

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL-MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA**

CARLOS AUGUSTO STEINBACH

**CONTROLE DE POSIÇÃO E VELOCIDADE EM MOTOR CC COM O
USO DE CLP**

FLORIANÓPOLIS, 2024.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL-MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA**

CARLOS AUGUSTO STEINBACH

**CONTROLE DE POSIÇÃO E VELOCIDADE EM MOTOR CC COM O
USO DE CLP**

Trabalho de Conclusão de Curso / Monografia / Dissertação submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro em Mecatrônica.

Orientador:

Prof. Jean Paulo Rodrigues, Dr. Eng.

FLORIANÓPOLIS, 2024.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Steinbach, Carlos Augusto

CONTROLE DE POSIÇÃO E VELOCIDADE EM MOTOR CC COM O

USO DE CLP / Carlos Augusto Steinbach; orientação de Jean Paulo Rodrigues. - Florianópolis, SC, 2025.

54 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado em Engenharia Mecatrônica. Departamento Acadêmico de Metal Mecânica.

Inclui Referências.

1. Controle. 2. PID. 3. Motor CC. 4. CLP. 5. Delta.

I. Rodrigues, Jean Paulo. II. Instituto Federal de Santa Catarina. III. CONTROLE DE POSIÇÃO E VELOCIDADE EM MOTOR CC COM O USO DE CLP.

CONTROLE DE POSIÇÃO E VELOCIDADE EM MOTOR CC COM O USO DE CLP

CARLOS AUGUSTO STEINBACH

ESTE TRABALHO FOI JULGADO ADEQUADO PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO EM MECATRÔNICA E APROVADO NA SUA FORMA FINAL PELA
BANCA EXAMINADORA DO CURSO DE ENGENHARIA MECATRÔNICA DO
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA.

FLORIANÓPOLIS, 24 DE FEVEREIRO, 2025.

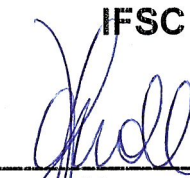
BANCA EXAMINADORA:



JEAN PAULO RODRIGUES, DR. ENG.



FRANCISCO RAFAEL MOREIRA DA MOTA, DR. ENG.
IFSC



VALDIR NOLL, DR. ENG.
IFSC

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Carlos Pedro Steinbach e Laureci Herondina Batista Steinbach, a minha irmã Renata Steinbach e a minha noiva Beatriz Carolina Tambosi pelo apoio e carinho incondicionais que recebi para concluir essa jornada.

Ao Prof. Dr. Eng. Jean Paulo Rodrigues por me orientar nesse trabalho, dedicando seu tempo e conhecimento fundamentais para esse resultado. Ao professor Francisco Rafael Moreira da Mota pela atenção e disponibilidade em esclarecer dúvidas e a todos os professores que fizeram parte dessa caminhada.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é aplicar o controlador PID para regular a velocidade em motores de corrente contínua. Além disso, será abordado o estudo e controle da posição do motor CC em um sistema de movimentação linear. Para alcançar esses objetivos, serão conduzidos experimentos utilizando o CLP e a IHM da Delta e seus softwares exclusivos, ISPsoft e DOPSoft. O intuito é realizar ensaios em malha aberta, seguida pela implementação do método de malha fechada, contribuindo assim para o desenvolvimento de um roteiro de ensaios utilizando os dispositivos da Delta, aproveitando os recursos já presentes na máquina industrial. Ao fim, serão disponibilizados os ensaios experimentais, comprovando as respostas adequadas com o bloco PID do CLP, mesmo nas aplicações em plantas de rápidas repostas.

Palavras-chave: Controle, PID, Motor CC, CLP, Delta.

ABSTRACT

The objective of this study is to apply the PID controller to regulate the speed of direct current (DC) motors. Furthermore, the study and control of the DC motor positioning in a linear motion system will be addressed. To achieve these objectives, experiments will be conducted using Delta's programmable logic controller (PLC) and human-machine interface (HMI), along with their proprietary software, ISPSOFT and DOPSOFT. The study aims to perform tests in an open-loop configuration, followed by the implementation of a closed-loop control method. This approach contributes to the development of a testing protocol using Delta's devices while utilizing the existing resources of the industrial machine. Ultimately, the experimental trials will be made available, demonstrating the appropriate responses of the PLC's PID block, even in applications involving fast-response plants

Keywords: Control, PID, DC Motor, PLC, Delta.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Encoder incremental e seus principais sinais de saída.....	17
Figura 2 - IHM Delta	20
Figura 3 - CLP Delta.....	22
Figura 4 - Conexões elétricas do CLP.....	23
Figura 5 - Esquema elétrico de conversão de 5V para 24V	23
Figura 6 - Esquema da ponte BTS7960 de 43A (esq.) e chave seletora (dir.)	23
Figura 7 – Pinagem do CI 74LS14	24
Figura 8 - Bloco PID	25
Figura 9 - Diagrama de blocos malha aberta	26
Figura 10 - Diagrama de blocos malha fechada.....	27
Figura 11 - Método de sintonia Ziegler-Nichols em malha fechada.....	28
Figura 12 - Motor a vazio acionado em 12v	30
Figura 13 - Curva em malha aberta.....	32
Figura 14 - Sintonia de controladores PID pelo método IMC	33
Figura 15 - Interface IHM velocidade	34
Figura 16 - Ensaio em malha fechada de 0 a 1000 RPM.....	35
Figura 17 - Ensaio em malha fechada de 0 a 500 RPM com perturbação	36
Figura 18 - Planta para controle de posição.....	37
Figura 19 - Ensaio em malha fechada.....	38
Figura 20 - Período crítico	39
Figura 21 - IHM controle de posição	41
Figura 22 - Curva em malha fechada de 0 a 12500 pulsos	42
Figura 23 - Conversor analógico de frequência para tensão.....	47
Figura 24 - Ensaio em malha fechada de 0 a 750 RPM.....	48
Figura 25 - Ensaio em malha fechada de 0 a 500 RPM.....	48
Figura 26 - Ensaio em malha fechada de 0 a 250 RPM.....	49
Figura 27 - Ensaio em malha fechada de 950 a 600 a 300 a 0 RPM	49
Figura 28 - Ensaio em malha fechada de 0 a 250 a 500 a 750 a 900 RPM (1).....	50
Figura 29 - Ensaio em malha fechada de 0 a 250 a 500 a 750 a 900 RPM (2).....	50
Figura 30 - Ensaio em malha fechada de 0 a 300 RPM com perturbação	51
Figura 31 - Ensaio em malha fechada a 750 RPM constante com perturbação	51
Figura 32 - Ensaio em malha fechada de 0 a 25000 pulsos	52
Figura 33 - Ensaio em malha fechada de 25000 a 0 pulsos	52

Figura 34 - Ensaio em malha fechada de 0 a 15000 pulsos com degraus de 5000 pulsos.....	53
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Modelos de CLP Delta e suas saídas	19
Tabela 2 - Relação razão cíclica x velocidade	31
Tabela 3 - Equações de Ziegler-Nichols para malha fechada.....	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CNC	Controle Numérico Computadorizado
CLP	Controlador Lógico Programável
IFSC	Instituto Federal de Santa Catarina
IHM	Interface Homem-Máquina
PID	Proporcional Integral Derivativo
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> (modulação por largura de pulso)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Justificativa	13
1.2	Definição do Problema	13
1.3	Objetivo Geral.....	13
1.4	Objetivos Específicos	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
2.1	Motores para controlar o posicionamento.....	15
2.2	Motores para controlar velocidade.....	15
2.3	Drivers de motores	16
2.3.1	Encoder absoluto e incremental.....	17
2.3.2	Tacômetro	18
2.3.3	Sensor de fim de curso	18
2.4	CLP	18
2.5	IHM	19
2.6	Controle de processos industriais	20
2.6.1	Malha aberta	20
2.6.2	Malha fechada.....	21
3	METODOLOGIA	22
3.1	CLP da DELTA.....	22
3.1.1	Conexões do CLP	22
3.1.2	Bloco PID	24
3.2	Controle de velocidade.....	25
3.2.1	Diagrama de blocos	26
3.2.2	Método IMC (Internal Model Control)	26
3.3	Controle de posição.....	27
3.3.1	Diagrama de blocos	27
3.3.2	Método Ziegler-Nichols	27
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	29
4.1	Controle de velocidade.....	29
4.1.2	Curva em malha aberta.....	31
4.1.3	Parâmetros de controle	32
4.1.4	Ensaio em malha fechada.....	33
4.1.5	Curva em malha fechada	34
4.2	Controle de posição.....	36
4.2.1	Ensaio em malha fechada.....	36
4.2.2	Parâmetros de controle	39
4.2.3	Curva em malha fechada	40
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	43
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	43
	APÊNDICE A – Conversor analógico de frequência para tensão	47
	APÊNDICE B – Ensaio em malha fechada velocidade	48
	APÊNDICE C – Ensaio em malha fechada posição	52

1 INTRODUÇÃO

O surgimento do motor elétrico marcou um ponto de virada crucial na história da tecnologia, desencadeando uma revolução que moldou o curso da sociedade moderna. No século XIX, inventores visionários como Michael Faraday e Thomas Davenport pavimentaram o caminho para a criação do motor elétrico, tornando capaz a conversão da energia elétrica em movimento mecânico. Essa inovação não apenas transformou a forma como máquinas e equipamentos eram alimentados, mas também desempenhou um papel fundamental na transição da sociedade industrial para a era da eletrificação. O motor elétrico impulsionou avanços em setores que vão desde a manufatura até o transporte, proporcionando eficiência e versatilidade sem precedentes.

A utilização do motor elétrico está bastante presente na automação industrial, tendo como um dos principais exemplos o motor de corrente contínua (CC), que desempenha um papel crucial devido à sua capacidade de oferecer um controle simples e preciso, de velocidade e posição. Esses motores são empregados em sistemas automatizados, como robôs industriais e máquinas CNC, devido à sua resposta dinâmica rápida e ajuste preciso de velocidade. A capacidade de inversão de sentido e a fácil implementação de sistemas de controle tornam os motores CC ideais para aplicações onde é essencial um desempenho preciso e com baixo custo, em relação aos demais servomotores.

Assim sendo, este projeto tem como objetivo utilizar os métodos de controladores PID para estimar a eficiência de acionamento dos motores e controlar corretamente a velocidade do motor a vazio, bem como seu posicionamento ao longo de uma guia linear, utilizando um *encoder* incremental a fim de otimizar a curva de resposta quando o motor for acionado até a posição desejada. Através dos testes que serão realizados em uma máquina projetada pela sétima fase da Engenharia Mecatrônica do IFSC, será possível provar que o bloco controlador do CLP não aumenta os custos e não prejudica seu desempenho na automação da máquina.

1.1 Justificativa

Na área de automação industrial, inúmeros processos estão ligados à precisão de posicionamento e à velocidade de movimento que uma máquina pode efetuar, e tão importante quanto chegar aos parâmetros desejados, é fazer isso com o menor custo possível. Para tal, é necessário pesquisar as diversas opções que existem no mercado e escolher a que se encaixa melhor para chegar ao objetivo final, as vezes sendo necessário excluir opções caras com qualidades inúteis e permitir peças de custo baixo com desvantagens que não influenciam no desempenho da máquina.

A fim de gerar resultados eficientes de controle de posicionamento e velocidade de maneira razoavelmente simples, robusta e de baixo custo, em relação ao que se costuma usar nos projetos mecatrônicos, este projeto visa utilizar o CLP da DELTA, o qual já possui parâmetros disponíveis para realizar o controle PID.

1.2 Definição do Problema

Em certos cenários, é crucial identificar os parâmetros de um motor em uma máquina específica. Isso não apenas facilita a análise de manutenção, mas também é vital durante sua operação. No entanto, é comum que os fabricantes industriais não forneçam informações detalhadas sobre parâmetros como velocidade, rotação e eficiência, mesmo que esses sejam importantes para avaliar se o motor está atingindo suas metas durante o uso. Buscando melhorar a operação ao controlar uma planta desconhecida, o projeto busca demonstrar estes parâmetros e oferecer possíveis mudanças futuras.

1.3 Objetivo Geral

A fim de gerar resultados eficientes de controle de posicionamento e velocidade de maneira razoavelmente simples, robusta e de baixo custo, em relação ao que costuma-se usar nos projetos mecatrônicos, este projeto visa utilizar o CLP da DELTA, o qual já possui parâmetros disponíveis para realizar o controle PID.

1.4 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos estão listados abaixo:

- a) desenvolver o posicionamento elétrico através de um circuito de comando PWM;
- b) desenvolver o acionamento da velocidade em dois sentidos através de um módulo didático;
- c) realizar a modelagem de velocidade do sistema e de posicionamento do motor CC através de ensaios;
- d) realizar as ligações elétricas, a comunicação e a integração do CLP para o funcionamento da máquina;
- e) definir os requisitos do sistema controlador PID de velocidade e posicionamento;
- f) documentar todos os gráficos, modelagens matemáticas e comparar os gráficos de respostas de acordo com os ajustes do controlador.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, encontram-se fundamentadas análises comportamentais do sistema. Serão discutidos diversos temas relevantes para o conhecimento técnico e aplicados ao longo da pesquisa. Também serão abordadas as técnicas de controle e projeto de controladores, motores para controle de posicionamento, tipos de sensores, *drivers* de motores, CLP, interface homem-máquina (IHM) além do princípio de funcionamento de um motor CC. No presente trabalho, as tecnologias empregadas serão analisadas, contextualizando-as e justificando as escolhas feitas para cada componente utilizado no protótipo didático deste estudo.

2.1 Motores para controlar o posicionamento

Com um motor CC com escovas para controlar o posicionamento em uma certa faixa de potência mecânica à 3000rpm, consegue-se com uma ponte H realizar o seu acionamento, sendo possível assim economizar no controlador digital e no *servodriver*.

Além da análise de torque e velocidade em alta velocidade, em algumas aplicações pode ser necessário um torque significativamente maior durante a partida. Os servomotores *Brushless* e os servo motores de corrente alternada (CA) conseguem atingir um pico de torque até três vezes maior do que o seu valor nominal, enquanto o motor de corrente contínua (CC) com escovas pode alcançar um pico de torque na partida até dez vezes maior em relação ao seu valor nominal.

Tirando proveito de ter um sistema de controle simplificado, o motor CC com escovas dispensa a necessidade de um *servodriver* para controlar a posição e velocidade. Até uma certa precisão requerida de posicionamento, é possível utilizar apenas uma ponte H para o controle do motor.

2.2 Motores para controlar velocidade

Para controlar a velocidade, geralmente são utilizados motores de indução para aplicações de alta potência e motores CC para aplicações de baixa potência. No caso de motores de indução trifásicos, o inversor de frequência é empregado para variar a

velocidade. Já para aplicações de baixa potência, utiliza-se motores CC, podendo ser com ou sem escovas, para ajustar a velocidade. Os *drivers spindle* são uma opção mais econômica em comparação com os *drivers* de posicionamento para motores CC, tanto com escovas quanto sem.

2.3 Drivers de motores

Para motores CC, existem dois tipos de *drivers*: de velocidade e de posição (step/dir). A escolha do *driver* depende da tecnologia empregada. Muitos *drivers* comerciais direcionados ao controle de velocidade não realizam o fechamento da malha, simplesmente executam o comando PWM sem compensação para possíveis perturbações. Neste trabalho, será feito o controle de velocidade em malha fechada para compensar essas perturbações.

Alguns equipamentos, como tornos, furadeiras e fresadoras, possuem o controle de variação de velocidade em malha aberta. Isso significa que, com o aumento do atrito durante as operações de usinagem, a velocidade é reduzida, porém, isso não afeta a qualidade do processo. Variações na velocidade de corte não impactam significativamente a qualidade da usinagem.

Em esteiras sincronizadas com várias estações de trabalho, é essencial um controle preciso de velocidade. Por exemplo, se houver mais peças ou peças mais pesadas na esteira, isso diminui a velocidade. Dependendo da quantidade de peças a serem produzidas, o controle de velocidade da esteira é ajustado em malha fechada para garantir precisão e sincronização com as outras estações de trabalho, mesmo diante de perturbações.

Quanto ao posicionamento dos motores, poderia-se simplesmente ligar e desligar a fonte de energia. No entanto, dependendo do redutor utilizado, o motor pode continuar girando um pouco após ser desligado. Por exemplo, em alguns portões, basta ligar e desligar a fonte de energia, pois não é necessária precisão. Por outro lado, em aplicações como usinagem CNC e *plotter*, é essencial a precisão do *encoder* do servo motor, que pode ter cerca de 2000 ou 4000 posições por rotação. Para aplicações que exigem uma precisão intermediária, é possível fechar a malha com um sensor de menor resolução.

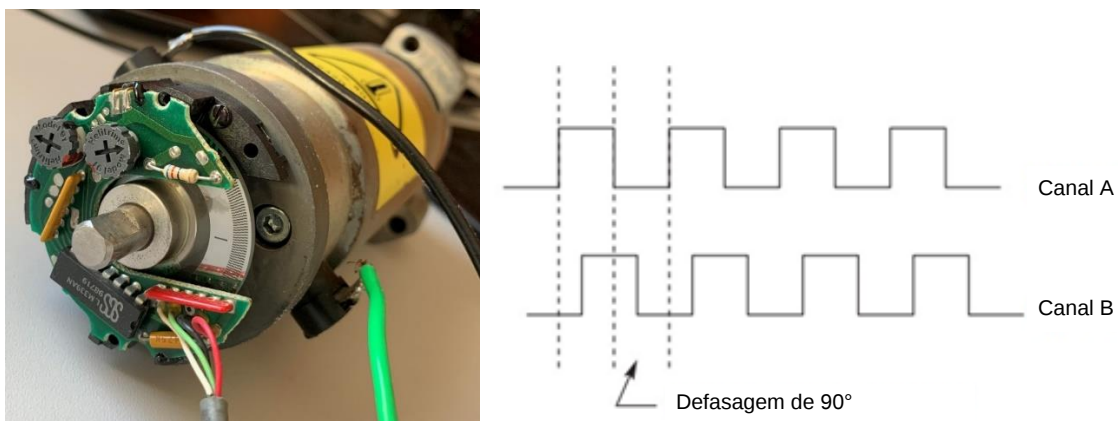
2.3.1 Encoder absoluto e incremental

Ambos os tipos de *encoders* têm suas vantagens e aplicações específicas, e a escolha entre eles depende das exigências do sistema em termos de precisão, custo e complexidade.

O *encoder* absoluto fornece uma leitura direta da posição atual do eixo, sem a necessidade de referências adicionais, considerando o giro em até uma volta. Ele gera um código único para cada posição angular ou linear possível, permitindo a determinação precisa da posição em qualquer momento. Isso o torna ideal para aplicações onde é essencial conhecer a posição exata, como em sistemas de controle de posicionamento de alta precisão, robótica industrial e máquinas CNC, porém seu custo é maior.

O *encoder* incremental fornece pulsos de saída que são contados para determinar a posição relativa do eixo em relação a uma referência inicial. Ele não fornece uma leitura direta da posição absoluta, mas sim uma contagem incremental dos movimentos do eixo. Para determinar a posição absoluta, é necessário inicializar o sistema a partir de uma posição conhecida. Os *encoders* incrementais, representado na Figura 1, são frequentemente utilizados em aplicações onde a precisão absoluta não é crítica, como em sistemas de controle de velocidade e posição em máquinas industriais, robótica móvel e sistemas de posicionamento de baixo custo.

Figura 1 - Encoder incremental e seus principais sinais de saída.



Fonte: Autor, 2024.

2.3.2 Tacômetro

Um tacômetro é um dispositivo crucial em aplicações industriais e automotivas, usado para medir a velocidade de rotação de um eixo. Existem diferentes tipos de tacômetros, como os mecânicos, ópticos, magnéticos e digitais. Os tacômetros mecânicos usam componentes mecânicos para acionar um contador ou mostrador analógico, enquanto os ópticos usam feixes de luz para medir a velocidade. Os magnéticos detectam alterações no campo magnético gerado pelo movimento do eixo, e os digitais utilizam sensores eletrônicos para medir a velocidade e exibem os resultados em uma tela digital.

2.3.3 Sensor de fim de curso

Os sensores de fim de curso são dispositivos fundamentais em sistemas mecânicos e elétricos, projetados para detectar a posição final de um objeto ou movimento de um mecanismo. Eles são frequentemente usados em portas automáticas, elevadores, máquinas industriais e robôs para garantir um funcionamento seguro e preciso.

Além disso, os fins de curso também podem ser empregados para estabelecer a posição inicial da ferramenta antes do início da usinagem. Por exemplo, ao carregar um programa CNC, a máquina pode mover a ferramenta para uma posição conhecida e utilizar os fins de curso para confirmar que a ferramenta está corretamente alinhada antes de iniciar o processo de usinagem.

2.4 CLP

CLPs são dispositivos fundamentais em automação industrial, executando sequências lógicas para controlar máquinas e processos automaticamente. Compostos por unidades de processamento, entradas e saídas, são programáveis e

versáteis. Proporcionam confiabilidade, modularidade e facilidade de manutenção. Amplamente empregados na indústria, melhoram a eficiência, qualidade e segurança dos processos.

