

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE FEDERAL DE ENGENHARIA MECÂNICA – FEMEC

NICOLAS DE SOUSA SILVA

**PROJETO DA UNIDADE DE CONTROLE DO SISTEMA MECATRÔNICO DE UMA  
MINIMÁQUINA-FERRAMENTA MULTIFUNCIONAL HÍBRIDA CNC**

UBERLÂNDIA

2024



NICOLAS DE SOUSA SILVA

**PROJETO DA UNIDADE DE CONTROLE DO SISTEMA MECATRÔNICO DE UMA  
MINIMÁQUINA-FERRAMENTA MULTIFUNCIONAL HÍBRIDA CNC**

Projeto de fim de curso apresentado como requisito para obtenção de título de Bacharel em Engenharia Mecatrônica, da Universidade Federal de Uberlândia.

Área de Concentração: Mecatrônica.

Orientador: Prof. Dr. Arthur Alves Fiocchi

UBERLÂNDIA

2024



NICOLAS DE SOUSA SILVA

**PROJETO DA UNIDADE DE CONTROLE DO SISTEMA MECATRÔNICO DE UMA  
MINIMÁQUINA-FERRAMENTA MULTIFUNCIONAL HÍBRIDA CNC**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito para obtenção de título de Bacharel em Engenharia Mecatrônica pela Faculdade de Engenharia Mecânica - UFU.

Uberlândia, 05 de janeiro de 2024

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Arthur Alves Fiocchi (orientador)

---

Prof. Dr. José Jean-Paul Zanlucchi de Souza Tavares

---

Prof. Dr. Alexandre Zuquete Guarato



## AGRADECIMENTOS

Agradeço a **DEUS**, pela vida que me deste e por todo o amparo, forças, bênçãos e provações que me guiaram até esta conquista.

À **SANTÍSSIMA VIRGEM MARIA** mãe de Deus que nos momentos mais difíceis de minha vida foi e é o consolo e conforto que preciso.

Aos meus **PAIS** e meu **IRMÃO**, Ézio José da Silva, Dalila Nunes de Sousa Silva e Lucas Gabriel de Sousa Silva por serem os pilares que sustentam minha vida e jornada. Sem seus sacrifícios, ensinamentos e amor jamais teria alcançado essa conquista.

A minha **NAMORADA** Marília Nayara Almeida por todo o apoio, compreensão e dedicação ao longo do desenvolvimento do trabalho estando presente durante todo o período.

Ao meu **ORIENTADOR** Prof. Dr. Arthur Alves Fiocchi, por todo conhecimento e experiência transmitido ao decorrer do desenvolvimento deste trabalho. Agradeço por ter sido fundamental na minha graduação e por todo suporte e esforço despendido para que esse e todos os outros trabalhos acontecessem.

Aos **PROFESSORES DA FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA (FEMEC) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE UERLANDIA (UFU)**, por toda transmissão de conhecimento realizada durante minha formação.

Ao **LABORATÓRIO DE ENSINO E PESQUISA EM USINAGEM e FEMEC Maker** pela oportunidade, conhecimento e experiência que me proporcionou durante minha graduação.

A **EMPRESA** Autodesk por fornecer de forma gratuita a licença de uso do programa Autodesk Fusion 360® para fins acadêmicos.

Agradeço a **FAPEMIG** (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais) pelo auxílio financeiro a pesquisa (APQ-01759-17), tornando possível a realização deste trabalho.



