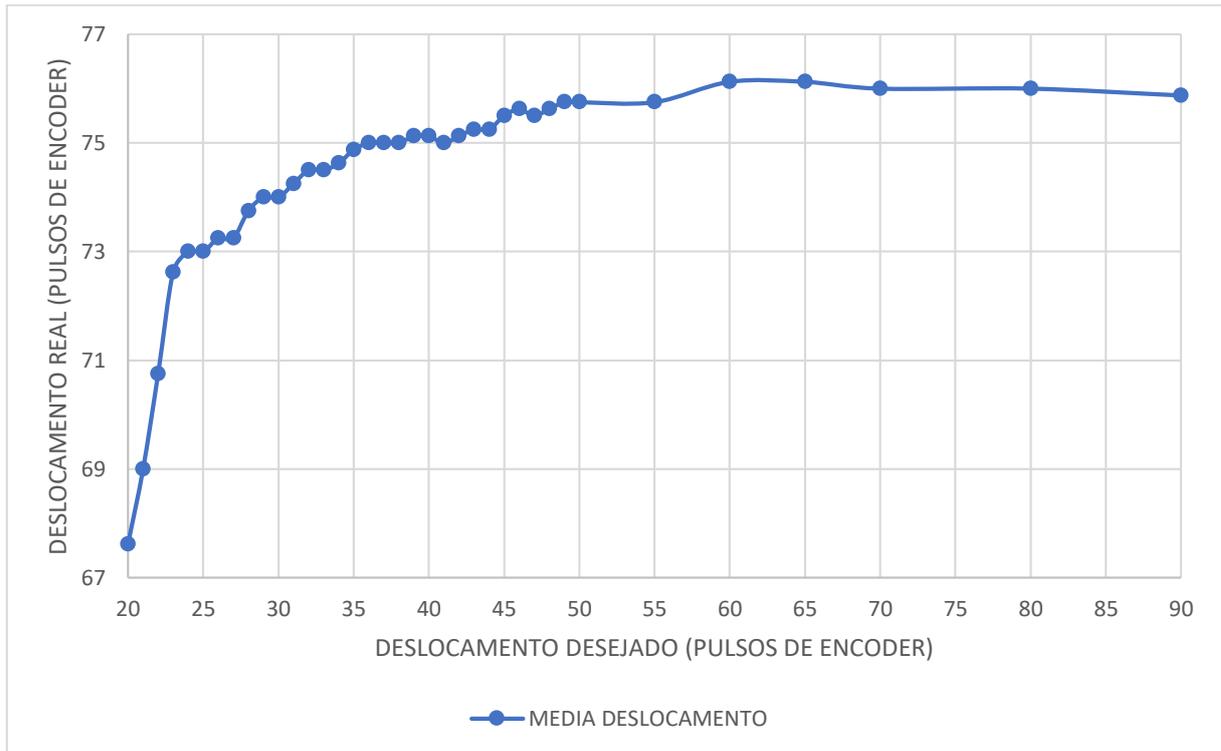


Fonte: Próprio autor (2024).

A partir deste primeiro teste, o seguinte gráfico da Figura 40 referente ao comportamento do atuador pôde ser gerado, onde os dados do eixo horizontal representam o deslocamento que o atuador deveria realizar e o eixo vertical o real deslocamento realizado.

Analisando a tabela do apêndice A, pode-se observar que os testes foram realizados para oito pontos de origem diferentes, variando 80 pulsos entre si de forma a cobrir praticamente todo o percurso do atuador. As amplitudes de deslocamentos estão informadas na primeira coluna à esquerda, tendo início no menor deslocamento possível até um valor de 100 pulsos do *encoder*.

Figura 40 - Gráfico inicial de comportamento do atuador.



Fonte: Próprio autor (2024).

Observando o gráfico (onde os pontos representam a média das diferenças entre a posição atingida e a desejada para o mesmo deslocamento partindo de posições diferentes), nota-se uma leve variação iniciando em 68 pulsos e aumentando conforme o deslocamento se torna maior, chegando ao valor constante de 76 pulsos, a partir desse valor não houve mais incremento de pulsos e o comportamento do atuador após parada passa a ser constante, independente do ponto de partida.

De posse desses dados, é possível a implementação na lógica do *Micrologix* de uma função para a correção da posição. Porém, após implementado a função de correção notou-se que o atuador passou a apresentar comportamento divergente aos dados levantados até então. Um novo estudo comportamental se tornou necessário, dessa vez para o comportamento do atuador após implementação da nova função.

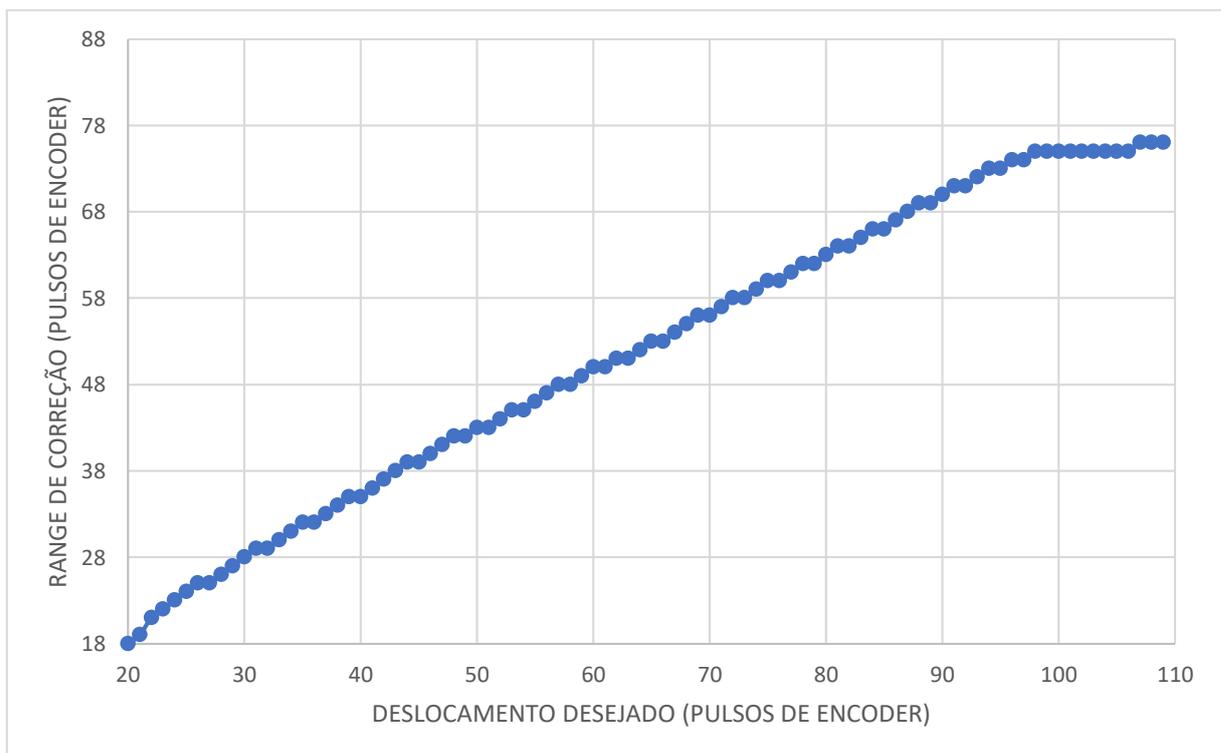
3.4.4 Estudo de comportamento do atuador com função de correção da posição

