

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



Calibração e Controlo de um manipulador robótico com configuração SCARA



Projeto FEUP 2024/25 - LEEC

Coordenação

Geral: Manuel Firmino e Sara Ferreira

De curso: Paulo Costa

Equipa 4

Supervisor: Carlos Gonçalves

Monitor: Lucca Garcia

Estudantes & Autores

Carlos Canuto up202403967@up.pt Catarina Oliveira up202406666@up.pt

Henrique Burmester up202406108@up.pt Laura Serra up202403452@up.pt

Mateus Martins up202400139@up.pt Pedro Fonseca up202406551@up.pt

11 de dezembro de 2024

Resumo

Este relatório foi desenvolvido no âmbito da unidade curricular Projeto FEUP, com foco no controlo de manipuladores robóticos de pequenas dimensões, dando especial atenção ao papel dos servomotores. Inicialmente, foi realizada uma pesquisa detalhada sobre o funcionamento e as aplicações desses motores em sistemas de movimentação precisa. O estudo aprofundou-se no controlo por Pulse-Width Modulation (PWM), explorando a sua importância na calibração e no ajuste de ângulos das articulações. A parte prática do projeto consistiu na implementação de um manipulador robótico SCARA, onde os servomotores foram calibrados para assegurar precisão e consistência nos movimentos. A aplicação do software ComRobot foi essencial para facilitar o controlo incremental e a criação de sequências automatizadas. Como resultado, foi possível realizar testes práticos com o robot, incluindo a movimentação de um objeto por cima de uma barreira, demonstrando a eficácia do sistema implementado. Este relatório finaliza com uma análise dos resultados, destacando as aprendizagens adquiridas e propondo melhorias para projetos futuros.

Palavras-Chave: Manipuladores robóticos, Calibração de Servomotores, Pulse-Width Modulation, ComRobot

Agradecimentos

Expressamos nossa gratidão ao professor Carlos Gonçalves e ao monitor Lucca Garcia pelo suporte contínuo e pelas contribuições valiosas na formulação dos conteúdos que compõem este relatório, assim como na preparação da apresentação final.

Aproveitamos, também, para agradecer à FEUP pela oportunidade de participar neste projeto. Além de enriquecer nosso conhecimento técnico, o projeto proporcionou um espaço para o desenvolvimento pessoal e científico, potencializado pelas palestras e atividades que integraram esta experiência acadêmica.

Índice

Conteúdo

Lista de Figuras	4
Lista de Tabelas	5
Lista de Gráficos.....	6
Lista de Acrónimos	7
1. Introdução.....	8
1.1 Objetivo Geral.....	8
1.2 Importância da Configuração SCARA.....	8
1.3 Organização do relatório.....	8
2. Fundamentos Teóricos	9
2.1 Introdução aos Manipuladores Robóticos.....	9
2.2. Configuração SCARA.....	9
2.3. Tecnologias Utilizadas.....	10
2.3.1 Atuadores	10
2.3.2 Servomotores	12
2.3.3 Arduino	13
2.3.4 Software ComRobot.....	14
3. Metodologia e Resultados	15
3.1. Descrição do Projeto	15
3.2. Calibração e Controlo dos Servomotores	15
3.2.1 Calibração do Primeiro Servo	16
3.2.2 Calibração do Segundo Servo	19
3.2.3 Calibração Rápida	22
3.2.3 Controlo do Manipulador com o Software Com Robot	24
4. Conclusões.....	26
Referências bibliográficas.....	27

Lista de Figuras

Figura 1: Manipulador Robótico (Lopes, 2002)	9
Figura 2: SCARA Robot (Gonzalez, 2016)	10
Figura 3: Manipulador SCARA com os 4 Servomotores	15
Figura 4: Página de Configuração/Controlo do ComRobot (FEUP, 2024)	24
Figura 5: Lista de Comandos utilizada para executar a instrução pretendida.....	25
Figura 6: Sequência de imagens que mostra o braço robótico a executar o movimento	25

Lista de Tabelas

Tabela 1: Calibração do Primeiro Servo - Largura do Pulso vs Ângulo	16
Tabela 2: Relação Ângulo vs largura de Pulso calculada e Aplicada para o servo 1	18
Tabela 3: Calibração do Segundo Servo - Largura do Pulso vs Ângulo	19
Tabela 4: Relação Ângulo vs largura de Pulso calculada e Aplicada para o servo 2	21
Tabela 5: Valores da Calibração Rápida para o Servo 1 e 2.	22
Tabela 6: Valores da Calibração Rápida para o Servo 3	23
Tabela 7: Valores da Calibração Rápida para o Servo 4.	23

Lista de Gráficos

Gráfico 1: Ângulo vs Largura de Pulso para o servo 1	17
Gráfico 2: Largura de Pulso vs Ângulo para o servo 1	17
Gráfico 3: Comparação entre os Valores de Pulso Calculados e Aplicados - Servo 1	19
Gráfico 4: Ângulo vs Largura de Pulso para o servo 2	20
Gráfico 5: Largura de Pulso vs Ângulo para o servo 2	20
Gráfico 6: Comparação entre os Valores de Pulso Calculados e Aplicados - Servo 2	22

Lista de Acrónimos

AC: Alternating Current

AM: Absolute Movement

DC: Direct Current

DOF: Degrees of Freedom

FEUP: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

IM: Immediate Movement

PWM: Pulse Width Modulation

SCARA: Selective Compliance Assembly Robot Arm

1. Introdução

Este relatório documenta o trabalho desenvolvido na unidade curricular Projeto FEUP (Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto), cujo objetivo principal foi calibrar um manipulador robótico com configuração SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm). Ao longo deste documento, são descritos os procedimentos realizados, os resultados obtidos e as aprendizagens adquiridas, com foco na integração de tecnologias e técnicas de controlo de sistemas robóticos.

1.1 Objetivo Geral

O projeto visou calibrar e operar um manipulador SCARA, explorando as suas capacidades em termos de precisão, repetibilidade e eficiência em tarefas específicas, como a movimentação de peças. Além disso, procurou-se aprofundar os fundamentos de controlo, calibração e programação de sistemas robóticos, aplicados em ambientes industriais.

1.2 Importância da Configuração SCARA

Os manipuladores SCARA destacam-se no contexto industrial pela sua configuração otimizada para operações rápidas e precisas no plano horizontal. Com uma estrutura simplificada e flexível, estes sistemas são ideais para tarefas repetitivas, como a montagem de componentes eletrónicos e operações de pick-and-place. Sua rigidez no eixo vertical e elevada flexibilidade no plano horizontal garante eficiência e adaptabilidade em linhas de produção automatizadas (Craig, 2005; Siciliano & Khatib, 2016; Bogue, 2022; Yoshikawa, 1990; Kim & Green, 2023).

1.3 Organização do relatório

O relatório está organizado de forma a apresentar de maneira clara e detalhada o desenvolvimento do projeto e os seus principais resultados. O relatório inicia-se com uma introdução, onde é contextualizado o projeto e apresentados os objetivos gerais e específicos, além da relevância da configuração SCARA no âmbito industrial e educacional.

Em seguida, são apresentados os fundamentos teóricos, que incluem uma visão geral sobre manipuladores robóticos e um foco específico na configuração SCARA. Esta secção explora ainda as tecnologias utilizadas no projeto, como os atuadores, os servomotores, a plataforma Arduino e o software ComRobot, detalhando a sua função e importância para o desenvolvimento do manipulador.

A metodologia e os resultados são descritos em conjunto, abordando os procedimentos realizados, desde a montagem do sistema e calibração dos servomotores até os testes práticos. Gráficos e tabelas são apresentados para ilustrar os dados obtidos e suportar as análises realizadas. Esta secção evidencia as aprendizagens e desafios enfrentados durante o projeto.