Tabela 1 - Modelos de CLP Delta e suas saídas

Modelo CPU	I/Os	Portas (COM)	Expansão	Pulsos
DVP14SS211T	8ED/6SD	RS232/RS485	494 I/Os	4 x 10 kHz
DVP12SA211T	8ED/4SD	RS232/RS485	236 I/Os	2 x 100 kHz
DVP12SE11T/R	8ED/4SD	Ethernet/RS485	236 I/Os	2 x 100 kHz
DVP20SX211T/R	8ED/6SD	USB/RS232/RS485	230 I/Os	2 x 100 kHz
DVP28SV11T/R	16ED/12SD	RS232/RS485	512 I/Os	4 x 200 kHz
DVP10MC	Motion Control	RS485	480 I/Os	18 eixos

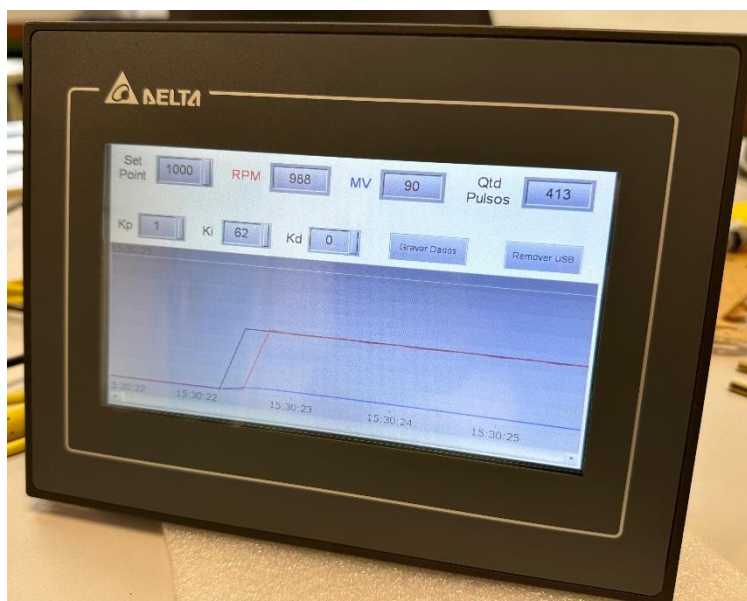
Fonte: Autor, 2024.

O CLP Delta DVP14SS211T possui 8 entradas digitais e 6 saídas digitais, como mostrado na Tabela 1. Suas portas de comunicação RS-232 e RS-485 integradas facilitam a integração com outros dispositivos e sistemas. Equipado com uma memória de programa de 8K *steps*, permite a implementação de lógica de controle complexa. Funcionando com uma fonte de alimentação de 24VDC padrão, é adequado para ambientes industriais, pois tem suporte para IHM.

2.5 IHM

As Interfaces Homem-Máquina (IHMs), mostrada na Figura 2, desempenham um papel fundamental na automação industrial, facilitando a interação entre operadores e sistemas automatizados. Elas consistem em dispositivos de tela sensível ao toque ou painéis de controle que fornecem uma interface intuitiva para monitorar e controlar processos industriais. As IHMs exibem informações em tempo real, como *status* de máquinas, dados de produção e alarmes de falhas, permitindo aos operadores tomarem decisões informadas e responderem rapidamente aos eventos.

Figura 2 - IHM Delta



Fonte: Autor, 2024.

2.6 Controle de processos industriais

O controle de processos industriais é um conjunto de técnicas e sistemas utilizados para monitorar e ajustar automaticamente variáveis como velocidade e posição. Seu objetivo é fazer esta operação da maneira mais eficiente possível. Esse controle pode ser realizado por meio de sensores, controladores lógicos programáveis (CLPs) e softwares de automação, permitindo uma operação estável e otimizada.

2.6.1 Malha aberta

O controle em malha aberta é um modelo onde as ações de controle são pré-determinadas sem considerar o *feedback* do sistema em tempo real. Nele, o sinal de entrada é enviado para o atuador sem que se receba o retorno da variável de saída para ajustar a ação do controle.

Uma das maneiras de se implementar o controle em malha aberta é por meio de um controle PID (Proporcional-Integral-Derivativo), que consiste em 3 termos para ajustar o sinal de controle. O termo proporcional reage ao erro atual entre a variável de saída e a desejada, o termo integral corrige o erro acumulado ao longo do tempo

e o termo derivativo antecipa as tendências de erro futuro. Juntos, esses três termos trabalham para ajustar a saída do controlador e manter o sistema o mais próximo possível do ponto de ajuste desejado.

O controle PID em malha aberta é comumente utilizado em sistemas onde o comportamento dinâmico do processo é conhecido e estável, mas onde pequenas correções são necessárias para manter o desempenho ideal. Por exemplo, em sistemas de posicionamento de atuadores em um robô industrial, o controle PID em malha aberta pode ser empregado para garantir uma movimentação suave e precisa, mesmo em condições de carga variável.

Em resumo, o controle em malha aberta se mostra eficiente em ambientes previsíveis, como linhas de produção estáveis, mas falha em lidar com mudanças imprevistas. O que torna o controle em malha fechada mais comum por sua capacidade corrigir estas deficiências.

2.6.2 Malha fechada

O controle em malha fechada é um método de controle que utiliza *feedback* do sistema para fazer ajustes em tempo real. Em contraste com o controle em malha aberta, onde as ações de controle são determinadas apenas com base em modelos e previsões, no controle em malha fechada, o desempenho do sistema é continuamente monitorado e corrigido com base nas informações obtidas.

Entre as opções de controle em malha fechada tem-se o PID, no qual os três termos combinados trabalham em conjunto para ajustar a saída do controlador e manter o sistema o mais próximo possível do *setpoint* desejado, minimizando o erro e garantindo um desempenho estável e preciso.

O PID em malha fechada é amplamente utilizado em uma variedade de aplicações, incluindo controle de temperatura, controle de velocidade de motores, sistemas de posicionamento e muito mais, devido à sua simplicidade, eficácia e capacidade de adaptação a diferentes condições de operação.

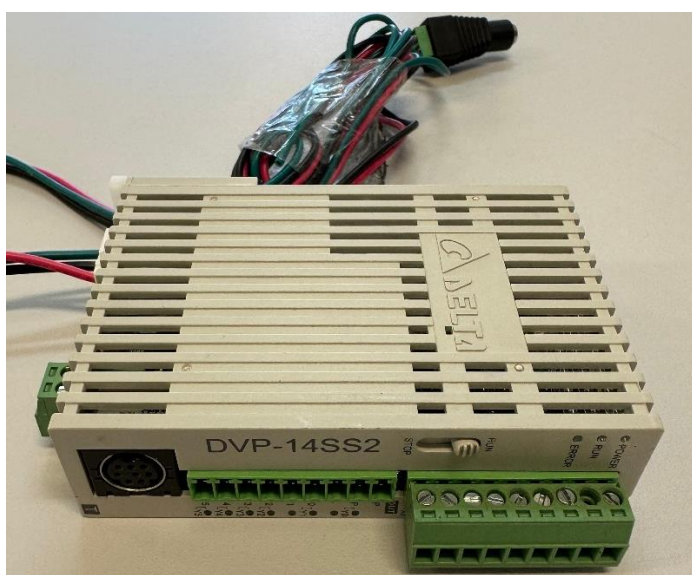
3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentados os métodos utilizados para a realização do projeto, e explicados com dados o motivo por que estes foram os escolhidos.

3.1 CLP da DELTA

A escolha do CLP da Delta (Figura 3) se mostra a mais indicada por ser um modelo robusto com boa velocidade de processamento e capacidade de entradas e saídas, além de possuir um software gratuito intuitivo. Tudo isso por um valor razoável, bem abaixo dos modelos mais consagrados.

Figura 3 - CLP Delta

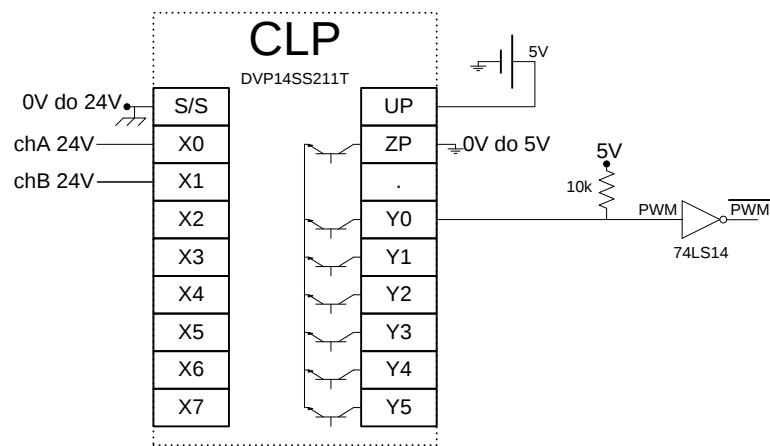


Fonte: Autor, 2024.

3.1.1 Conexões do CLP

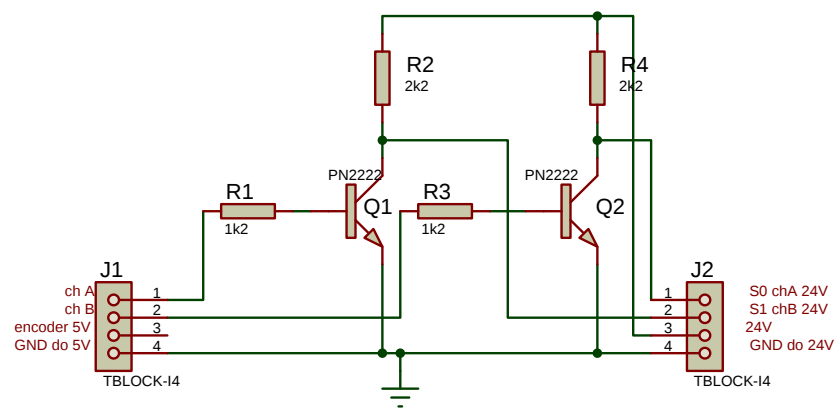
Considerando o CLP modelo DVP14SS211T da Delta para o controle de velocidade e posição, foram realizadas as conexões elétricas apresentadas na Figura 4. O CLP é alimentado em 24V. Foram utilizadas as entradas X0 e X1 para ler os sinais em quadratura do encoder incremental. Porém, o CLP só capta sinais de entrada em 24V. Então, desenvolveu-se a placa de circuito impresso (PCI) com esquema elétrico da Figura 5 para converter os sinais 5V do encoder do motor CC para sinais 24V para o CLP.

Figura 4 - Conexões elétricas do CLP



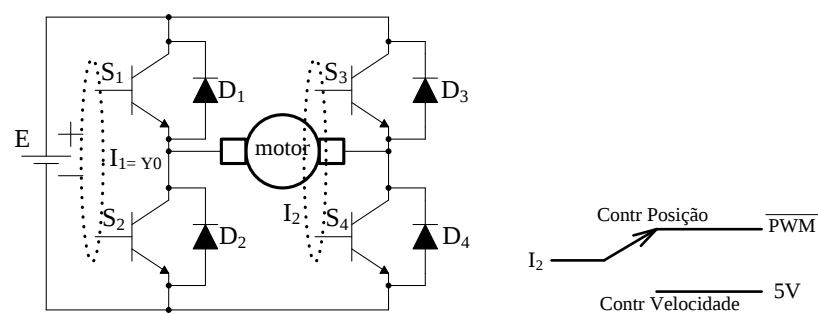
Fonte: Autor, 2024.

Figura 5 - Esquema elétrico de conversão de 5V para 24V



Fonte: Autor, 2024.

Figura 6 - Esquema da ponte BTS7960 de 43A (esq.) e chave seletora (dir.)

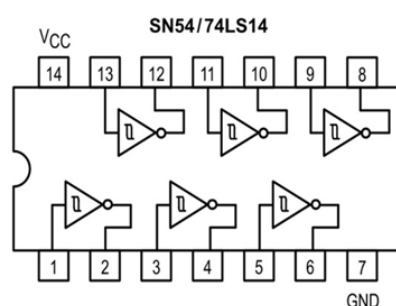


Fonte: Autor, 2024.

Os controladores utilizados no Ladder acionam a saída Y0 com sinal PWM. O controlador de velocidade utiliza a ponte H, com comando para apenas um transistor conduzir, colocando a chave seletora da Figura 6 na posição 5V. Assim, com razão cíclica 0% a velocidade é zero e com razão cíclica 100% a velocidade é máxima.

O controlador de posição utiliza a ponte H por completo, colocando a chave seletora da Figura 6 na posição PWM complementar. Assim, com razão cíclica 0% a velocidade é máxima sentido anti-horário, com razão cíclica 50% o motor para com torque de travamento e com razão cíclica 100% a velocidade é máxima no sentido horário. No controle de posição é possível inverter o sentido de giro e parar com precisão na posição comandada. O sinal PWM complementar foi gerado utilizando o CI 74LS14, mostrado na Figura 7.

Figura 7 – Pinagem do CI 74LS14



Fonte: Hitachi, 2024.

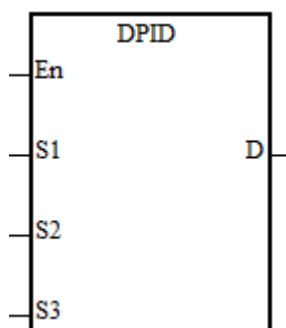
3.1.2 Bloco PID

O bloco PID (Figura 8) nos CLPs da Delta implementa um algoritmo utilizado para regular variáveis em sistemas industriais, como temperatura, pressão, velocidade e posição. Este bloco ajusta a saída do sistema com base na diferença entre o valor desejado e o valor atual visando minimizar o erro ao longo do tempo.

O software da Delta disponibiliza 2 versões de bloco PID: 16 ou 32 bits, sendo a última nomeada de DPID. Esta foi a escolhida para o projeto pois o contador responsável pela leitura de dados do encoder gera dados em 32 bits.

Os parâmetros de entrada S1, S2 e S3 indicam respectivamente o *setpoint*, o valor atual e os parâmetros do PID, que ocupam uma sequência de 21 registradores consecutivos, onde S3 é o tempo de amostragem, S3+1 o ganho proporcional, S3+2 o integral e S3+3 o derivativo. O registrador S3+4 indica o modo de controle, enquanto o S3+5,6 é o erro máximo tolerado. O parâmetro S3+7,8 define o valor máximo da variável de saída e S3+9,10 o valor mínimo. Já o parâmetro de saída D representa a variável manipulada, a qual ajusta o atuador do sistema.

Figura 8 - Bloco PID



Fonte: ISPSOft user manual, 2024.

3.2 Controle de velocidade

Um controlador de velocidade tem a função de ajustar e manter a velocidade de operação de equipamentos e máquinas de forma precisa e estável. Com o auxílio de sensores que monitoram a velocidade do equipamento ele é capaz de ajustar os comandos enviados ao motor, para mantê-la constante, mesmo diante de variações de carga ou outros fatores externos.

3.2.1 Diagrama de blocos

O bloco de controle em malha aberta está no diagrama abaixo, representado pela Figura 9, onde o processo ocorre sem controle do sinal, dessa forma teremos os parâmetros que devemos melhorar o sinal e o comportamento.

Figura 9 - Diagrama de blocos malha aberta



Fonte: Autor, 2024.

3.2.2 Método IMC (Internal Model Control)

O método IMC é uma abordagem de controle de processos que se baseia na ideia de que um controlador deve ter um modelo interno do sistema que está sendo controlado. No IMC, o controlador utiliza um modelo do processo para prever a resposta do sistema a diferentes entradas, permitindo uma compreensão mais profunda do comportamento do processo.

O controlador compara a saída do processo com a saída desejada e ajusta a entrada de controle para minimizar o erro, garantindo que o sistema opere conforme as especificações. Como o controlador possui um modelo, é capaz de ajustar suas ações mesmo diante de mudanças nas características do sistema.

Em suma, o método IMC se destaca por proporcionar maior precisão, adaptabilidade e estabilidade no controle de processos, tendo como principal vantagem, a praticidade em sua aplicação.

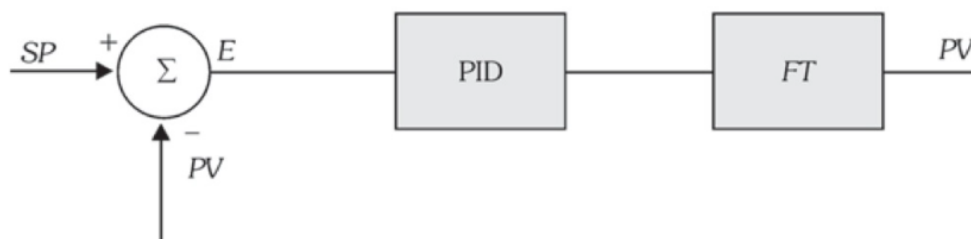
3.3 Controle de posição

O controle de posição é utilizado para regular com precisão o movimento de uma planta. Utilizando-se de sensores, servomotores e controladores eletrônicos, ele consegue ajustar continuamente a posição conforme os parâmetros desejados, garantindo exatidão e repetibilidade nas operações.

3.3.1 Diagrama de blocos

O bloco de controle em malha fechada é mostrado abaixo na Figura 10, onde o processo ocorre sem controle do sinal, dessa forma obtém-se os parâmetros que devem melhorar o sinal e o comportamento do sistema.

Figura 10 - Diagrama de blocos malha fechada



Fonte: Adaptado de FRANCHI, 2011.

3.3.2 Método Ziegler-Nichols

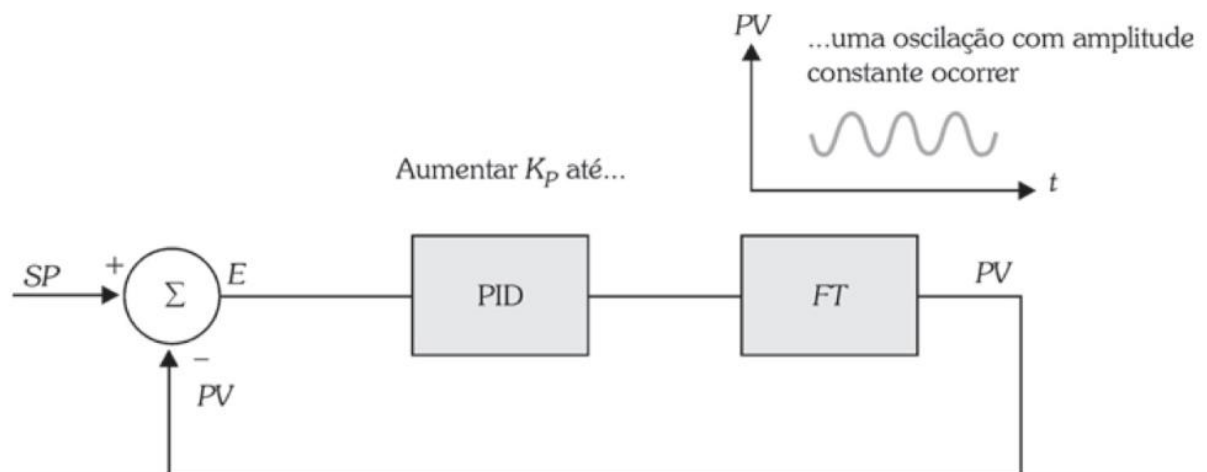
O método de Ziegler-Nichols é uma técnica empírica utilizada para ajustar os parâmetros de controladores PID e melhorar o desempenho de sistemas de controle. Ele pode ser aplicado tanto em malha aberta quanto em malha fechada, sendo o último o mais comum e o escolhido para este projeto.

A aplicação deste método, ilustrada na Figura 11, constitui-se em testar o sistema a fim de obter os parâmetros críticos. Em seguida, com o auxílio de uma tabela, esses parâmetros são usados para calcular os ganhos do controlador PID. Por

fim, os ganhos são ajustados até que o desempenho desejado seja alcançado no sistema em malha fechada.

A sua utilização se caracteriza pela facilidade de implementação, não necessitando grandes esforços na modelagem matemática. Em contrapartida, os sistemas controlados por este método costumam ter uma resposta rápida, mas oscilatória, levando a um alto valor de sobressinal. Como resultado destas características, é comum a necessidade de refinamentos nos parâmetros de controle para que se chegue em uma resposta satisfatória do sistema.

Figura 11 - Método de sintonia Ziegler-Nichols em malha fechada



Fonte: FRANCHI, 2011.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os ensaios em malha aberta e fechada dos controladores de velocidade e posição junto com uma análise dos resultados encontrados, a fim de sintetizar e apresentar as principais características dos testes.