## RESUMO

O projeto de uma minimáquina CNC multifuncional de precisão feita de granito sintético surgiu para atender à demanda por sistemas de fabricação híbridos, integrando processos subtrativos e aditivos em uma única máquina-ferramenta para atender aos requisitos avançados de fabricação da Indústria 4.0. Este estudo teve como objetivo desenvolver uma abordagem de projeto aplicada em um sistema mecatrônico para uma minimáquina-ferramenta de granito sintético, com base na pesquisa de Rodrigues (2022) e Alves (2022). A Metodologia de Projeto foi aplicada no projeto mecatrônico e elétrico. O projeto iniciou-se avaliando os tipos de fusos e motores aplicados, dando continuidade ao trabalho desenvolvido por Alves (2022). Sendo avaliada posteriormente o torque necessário em cada eixo, razão de inércia, resolução, unidade de controle do sistema e os métodos de transmissão de dados entre os dispositivos periféricos. Os requisitos de projeto foram: três eixos lineares ortogonais com guias e fusos de precisão de elementos recirculantes; previsão de expansão do sistema mecatrônico, adição de quarto e quinto eixos e novos dispositivos periféricos; 100 N/ $\mu\text{m}$  de rigidez estática; um cabeçote vertical; resolução mínima de posicionamento de 1  $\mu\text{m}$ ; velocidades de avanço nominais de 100 mm/s; unidade de controle numérico baseada em *LinuxCNC*; uso de protocolos de comunicação atuais no mercado internacional, visando obter um produto comercializável que atenda aos requisitos industriais; uso de malha fechada entre motores e drivers controladores. Os resultados incluem três protótipos evolutivos, sendo o último detalhado e analisado teoricamente quanto ao conjunto mecatrônico definido e protocolos de transmissão de dados, mostrando que foi possível obter um conjunto mecatrônico que atende aos requisitos de projeto. O projeto de pesquisa exigirá testes experimentais de desempenho dos protocolos de transmissão de dados e ensaios metrológicos do conjunto mecatrônico, dando continuidade ao Projeto de Pesquisa FAPEMIG APQ0175917.

**Palavras-chave:** Minimáquina-ferramenta. Sistemas servo acionados. Usinagem de ultraprecisão.. *LinuxCNC*. Redes industriais.

## ABSTRACT

The design of a multifunctional precision CNC mini-machine tool made of synthetic granite has emerged to address the demand for hybrid manufacturing systems, integrating subtractive and additive processes within a single machine-tool to meet advanced manufacturing requirements of Industry 4.0. The goal was to develop an evolutive structural design approach for a synthetic granite mini-machine tool, based on the research of Rodrigues (2022) and Alves (2022). Design Methodology was applied in the electric and mechatronic design. Firstly, the kind of applied ballscrews and electric motors was assessed, continuing the work developed by Alves (2022). In a posteriori time the torque needed of each axis, inertia ratio, resolution, system control unit and the data transmission method between the peripherals devices. The design requirements were: three orthogonal linear axes with precision guideways and ballscrews of recirculating elements; prediction of expansion of the mechatronic system; addition of fourth and fifth axes and new peripheric devices; 100 N/ $\mu\text{m}$  static stiffness; a vertical spindle; minimum positioning resolution of 1 $\mu\text{m}$ ; nominal feed rate of 100 mm/s; numeric control unit based on LinuxCNC; updated communication protocols in the international market, in the way of get a marketable product that meets the industrial requirements; closed-loop system between motos and driver controllers. The results include three evolutive prototypes, being the last one detailed and analyzed theoretic in the way of the defined mechatronic assembly and the data transmission protocol, showing that it was possible to achieve a mechatronic assembly that meets the design requirements. The design will require experimental trials of data protocol transmission performance and metrological tests of the mechatronic assembly, continuing the FAPEMIG APQ-01759-17 Research Project.