Na secção conclusões, para além das principais conclusões do trabalho descrevem-se as principais aprendizagens adquiridas.

O relatório inclui, ainda, uma secção de referências bibliográficas, onde todas as fontes utilizadas ao longo do texto, como livros, artigos e documentações técnicas, estão devidamente listadas.

2. Fundamentos Teóricos

Nesta secção, apresentam-se os conceitos fundamentais necessários para a compreensão do projeto, com destaque para os manipuladores robóticos, a configuração SCARA e as tecnologias utilizadas no seu controlo e operação.

2.1 Introdução aos Manipuladores Robóticos

Os manipuladores robóticos são sistemas mecânicos amplamente utilizados na automação industrial, desempenhando funções que requerem precisão, velocidade e repetibilidade. Compõem-se de elos rígidos ligados por juntas, permitindo movimentos controlados em graus de liberdade (DOF, Degrees of Freedom), que representam movimentos lineares ou rotacionais (Craig, 2005).

Existem dois tipos principais de manipuladores:

- Manipuladores de cadeia aberta: Oferecem maior amplitude de movimentos, como os manipuladores SCARA;
- Manipuladores de cadeia fechada: Destacam-se pela rigidez estrutural, sendo usados em aplicações que requerem força e precisão controlada, como os robôs paralelos (Spong et al., 2006).

A evolução dos manipuladores robóticos está intrinsecamente ligada aos avanços da inteligência artificial, sensores e sistemas de controlo, ampliando sua eficiência e flexibilidade em aplicações como soldagem, montagem eletrónica e operações pick-and-place (Siciliano & Khatib, 2016).

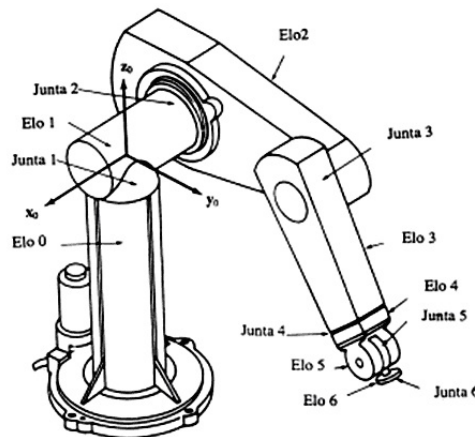


Figura 1: Manipulador Robótico (Lopes, 2002)

2.2. Configuração SCARA

Os manipuladores SCARA são projetados para tarefas que exigem rapidez e precisão no plano horizontal. Eles apresentam três características fundamentais:

- Movimentos no plano XY controlados por duas articulações rotativas.
- Movimento linear no eixo Z para operações verticais, como encaixes e manipulação de peças.

- *Flexibilidade horizontal combinada com rigidez vertical, características que os tornam ideais para operações repetitivas e precisas (Yoshikawa, 1990).*

Devido à sua simplicidade mecânica, os SCARA são fáceis de calibrar, possuem custos de manutenção reduzidos e são amplamente utilizados em linhas de produção automatizadas (Bogue, 2022).

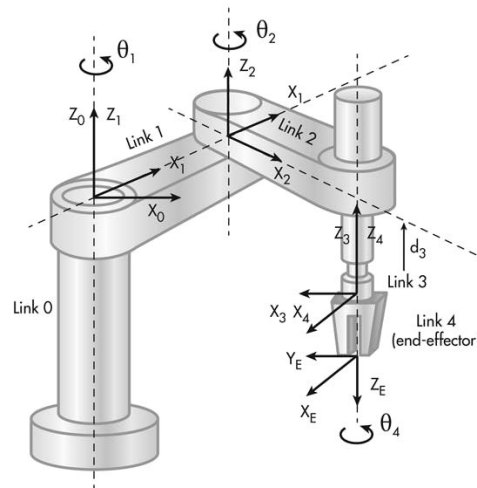


Figura 2: SCARA Robot (Gonzalez, 2016)

2.3. Tecnologias Utilizadas

O projeto integrou diferentes tecnologias para assegurar o controlo eficaz do manipulador. As principais utilizadas foram: os atuadores, os servomotores, o Arduino, Software ComRobot. Cada uma destas tecnologias será aprofundada nas secções seguintes.

2.3.1 Atuadores

Os atuadores desempenham um papel essencial nos sistemas robóticos, ao converterem diferentes formas de energia em movimento mecânico. Estes dispositivos possibilitam que os comandos gerados pelos controladores sejam transformados em ações físicas, como rotações, translações ou vibrações controladas. Segundo Siciliano e Khatib (2016), os atuadores podem ser classificados com base no tipo de energia utilizada, sendo cada tipo adequado para aplicações específicas.

Os atuadores elétricos são os mais amplamente utilizados na robótica, devido à sua precisão, eficiência energética e facilidade de controlo. Estes atuadores incluem motores DC, motores de passo e servomotores, que são frequentemente usados em manipuladores robóticos, veículos autónomos e sistemas de posicionamento (Craig, 2005). Além disso, os atuadores elétricos oferecem uma rápida resposta, permitindo ajustes rápidos e precisos. No entanto, a sua limitação está na capacidade de torque, que é menor em comparação com os hidráulicos.

Os atuadores pneumáticos utilizam ar comprimido para gerar movimento linear ou rotativo. Eles são amplamente utilizados em sistemas industriais que requerem operações rápidas e simples, como

prensas ou dispositivos de montagem. Sua simplicidade e baixo custo são grandes vantagens, mas apresentam menor precisão e repetibilidade, além de serem sensíveis a variações de pressão no sistema (Esposito, 2000). Na robótica, os pneumáticos são adequados para tarefas onde a precisão não é crítica, como em braços robóticos de baixo custo ou sistemas de embalagem.

Os atuadores hidráulicos destacam-se pela sua alta potência, sendo capazes de gerar forças significativas. São amplamente utilizados em máquinas pesadas, como escavadoras, guindastes e sistemas de levantamento, onde o controle de grandes cargas é necessário (Manring, 2013). No entanto, os sistemas hidráulicos apresentam desvantagens relacionadas com a complexidade da manutenção, ao risco de vazamentos de fluido e à menor eficiência em termos de consumo energético. Na robótica são mais comuns em aplicações que exigem força elevada, como robôs utilizados na construção ou resgate.

Os atuadores térmicos funcionam com base na expansão ou contração de materiais termoativos, como ligas com memória de forma ou polímeros termoativos. Estes atuadores são frequentemente aplicados em sistemas miniaturizados, como a microrrobótica, onde os movimentos precisam ser pequenos, precisos e controlados (Howell, 2001). Embora sejam promissores para tecnologias emergentes, sua principal limitação está na velocidade de resposta, que depende das variações de temperatura.

Finalmente, os atuadores magnéticos utilizam forças eletromagnéticas para gerar movimento e são altamente precisos, sendo frequentemente usados em sistemas de alta tecnologia, como robôs piezoelétricos e dispositivos magnetostrictivos. Estes atuadores são amplamente aplicados em microssistemas, robótica de precisão e até mesmo em dispositivos médicos (Boldea, 2009). Apesar da sua elevada precisão, apresentam limitações em termos de força e custo, o que restringe seu uso a aplicações específicas.

Além dessas classificações, os atuadores modernos podem integrar tecnologias híbridas, como os electro-hidráulicos e eletromagnéticos, que combinam as vantagens de diferentes fontes de energia. Estas tecnologias híbridas têm sido desenvolvidas para melhorar a eficiência, reduzir o consumo energético e ampliar as aplicações dos sistemas robóticos (Boldea, 2009; Manring, 2013; Siciliano & Khatib, 2016). Os atuadores eletro-hidráulicos, por exemplo, são amplamente utilizados em sistemas que requerem forças elevadas com controle preciso, enquanto os eletromagnéticos têm aplicações em sistemas de alta precisão, como dispositivos médicos ou robôs industriais (Kim & Son, 2019). Estudos recentes destacam o papel dos atuadores híbridos no avanço da robótica, especialmente em aplicações emergentes como dispositivos de assistência humana e microrrobótica (Yamamoto et al., 2011).