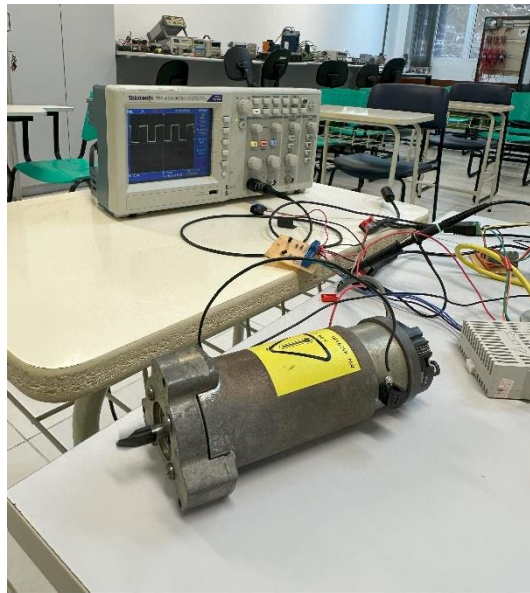
4.1 Controle de velocidade

O desenvolvimento do controlador de velocidade se iniciou com o ensaio em malha aberta, para encontrar a relação Razão cíclica x Velocidade. Em seguida foi gerada a curva em malha aberta, a fim de encontrar os parâmetros de controle e poder realizar os ensaios em malha fechada, que culminam no resultado final com as curvas em malha fechada.

4.1.1 Ensaio em malha aberta

No ensaio em malha aberta foram obtidos os valores da relação entre Razão Cíclica e Velocidade em rpm. Para conseguir a aferição dos dados que possibilitasse a execução do ensaio em malha aberta, utilizou-se um encoder com resolução de 250 pulsos por rotação acoplado ao motor CC alimentado com uma tensão de 12V (Figura 12), utilizando como *driver* apenas 1 transistor, ao invés de usar a ponte H completa. Utilizando-se de um timer que se auto reseta a cada 100ms e guardando esse valor em uma memória do CLP, foi possível calcular a quantidade de pulsos gerados durante este intervalo de tempo e consequentemente a velocidade em rpm.

Figura 12 - Motor a vazio acionado em 12v



Fonte: Autor, 2024.

A fim de converter a quantidade de pulsos gerados pelo encoder para rotações por minuto (rpm), foi feito o cálculo indicado nas expressões a seguir.

$$Pms \times 10 = Ps \rightarrow Ps \times 60 = Pm \rightarrow Pm \div Re = \mathbf{Rpm}$$

Onde:

Pms – Quantidade de pulsos geradas em 100ms

Ps – Quantidade de pulsos geradas em 1s

Pm – Quantidade de pulsos por minuto

Re – Resolução do encoder

Rpm – Quantidade de rotações por minuto

Feita a conversão foi possível aferir qual a velocidade do motor em relação a variação da razão cíclica conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Relação razão cíclica x velocidade

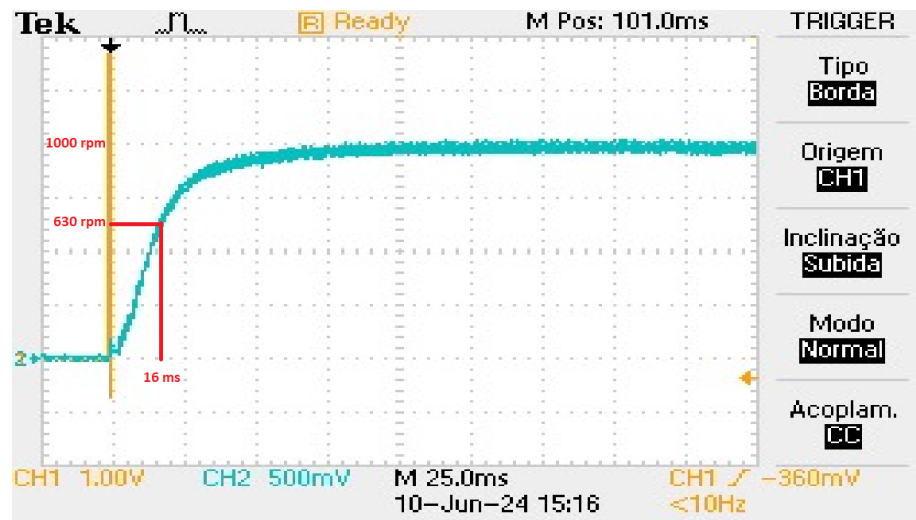
Razão Cíclica (%)	Velocidade (rpm)	Razão Cíclica (%)	Velocidade (rpm)
0	0	60	605
20	175	65	660
25	230	70	710
30	285	75	760
35	340	80	815
40	395	85	865
45	450	90	915
50	500	95	965
55	555	100	1010

Fonte: Autor. 2024.

4.1.2 Curva em malha aberta

O controle de velocidade do protótipo didático utiliza como sensor apenas 1 encoder de 24v e a leitura da velocidade é feita diretamente deste encoder para o CLP, e atualizada a cada 0,1s. Assim, o sistema didático tem esta limitação na taxa de atualização da leitura. O ensaio em malha aberta mudando a razão cíclica de 0% a 100% possui uma constante de tempo na resposta de 0,016s, o que inviabilizaria o sistema de sensoriamento original do kit didático. Assim, apenas para obtenção da modelagem matemática utilizou-se um circuito de sensor analógico adicional com o intuito de gerar a curva em malha aberta mostrada na Figura 13. No kit didático este sensor não será mais utilizado no fechamento da malha, reduzindo o número de componentes e aumentando a confiabilidade do sistema, utilizando apenas componentes robustos. O circuito elétrico do sensor analógico adicional está mostrado no APÊNDICE A – Conversor analógico de frequência para tensão.

Figura 13 - Curva em malha aberta



Fonte: Autor, 2024.

4.1.3 Parâmetros de controle

Utilizando o método IMC para fazer a sintonia do controlador, foi feita a escolha do modelo que melhor se encaixa para a planta proposta, o qual está destacado em vermelho na Figura 14.

Figura 14 - Sintonia de controladores PID pelo método IMC

Modelo $\tilde{G}$	K_c	T_i	T_d
$\frac{K_i}{s}$	$\frac{1}{K_i \cdot \tau_c}$	∞	0
$\frac{K_i \cdot e^{-\theta \cdot s}}{s}$ para $e^{-\theta \cdot s} \cong 1 - \theta \cdot s$	$\frac{2 \cdot \tau_c + \theta}{K_i \cdot (\tau_c + \theta)^2}$	$2 \cdot \tau_c + \theta$	0
$\frac{K_i \cdot e^{-\theta \cdot s}}{s}$ para $e^{-\theta \cdot s} \cong \frac{1 - \frac{\theta \cdot s}{2}}{1 + \frac{\theta \cdot s}{2}}$	$\frac{2 \cdot \tau_c + \theta}{K_i \cdot \left(\tau_c + \frac{\theta}{2} \right)^2}$	$2 \cdot \tau_c + \theta$	$\frac{\tau_c \cdot \theta + \frac{\theta^2}{4}}{2 \cdot \tau_c + \theta}$
$\frac{K}{\tau \cdot s + 1}$	$\frac{\tau}{K \cdot \tau_c}$	τ	0

Fonte: Adaptado de GARCIA, 2017.

Com os dados adquiridos no ensaio em malha aberta e com o modelo de controlador escolhido, foi possível calcular os ganhos proporcional (K_c), integral (K_i) e derivativo (K_d).

$$\text{Ganho (K)} = 10$$

$$\text{Theta } (\theta) = 0,005s$$

$$\text{Tau } (\tau) = 0,016s$$

$$T_i = \tau = 0,016s$$

$$K_c = \frac{1}{K} = 0,1$$

$$K_i = \frac{K_c}{T_i} = 6,25$$

4.1.4 Ensaio em malha fechada

A fim de testar os parâmetros definidos nos ensaios em malha aberta e validar o funcionamento do controlador, faz-se o ensaio em malha fechada. Na realização destes testes pode-se realizar pequenos ajustes nos ganhos para chegar a um controlador mais eficiente.

Neste ensaio, além do motor a vazio, utilizou-se um outro motor CC funcionando como gerador em curto circuito, acoplado para simular uma perturbação

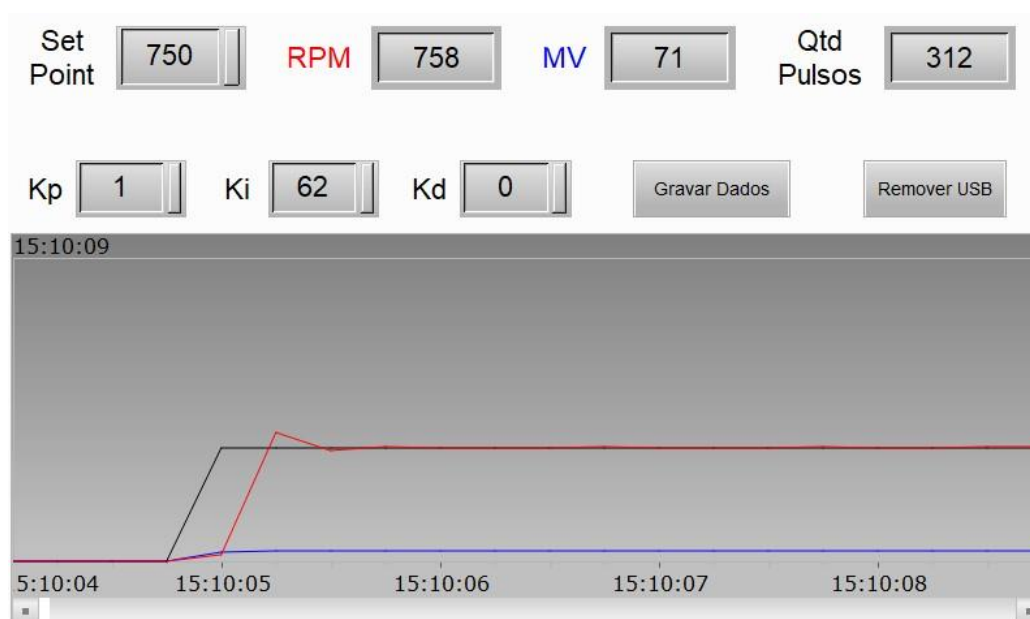
em degrau com torque fixo no sistema. Para testar o erro e rapidez de resposta do controlador, funcionando como uma bancada didática de controle.

Para a realização do ensaio foram utilizados os parâmetros encontrados na seção 4.1.3. Como o programa ISPSOft só aceita números inteiros para os parâmetros do bloco PID, o valor utilizado para o ganho proporcional foi $K_c = 1$ e ,para manter a proporção em relação aos parâmetros calculados, o ganho integral utilizado foi $K_i = 62$. O valor máximo de erro tolerado para este ensaio foi de ± 1 rpm e o sobressinal máximo foi de 7,5%.

4.1.5 Curva em malha fechada

A aquisição dos dados foi feita através da IHM (Figura 15) utilizando um *pen drive*, que guarda os dados em um formato compatível com o programa Excel. A frequência de amostras conseguida no dispositivo de saída, que foram utilizadas na modelagem foi de aproximadamente 4 amostras por segundo.

Figura 15 - Interface IHM velocidade

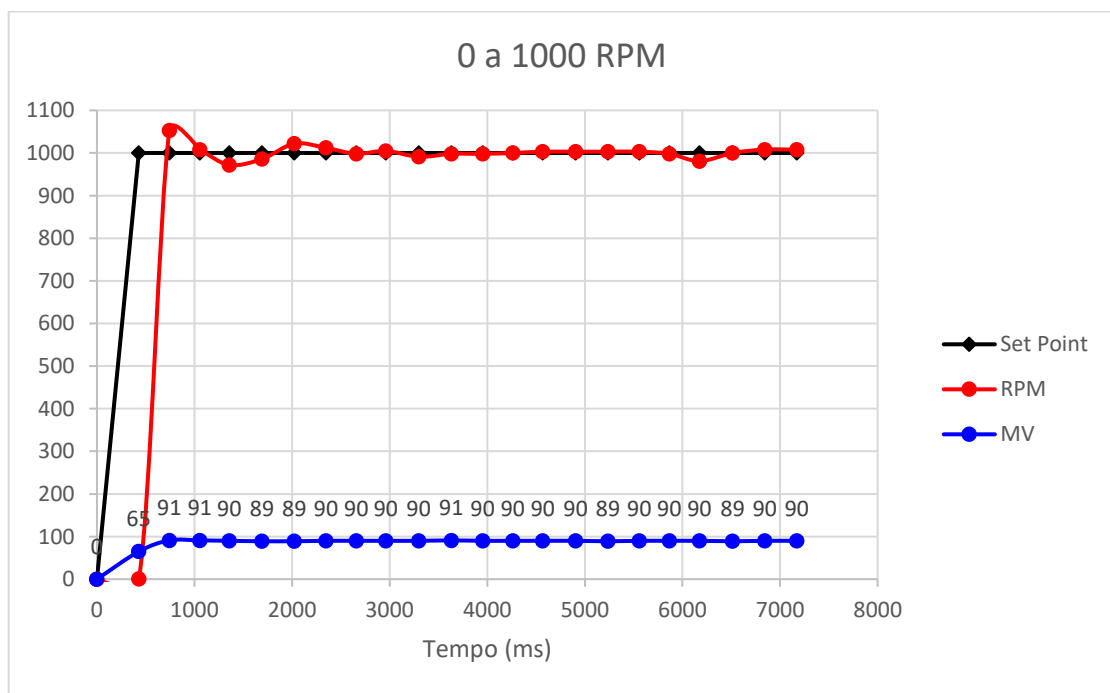


Fonte: Autor, 2024.

Foram feitos vários ensaios em diversas faixas de velocidade, apresentados no APÊNDICE B – Ensaio em malha fechada velocidade, a fim de comprovar o funcionamento do controlador. Com a ferramenta de aquisição utilizada foi possível gerar diferentes gráficos, como mostrado na Figura 16, que demonstram a variação da velocidade (RPM) e da variável de controle (MV), em relação ao tempo conforme a variação do *setpoint*, e na Figura 17 que mostra a atuação do controlador perante uma perturbação.

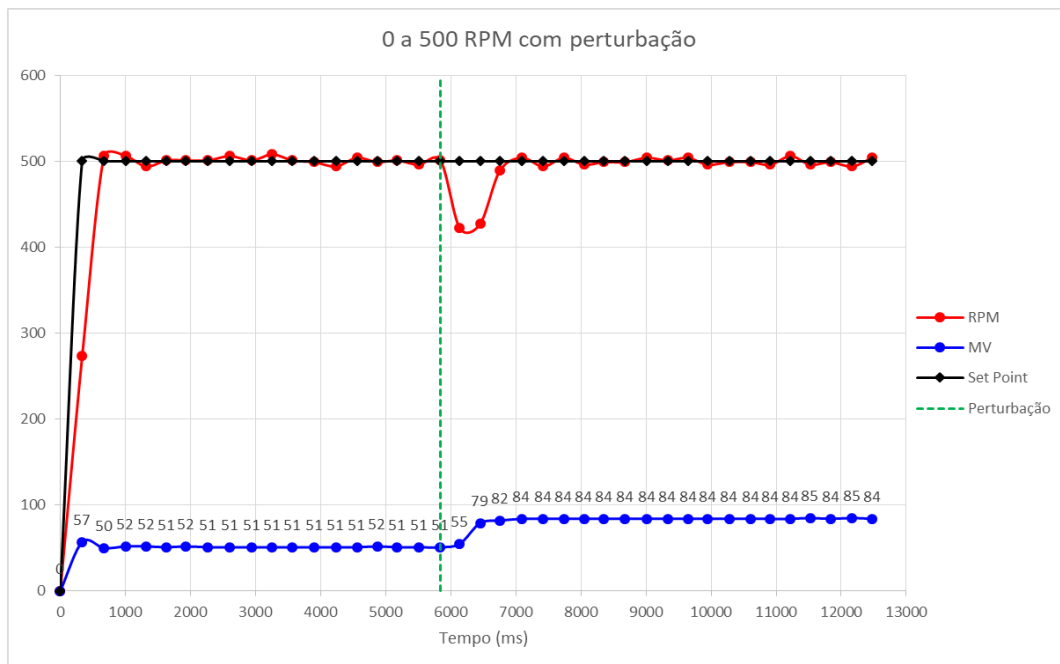
Através dos ensaios comprovou-se que com os ganhos utilizados ($K_p = 1$ e $K_i = 62$) obteve-se um controlador com comportamento satisfatório que respeitou o limite de sobressinal estabelecido, não sendo necessário fazer mais ajustes nestes parâmetros.

Figura 16 - Ensaio em malha fechada de 0 a 1000 RPM



Fonte: Autor, 2024.

Figura 17 - Ensaio em malha fechada de 0 a 500 RPM com perturbação



Fonte: Autor, 2024.

4.2 Controle de posição

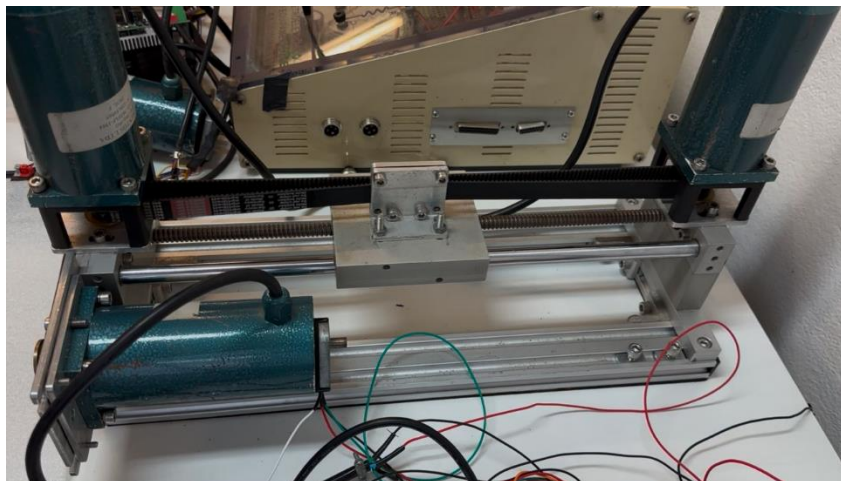
O desenvolvimento do controlador de posição se iniciou com o ensaio em malha fechada, a fim de encontrar os parâmetros de controle e poder gerar os gráficos das curvas em malha fechada, os quais mostram o comportamento do controlador.

4.2.1 Ensaio em malha fechada

A planta utilizada no ensaio em malha fechada para calcular o controlador de posição (Figura 18) constitui-se de um motor CC, alimentado com uma tensão de 12 V, aliado a um encoder acoplado com resolução de 400 pulsos por rotação. O motor gira para ambos os lados um fuso que movimenta um carrinho, levando-o de uma ponta à outra do eixo. Para isto, diferentemente do controlador de velocidade, foi utilizado a ponte H completa que permite parar o motor com a razão cíclica em 50% e alternar o sentido de giro quando a razão cíclica fica abaixo ou acima deste valor. O percurso completo do carrinho de uma ponta à outra contempla, aproximadamente,

25000 pulsos do encoder, sendo este dado utilizado como medida de distância no ensaio.

Figura 18 - Planta para controle de posição



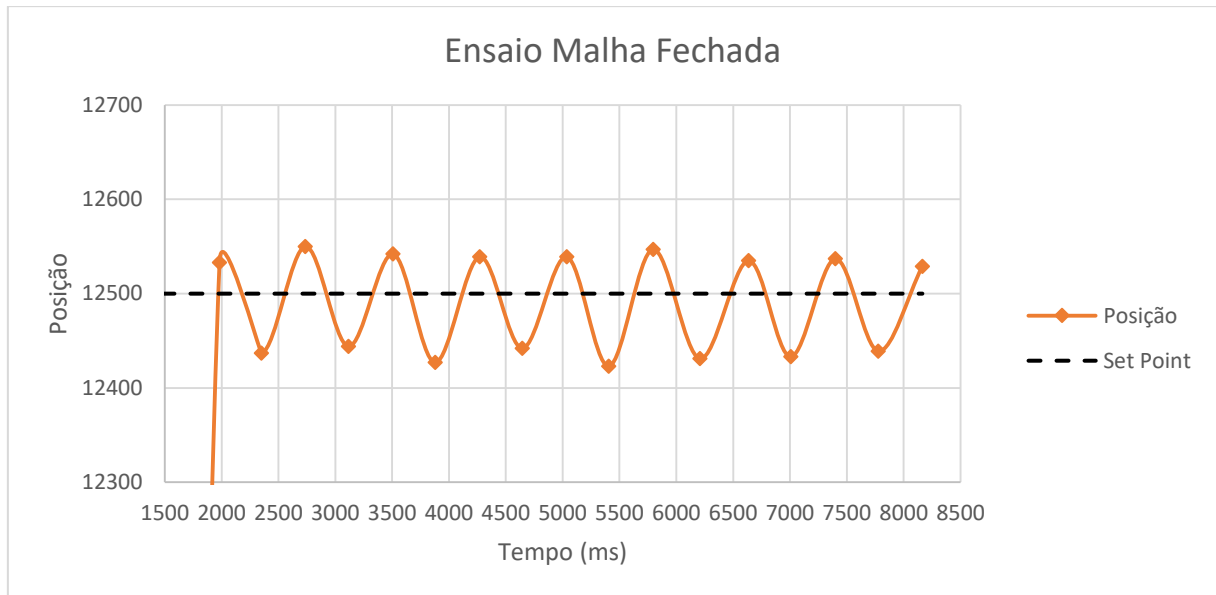
Fonte: Autor, 2024.