**Keywords:** Mini machine tool. Servo-driven systems.. Ultra-precision machining.. LinuxCNC. Industrial networks.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – (a) Primeiro transistor desenvolvido pela <i>Bell Labs</i> em 1947 e (b) um exemplo de arranjos eletrônicos de transistores e semicondutores de um processador. ....	1
Figura 1.2 – Fases de desenvolvimento do projeto de uma minimáquina-ferramenta para Usinagem de Ultraprecisão (UUP).....	3
Figura 2.1 – Sinal de pulso e direção enviados da unidade de controle do sistema (UCS) para um driver.....	7
Figura 2.2 – Exemplo de acionamento de motor de passo. Bobinas AA' acionadas (A e C), bobinas BB' acionadas (B e D) .....	8
Figura 2.3 – Representação dos elementos constituintes de um motor de passo ....	9
Figura 2.4 – Perfil de movimento desenvolvido pela massa movida. (a) Velocidade com perfil trapezoidal e (b) velocidade com perfil em “S” .....	10
Figura 2.5 – Distribuição de esforços mecânicos aplicados e representação dos vetores de velocidade e aceleração de um sistema servo acionado .....	11
Figura 2.6 – Estrutura da pirâmide da automação .....	15
Figura 2.7 – Modelo OSI de estrutura de redes .....	16
Figura 2.8 – (a) Comunicação mestre/escravo e (b) comunicação em modo <i>broadcast</i> .....	19
Figura 2.9 – Comparação do <i>frame</i> de dados <i>Modbus TCP/IP</i> com o <i>frame</i> de dados <i>Modbus RTU</i> .....	20
Figura 2.10 – Estrutura do objeto <i>SDO</i> no protocolo <i>CANOpen</i> .....	23
Figura 2.11 – Estrutura do objeto <i>PDO</i> no protocolo <i>CANOpen</i> .....	23
Figura 2.12 – Dados <i>EtherCAT</i> encapsulados no quadro <i>Ethernet</i> .....	26
Figura 3.1 – Fluxograma do projeto de minimáquina-ferramenta multifuncional CNC de estrutura de granito sintético (GS) .....	27
Figura 3.2 – Levantamento de eixos e dispositivos periféricos integrados à máquina-ferramenta multi-processos para manufatura aditiva e subtrativa.....	31
Figura 3.3 – Curva característica de velocidade x torque do motor de passo modelo 86HS156-5504A14-B35 com torque máximo de de 11,77 N.m (120 kgf.cm). A curva foi levantada sob condições de teste de 60 Vac, 5,83 A e 1 600 PPR....	35
Figura 3.4 – Sinais de entrada e saída da placa controladora modelo BOB 5 eixos .....	37

- Figura 3.5 – Curva característica de velocidade x torque do motor de passo modelo 86HS156-5504A14-B35 com torque máximo de de 11,77 N.m (120 kgf.cm). A curva foi levantada sob condições de teste de 60 Vac, 5,83 A e 1 600 PPR....39
- Figura 3.6 – Curva característica de velocidade x torque do servomotor Leadshine® modelo ELM1H – 0750MA80F .....42
- Figura 3.7 – Topologia da rede EtherCAT aplicada no protótipo 3 .....44

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 2.1 – Camadas implementadas em cada protocolo de comunicação, de acordo com o modelo <i>OSI</i> de redes .....	16
Tabela 2.2 – Estrutura do <i>frame</i> de comunicação <i>Modbus RTU</i> .....	17
Tabela 2.3 – Particularidades dos barramentos de comunicação RS-232, RS-442 e RS-485 .....	18
Tabela 2.4 – Operações comuns do protocolo <i>Modbus</i> .....	21
Tabela 3.1 – Relação de guias e patins considerados nos dez protótipos .....	30
Tabela 3.2 – Dados técnicos necessários para o cálculo do torque em cada eixo no protótipo 1 .....	33
Tabela 3.3 – Resultados do torque necessário em cada eixo para o protótipo 1 .....	34
Tabela 3.4 – Levantamento de custos dos principais sistemas mecatrônicos do protótipo .....	37
Tabela 3.5 – Resultados do torque necessário em cada eixo para o protótipo 2 .....	38
Tabela 3.6 – Principais dados técnicos do conjunto mecatrônico aplicado ao protótipo 3 .....	41
Tabela 3.7 – Acoplador de rede EtherCAT e cartões de expansão aplicados ao protótipo 3 .....	43
Tabela 3.8 – Levantamento de custos dos principais sistemas mecatrônicos do protótipo 3 .....	44
Tabela 4.1 – Levantamento de custos dos principais sistemas mecatrônicos do protótipo 3 .....	45