Combinando os benefícios de diferentes tipos de atuadores, estas tecnologias híbridas estão a moldar o futuro da automação, permitindo a criação de sistemas mais eficientes e versáteis, ao mesmo tempo, que reduzem o impacto ambiental e os custos operacionais.

De forma geral, a escolha do tipo de atuador depende de diversos fatores, como os requisitos de força, precisão, custo, eficiência energética e manutenção. Na robótica é comum combinar diferentes tipos de atuadores para responder às exigências de sistemas complexos, como manipuladores multiarticulados ou robôs móveis.

2.3.2 Servomotores

Os servomotores são os principais atuadores responsáveis pela movimentação das juntas do manipulador robótico. Controlados por sinais de modulação por largura de pulso (PWM, Pulse-Width Modulation), permitem ajustes precisos da posição e da velocidade. Um sistema de retroalimentação contínua, geralmente implementado por encoders, assegura a conformidade entre a posição desejada e a posição real (Boldea & Nasar, 2005). Eles são amplamente utilizados em robótica devido à sua capacidade de realizar movimentos rotativos controlados em ângulos específicos (Siciliano & Khatib, 2016; Craig, 2005).

2.3.2.1 Funcionamento

Os servomotores são atuadores muito usados em sistemas robóticos devido à sua capacidade de realizar movimentos precisos e controlados. Esses dispositivos utilizam motores DC ou AC como componente principal para gerar movimento rotacional, que é ajustado por um sistema de controle interno. Esse sistema compara continuamente a posição real do eixo com a posição desejada, ajustando automaticamente o motor para minimizar a diferença entre ambas. Para isso, os servomotores usam sensores, como encoders ou potenciômetros, que fornecem feedback em tempo real ao circuito de controle. Esse feedback é essencial para garantir alta precisão e rapidez na resposta, características que tornam os servomotores ideais para aplicações exigentes, como robótica e automação industrial (Boldea & Nasar, 2005; Siciliano & Khatib, 2016).

A comunicação entre o controlador externo, como um Arduino, e o servomotor é realizada por meio de sinais PWM (Pulse Width Modulation), que modulam a largura dos pulsos enviados ao motor. Essa modulação determina a posição angular do eixo do servomotor, permitindo movimentos suaves e precisos. A largura do pulso está diretamente relacionada à posição desejada: um pulso de 1 ms posiciona o eixo no ângulo mínimo (e.g., -90° ou 0°), enquanto um pulso de 1,5 ms move o eixo para o ponto neutro (geralmente 0° ou o centro do curso). Por fim, um pulso de 2 ms posiciona o eixo no ângulo máximo, como $+90^\circ$ ou 180° , dependendo do modelo do servo (Craig, 2005; Monk, 2020).

A utilização dos PWM apresentam diversas vantagens, como a simplicidade de implementação em controladores modernos e a eficiência energética, uma vez que o sinal torna-se ativo apenas durante os pulsos necessários. Além disso, a alta frequência do PWM (geralmente 50 Hz, correspondente a um período de 20 ms) garante que o movimento do eixo seja estável e suave, mesmo em aplicações que envolvem múltiplas articulações, como manipuladores SCARA (Spong et al., 2006). No entanto, o uso de PWM também apresenta desafios, como a suscetibilidade a ruídos elétricos e a necessidade de calibração precisa para evitar desvios em ângulos extremos.

Os servomotores são frequentemente integrados em sistemas robóticos complexos, onde cada servo controla uma articulação específica do manipulador. Em robôs SCARA, por exemplo, os servomotores ajustam os ângulos das articulações de forma coordenada para posicionar o braço robótico com precisão em tarefas como montagem de componentes e operações de pick-and-place. Além disso, sua aplicação estende-se a garras robóticas, sistemas de posicionamento em câmaras e antenas, e até mesmo veículos autônomos (Siciliano & Khatib, 2016; Boldea & Nasar, 2005).

Estudos recentes destacam o impacto dos servomotores digitais, que utilizam microprocessadores

internos para processar sinais PWM com maior resolução e velocidade. Esses dispositivos oferecem vantagens adicionais, como maior eficiência no controlo de movimento e maior tolerância a ruídos elétricos. Com o avanço das tecnologias de controlo, os servomotores continuam a desempenhar um papel central na automação e na robótica, sendo constantemente melhorados para atender às crescentes necessidades por precisão, eficiência e miniaturização (Boldea, 2009; Monk, 2020).

2.3.2.2 Controlo por PWM nos Servomotores

O controlo de posição e movimento dos servomotores é realizado por meio de sinais PWM (Pulse Width Modulation), uma técnica amplamente utilizada na robótica que permite ajustar a posição angular do eixo com elevada precisão. Nos servomotores padrão, a frequência do PWM é geralmente de 50 Hz, o que equivale a um período de 20 ms por ciclo. Durante este ciclo, a largura do pulso define o ângulo desejado do eixo, possibilitando um controlo incremental e suave (Boldea & Nasar, 2005; Siciliano & Khatib, 2016).

Este método apresenta diversas vantagens, como a simplicidade de implementação, especialmente em microcontroladores como o Arduíno, que suportam a geração nativa de sinais PWM (Monk, 2020). Além disso, a eficiência energética do PWM, por ativar o motor apenas durante os pulsos necessários, é particularmente relevante em sistemas que requerem baixo consumo de energia (Craig, 2005). A precisão do controlo e a capacidade de realizar ajustes incrementais tornam o PWM ideal para aplicações em manipuladores robóticos e sistemas de posicionamento (Spong et al., 2006).

A técnica é amplamente utilizada na robótica para o controlo de articulações em manipuladores, onde pequenas alterações na largura do pulso permitem movimentos suaves e precisos. Além disso, o PWM é essencial no controlo de garras robóticas, na movimentação de componentes em veículos autónomos e em sistemas de modelismo, como drones e braços robóticos (Siciliano & Khatib, 2016).

2.3.3 Arduíno

O Arduíno é uma plataforma de microcontroladores amplamente utilizada em robótica devido à sua flexibilidade, baixo custo e facilidade de programação (Banzi & Shiloh, 2014). Essa plataforma tornou-se uma escolha popular tanto em projetos educacionais como em aplicações industriais, graças à sua extensa biblioteca de suporte e à compatibilidade com diversos componentes e sensores.

O Arduíno é responsável pela geração de sinais PWM (Pulse Width Modulation), cuja largura define o ângulo de rotação dos servos. Por meio de bibliotecas como a Servo.h, disponíveis na plataforma, o Arduíno simplifica a programação e permite o controlo sincronizado de múltiplos servomotores, sendo essencial para manipuladores robóticos com várias articulações. A biblioteca Servo.h facilita a definição dos parâmetros de largura de pulso e frequência, além de possibilitar a integração com outros sensores ou sistemas, permitindo um controlo preciso e adaptável (Banzi & Shiloh, 2014; Monk, 2020).

Além disso, o Arduíno permite a integração com sensores, como encoders ou sensores de força, para criar sistemas de controlo em malha fechada. Esses sistemas utilizam feedback dos sensores para ajustar continuamente os sinais PWM, garantindo precisão mesmo em tarefas complexas, como manipulação de objetos delicados ou operações de montagem em linhas de produção (Monk, 2020).