O próximo passo consistiu na otimização da função de correção. A princípio, iniciou-se a partir do menor valor possível de 20 pulsos do *encoder* até o valor onde o comportamento se tornasse constante.

Levando em consideração que, para um mesmo deslocamento partindo de posições diferentes resultavam em comportamentos semelhantes por parte do atuador, como pode ser visto no apêndice A, este teste foi realizado com todos os deslocamentos partindo de um dos fins-de-curso do equipamento. Na coluna à esquerda é possível visualizar a posição que se deseja atingir (e ao mesmo tempo a amplitude do deslocamento) enquanto na direita está a correção necessária para que o atuador consiga atingir a posição desejada de maneira precisa.

De posse desses dados o seguinte gráfico representando o novo comportamento foi gerado, Figura 41.

Figura 41 - Novo comportamento do atuador.

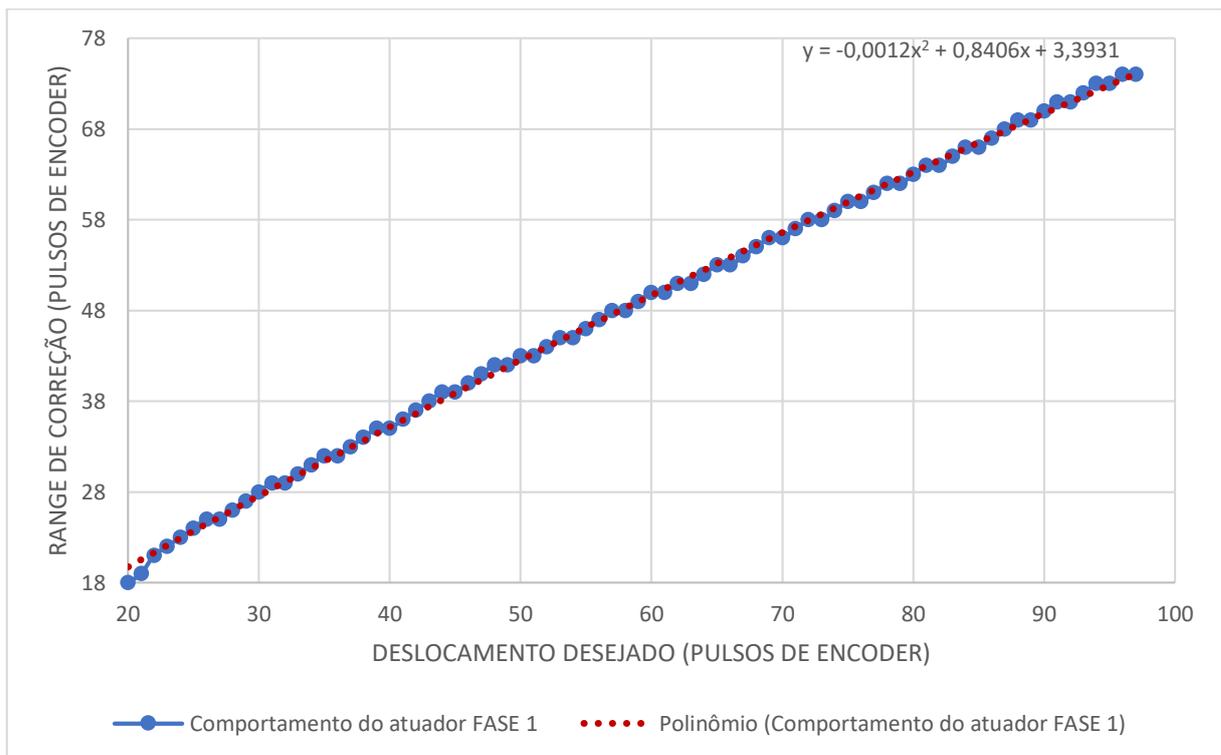


Fonte: Próprio autor (2024).

Em uma análise rápida, é possível separar o gráfico da figura acima em três componentes. Com o auxílio das ferramentas do Excel, além de separar as três etapas distintas de comportamento, também foi possível obter a linha de tendência que melhor descreve o comportamento do atuador em cada intervalo.

O primeiro intervalo pode ser observado na Figura 42.