Na realização do ensaio, apresentado mais abaixo na Figura 19, utilizou-se o método de Ziegler-Nichols do ganho crítico, o qual se baseia em encontrar o ganho crítico do sistema e ajustar os parâmetros do controlador a partir dele.

Para realizar o ensaio, é feito o controle do sistema utilizando-se apenas ganho proporcional (K_p) e zerando os ganhos integral (K_i) e derivativo (K_d). O ganho proporcional é aumentado até que o sistema produza uma resposta harmônica, ou seja, oscile continuamente sem aumentar nem diminuir de amplitude.

Ao chegar a um valor de K_p que satisfaça o comportamento desejado, este passa a ser denominado ganho crítico (K_{cr}), e o período de um ciclo completo das oscilações é chamado de P_{cr} .

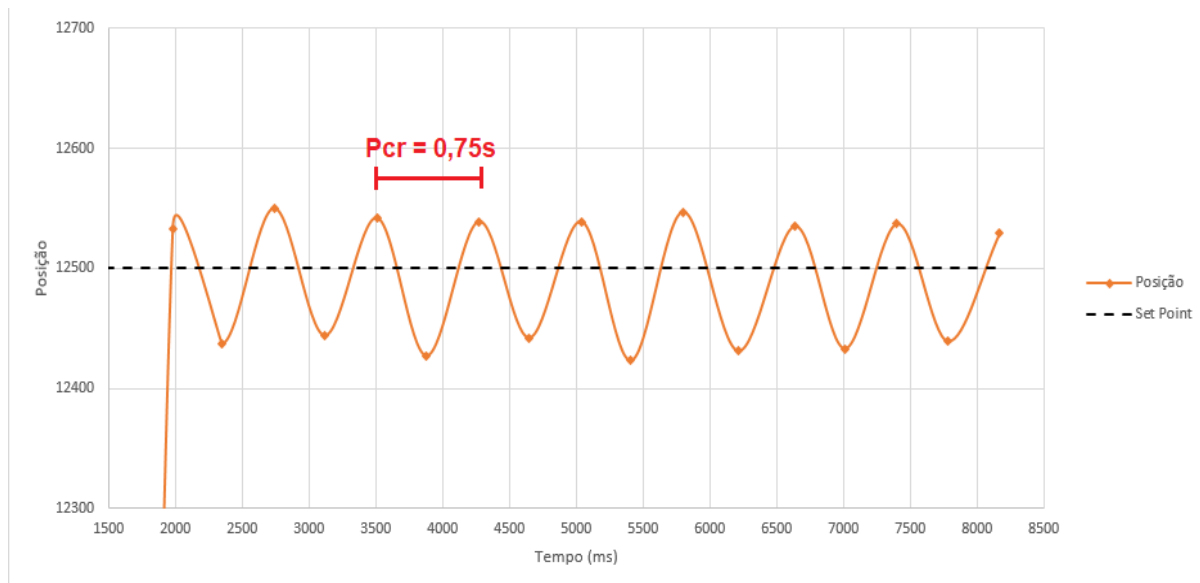
Figura 19 - Ensaio em malha fechada



Fonte: Autor, 2024.

Utilizando a aquisição de dados diretamente da IHM via *pen drive*, deu-se início ao ensaio. Para obter os parâmetros, zerou-se os ganhos integral e derivativo, e definiu-se o valor de $K_p = 1$, conforme indica o método de controle utilizado. Foi escolhido a posição de 12500 para realizar o ensaio pois este valor representa o ponto médio da distância total da planta. Como o sistema não gerou a curva de resposta esperada, foi-se aumentando o ganho K_p progressivamente até alcançar o comportamento desejado. O valor de K_p que gerou a oscilação constante foi de 80, sendo este então o valor do ganho crítico (K_{cr}). Analisando a curva gerada verificou-se que o período crítico (P_{cr}) encontrado foi de 0,75s, conforme mostrado na Figura 20.

Figura 20 - Período crítico



Fonte: Autor, 2024.

4.2.2 Parâmetros de controle

Com os valores de K_{cr} e P_{cr} definidos, pôde-se calcular os valores dos ganhos que seriam utilizados para iniciar os testes do controlador de posição. Para isso consultou-se a tabela de equações de Ziegler-Nichols, mostrada a seguir na Tabela 3.

Tabela 3 - Equações de Ziegler-Nichols para malha fechada

Tipo de controlador	K_P	T_I	T_D
P	$0.5 \cdot K_{cr}$	∞	0
PI	$0.45 \cdot K_{cr}$	$\frac{1}{1.2} \cdot P_{cr}$	0
PID	$0.6 \cdot K_{cr}$	$0.5 \cdot P_{cr}$	$0.125 \cdot P_{cr}$

Fonte: Adaptado de FRANCHI, 2011.

Primeiramente, foi feito um teste utilizando o controlador PI. Assim sendo, os valores de K_p e K_i foram calculados utilizando as fórmulas indicadas na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** conforme mostrado abaixo:

$$K_p = 0,45.K_{cr} \rightarrow K_p = 0,45.80 \Rightarrow K_p = 36$$

$$T_i = \frac{1}{1,2}.P_{cr} \rightarrow T_i = \frac{1}{1,2}.0,75 \Rightarrow T_i = 0,62s$$

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} = \frac{36}{0,62} \Rightarrow K_i = 58$$

Calculados os valores, iniciou-se o teste em bancada, com o auxílio do qual identificou-se que o controlador encontrado não funciona de maneira satisfatória, tendo uma resposta brusca e pouco precisa.

Sendo assim, procedeu-se a fazer ajustes nos ganhos para, primeiramente, deixar o controlador mais suave. Para isso, o valor de K_p foi sendo reduzido progressivamente, chegando ao comportamento esperado quando o mesmo atingiu o valor de 10.

Em seguida, iniciou-se o ajuste no K_i a fim de aumentar a precisão no posicionamento do sistema. O ganho integral foi sendo reduzido gradativamente, resultando em um funcionamento satisfatório quando utilizado o valor de 20.

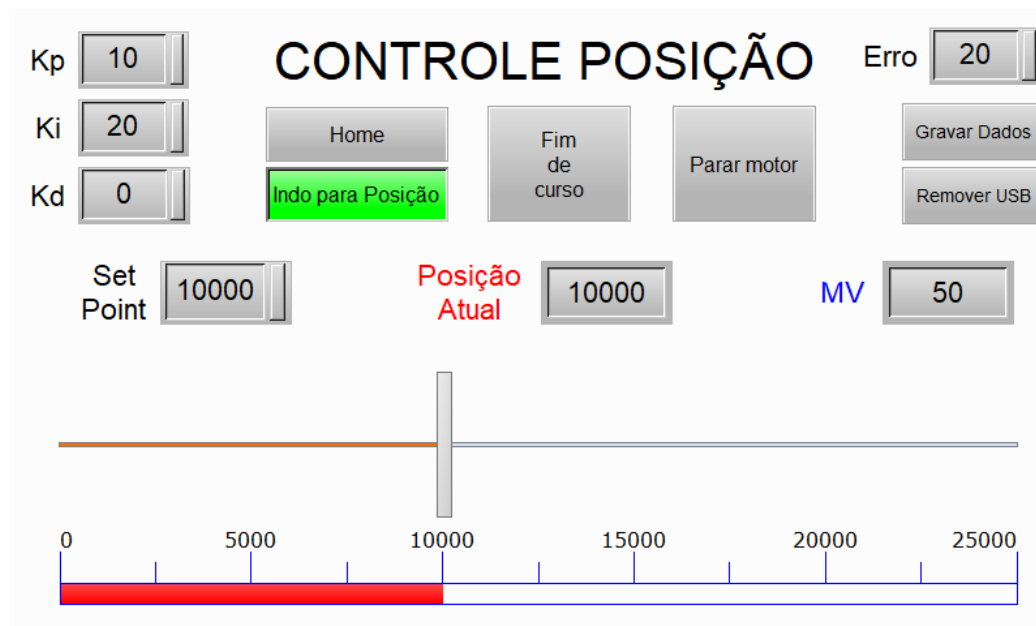
Definidos os ganhos, partiu-se para um novo teste em malha fechada, o qual demonstrou que com estes valores o controlador executa sua função da maneira correta. O valor máximo de erro tolerado foi de ± 20 pulsos.

4.2.3 Curva em malha fechada

Assim como no controle de velocidade, a aquisição de dados foi feita pela IHM (Figura 21) utilizando um *pen drive* para guardar os dados em um formato compatível

com o programa Excel. A frequência de amostras conseguida foi de uma amostra a cada 0,4s, aproximadamente.

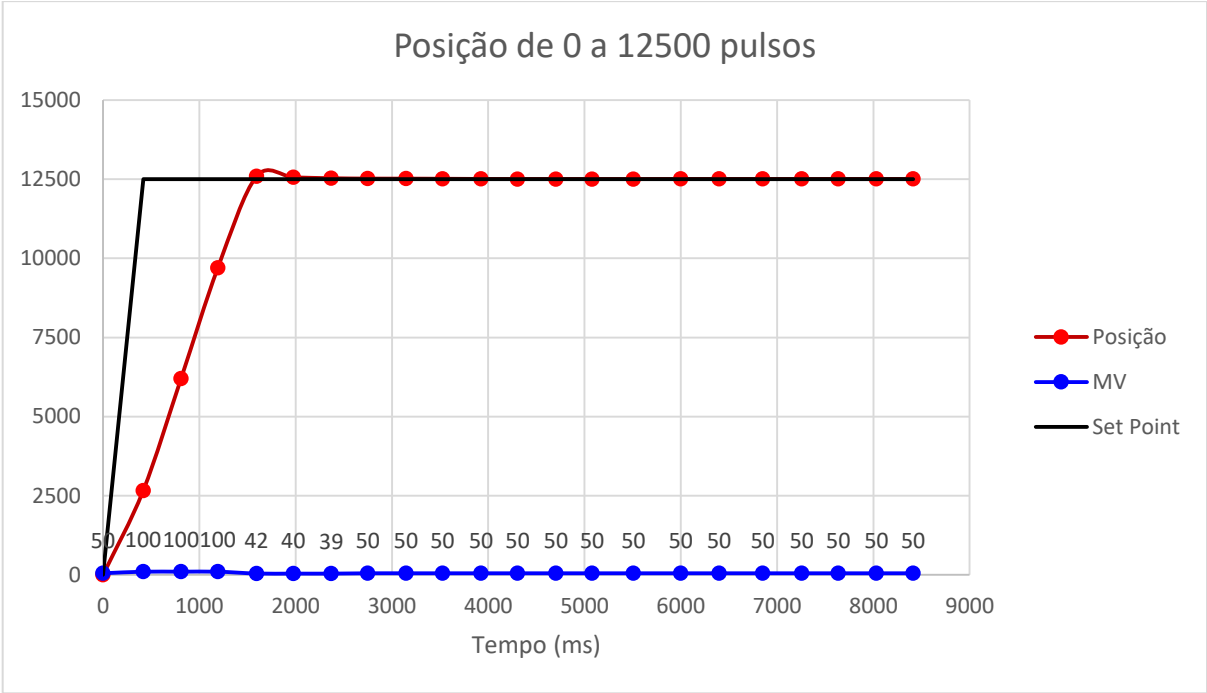
Figura 21 - IHM controle de posição



Fonte: Autor, 2024.

Repetindo o procedimento feito no controle de velocidade, executaram-se vários ensaios em diferentes faixas de posição, apresentados no APÊNDICE C – Ensaio em malha fechada posição, para validar o funcionamento do controlador. Através das aquisições foi geraram-se diferentes gráficos, como mostrado na Figura 22, que demonstram a variação da posição (pulsos) e da variável de controle (MV), em relação ao tempo conforme a variação do *setpoint*. Analisando os ensaios, comprovou-se que com os ganhos utilizados ($K_p = 10$ e $K_i = 20$) o controlador efetuou a tarefa proposta de modo satisfatório, não sendo necessário o uso da ação derivativa.

Figura 22 - Curva em malha fechada de 0 a 12500 pulsos



Fonte: Autor, 2024.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo a implementação, utilizando o CLP DVP14SS211T da Delta, de um controlador PID para a regulação da velocidade de motores de corrente contínua, bem como o estudo do controle de posição em um sistema de movimentação linear. Os experimentos realizados com o CLP e a IHM da Delta demonstraram a viabilidade do método de controle proposto, proporcionando um sistema eficiente e confiável.

Os resultados encontrados mostram que o controlador PID do CLP da Delta é capaz de realizar, sem a adição de módulos de expansão, o controle de uma planta de resposta rápida. O controlador não demonstra dificuldades para manter a velocidade e a posição desejada, chegando ao *setpoint* com o comportamento esperado.

Com o desenvolver do projeto, notou-se algumas limitações do *hardware* do CLP, como o limite de I/Os e, principalmente, a baixa taxa de amostragem dos dados de saída da IHM, que dificulta o uso em plantas de resposta rápida como a testada. Mesmo assim, foi capaz de realizar a os controles de velocidade e posição sem grandes dificuldades, sendo necessário apenas um grande ajuste nos ganhos do controlador de posição.

Por fim, espera-se que este trabalho contribua para futuras pesquisas e aplicações semelhantes dentro do IFSC, auxiliando na implementação desta ferramenta que se demonstrou robusta e com ótimo custo-benefício.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Sugere-se que sejam feitos testes em diferentes tipos de planta, principalmente as de característica lenta, a fim de avaliar o comportamento do CLP em situações que não extrapolem as limitações citadas acima.

Seria enriquecedor também, um estudo aprofundado sobre as equações do controlador PID, pois seria possível identificar com clareza todas as possibilidades de

uso deste sistema, além de apontar possíveis limitações que não puderam ser identificadas no decorrer deste trabalho.

REFERÊNCIAS

DOPSoft User Manual. Disponível em:

filecenter.deltaww.com/Products/download/06/060302/Manual/DELTA_IA-HMI_DOPSoft_UM_EN_20211230.pdf. Acesso em: 02 mar. 2024.

DVP-PLC Application Examples of Programming. Disponível em:

https://filecenter.deltaww.com/Products/download/06/060301/Catalogue/DELTA_IA-PLC_DVP_TP_C_EN_20240226.pdf. Acesso em: 05 mar. 2024.

FRANCHI, Claiton M. Controle de Processos Industriais: Princípios e Aplicações. Rio de Janeiro: Érica, 2011. E-book. p.142. ISBN 9788536518282. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788536518282/>. Acesso em: 28 nov. 2024.

GARCIA, Claudio. Controle de processos industriais: Estratégias Convencionais. São Paulo: Editora Blucher, 2017. E-book. p.452. ISBN 9788521211860. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788521211860/>. Acesso em: 09 mai. 2024.

ISPSOft User Manual. Disponível em:

https://filecenter.deltaww.com/Products/download/06/060301/Manual/DELTA_IA-PLC_ISPSOft_UM_EN_20210329.pdf. Acesso em: 02 mar. 2024.

KOLARSKI, A. D. (2008). Encoders: the building blocks of motion control. IEEE Industry Applications Magazine, 14(5), 68-77.

PATRANABIS, D. (2003). Sensors and transducers. New Age International.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Conversor analógico de frequência para tensão

Este circuito foi utilizado somente para a modelagem da planta, pois ele é mais rápido na medição da velocidade em relação a medição realizada pelo CLP a partir da leitura do *encoder*.