Um exemplo típico de utilização do Arduino no controlo de servos é a implementação de movimentos sincronizados em manipuladores SCARA. Nesse caso, o Arduino é programado para enviar pulsos com larguras específicas a cada servo, garantindo que as articulações se movam de forma coordenada para alcançar posições precisas. Além disso, o Arduino pode ser configurado para executar sequências de movimentos automáticos, permitindo que o manipulador execute tarefas repetitivas, como empilhamento de peças ou operações pick-and-place.

2.3.4 Software ComRobot

A aplicação ComRobot desempenhou um papel essencial no projeto, ao fornecer uma interface gráfica para a calibração, controlo e programação do manipulador SCARA. Este software permitiu a definição e ajuste de parâmetros críticos, como os sinais PWM enviados aos servos, e facilitou a criação de sequências de movimentos automatizados (Projeto FEUP, 2024).

Durante o processo de calibração, a ComRobot possibilitou ajustes em tempo real dos sinais PWM, permitindo que os utilizadores definissem ângulos específicos para as articulações. Por meio da interface, foi possível visualizar diretamente os ângulos alcançados e identificar discrepâncias entre as posições reais e as posições desejadas. Essa funcionalidade eliminou a necessidade de ferramentas externas, reduzindo significativamente o tempo necessário para calibrar o sistema (Projeto FEUP, 2024). Além disso, a aplicação suportou a programação de sequências de movimentos automatizados, essencial para tarefas repetitivas. Por exemplo, o utilizador pode criar listas de comandos para movimentar as articulações de forma sincronizada, otimizando tarefas como a movimentação de peças e o empilhamento de objetos. Essa funcionalidade foi particularmente útil em operações que exigem precisão e consistência (Projeto FEUP, 2024).

Outro destaque da ComRobot foi o controlo incremental das articulações, que permitiu deslocamentos precisos (e.g., 1° ou 5°). Isso é essencial em aplicações que exigem alta precisão, como o alinhamento de componentes em montagens delicadas (Projeto FEUP, 2024).

A integração direta entre a ComRobot e o Arduino garantiu que os sinais PWM fossem gerados de forma sincronizada e sem atrasos, permitindo um controlo eficiente do manipulador SCARA. Essa conectividade simplificou o processo de calibração e programação, tornando-o acessível tanto para iniciantes quanto para utilizadores experientes (Projeto FEUP, 2024).

3. Metodologia e Resultados

A metodologia adotada neste projeto foi estruturada em várias etapas, para a calibração do manipulador robótico e execução de tarefas automatizadas. O trabalho seguiu uma abordagem incremental, com o objetivo de explorar as capacidades de cada componente do manipulador SCARA em atividades práticas.

3.1. Descrição do Projeto

O manipulador robótico utilizado neste projeto possui uma configuração SCARA, composta por quatro servomotores controlados por uma placa Arduino. Os principais componentes e ferramentas utilizados foram:

- *Manipulador robótico SCARA: Equipado com articulações rotativas e lineares para manipulação em três graus de liberdade (XY e Z);*
- *Placa Arduino: Programada para gerar sinais PWM e controlar os servomotores.*
- *Software ComRobot: Aplicação utilizada para calibração, controlo incremental e execução de tarefas;*
- *Papel milimétrico: Utilizado para registar ângulos durante a calibração.*

A integração destes elementos permitiu a calibração precisa e o controlo eficiente do manipulador, possibilitando a execução de tarefas programadas, como movimentação de peças e operações de empilhamento.

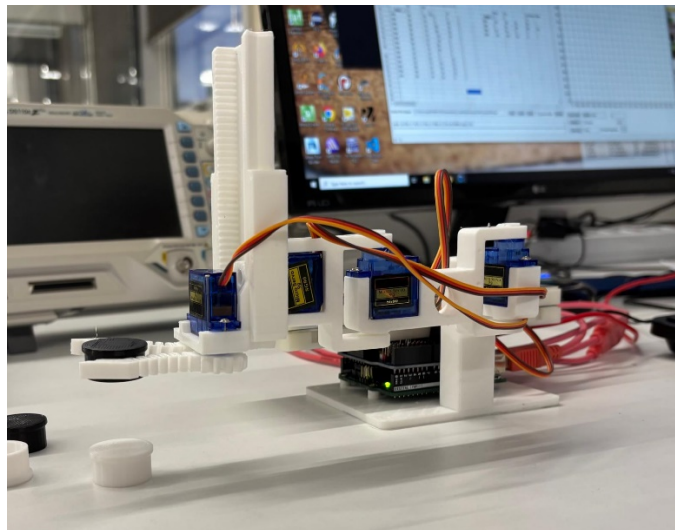


Figura 3: Manipulador SCARA com os 4 Servomotores

3.2. Calibração e Controlo dos Servomotores

A calibração dos servomotores foi uma etapa fundamental para garantir que os movimentos do manipulador fossem precisos e consistentes. Este processo estabeleceu a relação entre a largura do pulso do sinal PWM e os ângulos alcançados pelos servos.

A calibração seguiu as seguintes etapas:

1. *Preparação:* O manipulador foi conectado ao Arduino e à fonte de alimentação (5 V fixos). O circuito foi verificado para garantir que todos os componentes estavam funcionalmente integrados.
2. *Configuração Inicial:* Utilizou-se o software ComRobot para enviar sinais PWM com largura inicial de 1500 μs (posição neutra). Variações incrementais de 100 μs foram aplicadas para explorar os ângulos correspondentes.
3. *Registo dos Ângulos:* Para cada largura de pulso aplicada, foram registadas as posições horizontais (x) e verticais (y) da extremidade do manipulador, utilizando papel milimétrico. Os ângulos correspondentes foram calculados pela expressão:

$$\theta = \arctan \left(\frac{x}{y} \right)$$

4. *Análise dos Dados:* Gráficos de largura de pulso vs. ângulo e ângulo vs. largura de pulso foram construídos para verificar a linearidade. Além disso, calcularam-se os erros médios e máximos para avaliar a precisão do sistema.

3.2.1 Calibração do Primeiro Servo

Procedeu-se a calibração do primeiro servo seguindo o procedimento descrito anteriormente.

Os valores assim obtidos encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1: Calibração do Primeiro Servo - Largura do Pulso vs Ângulo

Largura do pulso (μs)	x (cm)	y (cm)	Ângulo ($^{\circ}$) $\theta = \arctan \left(\frac{x}{y} \right)$
540	5	89	86,78
600	13	87	81,50
700	23	84	74,69
800	40	77	62,55
900	51	70	53,92
1000	61	60	44,53
1100	69	50	35,93
1200	77	37	25,67
1300	82	27	18,23
1400	84	8	5,44
1500	87	-14	-9,14
1600	83	-27	-18,02
1700	80	-37	-24,82
1800	73	-40	-28,72
1900	65	-51	-38,12
2000	54	-61	-48,48
2100	43	-69	-58,07
2200	30	-75	-68,20
2300	15	-80	-79,38
2400	-2	-82	-91,40

Com os dados da tabela anterior contruiu-se o Gráfico 1 que apresenta a relação entre a largura do pulso e o ângulo obtido. Destaca-se a linearidade das medidas ($R^2 = 0,9979$).