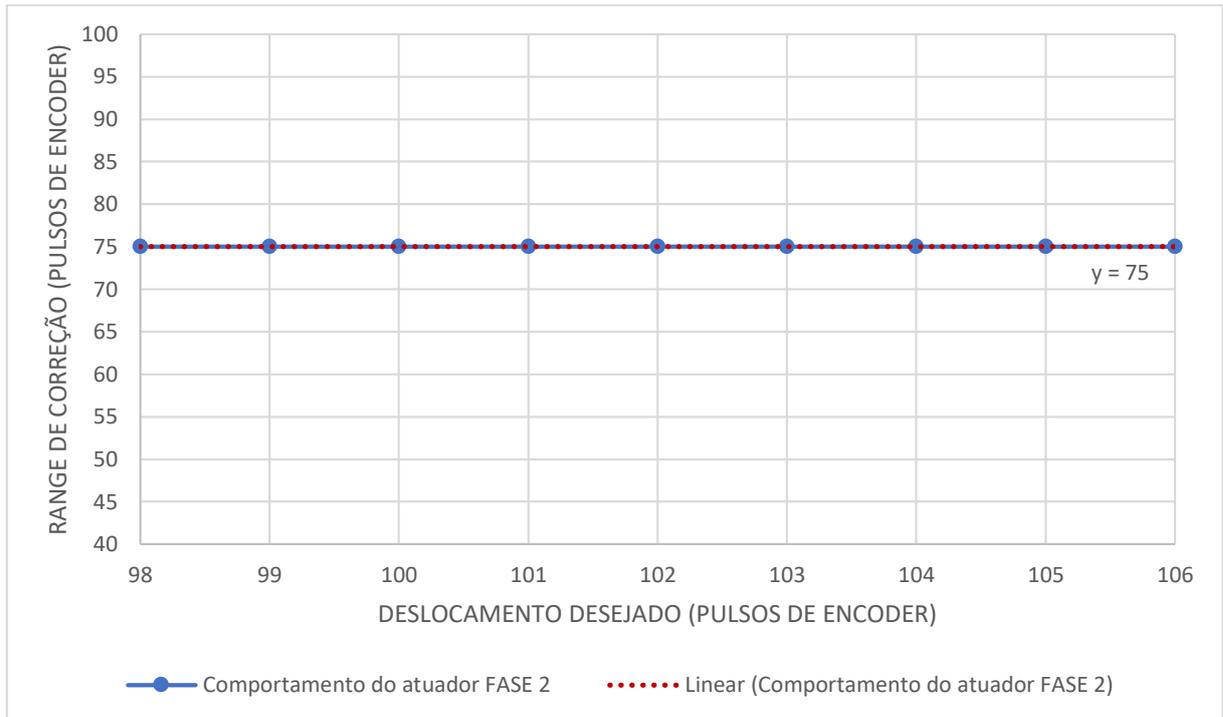
Figura 42 - Tendência do novo comportamento do atuador para primeiro intervalo de deslocamento.



Fonte: Próprio autor (2024).

O segundo intervalo é descrito pela Figura 43.

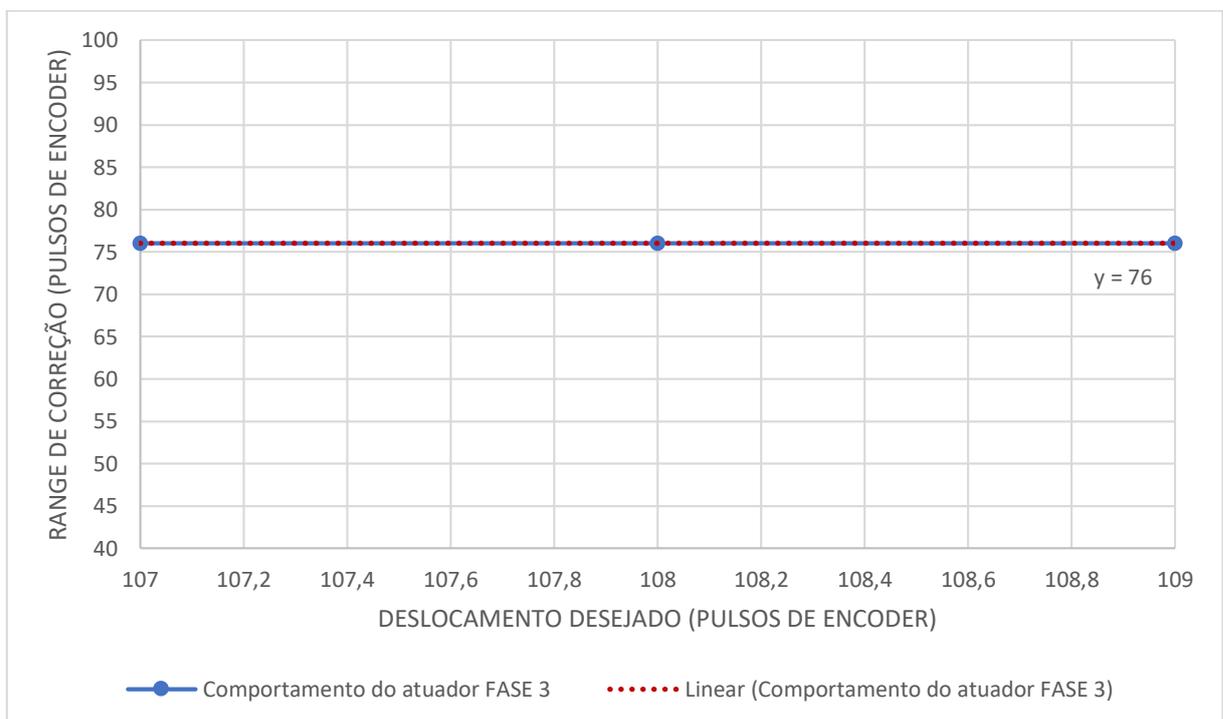
Figura 43 - Tendência do novo comportamento do atuador para segunda etapa de deslocamento.



Fonte: Próprio autor (2024).

E, por último, o terceiro intervalo de comportamento pode ser visto na Figura 44.

Figura 44 - Tendência do novo comportamento do atuador para terceira etapa de deslocamento



Fonte: Próprio autor (2024).