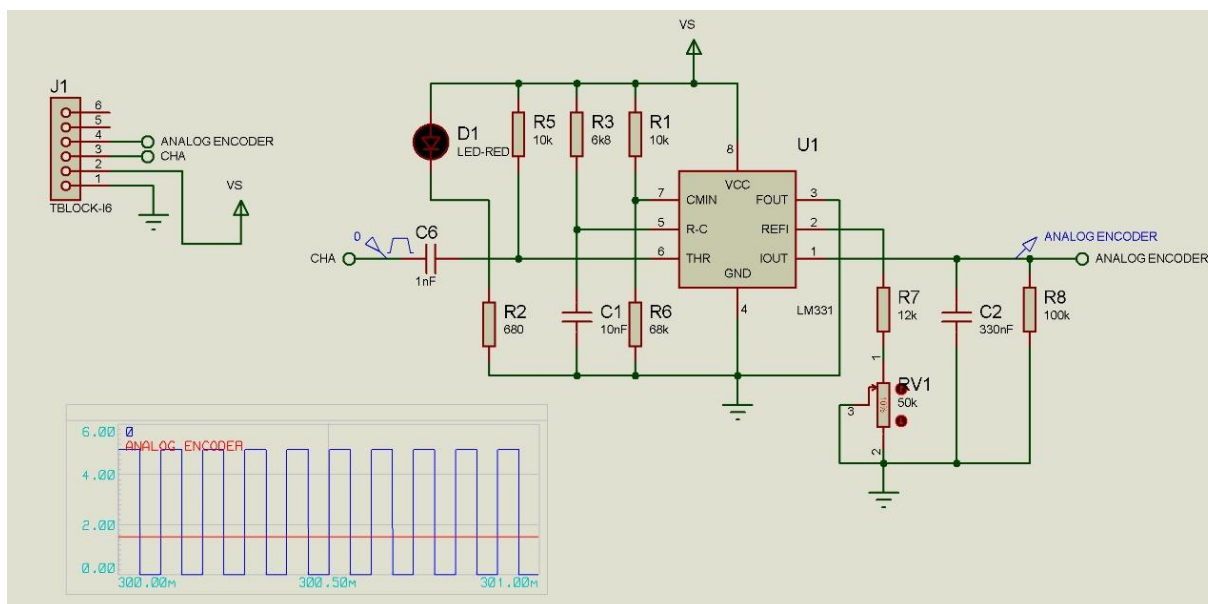


Figura 23 - Conversor analógico de frequência para tensão

APÊNDICE B – Ensaios em malha fechada velocidade

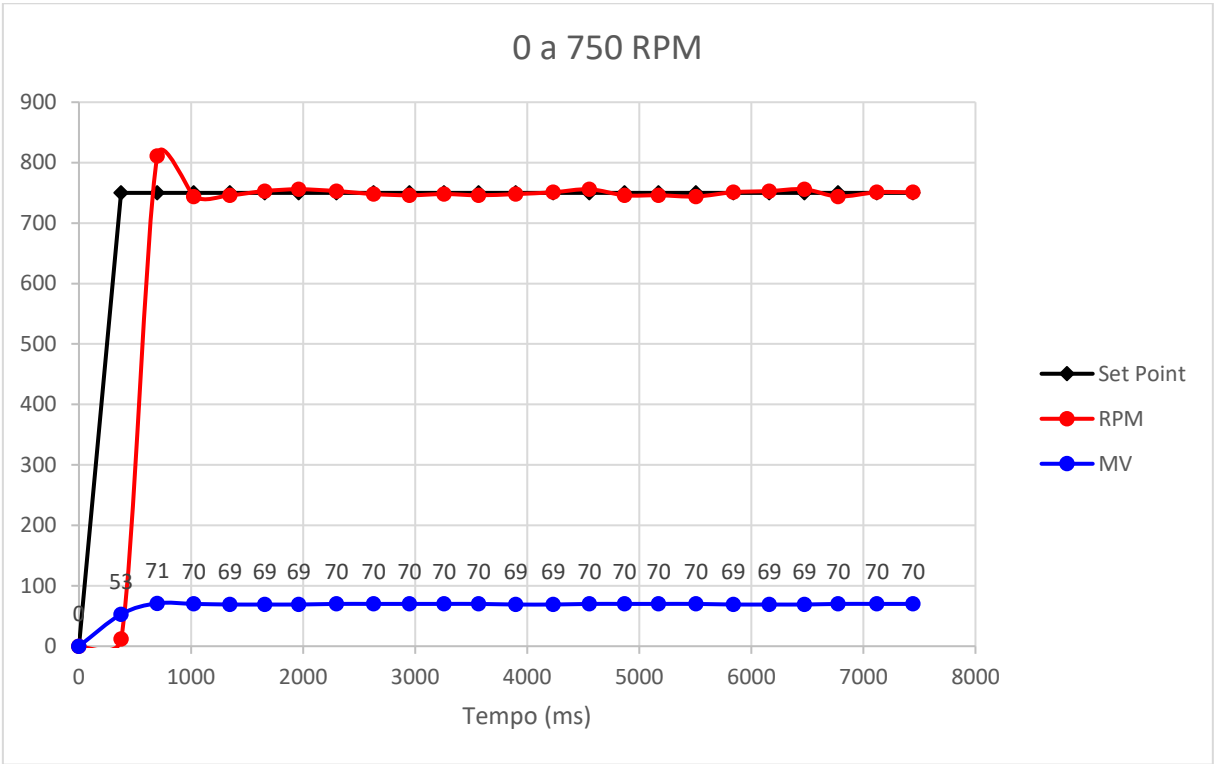


Figura 24 - Ensaio em malha fechada de 0 a 750 RPM

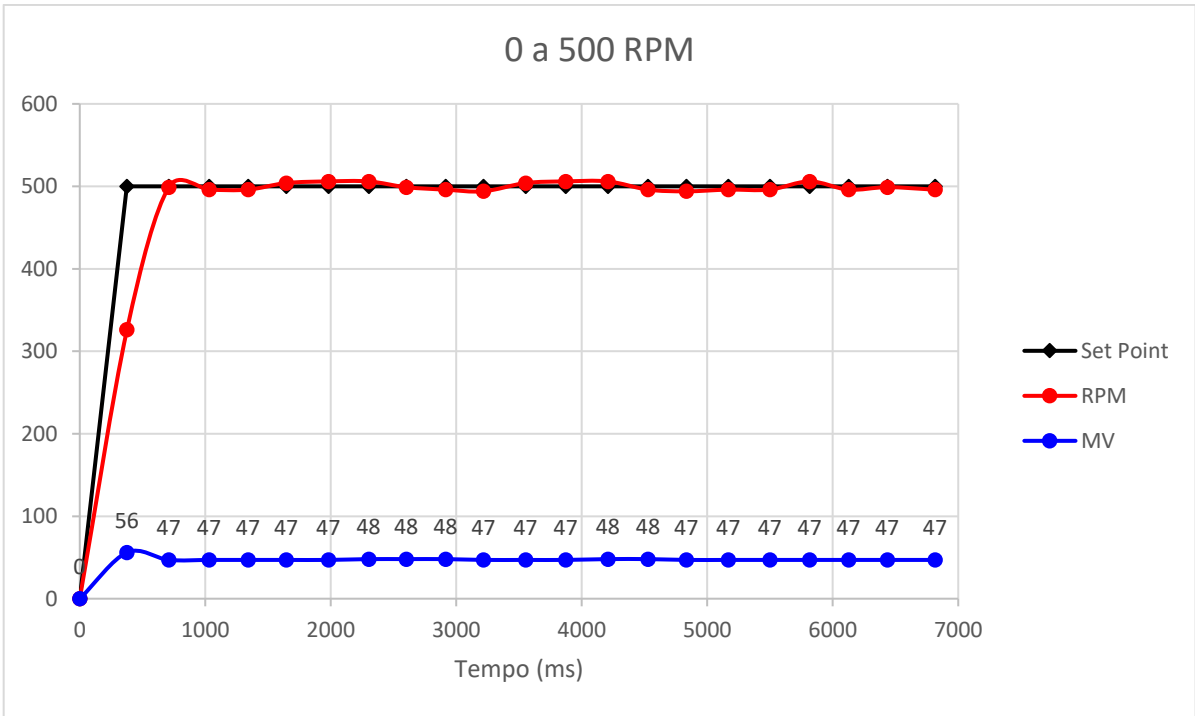


Figura 25 - Ensaio em malha fechada de 0 a 500 RPM

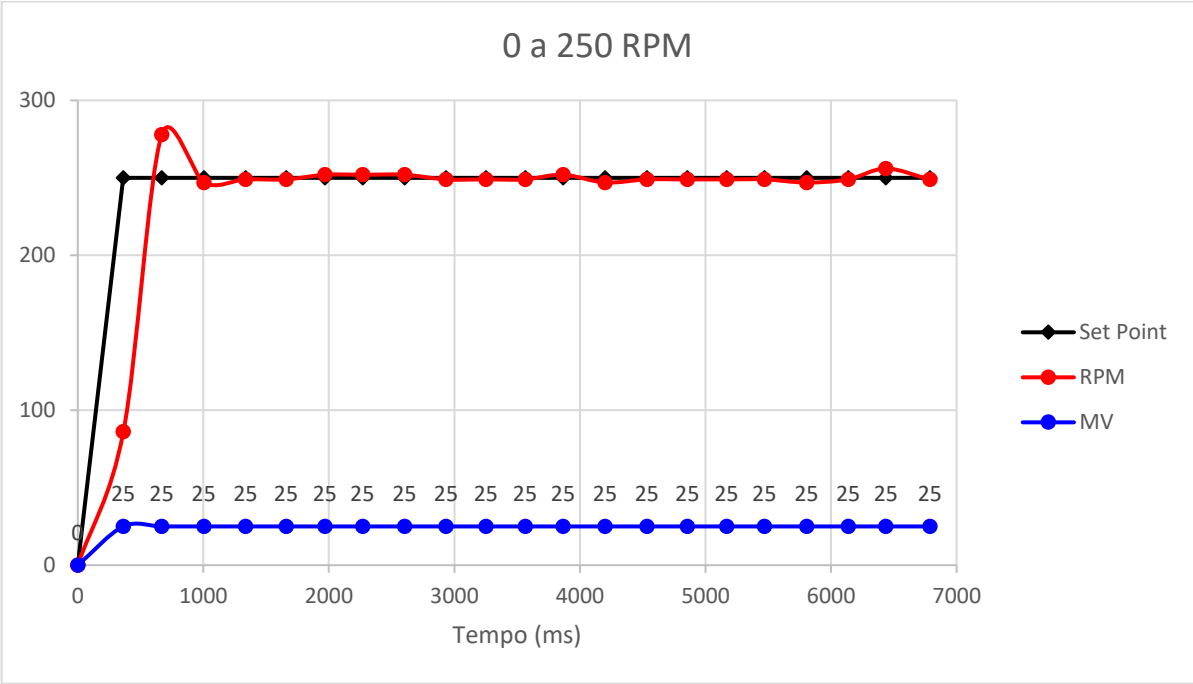


Figura 26 - Ensaio em malha fechada de 0 a 250 RPM

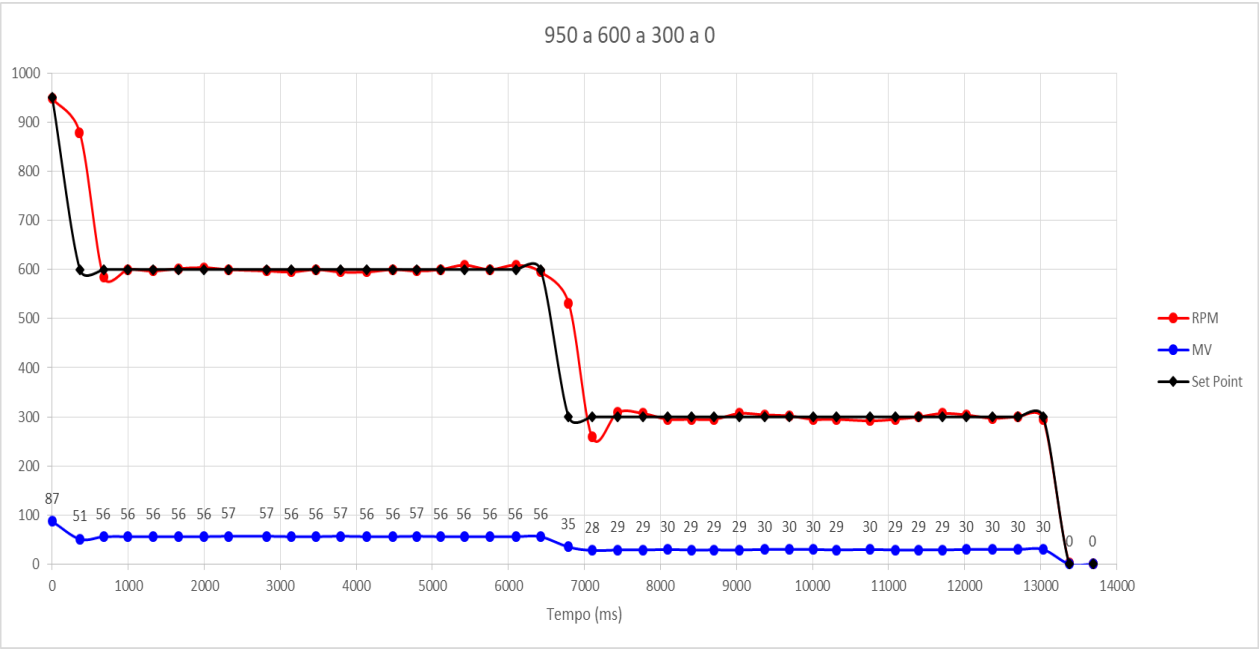


Figura 27 - Ensaio em malha fechada de 950 a 600 a 300 a 0 RPM

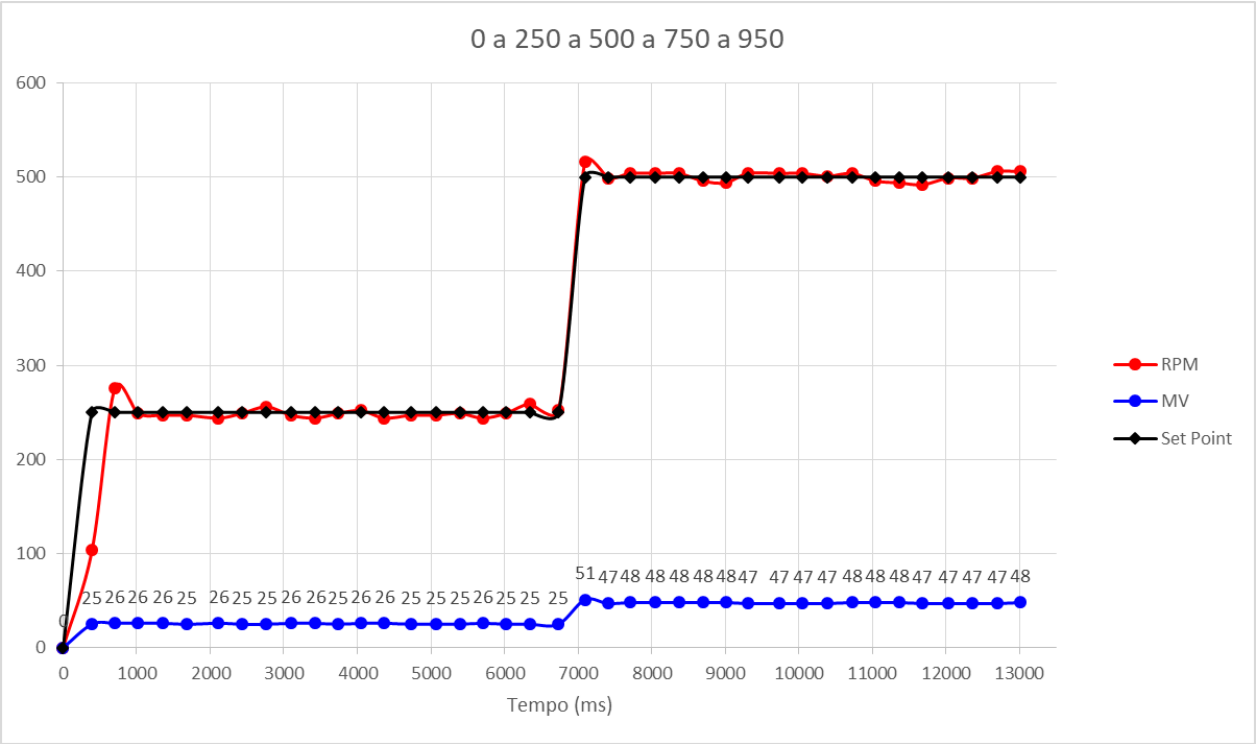


Figura 28 - Ensaio em malha fechada de 0 a 250 a 500 a 750 a 900 RPM (1)

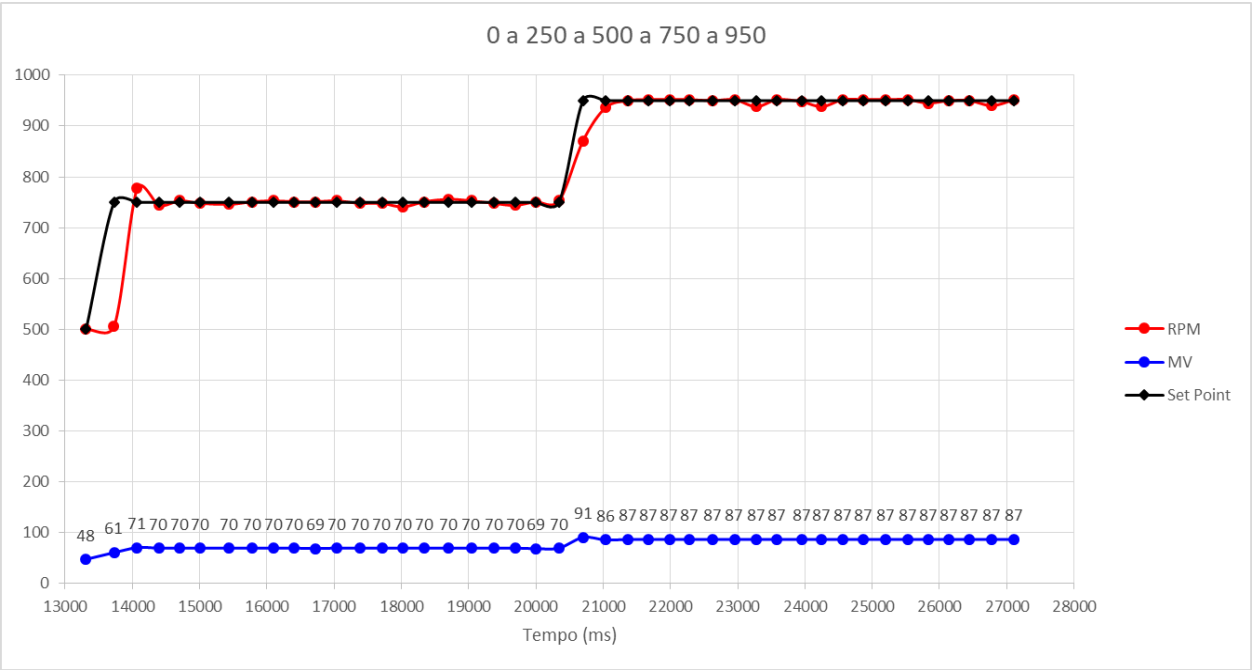


Figura 29 - Ensaio em malha fechada de 0 a 250 a 500 a 750 a 900 RPM (2)