**SIGLAS E ABREVIACOES**

<i>AI</i>	<i>Analog Input</i>
<i>AO</i>	<i>Analog Output</i>
<i>API</i>	<i>Application Programing Interface</i>
<i>ASCII</i>	<i>American Code for Information Interchange</i>
<i>BOB</i>	<i>Breakout Board</i>
<i>CAN</i>	<i>Controller Area Network</i>
<i>CLP</i>	Controladores Lógicos Programáveis
<i>CNC</i>	Comando Numérico Computadorizado
<i>CRC</i>	Checagem Cclica Redundante
<i>CSMA-CD</i>	Mecanismo desenvolvido especificamente para redes ethernet
<i>DO</i>	<i>Digital Output</i>
<i>DI</i>	<i>Digital Input</i>
<i>DIY</i>	<i>Did It Yourself</i>
<i>FEMEC</i>	Faculdade de Engenharia Mecnica
<i>GUI</i>	<i>Graphical User Interface</i>
<i>IHM</i>	Interface Homem Máquina
<i>ISO</i>	<i>International Organization for Standartization</i>
<i>ITU-T</i>	<i>International Telecommunication Union Standartization</i>
<i>LEPU</i>	Laboratrio de Ensino e Pesquisa em Usinagem
<i>MBAP</i>	<i>Modbus Application Protocol</i>
<i>NEMA</i>	<i>National Eletrical Manufacture Association</i>
<i>NMT</i>	<i>Network Management</i>

<i>OSI</i>	<i>Open Systems Interconnction</i>
<i>PDO</i>	<i>Process Data Object</i>
<i>PDU</i>	<i>Protocol Data Unit</i>
<i>PPR</i>	<i>Pulse Per Revolution</i>
<i>RTU</i>	<i>Remote Terminal Unit</i>
<i>SCADA</i>	<i>Supervisoty Control and Data Acquisition</i>
<i>SDO</i>	<i>Service Data Object</i>
<i>SYNC</i>	<i>Synchronization Object</i>
<i>TSMC</i>	<i>Taiwan Semicondutor Manufacturing Co</i>
<i>UCS</i>	Unidades de Controle do Sistema
<i>UFU</i>	Universidade Federal de Uberlândia
<i>USB</i>	<i>Universal Serial Bus</i>
<i>UUP</i>	Usinagem de Ultraprecisão