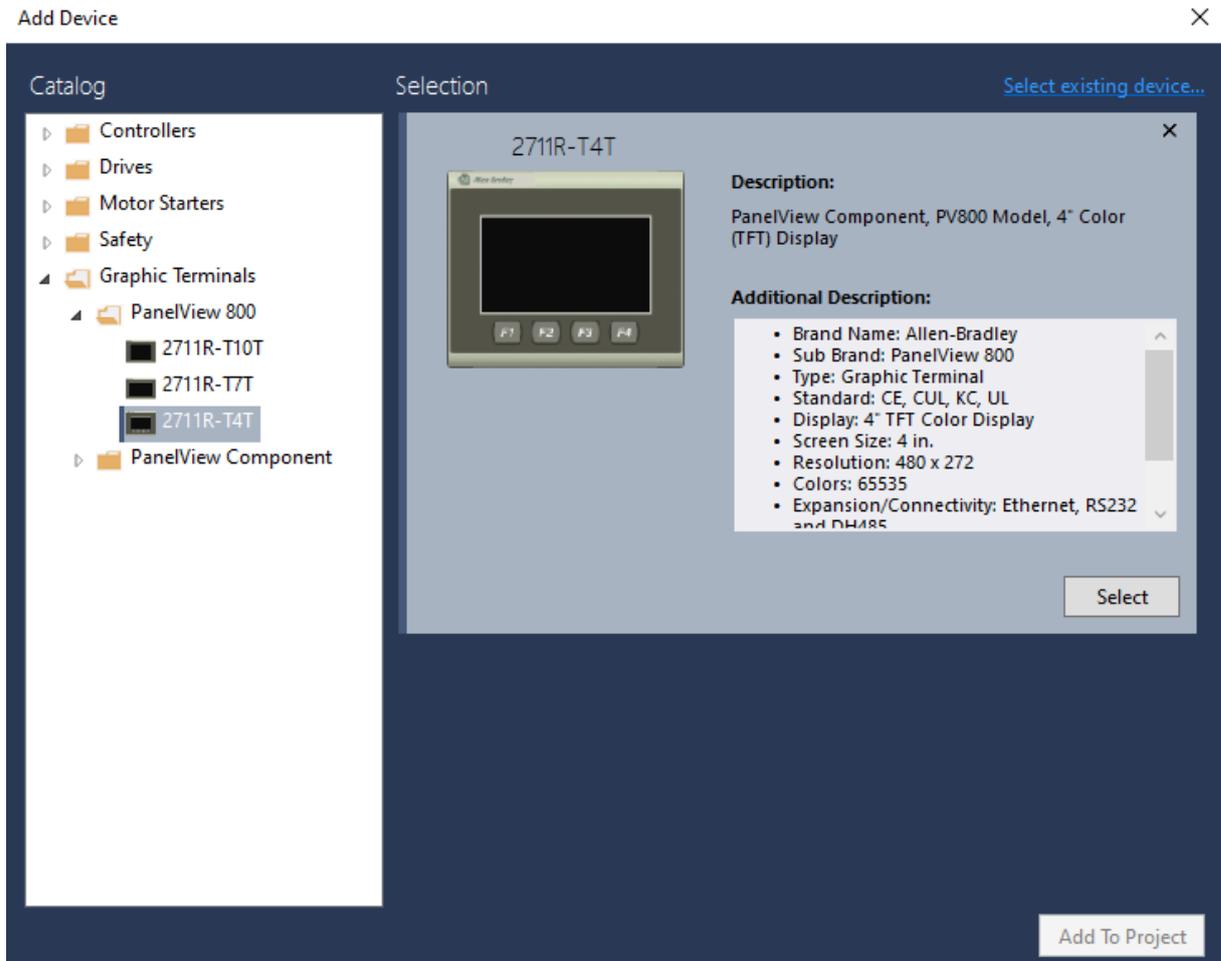
Porém, para deslocamentos de 20 e 21 pulsos, ainda ocorriam inconsistências. Devido ao tempo de processamento, em determinadas situações, para esses dois intervalos o atuador não realizava qualquer deslocamento. Para corrigir este imprevisto, foi adicionado um novo intervalo à função de correção contendo somente as duas amplitudes mencionadas.

3.5 Configuração da IHM

Após implementação do código do controlador, o novo foco passou a ser a implementação da IHM. Para o desenvolvimento das telas fez-se uso do *software Connected Components Workbench (CCW) da Rockwell Automation*.

Como já mencionado, o dispositivo utilizado trata-se do terminal PanelView 800 2711R-T4T. Ao criar um novo projeto no CCW, escolhe-se a interface gráfica desejada, como pode ser observado na Figura 45. Em seguida, configura-se o protocolo de comunicação, fez-se uso do EtherNet/IP, denominado no software como *Ethernet Allen Bradley Micrologix/ENI*. No meio físico, vale ressaltar que se fez o uso de um switch, também da *Allen Bradley, Stratix 2000 us5t* como intermediário, dessa forma é possível se comunicar com ambos os equipamentos da bancada sem a necessidade de remover o cabo de comunicação.

Figura 45 - Tela de seleção de dispositivos do projeto.



Fonte: Próprio autor (2024).

Quanto às *tags* de escrita e leitura de dados do CLP pela IHM, podem ser vistos na Figura 46.

Figura 46 - Tabela de tags da IHM.

Adicionar Excluir Desfazer Refazer Importar Exportar					
	Nome do tag ▲	Tipo de dados	Endereço	Controlador	Descrição
▶	IHM_DIREITA	Boolean	B3:1/1	PLC-1	
	IHM_ESQUERDA	Boolean	B3:1/0	PLC-1	
	POSICAO	32 bit integer	N7:23	PLC-1	
	VALOR	Real	N7:0	PLC-1	
	IHM_ATIVA_HSC	Boolean	B3:1/7	PLC-1	
	ENTRADA DE P...	Real	N7:28	PLC-1	
	EMERGENCIA	Boolean	I:0/8	PLC-1	
	RESET HSC	Boolean	B3:1/8	PLC-1	
	C FUNÇÃO 1	Real	F8:13	PLC-1	
	A FUNÇÃO 2	Real	F8:0	PLC-1	
	B FUNÇÃO 2	Real	F8:1	PLC-1	
	C FUNÇÃO 2	Real	F8:2	PLC-1	
	C FUNÇÃO 3	Real	F8:3	PLC-1	
	C FUNÇÃO 4	Real	F8:4	PLC-1	
	FIM_ESQ	Boolean	B3:2/13	PLC-1	
	FIM_DIR	Boolean	B3:2/12	PLC-1	
	INT1	Boolean	B3:2/11	PLC-1	
	INT2	Boolean	B3:2/10	PLC-1	
	INT3	Boolean	B3:2/9	PLC-1	
	IHM_INT1	Boolean	B3:1/2	PLC-1	
	IHM_INT2	Boolean	B3:1/3	PLC-1	
	IHM_INT3	Boolean	B3:1/4	PLC-1	

Fonte: Próprio autor (2024).

As telas foram implementadas com o objetivo de poder alternar entre os dois modos de controle do atuador possíveis, ou seja, é possível tanto realizar o controle através do *high-speed counter* quanto usar o sistema de controle padrão do atuador. Além disso, existe a possibilidade de se configurar as constantes das funções de correção com o objetivo de compreender como cada uma afeta as etapas de movimento do atuador.

Dito isso, a primeira tela implementada foi a de menu ou tela principal. Nessa tela, o operador pode navegar entre os dois modos de controle do atuador ou acessar

as configurações de controle. A partir dessa tela, também é possível acessar as telas de especificações do equipamento. A mesma pode ser vista na Figura 47.

Figura 47 - Tela inicial da IHM.



Fonte: Próprio autor (2024).

A próxima tela é a de controle padrão (Figura 48), onde o operador pode escolher entre as 5 posições fixas do atuador e recebe o feedback quando o mesmo atinge a posição.

Figura 48 - Tela de controle padrão da IHM.