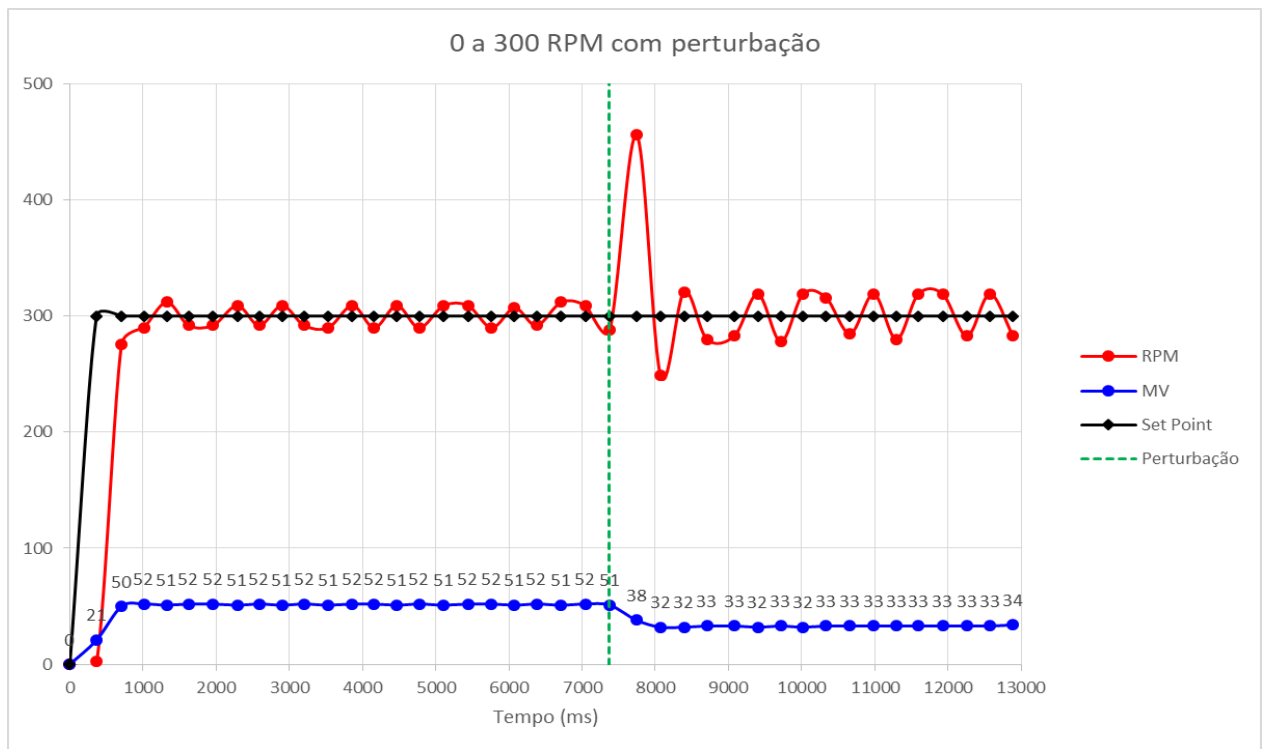


Figura 30 - Ensaio em malha fechada de 0 a 300 RPM com perturbação

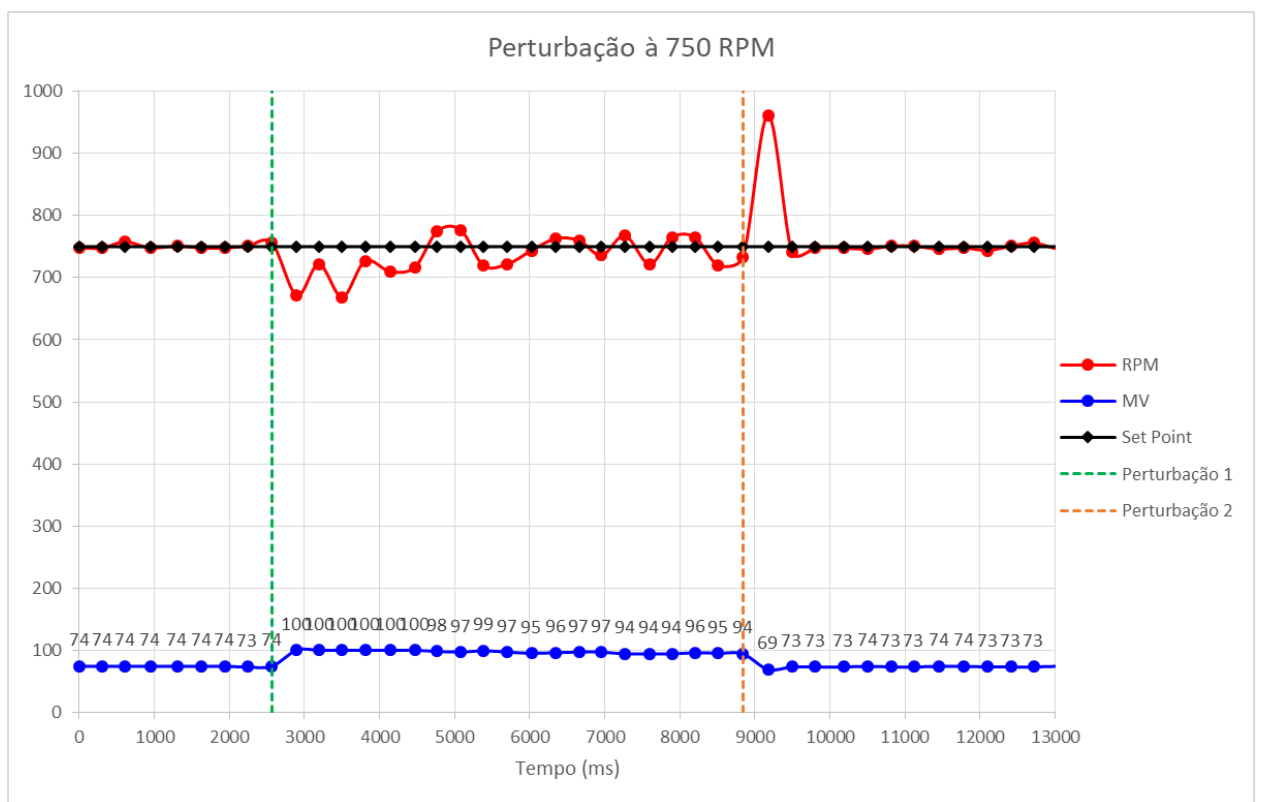


Figura 31 - Ensaio em malha fechada a 750 RPM constante com perturbação

APÊNDICE C – Ensaio em malha fechada posição

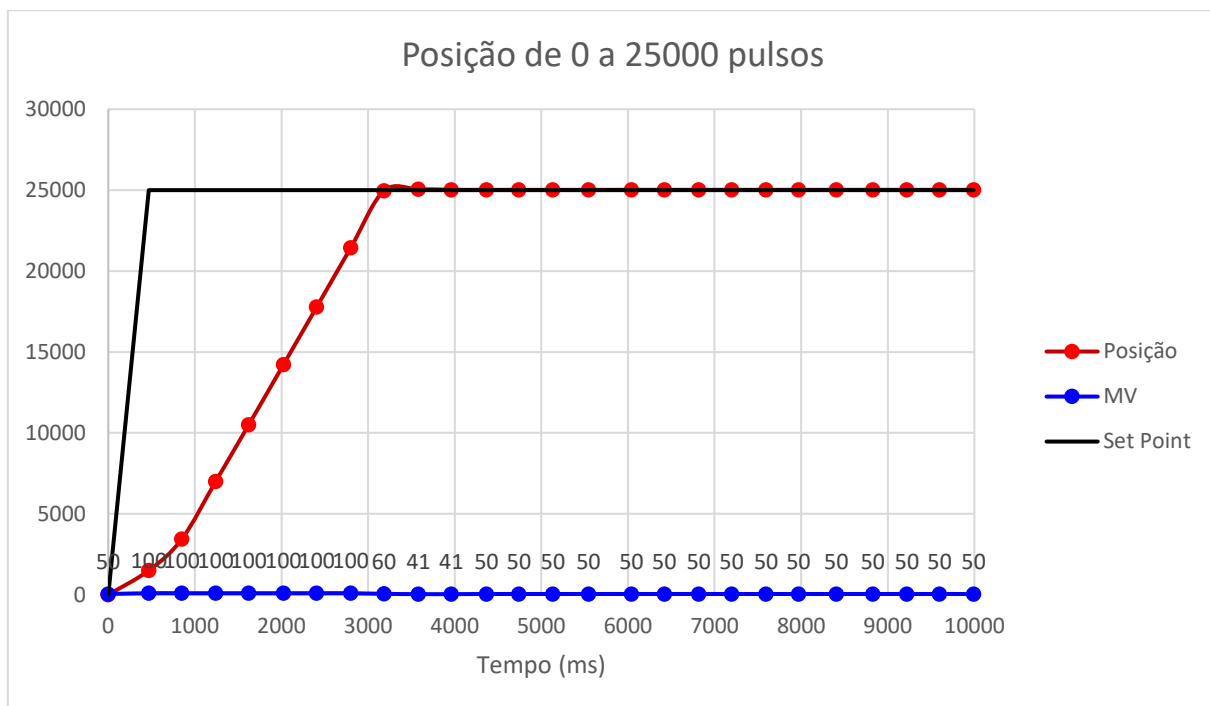


Figura 32 - Ensaio em malha fechada de 0 a 25000 pulsos

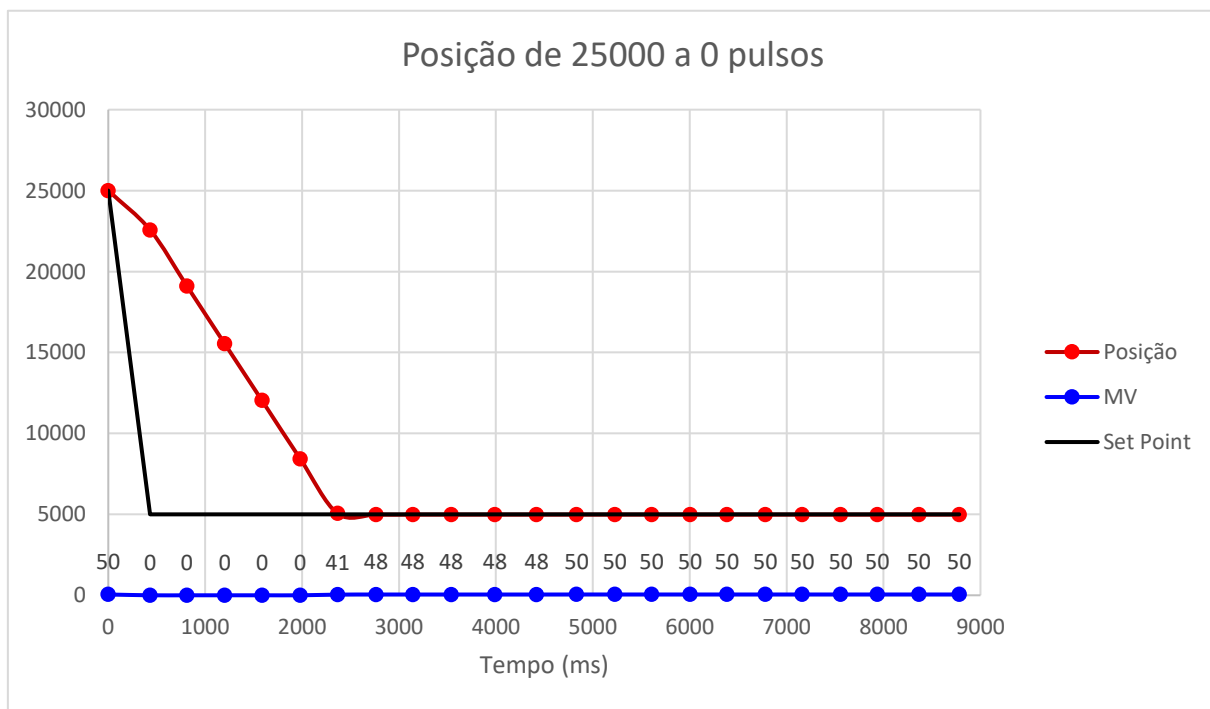


Figura 33 - Ensaio em malha fechada de 25000 a 0 pulsos

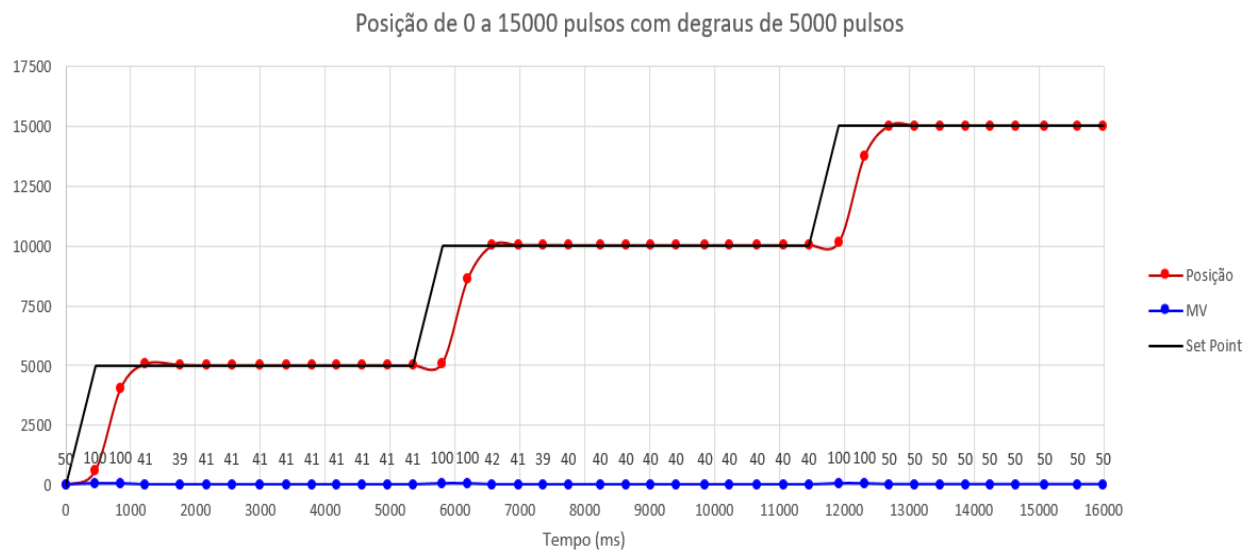


Figura 34 - Ensaio em malha fechada de 0 a 15000 pulsos com degraus de 5000 pulsos

APÊNDICE D – Ladder Controle de Velocidade

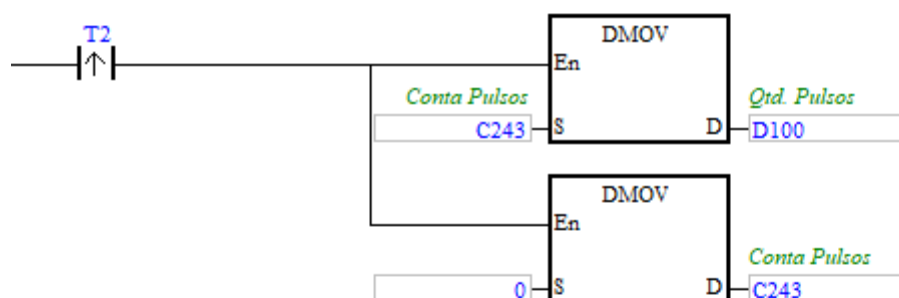
Network 1

Contador de pulsos do encoder

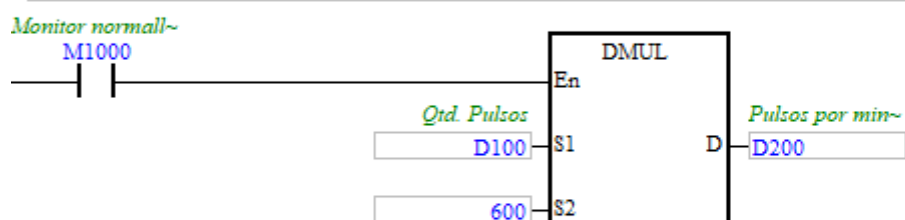
Network 2

Timer de 100ms com auto reset

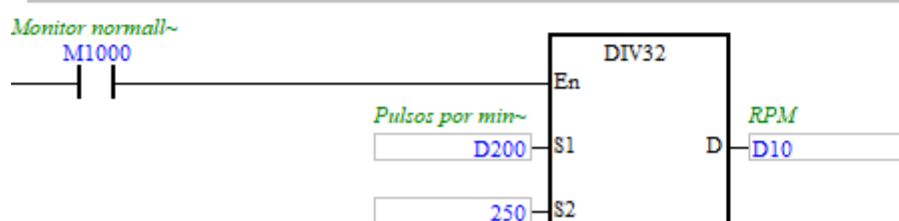
Network 3

Quando o timer é ativado, a quantidade de pulsos em 100ms é guardada em D100 e o contador é zerado

Network 4

Calcula a qtd. de pulsos por minuto

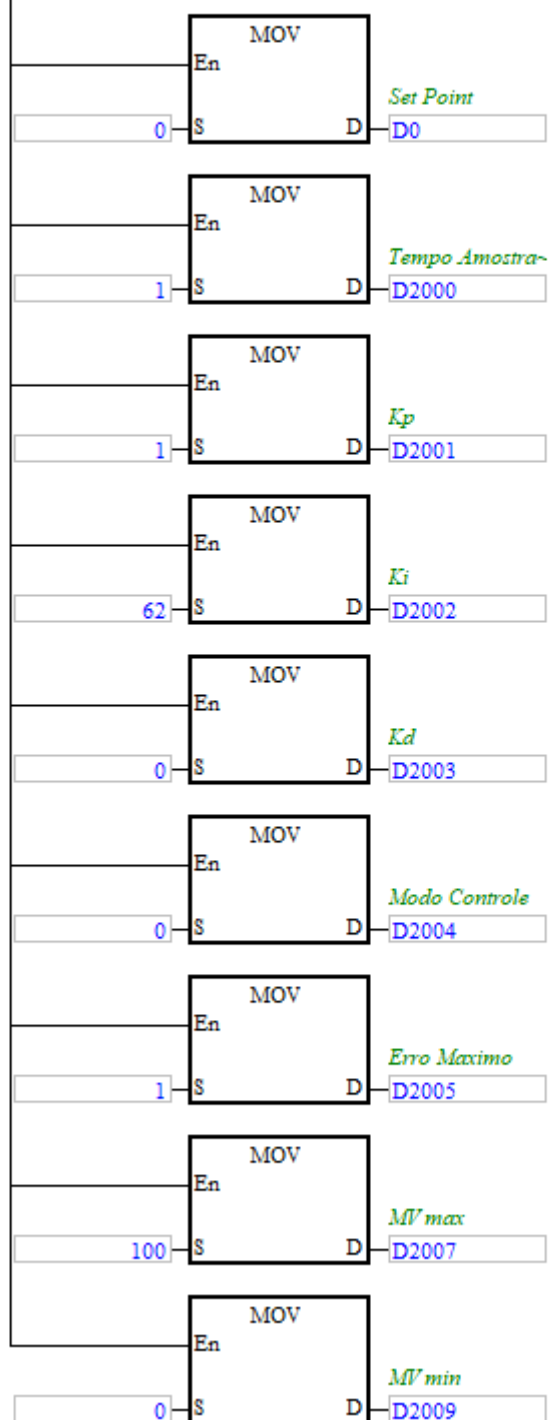
Network 5

Calcula a qtd. de rotações por minuto

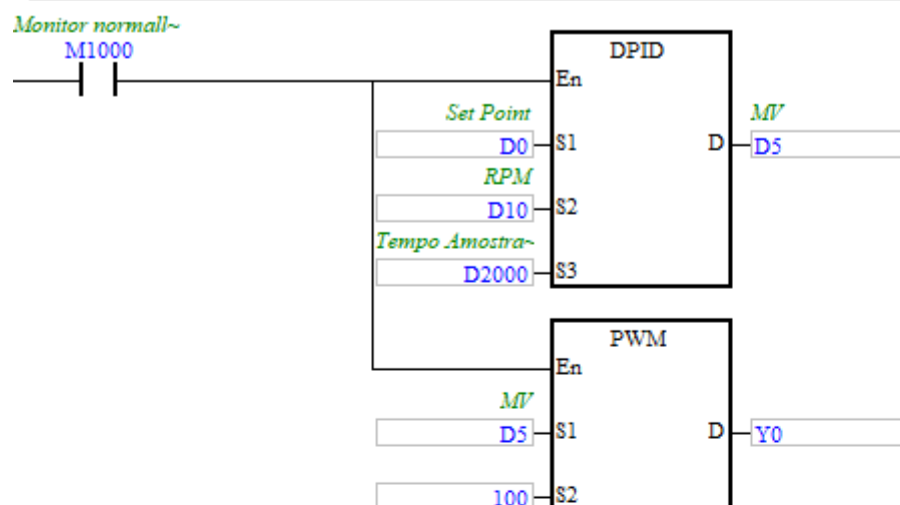
Network 6

Enable single po~
M1002

M1116
(s)

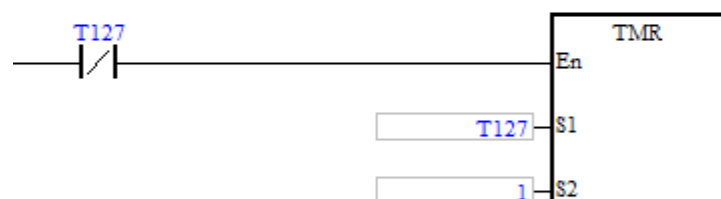


Network 7



Network 8

Timer 1ms com auto reset para facilitar a visualização do tempo na aquisição de dados



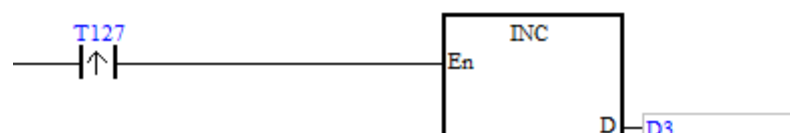
Network 9

Zera o valor de D3 ao ligar iniciar a gravação de dados



Network 10

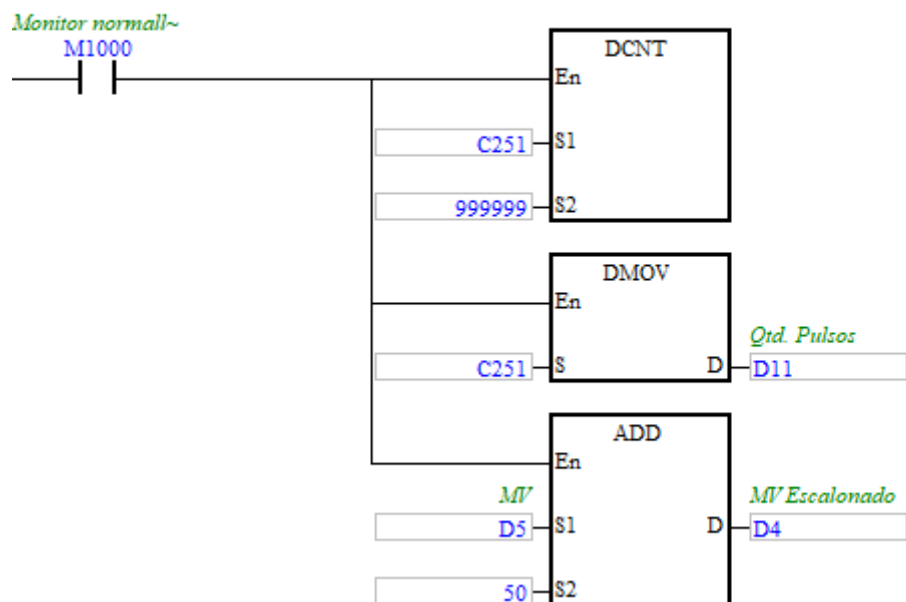
A cada 1ms acrescenta 1 no D3



APÊNDICE E – Ladder Controle de Posição

Network 1

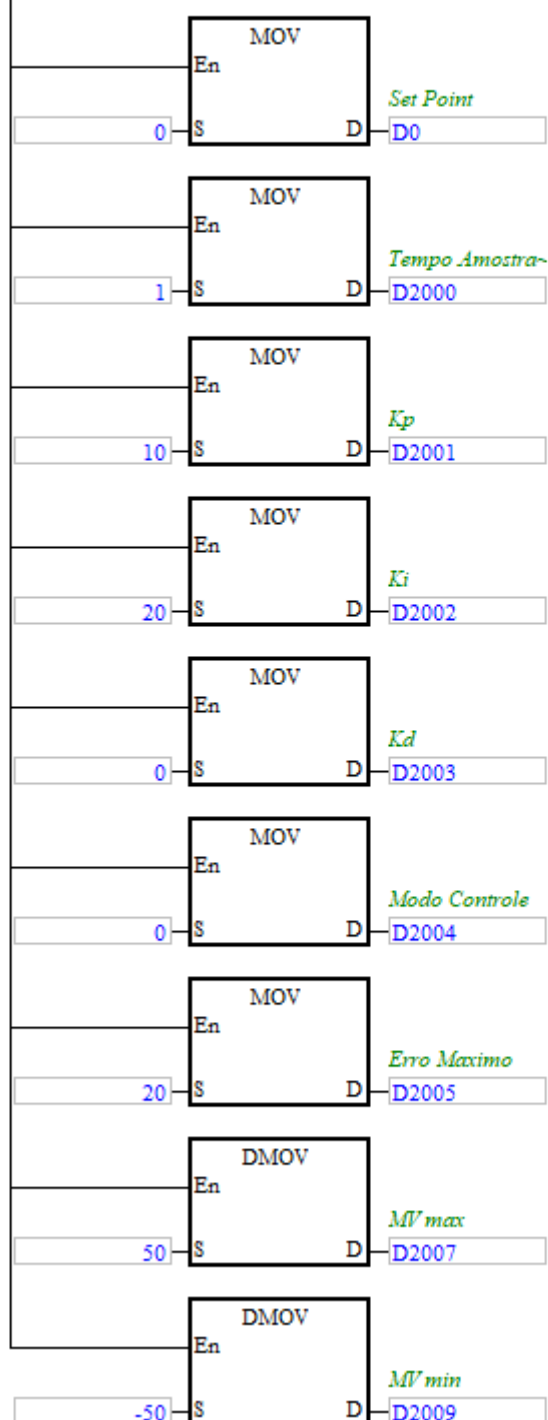
Contador de pulsos do encoder



Network 2

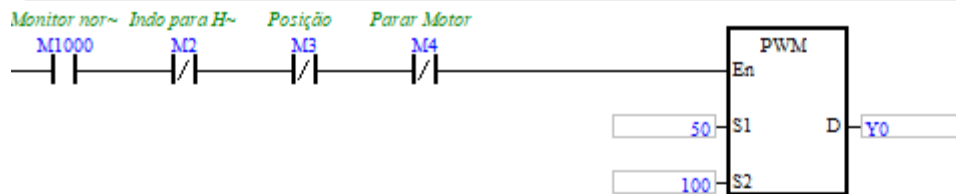
Enable single po~
M1002

M1116
(s)