## Sumário

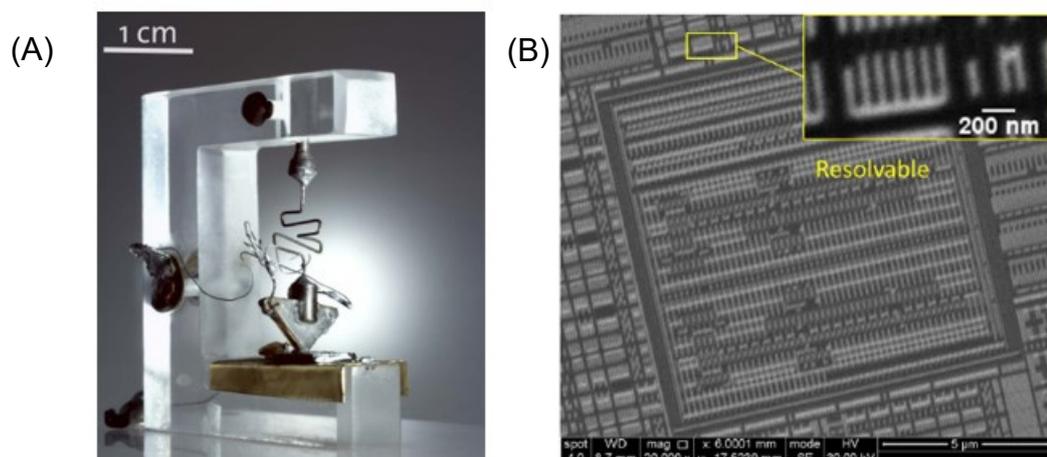
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1	OBJETIVO.....	3
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	5
2.1	UNIDADES DE CONTROLE DO SISTEMA.....	5
2.2	SISTEMAS ELETROMECAÑICOS .....	8
2.3	SISTEMAS SERVO ACIONADOS .....	9
2.4	REDES INDUSTRIAIS .....	14
2.4.1	MODBUS RTU .....	17
2.4.2	MODBUS TCP/IP .....	19
2.4.3	CANOpen .....	21
2.4.4	ETHERCAT .....	24
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	27
3.1	IDENTIFICAÇÃO DA DEMANDA.....	28
3.2	PROJETO CONCEITUAL .....	29
3.2.1	DELIMITAÇÃO DO PROJETO.....	29
3.3	PROJETO PRELIMINAR.....	31
3.3.1	PROTÓTIPO 1 .....	32
3.3.2	PROTÓTIPO 2 .....	38
3.3.3	PROTÓTIPO 3 .....	40
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	45
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	49
<b>6</b>	<b>PROPOSTAS PARA FUTUROS TRABALHOS</b> .....	51
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	53

## 1 INTRODUÇÃO

Com o passar dos anos, os equipamentos eletrônicos evoluíram de forma significativa e em escala exponencial, onde cada ciclo evolutivo proporcionou um salto tecnológico em toda a cadeia produtiva. Diante deste contexto, os avanços da engenharia mecatrônica tem sido a espinha dorsal das inovações nas últimas décadas. A convergência entre áreas como mecânica, eletrônica, controle e automação desencadeou uma onda de progresso e moldou a maneira como interagimos, produzimos e exploramos nossos recursos.

Considerando a necessidade de dispositivos eletrônicos cada vez mais compactos, com menor consumo energético, maior número de transistores e de circuitos integrados, a busca pela miniaturização caminhou ano após ano na fronteira do conhecimento e nos limites da capacidade de fabricação oferecidos em cada ciclo tecnológico evolutivo. Buscando entender esse perfil de evolução, em 1975 o fundador da *Intel*<sup>®</sup>, Gordon Moore, avaliou essa tendência de miniaturização dos circuitos eletrônicos, que de acordo com suas análises o número de transistores em um circuito integrado dobrava a cada dois anos (LEISERSON *et al.*, 2023). Mais tarde o conceito ficou conhecido como Lei de Moore.

Figura 1.1 – (a) Primeiro transistor desenvolvido pela *Bell Labs* em 1947 e (b) um exemplo de arranjos eletrônicos de transistores e semicondutores de um processador.



(ETH, 2023 e JIA *et al.*, 2017)