Fonte: Próprio autor (2024).

Em sequência, tem-se a tela de controle através do *high-speed counter* (Figura 49). Nessa tela o operador pode digitar a posição em milímetros que ele deseja atingir com o atuador. É retornado à posição atual do atuador através de um display numérico e uma barra que graduada que indica onde o atuador parou.

Figura 49 - Tela de controle por HSC da IHM.



Fonte: Próprio autor (2024).

Além dessas duas telas, ainda existe a tela de configuração do controle por HSC, Figura 50. Apesar de não existir um grau de liberdade maior para configurar, nessa tela é possível alterar os valores dos escalares e constantes das funções que descrevem os movimentos a fim de realizar ajustes finos ou observar como cada valor pode alterar o comportamento do atuador.

Figura 50 - Tela de configuração da IHM.

The screenshot displays the 'CONFIGURAÇÕES' (Configurations) screen. At the top, there is a home icon, the title 'CONFIGURAÇÕES', and two status boxes: 'HORA: 3:28:23 PM' and 'DATA: 1/2/2024'. Below the title bar, there are four panels, each for a different function:

- FUNÇÃO 1:** 'INFORME O VALOR DA CONSTANTE DE CORREÇÃO PARA A FUNÇÃO QUE DESCREVE O MOVIMENTO DO PRIMEIRO TRECHO DO ATUADOR:'. It features a single input field labeled 'C'.
- FUNÇÃO 2:** 'INFORME O VALOR DAS CONSTANTES DE CORREÇÃO PARA A FUNÇÃO QUE DESCREVE O MOVIMENTO DO SEGUNDO TRECHO DO ATUADOR:'. It features three input fields labeled 'A.X² + B.X + C'.
- FUNÇÃO 3:** 'INFORME O VALOR DA CONSTANTE DE CORREÇÃO PARA A FUNÇÃO QUE DESCREVE O MOVIMENTO DO TERCEIRO TRECHO DO ATUADOR:'. It features a single input field labeled 'C'.
- FUNÇÃO 4:** 'INFORME O VALOR DA CONSTANTE DE CORREÇÃO PARA A FUNÇÃO QUE DESCREVE O MOVIMENTO DO QUARTO TRECHO DO ATUADOR:'. It features a single input field labeled 'C'.

Fonte: Próprio autor (2024).

Por fim, estão as telas de especificações elétricas e mecânicas do sistema. Essas telas não possuem papel fundamental, porém possuem informações pertinentes a operação do equipamento tal qual a tensão de alimentação, comprimento do curso do atuador, modelo do atuador, corrente suportada, tensão de alimentação do circuito de integração, etc. Essas telas podem ser vistas na Figura 51 e Figura 52.

Figura 51 - Tela de especificações elétricas do sistema.

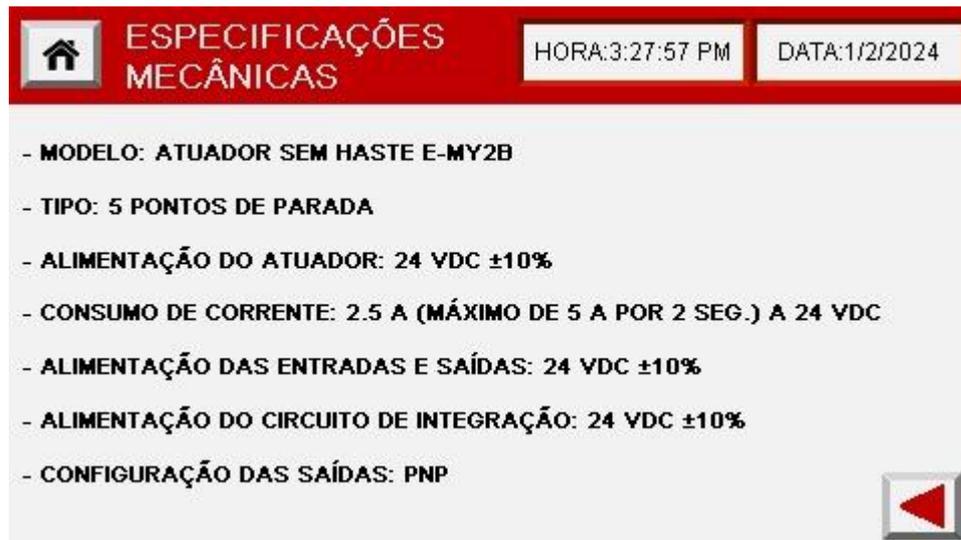
The screenshot displays the 'ESPECIFICAÇÕES ELÉTRICAS' (Electrical Specifications) screen. At the top, there is a home icon, the title 'ESPECIFICAÇÕES ELÉTRICAS', and two status boxes: 'HORA: 3:27:34 PM' and 'DATA: 1/2/2024'. The main content area lists the following specifications:

- **MODELO:** ATUADOR SEM HASTE E-MY2B
- **TIPO:** 5 PONTOS DE PARADA
- **ALIMENTAÇÃO DO ATUADOR:** 24 VDC ±10%
- **CONSUMO DE CORRENTE:** 2.5 A (MÁXIMO DE 5 A POR 2 SEG.) A 24 VDC
- **ALIMENTAÇÃO DAS ENTRADAS E SAÍDAS:** 24 VDC ±10%
- **ALIMENTAÇÃO DO CIRCUITO DE INTEGRAÇÃO:** 24 VDC ±10%
- **CONFIGURAÇÃO DAS SAÍDAS:** PNP

A red play button icon is located in the bottom right corner of the screen.

Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 52 - Tela de especificações mecânicas do sistema.

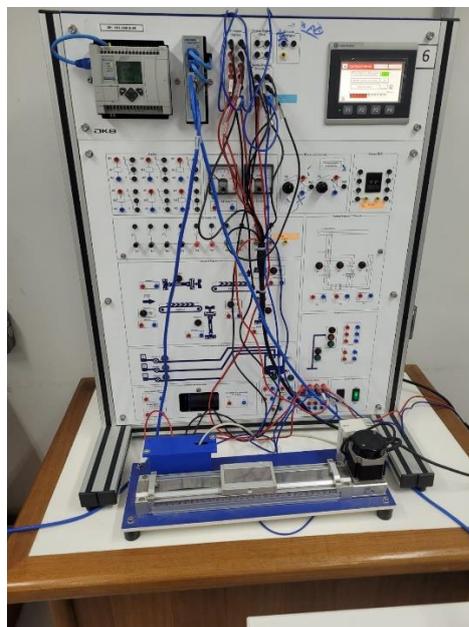


Fonte: Próprio autor (2024).