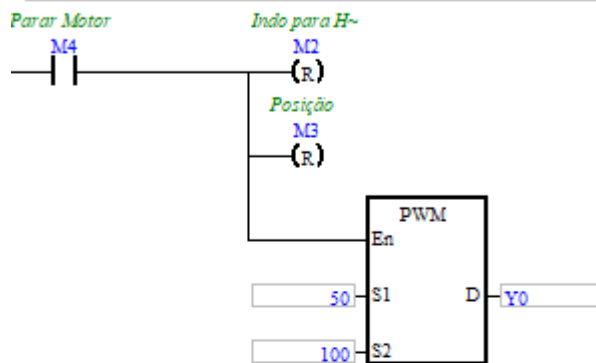
Network 3

Ao ligar, seta razão cíclica em 50%



Network 4

Botão parar motor



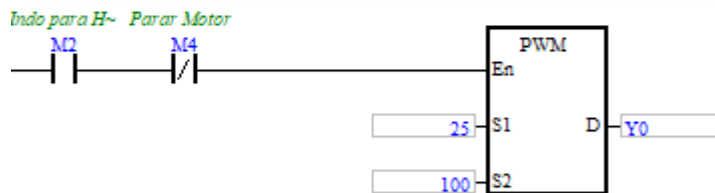
Network 5

Botão Home



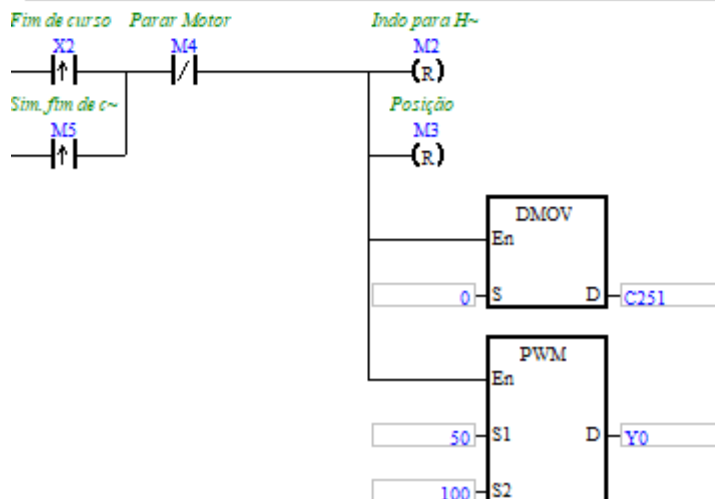
Network 6

Girar motor até posição Home

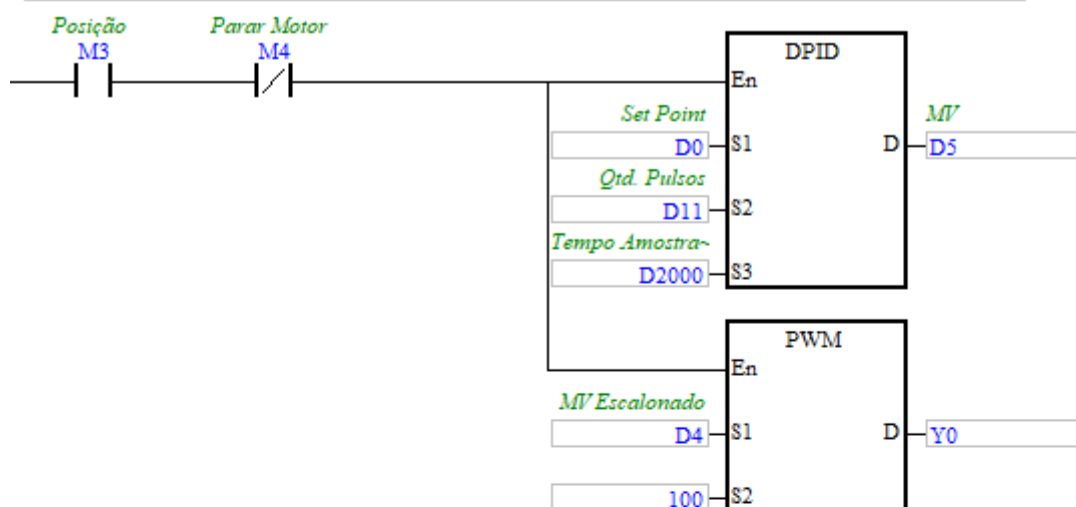


Network 7

Para motor na posição Home e zera o encoder



Network 8



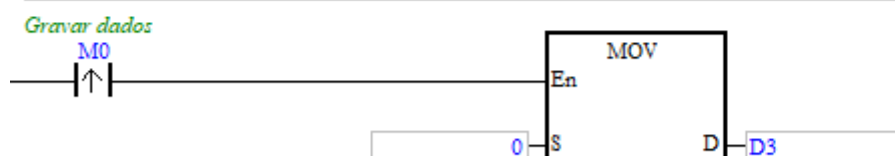
Network 9

Timer 1ms com auto reset para facilitar a visualização do tempo na aquisição de dados



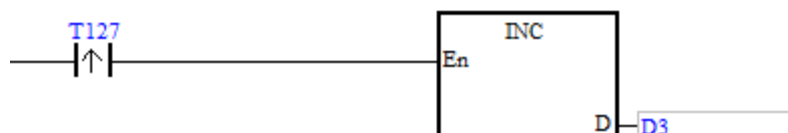
Network 10

Zera o valor de D3 ao ligar iniciar a gravação de dados



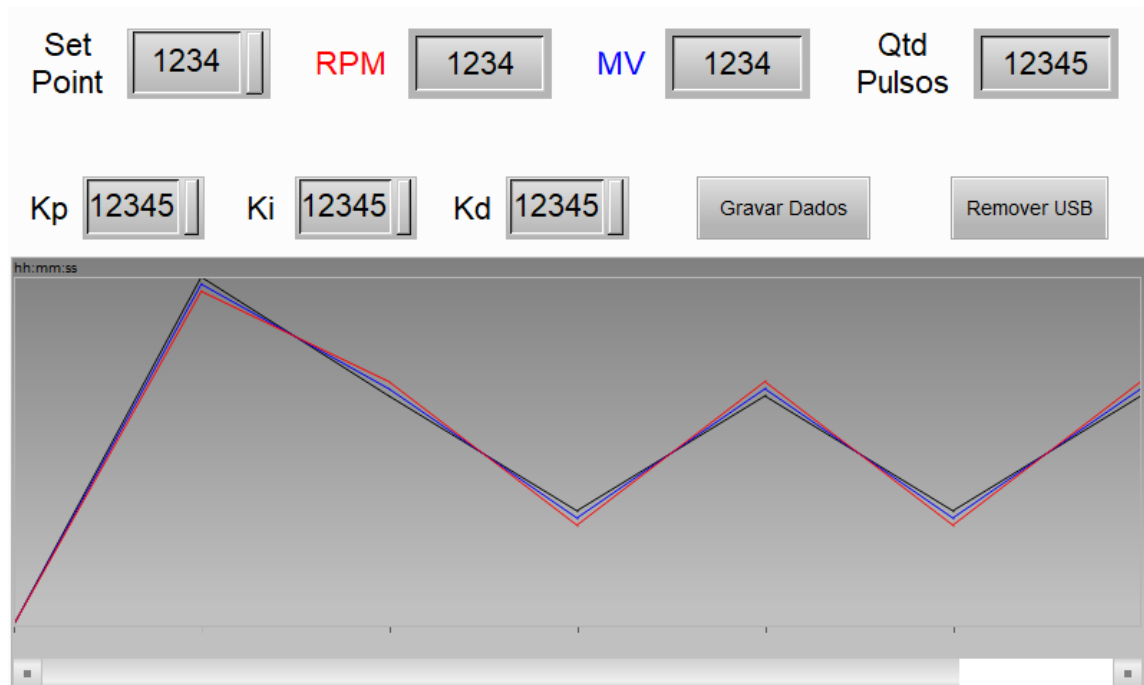
Network 11

A cada 1ms acrescenta 1 no D3

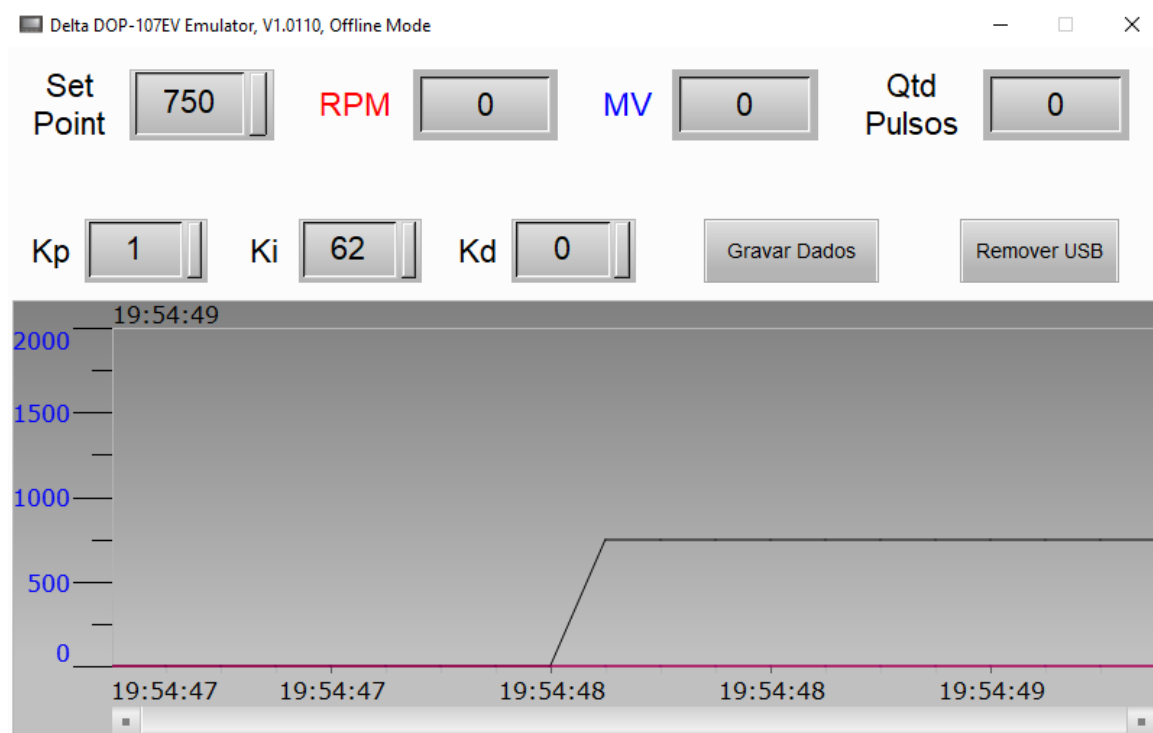


APÊNDICE E – Tutorial IHM

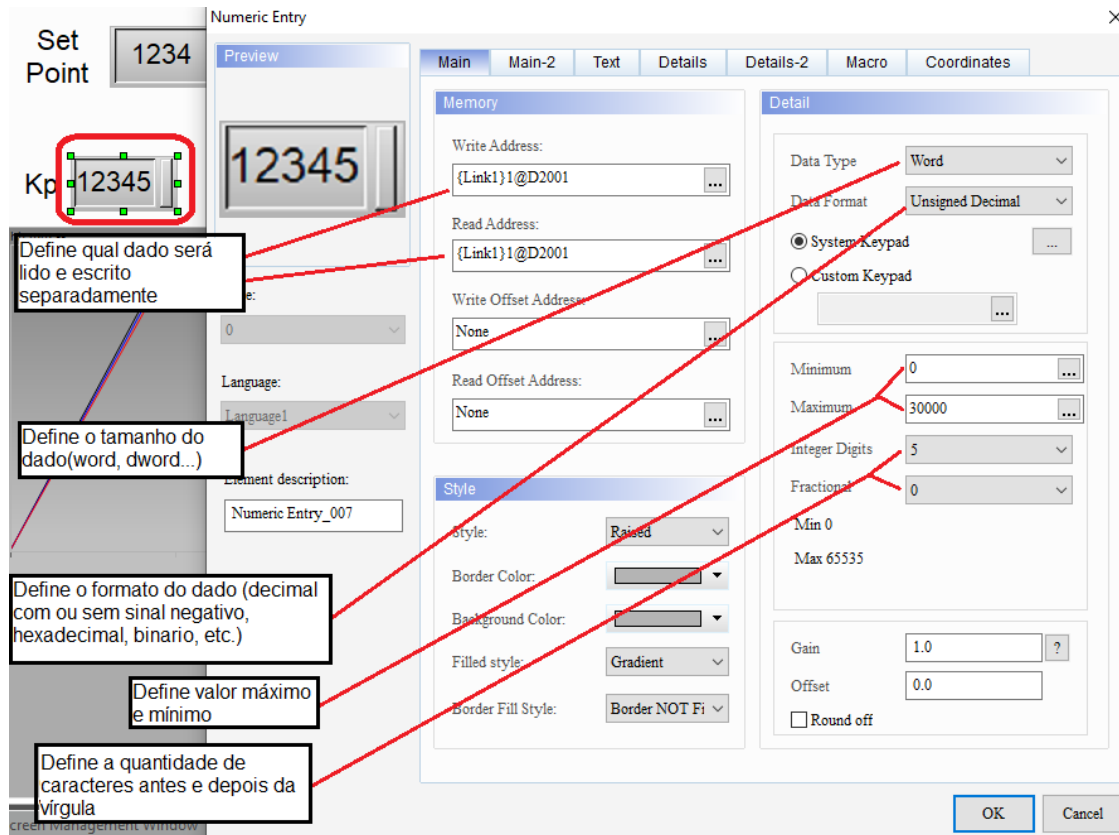
Interface IHM Controle de Velocidade



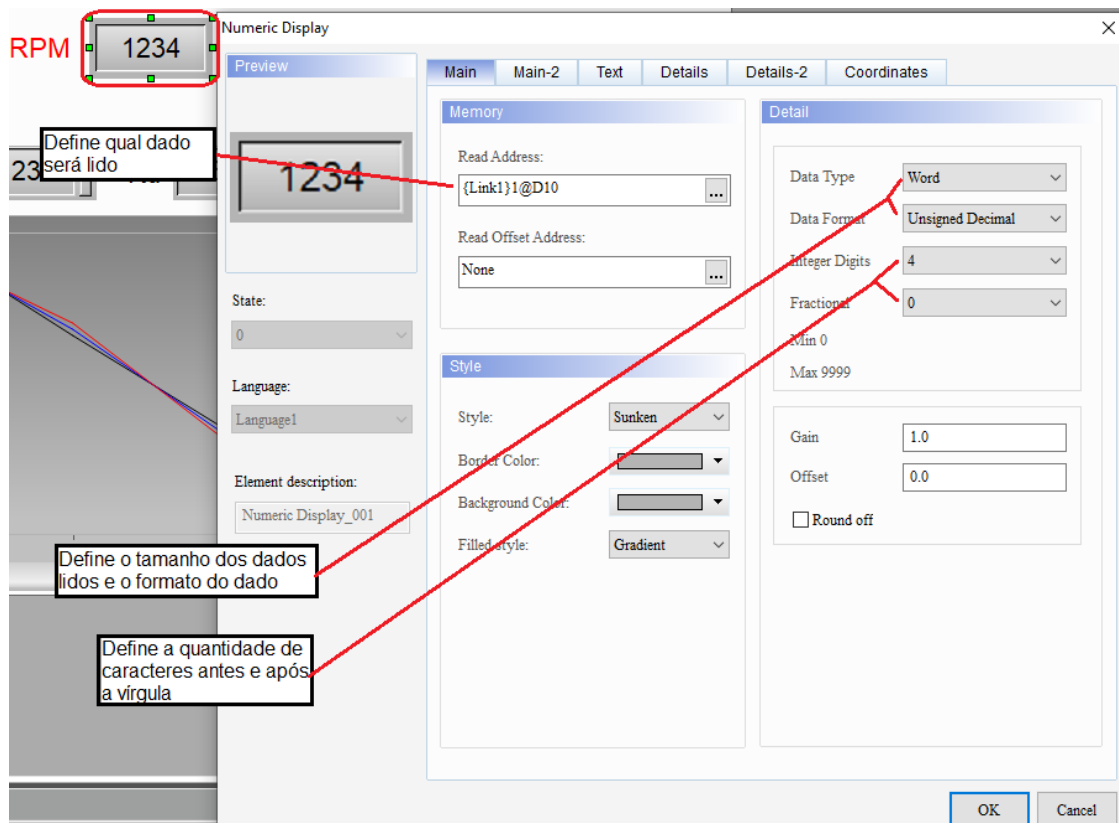
Interface IHM Controle de Velocidade em Funcionamento



Entrada de dados numérica (Numeric Entry)



Display numérico (Numeric Display)



Gerar gráfico na IHM (Historical Graph Trend)

Historical Trend Graph

Define a quantidade de curvas que serão mostradas

Define quais e quantos dados serão lidos para gerar o gráfico, bem como a velocidade da taxa de amostragem destes dados.

1. Indica qual será a primeira variável que será lida.

2. Define a quantidade de variáveis que serão lidas, incluindo a variável indicada no passo 1. Neste exemplo apresentado serão lidos dados desde D0 até D10. Totalizando 11 dados.

3. Quantifica o total de amostras que serão geradas de cada .

4. Define a cada quanto tempo será mostrada uma nova atualização dos dados.

5. Define se quer mostrar no gráfico o tempo e a data.

History Buffer Setup

No.	Address	Read Length (Wcrt)	Sampling Cycle(ms)	Sample Number	Trigger Source	Stamp Time and Date	Auto Stop	Non-volatile	CSV
1	[Link1]1@D0	11	100	20	Timer	Yes	No	No	H-0001

Buffer Properties

Sampling

Address: 1 [Link1]1@D0

Read Length (Word): 11

Sample Number: 20

Trigger: ☒ Sampling Cycle (ms) 100

☒ Stamp Time and Date

Time Format: hh:mm:ss

Date Format: dd/mm/yy

File Output

☒ Save As Single

File Name: H0001

File Date: %y %m %d

File Time: %H %M %S

File Name: H0001

☒ Archive trigger bit: None

OK Cancel

Historical Trend Graph

Preview

State: 0

Language: Language1

Element description: Historical Trend Graph_01

History Buffer Setup

Buffer ID: 1

Curve	Enable	Length	Start Position	Data Format	Integer Di	Fractional	Line Color
1	1	1	0	Unsigned Decimal	4	0	■ RGB(0, 0, 0)
2	1	1	5	Unsigned Decimal	4	0	■ RGB(0, 0, 255)
3	1	1	10	Unsigned Decimal	4	0	■ RGB(255, 0, 0)

Seleciona quais dados serão representados pelas curvas. Neste caso serão os dados D0, D5 e D10.

Define a cor de cada curva

Time/Date

☒ Time Format: hh:mm:ss

☐ Date Format: mm/dd/yy

☒ Display time/date

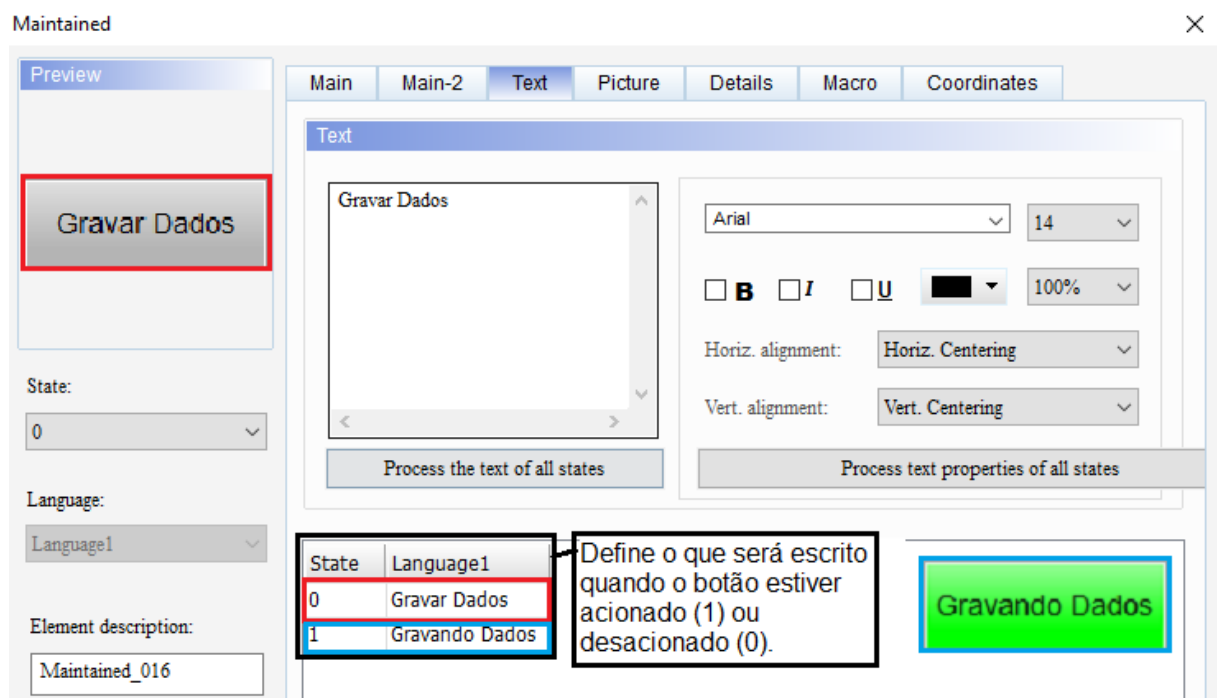
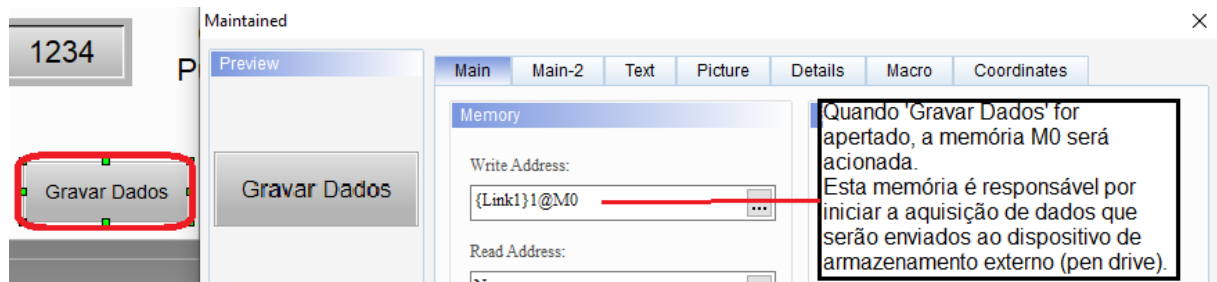
Time Interval: 1