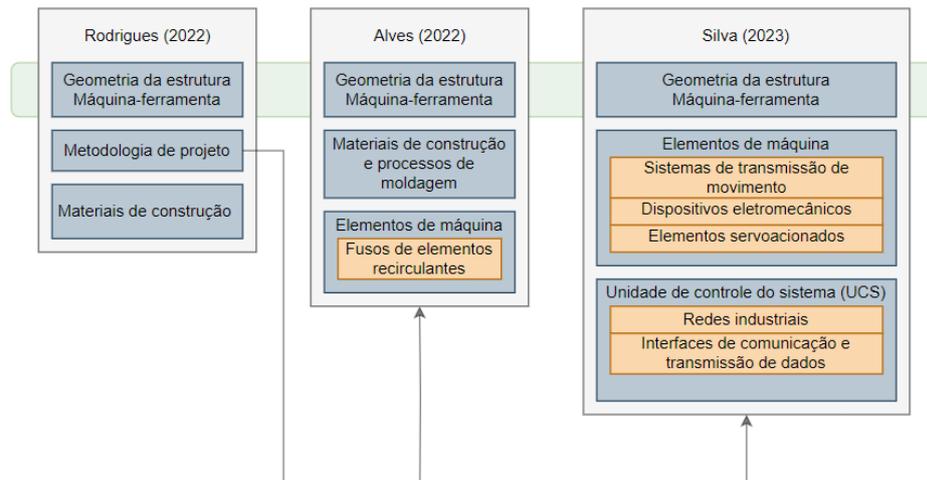
Moore (2019) apontou que há duas grandes empresas que desenvolvem tecnologias de processamento de informações, a *Taiwan Semiconductor Manufacturing Co.* (TSMC®) e a *Samsung*® iniciaram a produção de seus novos semicondutores na ordem de grandeza de 5 nm, promovendo o mais recente salto implementado em linha de produção para um novo ciclo, conforme definido por Moore.

A presença dessas tecnologias tanto no mercado nacional quanto internacional eleva a demanda por novos processos de manufatura, em destaque os processos de Usinagem de Ultraprecisão (UUP), que são utilizados na produção de componentes ópticos, mecânicos e eletrônicos com precisão e exatidão em escala nanométrica, contribuindo tanto de forma direta na produção dos próprios componentes eletrônicos quanto de forma indireta, produzindo elementos de máquinas e permitindo a criação de novos equipamentos que suprem esta necessidade.

Analisando o cenário brasileiro e o mercado mundial, Alves (2022) e Rodrigues (2022) desenvolveram trabalhos que envolveram o projeto de uma minimáquina-ferramenta para atender a necessidade de processos de UUP. As pesquisas empregaram novas tecnologias de materiais, revisões bibliográficas, projeto mecânico e a experiência do grupo de pesquisa do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU-UFU) e seus parceiros. Seus trabalhos trouxeram clareza e competências que definem um dos pilares do projeto de máquina: o projeto mecânico. Paralelo a esses trabalhos, o sistema mecatrônico deverá ser desenvolvido para compor a solução tecnológica nacional original e de alto desempenho para máquinas-ferramentas híbridas, resultando em um produto preparado para o mercado mundial.

A construção do mapa de evolução do projeto encontra-se na Figura 1.2.

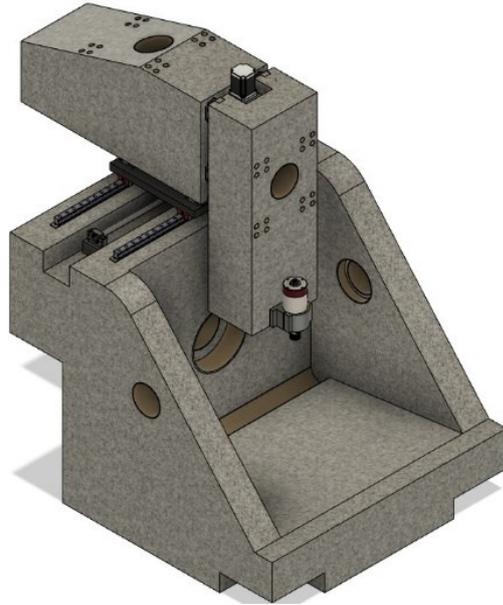
Figura 1.2 – Fases de desenvolvimento do projeto de uma minimáquina-ferramenta para Usinagem de Ultraprecisão (UUP)



## 1.1 OBJETIVO

A partir da identificação da demanda, este trabalho tem como objetivo geral a continuidade do desenvolvimento científico e tecnológico na área de projeto de minimáquinas-ferramentas de precisão realizado no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) e Laboratório FEMEC *Maker* da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), com foco na avaliação e projeto preliminar de sistemas mecatrônicos da minimáquina ferramenta proposta por Alves (2022) e Rodrigues (2022)..