3.6 Resultados

O sistema de controle e supervisão montado, composto pelo CLP, IHM, atuador e circuito de integração pode ser observado na Figura 53.

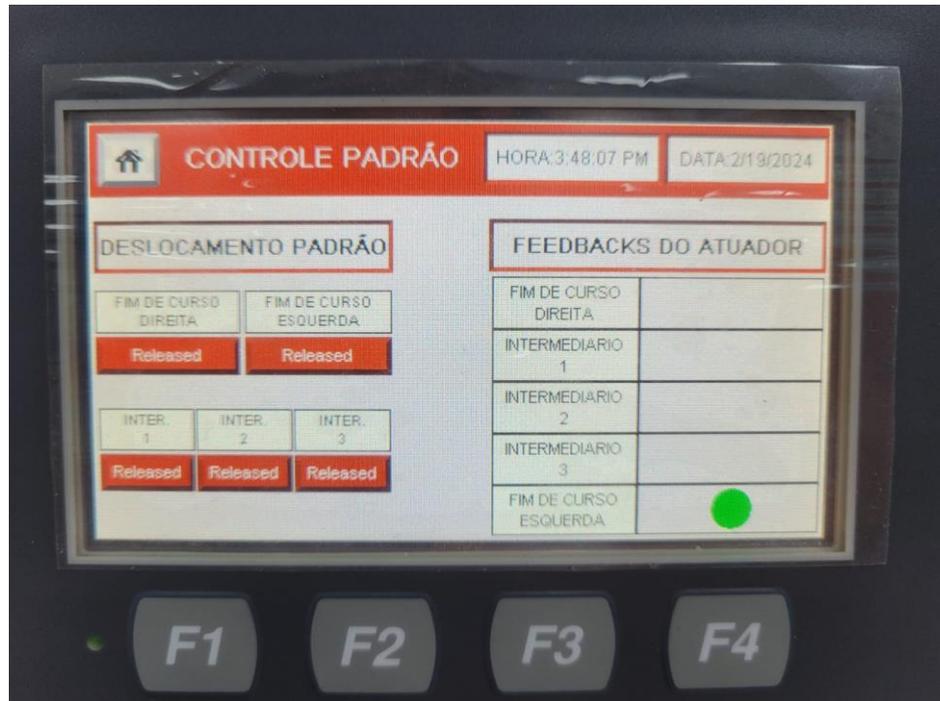
Figura 53 - Sistema operando.



Fonte: Próprio autor (2024).

Na tela de controle padrão, selecionando para o atuador se deslocar para o fim-de-curso da extremidade oposta ao motor e é possível observar o sinal de *feedback* na tabela a direita na figura indicando a conclusão do deslocamento. A tela em operação pode ser observada na Figura 54.

Figura 54 - Tela de controle padrão em operação.



Fonte: Próprio autor (2024).

Já na tela de controle através do *high-speed counter*, tem-se duas formas de visualizar o *feedback*. Na Figura 55 possível observar que foi configurado para o atuador se deslocar para a posição 80, em milímetros. A barra com marcação indica a posição atingida, além do retorno numérico exato no *display* acima da barra.

Figura 55 - Tela de controle por HSC em operação.



Fonte: Próprio autor (2024).

Com o objetivo de validar o novo sistema de controle implementado, fez-se uso da seguinte equação para obter o erro relativo de posição de ambos os testes realizados, o com *high-speed counter* antes da implementação do controle e após a implementação do controle.

$$Erro(\%) = 100 \cdot \frac{|posição_{real} - posição_{referência}|}{posição_{referência}} \quad (2)$$

Além disso, para se ter uma referência de precisão do equipamento, também é possível comparar os resultados com a margem de precisão do atuador informado em seu manual para o sistema de controle padrão do mesmo. A Figura 56 informa esses dados.

Figura 56 - Precisão do atuador.

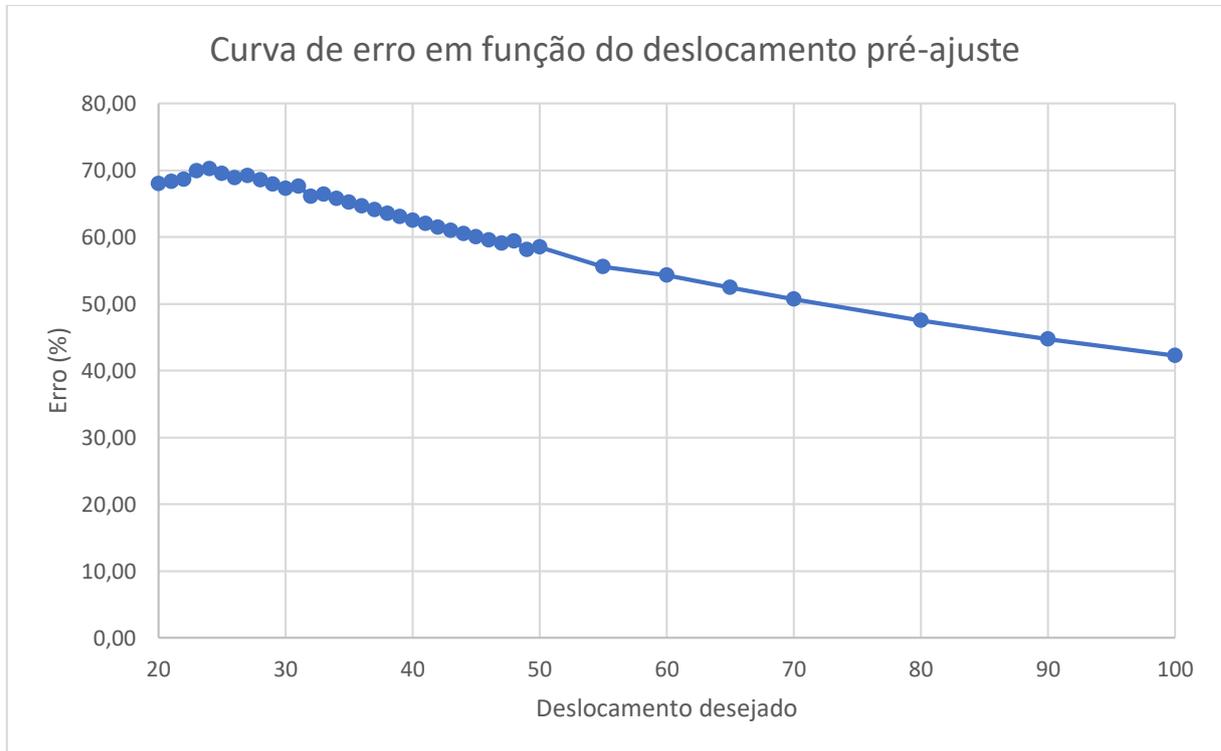
Repeated positioning stopping precision	Both ends	± 0.01 mm
	Intermediate stopping position	± 0.1 mm

Fonte: (SMC, 2008)

Para o erro relativo do primeiro teste, devido à grande extensão da tabela do apêndice A e observando que o comportamento do atuador para todas as posições

foi próximo à média calculada, calculou-se o erro de posição para os deslocamentos da primeira posição. O resultado disso pode ser visto na Figura 57.