Color: [Black]

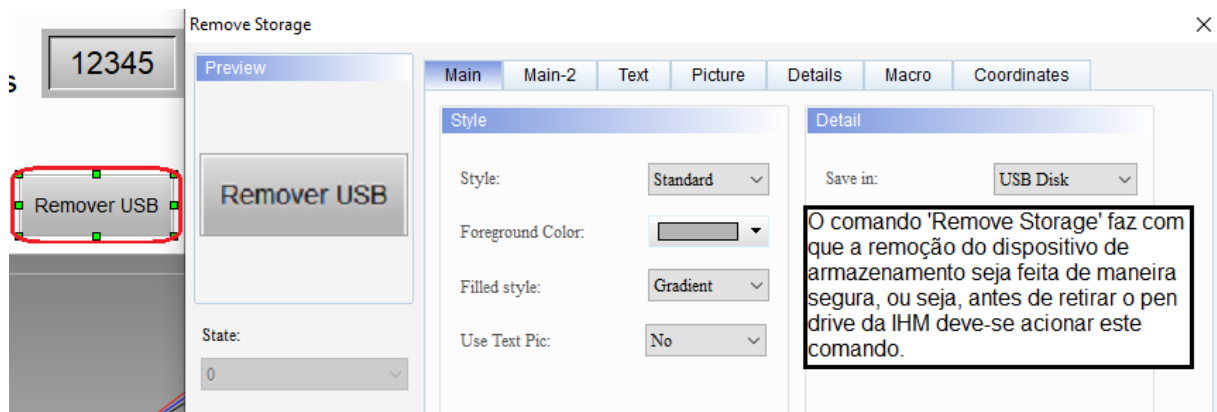
Timeline scaling: 25%

OK Cancel

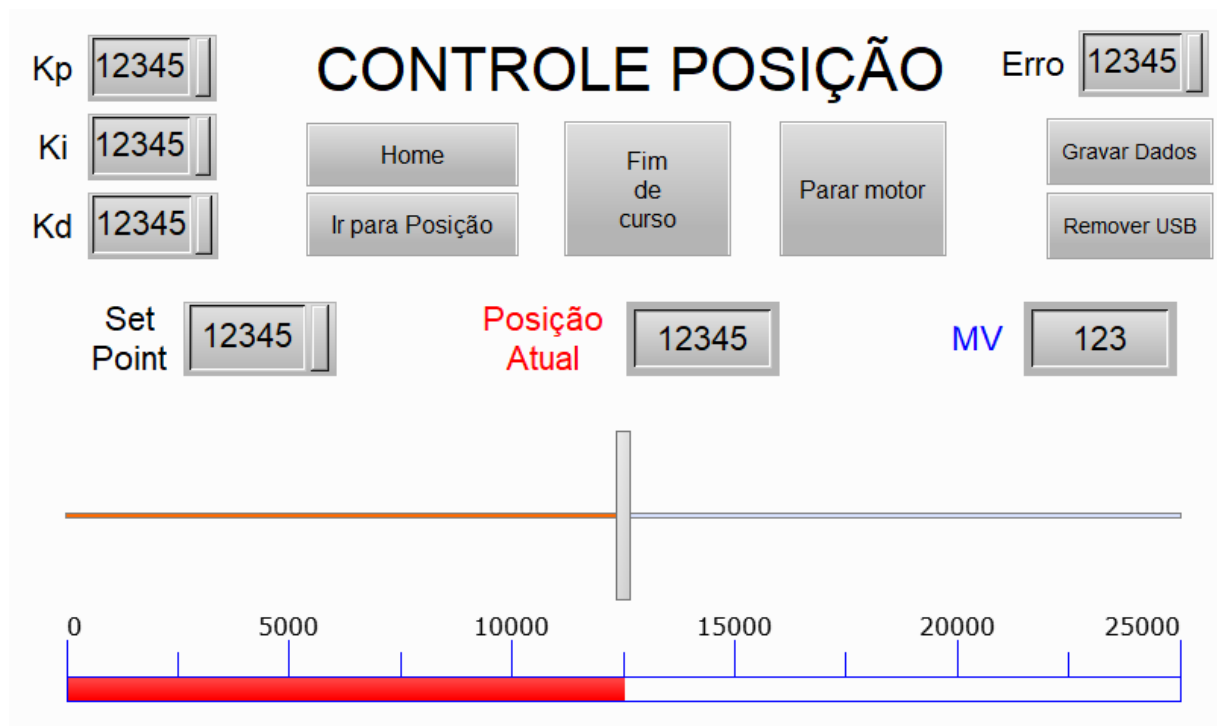
Botão 'Gravar Dados' (Maintained Button)



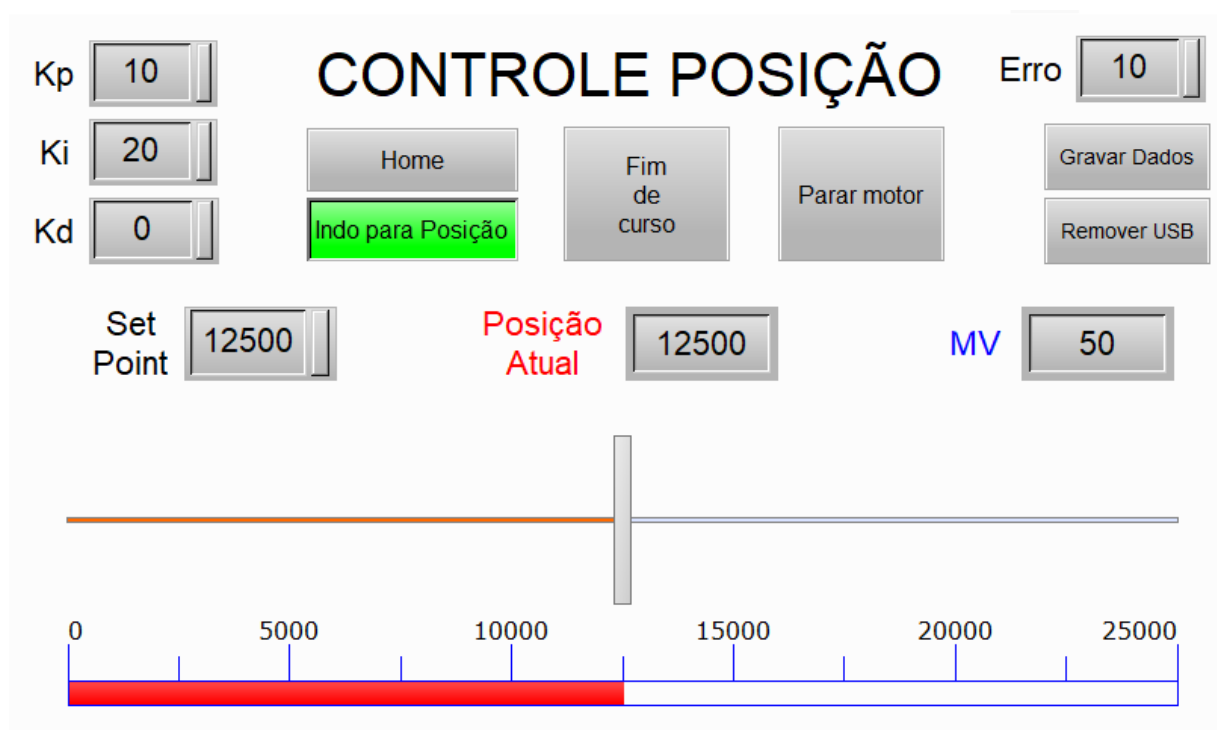
Remover USB (Remove Storage)



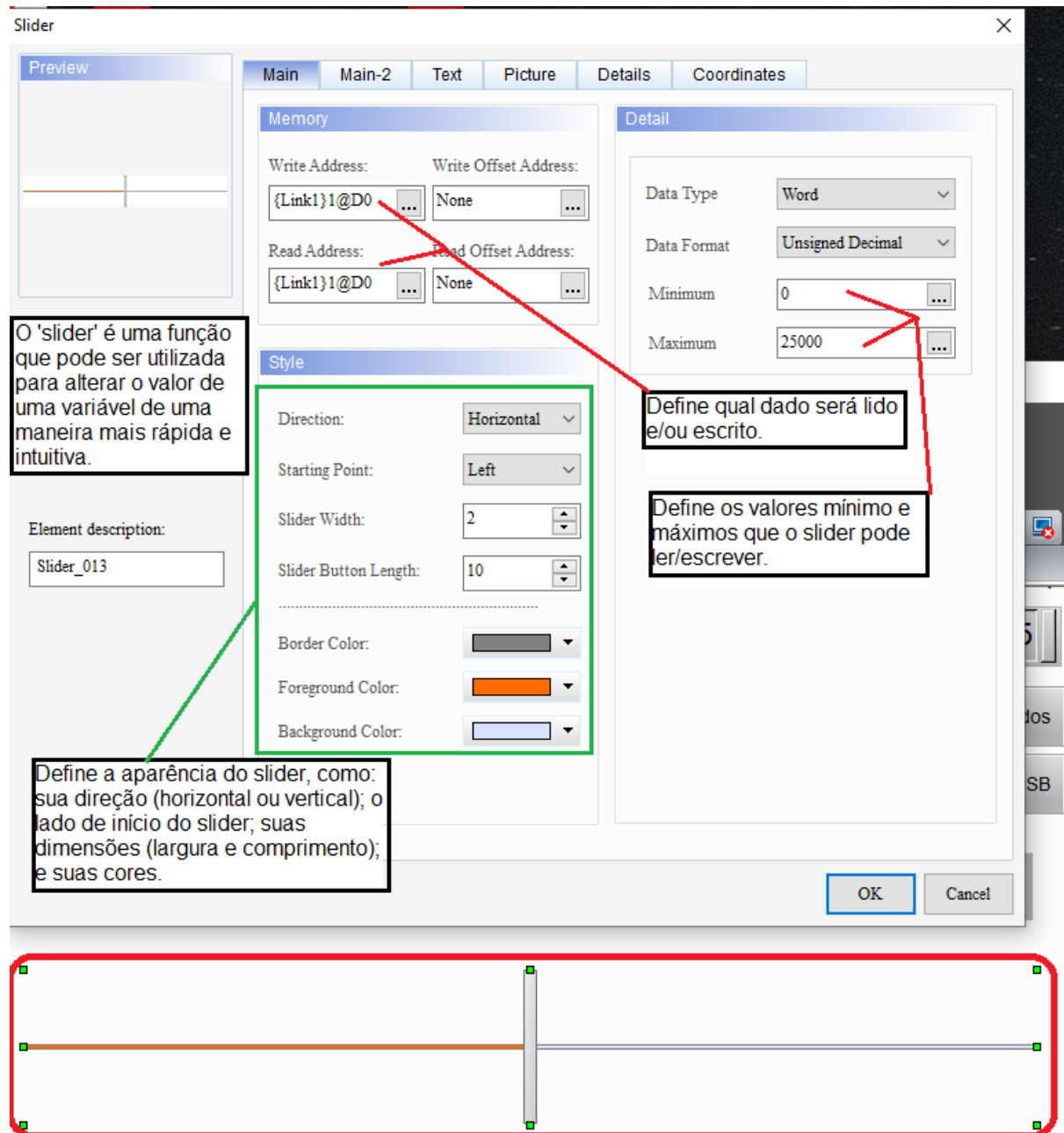
Interface IHM Controle de Posição



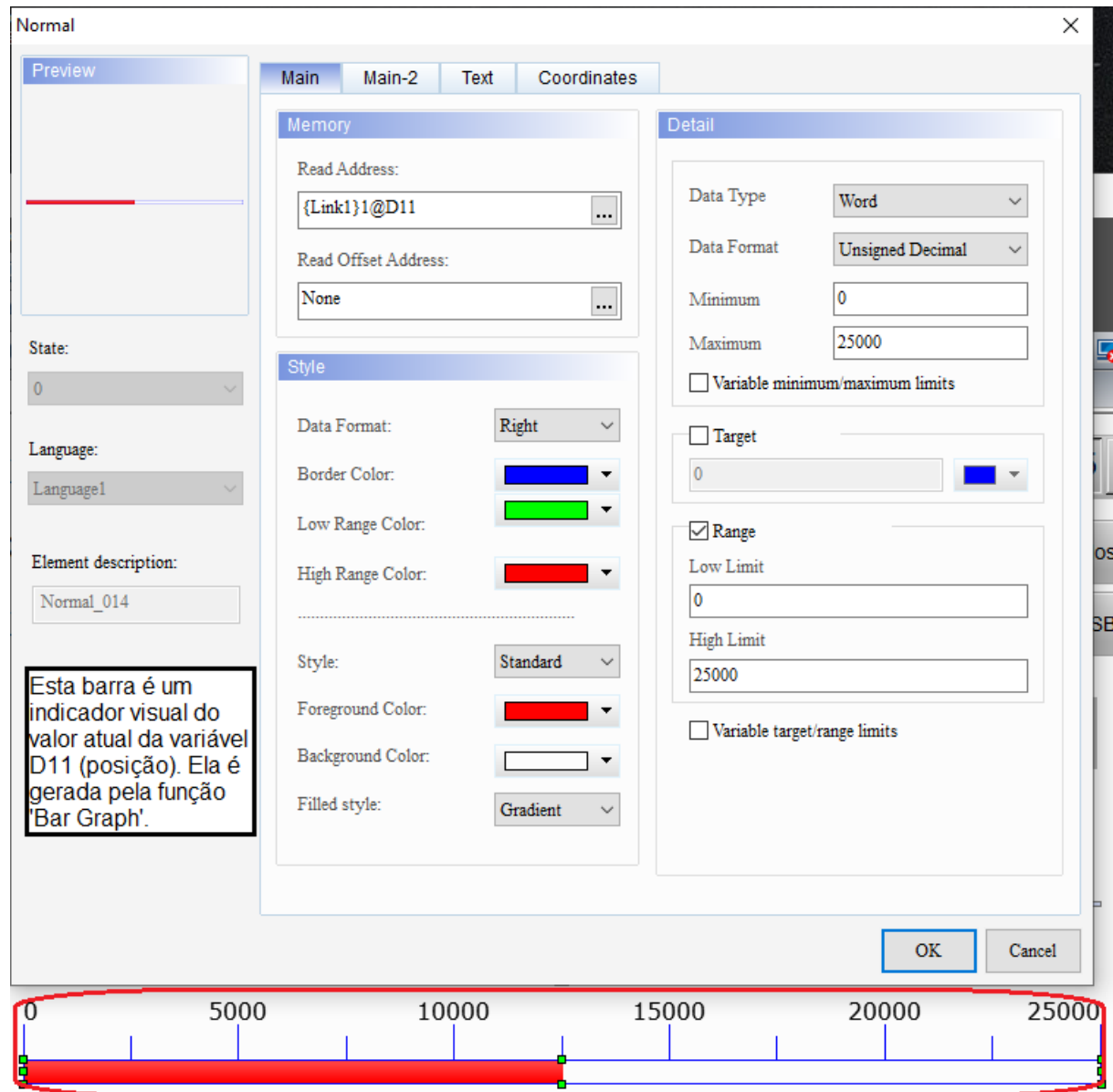
Interface IHM Controle de Posição em Funcionamento



Slider



Barra de indicação (Bar Graph)



History Buffer (Armazenando e Exportando dados para o Excel)

O History Buffer, além de ser utilizado para gerar gráficos na IHM (como o mostrado no controle de velocidade), também pode servir para armazenar dados que podem ser exportados para uma planilha do excel.

Define quais dados serão armazenados (de D0 a D11 neste exemplo) e a quantidade de amostras

Define um bit de ativação para iniciar a captura de dados

Define o trigger que é responsável pelo tempo de amostragem

Escolhe para onde os dados armazenados pelo buffer serão enviados

Exporta os dados em formato .csv, compatível com o Excel

Define em qual coluna cada dado será apresentado no Excel, além do formato que o dado será escrito e quantos campos este dado ocupará na planilha

Define o nome do arquivo gerado

Continua na próxima página...

CSV Fields

Time:

Date:

Title Setting

Column:

Define o nome das colunas de tempo e data

Define o nome de cada coluna

Define quantos dados serão lidos a partir do dado inicial selecionado

Define o dado inicial a ser lido em cada coluna

Define o formato de cada dado

Column Settings

Item	Open	Name	Length	Data Start Pos	Data Format
0	☒	Tempo(m)	1	3	Signed Decimal
1	☒	Posição	1	11	Signed Decimal
2	☒	MV	1	4	Signed Decimal
3	☒	Set point	1	0	Signed Decimal
4	☐	RPM	1	10	Signed Decimal
5	☐		1	5	Unsigned Decimal
6	☐		1	6	Unsigned Decimal
7	☐		1	7	Unsigned Decimal
8	☐		1	8	Unsigned Decimal
9	☐		1	9	Unsigned Decimal
10	☐		1	10	Unsigned Decimal
11	☐		1	11	Signed Decimal
12	☒		1	12	Signed Decimal

OK Cancel

Date Auto Stop Non-volatile CSV

File Output

☒ Non-volatile

☐ Auto Stop

Field Name

☒ Save As Single

File Name

☐ Save As Multi

File Date

%y %m %d

File Time

%H %M %S

File Name

☒ Archive trigger bit

OK Cancel

Planilha no Excel

Planilha no Excel interface showing the ribbon and data table.

Ribbon: ARQUIVO | PÁGINA INICIAL | INSERIR | LAYOUT DA PÁGINA | FÓRMULAS

Fontes: Calibri, 11, A, A, N, I, S, B, A

Área de Transferência: Recortar, Copiar, Colar, Pincel de Formatação

Formulas: P32, X, ✓, fx

	A	B	C	D	E	F	G
1	Tempo	Data	Tempo(m)	Posição	MV	Set point	
2	16:58:07	27/11/2024	304	0	50	0	
3	16:58:07	27/11/2024	767	0	0	0	
4	16:58:07	27/11/2024	1184	2663	100	12500	
5	16:58:08	27/11/2024	1577	6204	100	12500	
6	16:58:08	27/11/2024	1959	9701	100	12500	
7	16:58:09	27/11/2024	2362	12595	42	12500	
8	16:58:09	27/11/2024	2743	12558	40	12500	
9	16:58:09	27/11/2024	3138	12530	39	12500	
10	16:58:10	27/11/2024	3517	12519	41	12500	
11	16:58:10	27/11/2024	3914	12518	41	12500	
12	16:58:11	27/11/2024	4293	12514	41	12500	
13	16:58:11	27/11/2024	4694	12508	50	12500	
14	16:58:11	27/11/2024	5072	12506	50	12500	
15	16:58:12	27/11/2024	5470	12506	50	12500	
16	16:58:12	27/11/2024	5847	12506	50	12500	
17	16:58:13	27/11/2024	6276	12506	50	12500	
18	16:58:13	27/11/2024	6768	12507	50	12500	
19	16:58:13	27/11/2024	7165	12507	50	12500	
20	16:58:14	27/11/2024	7619	12507	50	12500	
21	16:58:14	27/11/2024	8023	12507	50	12500	
22	16:58:15	27/11/2024	8402	12507	50	12500	
23	16:58:15	27/11/2024	8798	12507	50	12500	
24	16:58:15	27/11/2024	9179	12507	50	12500	
25	16:58:55	27/11/2024	119	0	50	25000	
26	16:58:55	27/11/2024	496	0	50	25000	
27	16:58:55	27/11/2024	964	110	100	25000	
28	16:58:56	27/11/2024	1345	3439	100	25000	
29	16:58:56	27/11/2024	1737	7008	100	25000	
30	16:58:57	27/11/2024	2117	10496	100	25000	
31	16:58:57	27/11/2024	2518	14214	100	25000	
32	16:58:57	27/11/2024	2902	17778	100	25000	
33	16:58:58	27/11/2024	3296	21444	100	25000	
34	16:58:58	27/11/2024	3679	24958	60	25000	
35	16:58:58	27/11/2024	4076	25053	41	25000	
36	16:58:59	27/11/2024	4456	25022	41	25000	
37	16:58:59	27/11/2024	4862	25019	43	25000	
38	16:59:00	27/11/2024	5237	25018	43	25000	
39	16:59:00	27/11/2024	5629	25018	43	25000	

Sheet Name: EnsaioP2

Status: PRONTO