Figura 1.3 – Protótipo 10 da minimáquina-ferramenta em perspectiva isométrica, desenvolvido por Alves (2022).



Os objetivos específicos são (a) controle de movimentação de alta precisão na execução desses processos de manufatura, (b) possibilidade de futuras modificações/atualizações, (c) flexibilidade na integração de novos dispositivos periféricos de processo, (d) adequação do equipamento aos padrões encontrados em parques fabris e indústrias de manufatura, em conformidade com normas regulamentadoras de segurança e (e) a integração de sua rede interna de informações com sistemas atuais da indústria 4.0, utilizando periféricos industriais que se adequam à *IloT (Industrial Internet of Things)* para transmissão e tratamento de dados.

A pesquisa possui financiamento da FAPEMIG por meio do Projeto de Pesquisa APQ-01759-17 e dá continuidade aos Projetos de Fim de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica realizados por Rodrigues (2022) e Alves (2022).

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste trabalho serão abordados os seguintes temas: unidades de controle do sistema, sistemas eletromecânicos, sistemas servo acionados e redes industriais.

O Capítulo 2.1, unidades de controle do sistema, aponta os diferentes tipos de placas controladoras para acionamento de motores e comunicação com dispositivos periféricos disponíveis no mercado.

O Capítulo 2.2, sistemas eletromecânicos, apresenta tecnologias relacionadas à motores de passo e seus respectivos controladores, utilizados com e sem a integração de *encoders*.

O Capítulo 2.3, sistemas servo acionados, características relacionadas à servomotores e controladores são apresentadas com o intuito de fundamentar e trazer clareza quanto a sua aplicação, levantando as principais diferenças quando comparados a sistemas eletromecânicos convencionais.

E por fim, no capítulo 2.4, redes industriais, são abordados alguns protocolos de comunicação mais comuns em máquinas-ferramentas encontrados no ambiente industrial no cenário atual, e suas respectivas vantagens e desvantagens.

### 2.1 UNIDADES DE CONTROLE DO SISTEMA

Ao longo das pesquisas sobre interfaces eletrônicas de controle numérico computadorizado, diferentes modelos foram encontrados no mercado. Cada tecnologia atende a uma aplicação específica, variando as condições de conectividade ao computador central, disponibilidade de relés de interface integrados para acionamento de periféricos, quantidade de canais de entrada e saída de sinais, número de eixos controlados e taxa de comunicação.

Um dos modelos de placa controladora amplamente utilizado é a BSMCEO4U - PP da empresa *Bitsensor*<sup>®</sup>, também conhecida como RNR *Ecomotion*. A controladora possui baixo custo de aquisição, interface amigável, e não requer conhecimentos avançados em linguagens de programação específicas. Entretanto, este tipo de controladora é exclusivamente desenvolvido para aplicações que utilizam o *Mach3*, *software* de controle desenvolvido pela *Artsoft*<sup>®</sup>. A RNR *Ecomotion* possui conectividade via USB (*Universal Serial Bus*), trabalha com sinais de pulso e direção

para controle de até 4 motores, pode atingir até 100 kHz por eixo e não possui relés de interface integrados (CUZUOL; SIQUEIRA, 2023).