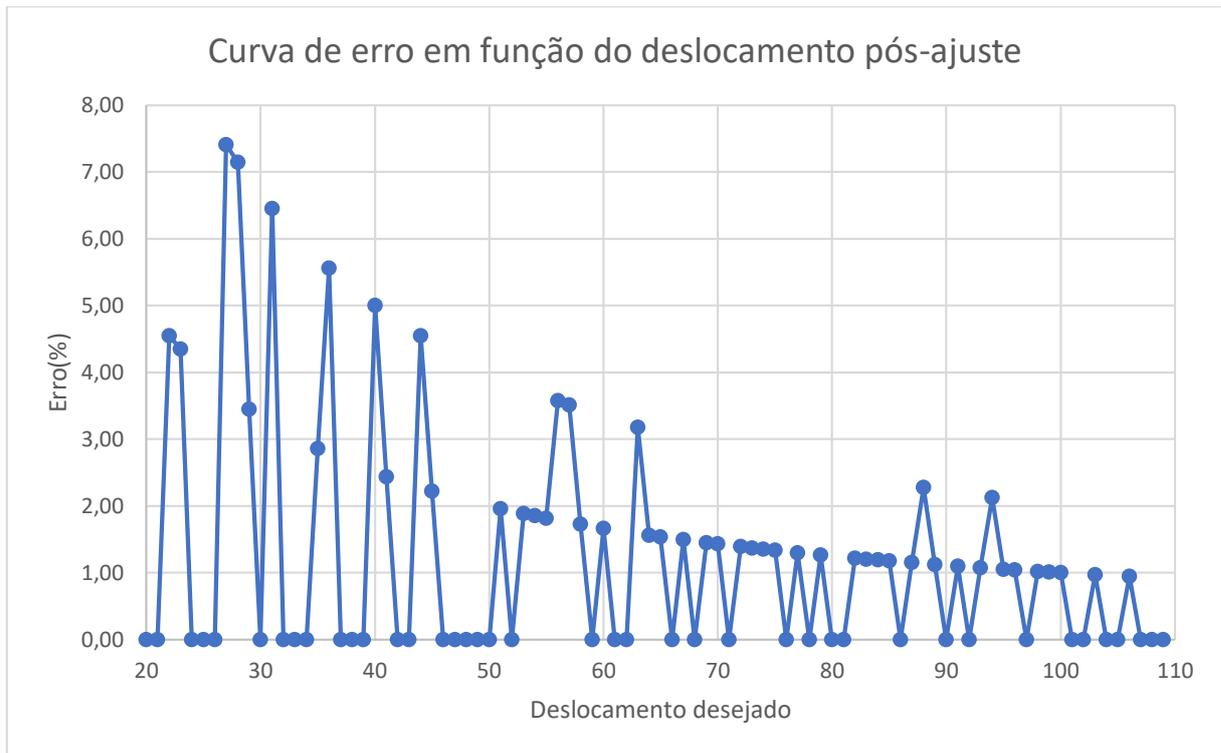
Figura 57 - Gráfico do erro obtido em função do deslocamento desejado.



Fonte: Próprio autor (2024).

Já para o erro relativo de posição gerado pelo segundo teste, a Figura 58 expõe os resultados.

Figura 58 - Gráfico do erro pós implementação do controle obtido em função do deslocamento desejado.



Fonte: Próprio autor (2024).

Comparando os erros de ambos os gráficos, é notável o aprimoramento do sistema de controle proposto para este projeto.

4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

Pode-se concluir que o novo sistema de controle e supervisão para o atuador cumpriu os objetivos propostos, apresentando uma boa acurácia no controle de posição. O circuito de integração se demonstrou confiável e atendeu às especificações necessárias para que o *Micrologix* 1100 pudesse interpretar os sinais do sensor de posição do atuador, tornando possível o controle de sua posição através dos dados de posição e do sinal de parada externa. Já a IHM permite a transição entre os dois modos de controle, o monitoramento e escrita dos valores de posição que se deseja atingir de maneira intuitiva e rápida.

O sistema abre espaço para aprimoramentos, tendo em vista que este estudo foi realizado para o atuador operando com velocidade e aceleração mínimas, e novos estudos por parte de futuros discentes, fazendo uso de CLP's com taxas de leitura mais rápidas, otimizando o código ou até mesmo agregando conhecimentos de áreas distintas para projetos futuros. Além disso, o mesmo permite sua replicação em sala de aula para diversas disciplinas, podendo se tornar uma ótima ferramenta de ensino para os docentes do curso de automação.

REFERÊNCIAS

AGUIRRE, L. A. **Fundamentos de instrumentação.**

ALLEN BRADLEY. **MicroLogix™ 1100 Programmable Controller.**

ALMEIDA, Fernanda. **HI tecnologia**, 2018. Disponível em:
<<https://materiais.hitecnologia.com.br/blog/o-que-%C3%A9-encoder-para-que-serve-como-escolher-como-interfacear/>>.

ANDERSON, NORMAN A. **Instrumentation for Process Measurement and Control.** 3ª. ed.

CASTRUCCI, Plínio B. D. L.; BITTAR, Anselmo; SALES, Roberto M. **Controle Automático.** 2ª. ed.

CPI. What is a Linear Actuator? **CPI Hi-Endurance Switching, Sensing.** Disponível em:
<<https://www.cpi-nj.com/what-is-a-linear-actuator/>>. Acesso em: Maio 2023.

DORF, R.C.; BISHOP, R.H. **Sistemas de controle moderno.** 8ª. ed.

FABER. **FABER INDUSTRIAL TECHNOLOGIES**, 2021. Disponível em:
<<https://eshop.faberinc.com/products/HMRS11C160-0700-0000000AB>>. Acesso em: Outubro 2023.