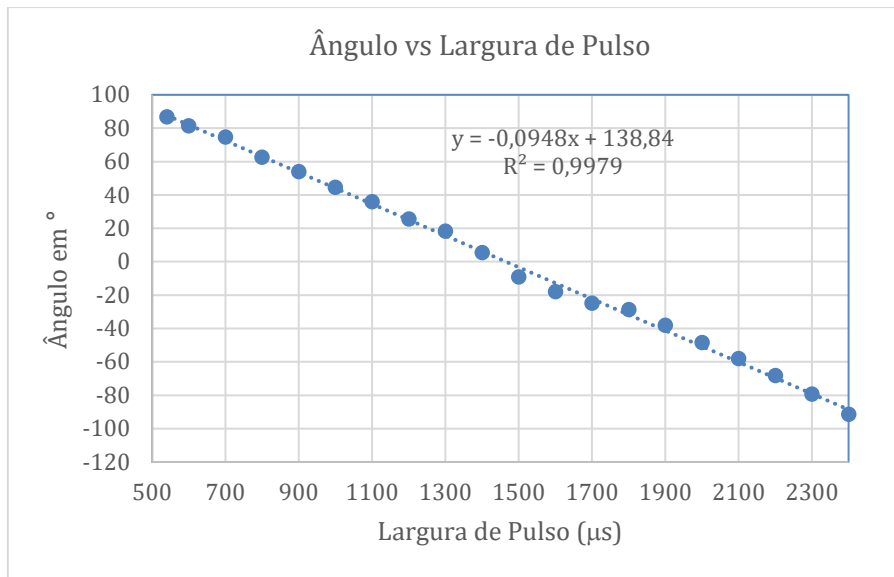


Gráfico 1: Ângulo vs Largura de Pulso para o servo 1

Com os mesmos valores contruiu-se o gráfico inverso (Gráfico 2), que traduz a relação entre o ângulo e a largura de pulso:

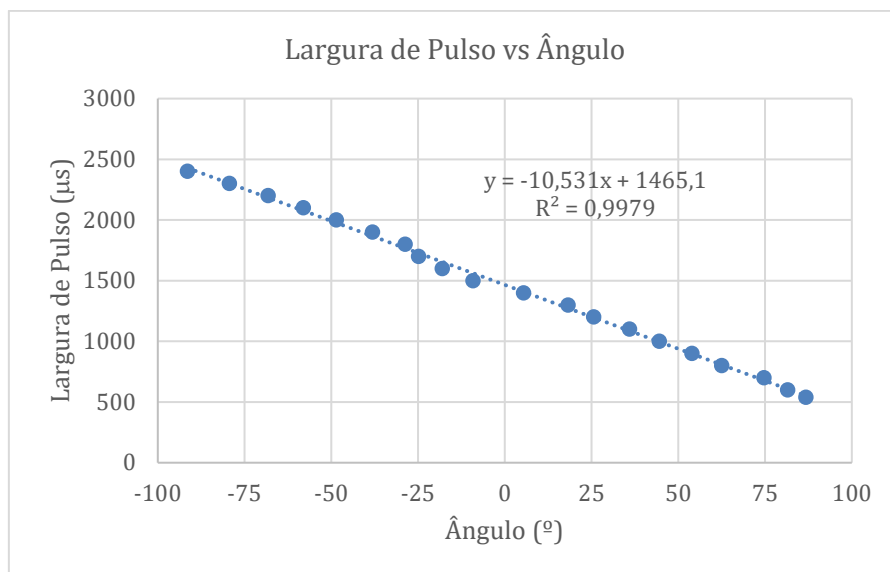


Gráfico 2: Largura de Pulso vs Ângulo para o servo 1

O gráfico apresentado confirma a relação linear inversa entre o ângulo e a largura do pulso do sinal PWM. A inclinação constante da linha evidencia a consistência nos resultados da calibração, com um coeficiente de correlação $R^2 = 0,9979$ que valida a alta precisão do sistema no intervalo analisado. Estes gráficos seguem a equação da relação linear: $\Delta t = \Delta t_0 + \alpha \cdot \theta$, onde:

- Δt : largura do pulso (μs).
- Δt_0 : largura do pulso (μs) para o ângulo de referência (0°);
- α ganho em $\mu s/^\circ$.

Para o nosso caso a equação para o primeiro servo é: $\Delta t = 1465,1 - 10,531 \cdot \theta$

A partir dessa relação foi construída a Tabela 2 que compara a largura do pulso calculada pela equação anterior com a largura do pulso aplicada nos vários ensaios. A análise dos dados revela que o erro absoluto, medido como a diferença entre os dois valores, é mínimo. Este facto é comprovado pelo valor do erro relativo, que mede a proporção do erro em relação à largura de pulso aplicada, permanece abaixo de 4,1%, mesmo nos limites do intervalo operacional. Esses resultados indicam um desempenho muito confiável do sistema dentro do intervalo de calibração.

Tabela 2: Relação Ângulo vs largura de Pulso calculada e Aplicada para o servo 1

Ângulo θ (°)	Largura do Pulso Calculada (μs)	Largura do Pulso Aplicada (μs)	Erro Absoluto (μs)	Erro Relativo (%)
86,78	551	540	11	2,1%
81,50	607	600	7	1,1%
74,69	679	700	21	3,1%
62,55	806	800	6	0,8%
53,92	897	900	3	0,3%
44,53	996	1000	4	0,4%
35,93	1087	1100	13	1,2%
25,67	1195	1200	5	0,4%
18,23	1273	1300	27	2,1%
5,44	1408	1400	8	0,6%
-9,14	1561	1500	61	4,1%
-18,02	1655	1600	55	3,4%
-24,82	1726	1700	26	1,6%
-28,72	1768	1800	32	1,8%
-38,12	1867	1900	33	1,8%
-48,48	1976	2000	24	1,2%
-58,07	2077	2100	23	1,1%
-68,20	2183	2200	17	0,8%
-79,38	2301	2300	1	0,0%
-91,40	2428	2400	28	1,2%

Em que:

- Largura de Pulso Calculada foi obtida pela equação: $\Delta t = 1465,1 - 10,531 \cdot \theta$;
- Erro absoluto foi obtido por: $|\Delta t_{Cal} - \Delta t_{Apl}|$, em que Δt_{Cal} é a Largura de Pulso Calculada e Δt_{Apl} é a largura de pulso aplicada;
- Erro relativo foi obtido por: $\frac{|\Delta t_{Cal} - \Delta t_{Apl}|}{\Delta t_{Apl}} \times 100\%$

Finalmente, construiu-se um gráfico que compara os valores calculados para a largura de pulso dados pela equação $\Delta t = 1465,1 - 10,531 \cdot \theta$ e os valores que foram aplicados:

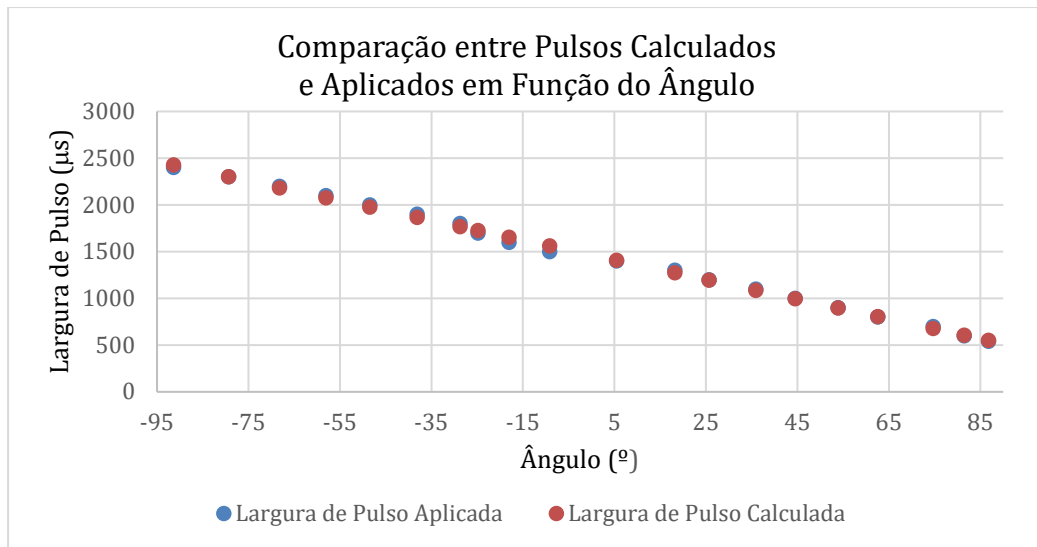


Gráfico 3: Comparação entre os Valores de Pulso Calculados e Aplicados - Servo 1

A análise do gráfico permite concluir que os valores são quase coincidentes, o que mostra uma boa calibração do servo 1.