GOEKING, W. Da máquina a vapor aos softwares de automação. **Memória da eletricidade**, p. 7, Maio 2010.

JHFOSTER. A Brief Guide to Electric Actuators. **JHFOSTER REDEFINING REDEFINING THE POSSIBILITIES OF AUTOMATION**, 2022. Disponível em:
<<https://jhfooster.com/automation-blogs/a-brief-guide-on-electric-actuators/#:~:text=The%20primary%20difference%20between%20rodless,high%20loads%20and%20moment%20forces>>. Acesso em: 2023.

KOVACHEVA, M.; STOIMENOV, E.; YAKIMOV, P. Behavioral and physical modeling of an incremental rotary encoder. **IEEE**, 29 Maio 2014.

MARSTON, R. M. **Optoelectronics circuits manual.** 2ª. ed.

MARTINS, G. **Princípios de Automação Industrial.**

MOROZOVA, Tatyana S. Linear Actuator Modeling. **IEEE**, São Petersburgo, 02 Novembro 2020. 03.

NORGREN. What is an Electric Actuator. **NORGREN**, 2022. Disponível em:
<<https://www.norgren.com/en/support/blog/what-is-an-electric-actuator>>. Acesso em: 08 Outubro 2023.

RAUTEON, Drano. Excepcional: Encoders. **Hardware Central**, 2021. Disponível em:
<<https://www.hardwarecentral.net/single-post/excepcional-encoders>>. Acesso em: 04 Fevereiro 2024.

SHARP. **DEVICE SPECIFICATION FOR PHOTOCOUPLER MODEL No. PC817.**

SMC. **e-Rodless Actuator Operation Manual E-MY2B Series.**

SOARES, N.V. renderBlog. <https://blog.render.com.br>, 2014. Disponível em:
<<https://blog.render.com.br/diversos/sensores-e-transdutores/#:~:text=Os%20Sensores%20Anal%C3%B3gicos%20produzem%20um,outras%20s%C3%A3o%20todas%20medidas%20anal%C3%B3gicas.>>. Acesso em: 02 out. 2022.

STENERSON, J. **Industrial Automation and Process Control.**

THOMAZINI, D.; ALBUQUERQUE, P. U. B. D. **Sensores industriais fundamentos e aplicações**. 9^a. ed.

TOCCI, R. J. **Sistemas digitais: princípios e aplicações**. 11^a. ed.

VARGAS, Alessandro N. **Sensor óptico em quadratura: leitura via Arduino**.

ZANCAN, M. D. **Controladores programáveis**. 3^a. ed.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Tabela de testes de deslocamento iniciais.

DESLOCAMENTO	POSIÇÃO 80		POSIÇÃO 160		POSIÇÃO 240		POSIÇÃO 320		POSIÇÃO 400		POSIÇÃO 480		POSIÇÃO 560		POSIÇÃO 640		MÉDIA
	REF.	REAL	REF.	REAL	REF.	REAL	REF.	REAL	REF.	REAL	REF.	REAL	REF.	REAL	REF.	REAL	
20	100	168	180	246	260	328	340	406	420	487	500	569	580	649	660	728	68
21	101	170	181	248	261	331	341	411	421	491	501	570	581	650	661	729	69
22	102	172	182	253	262	333	342	413	422	492	502	574	582	652	662	733	71
23	103	175	183	255	263	336	343	415	423	496	503	576	583	656	663	736	73
24	104	177	184	257	264	337	344	417	424	497	504	577	584	657	664	737	73
25	105	178	185	258	265	338	345	418	425	498	505	578	585	658	665	738	73
26	106	179	186	259	266	339	346	419	426	499	506	580	586	659	666	740	73
27	107	181	187	261	267	340	347	420	427	500	507	580	587	660	667	740	73
28	108	182	188	262	268	342	348	422	428	502	508	582	588	661	668	741	74
29	109	183	189	263	269	343	349	423	429	503	509	583	589	663	669	743	74
30	110	184	190	264	270	344	350	424	430	504	510	584	590	664	670	744	74
31	111	186	191	265	271	345	351	425	431	505	511	586	591	665	671	745	74
32	112	186	192	267	272	347	352	426	432	506	512	587	592	666	672	747	75
33	113	188	193	268	273	348	353	427	433	508	513	587	593	667	673	747	75
34	114	189	194	269	274	348	354	428	434	509	514	588	594	669	674	749	75
35	115	190	195	269	275	350	355	430	435	511	515	590	595	669	675	750	75
36	116	191	196	271	276	351	356	431	436	511	516	591	596	671	676	751	75
37	117	192	197	272	277	352	357	432	437	512	517	592	597	672	677	752	75
38	118	193	198	273	278	353	358	433	438	513	518	593	598	673	678	753	75
39	119	194	199	274	279	355	359	434	439	514	519	594	599	674	679	754	75
40	120	195	200	275	280	355	360	435	440	516	520	595	600	675	680	755	75
41	121	196	201	276	281	356	361	436	441	516	521	596	601	676	681	756	75

42	122	197	202	277	282	357	362	437	442	517	522	597	602	678	682	757	75
43	123	198	203	278	283	359	363	438	443	518	523	598	603	678	683	759	75
44	124	199	204	279	284	360	364	439	444	519	524	599	604	679	684	760	75
45	125	200	205	281	285	361	365	440	445	520	525	601	605	681	685	760	76
46	126	201	206	281	286	362	366	442	446	522	526	602	606	681	686	762	76
47	127	202	207	283	287	362	367	442	447	523	527	603	607	682	687	763	76
48	128	204	208	284	288	364	368	444	448	523	528	603	608	683	688	764	76
49	129	204	209	285	289	365	369	445	449	524	529	605	609	685	689	765	76
50	130	206	210	286	290	366	370	446	450	526	530	605	610	686	690	765	76
55	135	210	215	291	295	371	375	451	455	531	535	611	615	691	695	770	76
60	140	216	220	296	300	376	380	456	460	536	540	616	620	697	700	776	76
65	145	221	225	301	305	381	385	461	465	542	545	621	625	701	705	781	76
70	150	226	230	306	310	386	390	466	470	546	550	626	630	706	710	786	76
80	160	236	240	316	320	396	400	476	480	556	560	636	640	716	720	796	76
90	170	246	250	326	330	406	410	486	490	566	570	645	650	726	730	806	76
100	180	256	260	336	340	416	420	496	500	576	580	656	660	736	740	816	76