3.2.2 Calibração do Segundo Servo

A calibração do segundo servo seguiu o mesmo procedimento que o anterior. Havia, no entanto, uma dificuldade acrescida que está relacionada com o facto de não ser conhecida a origem do eixo de rotação deste servo, pois esta depende do posicionamento da primeira articulação. Foi assim, necessário estimar o centro da circunferência que será a origem do eixo de rotação. Este cálculo foi feito com uma folha de cálculo fornecida. Após este passo foi possível determinar os ângulos a que cada ponto corresponde. A Tabela 3 apresenta os valores obtidos para o segundo servo.

Tabela 3: Calibração do Segundo Servo - Largura do Pulso vs Ângulo

Largura do pulso (μs)	x (cm)	y (cm)	Ângulo (°) $\theta = \arctan\left(\frac{x}{y}\right)$
600	24	64	69,44
700	36	56	57,26
800	44	50	48,65
900	53	41	37,72
1000	59	30	26,95
1100	62	20	17,88
1200	65	9	7,88
1300	66	-1	-0,87
1400	65	-13	-11,31
1500	63	-22	-19,25
1600	54	-32	-30,65
1700	47	-42	-41,78
1800	39	-50	-52,05
1900	29	-67	-66,60
2000	20	-70	-74,05
2100	8	-73	-83,75
2200	-4	-74	-93,09

Com os dados da tabela anterior contruiu-se o seguinte gráfico que apresenta a relação entre a largura do pulso e o ângulo obtido. Destaca-se a linearidade das medidas ($R^2 = 0,9991$).

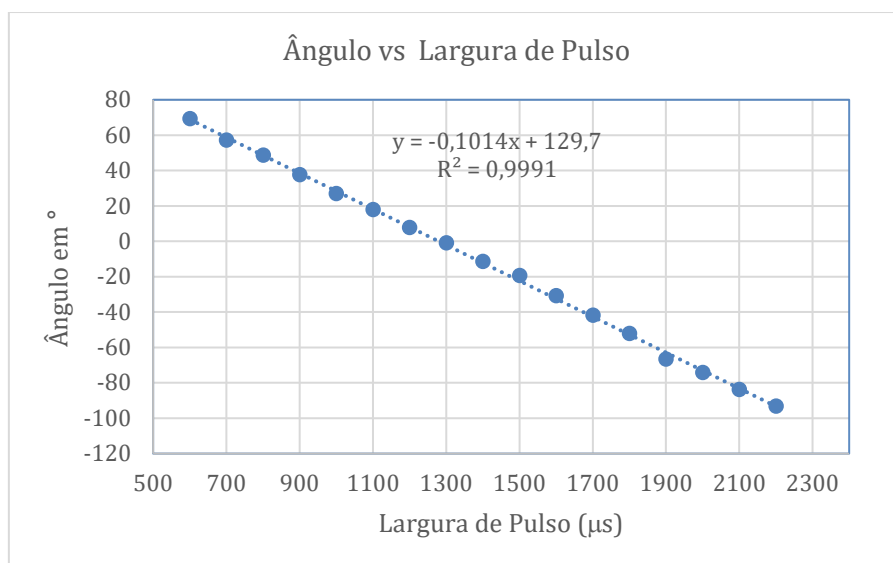


Gráfico 4: Ângulo vs Largura de Pulso para o servo 2

Com os mesmos valores contruiu-se o gráfico inverso, que traduz a relação entre o ângulo e a largura de pulso.

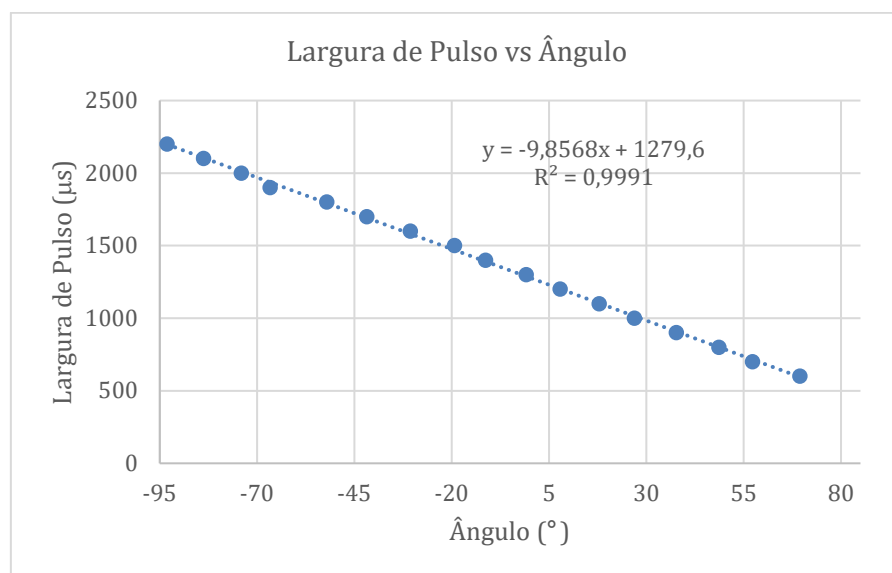


Gráfico 5: Largura de Pulso vs Ângulo para o servo 2

O gráfico apresentado confirma a relação linear inversa entre o ângulo e a largura do pulso do sinal PWM. A inclinação constante da linha evidencia a consistência nos resultados da calibração, com um coeficiente de correlação $R^2 = 0,9991$ que valida a alta precisão do sistema no intervalo analisado.

Estes gráficos seguem a equação da relação linear: $\Delta t = \Delta t_0 + \alpha \cdot \theta$, onde:

- Δt : largura do pulso (μs).
- Δt_0 : largura do pulso (μs) para o ângulo de referência (0°);
- α ganho em $\mu s/^\circ$.

Para o nosso caso a equação para o segundo servo é: $\Delta t = 1279,6 - 9,8568 \cdot \theta$

A partir dessa relação foi construída uma tabela que compara a largura do pulso calculada pela equação com a largura do pulso aplicada nos vários ensaios. A análise dos dados revela que o erro absoluto, medido como a diferença entre os dois valores, é mínimo. Este facto é comprovado pelo valor do erro relativo, que mede a proporção do erro em relação à largura de pulso aplicada, permanece abaixo de 2,16%, mesmo nos limites do intervalo operacional. Esses resultados indicam um desempenho confiável do sistema dentro do intervalo de calibração.

Tabela 4: Relação Ângulo vs largura de Pulso calculada e Aplicada para o servo 2

Ângulo θ ($^\circ$)	Largura do Pulso Calculada (μs)	Largura do Pulso Aplicada (μs)	Erro Absoluto (μs)	Erro Relativo (%)
69,44	595	600	5	0,8%
57,26	715	700	15	2,2%
48,65	800	800	0	0,0%
37,72	908	900	8	0,9%
26,95	1014	1000	14	1,4%
17,88	1103	1100	3	0,3%
7,88	1202	1200	2	0,2%
-0,87	1288	1300	12	0,9%
-11,31	1391	1400	9	0,6%
-19,25	1469	1500	31	2,0%
-30,65	1582	1600	18	1,1%
-41,78	1691	1700	9	0,5%
-52,05	1793	1800	7	0,4%
-66,60	1936	1900	36	1,9%
-74,05	2010	2000	10	0,5%
-83,75	2105	2100	5	0,2%
-93,09	2197	2200	3	0,1%

Em que:

- Largura de Pulso Calculada foi obtida pela equação: $\Delta t = 1465,1 - 10,531 \cdot \theta$;
- Erro absoluto foi obtido por: $|\Delta t_{Cal} - \Delta t_{Apl}|$, em que Δt_{Cal} é a Largura de Pulso Calculada e Δt_{Apl} é a largura de pulso aplicada;
- Erro relativo foi obtido por: $\frac{|\Delta t_{Cal} - \Delta t_{Apl}|}{\Delta t_{Apl}} \times 100\%$

Finalmente, construiu-se um gráfico que compara os valores calculados para a largura de pulso dados pela equação $\Delta t = 1279,6 - 9,8568 \cdot \theta$ e os valores que foram aplicados:

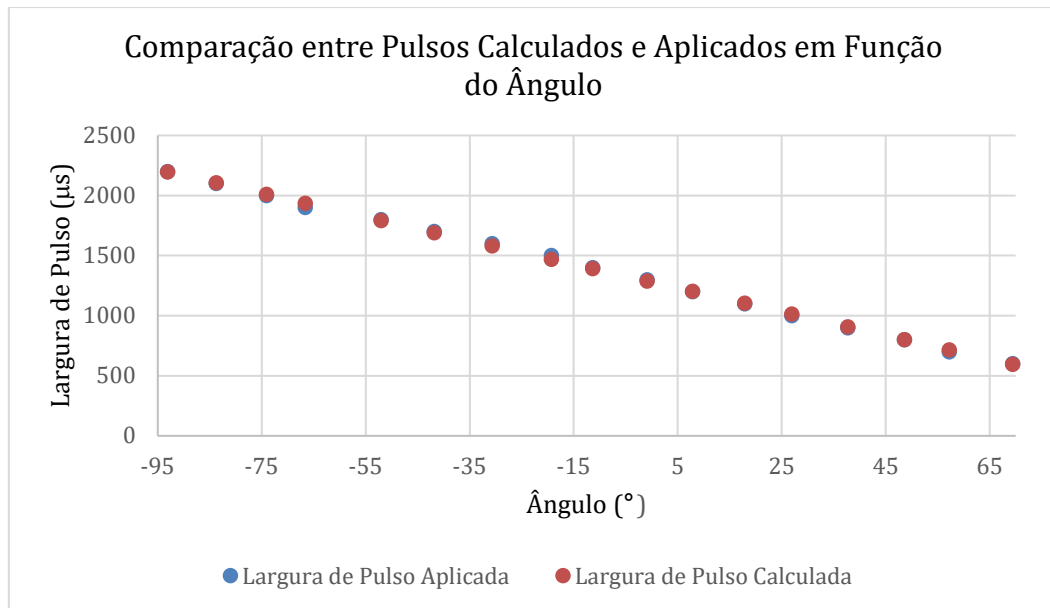


Gráfico 6: Comparação entre os Valores de Pulso Calculados e Aplicados - Servo 2

3.2.3 Calibração Rápida

Com a calibração dos primeiros dois servos, validamos a linearidade da relação entre o tempo de pulso e o ângulo. Este facto permite fazer calibrações rápidas recorrendo a dois pontos.

Já sabemos que para cada articulação a expressão que permite relacionar a largura do pulso em função da sua posição é do tipo:

$$\Delta t = \Delta t_0 + \alpha \cdot \theta$$

Com:

- Δt : largura do pulso (μs).
- Δt_0 : largura do pulso (μs) para o ângulo de referência (0°);
- α ganho em $\mu s/^\circ$.

Assim, conhecendo dois valores de largura do pulso e o respetivo ângulo é possível determinar Δt_0 e α .

3.2.3.1 Calibração Rápida para o servo 1 e 2

Para se fazer a calibração rápida destes servos começou-se por ajustar a largura de pulso até se obter um ângulo de 0° . De seguida, tornamos a ajustar a largura de pulso até obtermos um ângulo de 90° .

Tabela 5: Valores da Calibração Rápida para o Servo 1 e 2.

Largura do Pulso (μs)	Angulo ($^\circ$)
1600	0
600	90

Com estes valores resolveu-se o sistema:

$$\begin{cases} 1600 = \Delta t_0 + \alpha \cdot 0 \\ 600 = \Delta t_0 + \alpha \cdot 90 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \Delta t_0 = 1600 \mu s \\ \alpha = -11,111 \mu s/^{\circ} \end{cases}$$

3.2.3.2 Calibração Rápida para o servo 3

De forma semelhante procedeu-se à calibração do servo 3. No entanto, existe uma diferença na equação de calibração. Para esta articulação, a relação que queremos calibrar é a relação entre a largura do pulso e a altura em que a garra fica posicionada. A equação é do tipo:

$$\Delta t = \Delta t_0 + \alpha \cdot z$$

Com:

- Δt : largura do pulso (μs).
- Δt_0 : largura do pulso (μs) para o ângulo de referência (0°);
- α ganho em $\mu s/mm$.

Os valores obtidos encontram-se na tabela seguinte:

Tabela 6: Valores da Calibração Rápida para o Servo 3

Largura do Pulso (μs)	Altura (mm)
2000	0
600	45

Com estes valores resolveu-se o sistema:

$$\begin{cases} 2000 = \Delta t_0 + \alpha \cdot 0 \\ 600 = \Delta t_0 + \alpha \cdot 45 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \Delta t_0 = 2000 \mu s \\ \alpha = -31,111 \mu s/mm \end{cases}$$

3.2.3.3 Calibração Rápida para o servo 4

Para se fazer a calibração rápida deste servo começou-se por ajustar a largura de pulso até se obter um ângulo de 0° . De seguida, tornamos a ajustar a largura de pulso até obtermos um ângulo de 90° .

Os valores obtidos encontram-se na tabela seguinte:

Tabela 7: Valores da Calibração Rápida para o Servo 4.

Largura do Pulso (μs)	Angulo ($^{\circ}$)
1900	0
600	90

Com estes valores resolveu-se o sistema:

$$\begin{cases} 1900 = \Delta t_0 + \alpha \cdot 0 \\ 600 = \Delta t_0 + \alpha \cdot 90 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \Delta t_0 = 1900 \mu s \\ \alpha = -14,444 \mu s/^{\circ} \end{cases}$$

3.2.3 Controlo do Manipulador com o Software Com Robot

Depois da calibração dos servomotores é possível fazer o controlo do manipulador robótico. Este é feito com recurso a um software (que foi parcialmente usado para fazer a calibração) denominado ComRobot. Este encontra-se dividido em várias zonas (Ver Figura 1):

- **Zona Roxa:** Controlo dos servos motores por pulso. Este controlo foi usado na calibração dos servos.
- **Zona Azul:** Calibração dos servos e controlo por ângulo/mm (valores que resultaram da calibração rápida).
- **Zona verde:** Controlo incremental por ângulo/mm. Permite alterar o valor do ângulo/altura.
- **Zona vermelha:** Controlo por lista de comandos. O Play ativa o programa e dá início ao ciclo. Na primeira coluna, está definido o tipo de movimento. Pode ser AM (Absolute Movement) ou IM (Immediate Movement). Por recomendação usamos sempre o AM. Nas colunas 2, 3, 4 e 5 está definida a posição final para cada articulação. Na 6 (e última coluna) apresenta-se o tempo de cada ação. Cada linha corresponde a uma ação e estas são sequenciais (linhas 11 e seguintes).

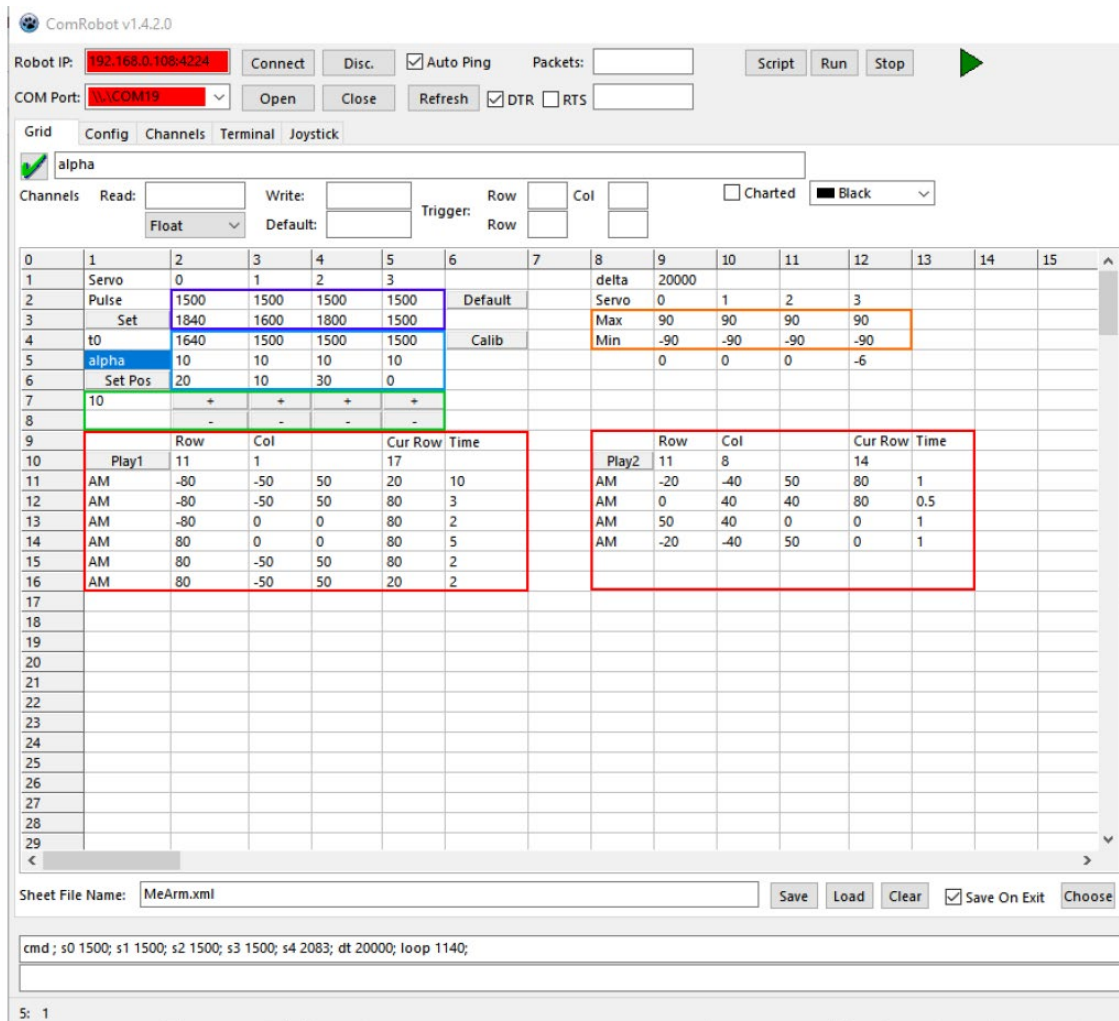


Figura 4: Página de Configuração/Controlo do ComRobot (FEUP, 2024)

O objetivo da calibração era fazer o robot apanhar um disco e deslocá-lo para uma determinada posição. De seguida, apanhar outro disco e colocá-lo em cima do anterior.

A lista de comandos usada foi:

Play1	11	1		17	
AM	0	0	0	80	3
AM	-10	-10	0	80	3
AM	-10	-10	80	80	3
AM	60	-10	80	80	3
AM	60	-10	30	80	3
AM	60	-10	20	10	7

Figura 5: Lista de Comandos utilizada para executar a instrução pretendida.

A seguinte sequência de imagens da Figura 3 mostram o movimento do braço robótico. Na imagem da esquerda, o braço coloca o primeiro disco numa posição pré-determinada, na imagem do meio o braço robótico apanha o segundo disco, para finalmente o colocar em cima do primeiro (imagem da direita).



Figura 6: Sequência de imagens que mostra o braço robótico a executar o movimento

4. Conclusões

Este projeto permitiu explorar, de forma prática e teórica, os fundamentos do controlo de manipuladores robóticos, com especial foco na configuração SCARA e na utilização de servomotores. A calibração e o controlo por Pulse-Width Modulation (PWM) revelaram-se fundamentais para alcançar movimentos precisos e consistentes, demonstrando a relevância desta técnica em aplicações robóticas. A integração da plataforma Arduino com o software ComRobot foi um elemento essencial no desenvolvimento do sistema.

A calibração dos servomotores foi realizada com sucesso, atingindo erros inferiores a 4,1%, o que demonstra a precisão do sistema implementado. Além disso, a relação linear entre o ângulo e a largura do pulso destacou-se como um fator crucial para garantir previsibilidade e confiabilidade no controlo incremental das articulações, permitindo ainda a calibração rápida dos servos. Os resultados práticos, como a movimentação de objetos, evidenciaram a eficácia do manipulador robótico.

No entanto, alguns desafios foram identificados, incluindo a necessidade de maior precisão na calibração e a limitação das capacidades dos servomotores utilizados. Este projeto contribuiu significativamente para o domínio de conceitos fundamentais em robótica e o desenvolvimento de competências práticas relevantes para o campo.

Referências bibliográficas

- Banzi, M., & Shiloh, M. (2014). Getting Started with Arduino. Maker Media.
- Boldea, I. (2009). Linear Electric Machines, Drives, and MAGLEVs Handbook. CRC Press.
- Boldea, I., & Nasar, S. A. (2005). Electric Drives. CRC Press.
- Bogue, R. (2022). "Recent developments in SCARA robots." Industrial Robot: An International Journal.
- Craig, J. J. (2005). Introduction to Robotics: Mechanics and Control. Pearson.
- Esposito, A. (2000). Fluid Power with Applications. Pearson.
- Green, M., & Kim, H. (2023). "Advances in robotic manipulators: SCARA systems and their industrial applications." Journal of Advanced Robotics.
- Gonzalez, C. (2016). What's the difference between industrial robots? New Equipment Digest. Recuperado em 9 de dezembro de 2024, de <https://www.newequipment.com/learning-center/article/22059066/whats-the-difference-between-industrial-robots>.
- Howell, L. L. (2001). Compliant Mechanisms. Wiley.
- Kim, D. H., & Son, J. (2019). "Hybrid actuator systems: Trends and applications." Journal of Robotics and Automation.
- Lopes, A.M. (2002). "Modelação cinemática e dinâmica de manipuladores de estrutura em série." Dissertação (Mestrado) – Departamento de Automação, instrumentação e Controle, Universidade do Porto, 2002.
- Manring, N. D. (2013). Hydraulic Control Systems. Wiley.
- Monk, S. (2020). Programming Arduino: Getting Started with Sketches. McGraw Hill.
- Projeto FEUP. (2024). Construção de um Manipulador Robótico (Aula 1, 2 e 3). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Siciliano, B., & Khatib, O. (2016). Springer Handbook of Robotics. Springer.
- Spong, M. W., Hutchinson, S., & Vidyasagar, M. (2006). Robot Modeling and Control. Wiley.
- Yamamoto, A., Higuchi, T., & Shimojo, M. (2011). "Actuator technologies for human assistive devices." Annual Reviews in Control.
- Yoshikawa, T. (1990). Foundations of Robotics: Analysis and Control. MIT Press.