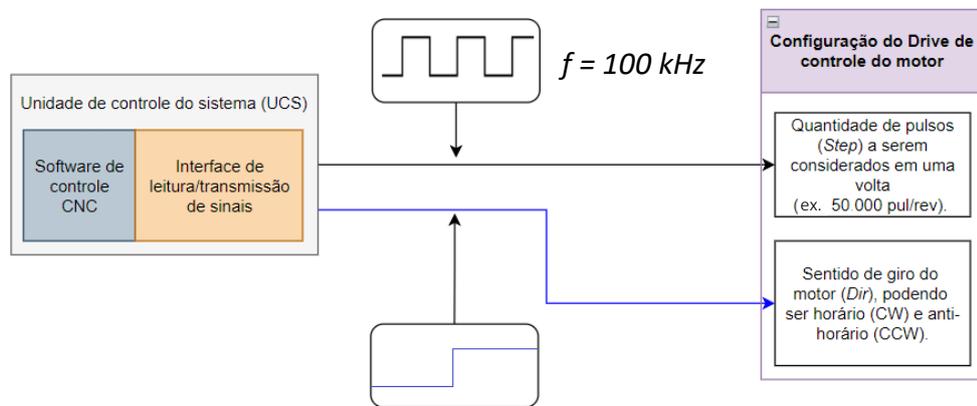
Outro modelo conhecido de placa controladora é a CPU5A desenvolvido pela EdingCNC®, equipada com entrada para botão de emergência, botões *start/stop* e *switches* que permitem habilitar apenas canais vinculados a motores em uso (ABD - IRAZZAQ; AHMED; YOUNES, 2018). A placa conta com capacidade para controle simultâneo de 4 eixos, sinal de pulsos de até 125 kHz para cada eixo, saída de 0 V a 10 V para controle de velocidade do *Spindle*, conexão para controle tipo *Handwell MPG*, e em alguns modelos tem-se a comunicação *Ethernet* de até 100 *Mbit/s*. Esta controladora é desenvolvida para *Windows XP* e *Windows 7*, entretanto são encontrados na literatura modelos da linha profissional capazes de comunicar-se com *LinuxCNC* e atingir sinais de pulso de até 400 kHz (modelo CNC-720) (ENDING CNC, 2024).

Para aplicações industriais, é comum encontrar a placa controladora *BOB* (*Breakout Board*) 5 eixos em equipamentos CNC como de corte a plasma, corte *LASER*, fresadoras e tornos que passaram pelo processo de atualização (*retrofitting*). A *BOB* 5 eixos conta com um relé de interface integrado a placa, saída analógica de 0 V a 10 V, canais de entrada digital para sensores de final de curso, botoeira de emergência e *tool setting*, e comunicação via porta paralela (DB25) atingindo sinais de pulso de 25 kHz por motor (VALLDER®, 2023).

Diversas opções similares aquelas apresentadas estão disponíveis no mercado, com pequenas variações que impactam no tipo de comunicação, compatibilidade de *softwares* e quantidade de periféricos a serem integrados. Entretanto, um ponto crucial que deve ser observado é a frequência máxima de saída por eixo disponibilizada em cada placa, que se inicia em 15 kHz e pode chegar até 2 MHz em alguns modelos, como, por exemplo, a *XHC MKX* desenvolvida pela *WiXHC*® (*WiXHC*®, 2023).

Para analisar o impacto causado pela escolha incorreta da frequência de saída dos pulsos, enviada da placa controladora para o driver de controle de um motor qualquer, apresenta-se o exemplo da Figura 2.1.

Figura 2.1 – Sinal de pulso e direção enviados da unidade de controle do sistema (UCS) para um driver



Observa-se na Figura 2.1 que o sinal de pulso (*Step*) enviado pela UCS é de 100 kHz. Em contrapartida, o *driver* de controle do motor foi configurado de tal modo que, a cada 50 000 pulsos recebidos no canal *step*, uma volta completa ( $360^\circ$ ) será completada pelo motor. Dessa forma, sob as condições apresentadas na Figura 2.1, o resultado desta configuração é uma velocidade angular de 2 voltas por segundo, conseqüentemente resultando em 120 rpm do motor.

Como consequência da escolha da frequência do sinal de saída e da configuração de pulsos por revolução definida no controlador, define-se de forma indireta a resolução do motor. A partir do exemplo acima, onde o controlador é configurado de modo que a cada 50 000 pulsos teremos uma única volta, e levando em consideração que a menor divisão de leitura com relação à eletrônica de potência é de um pulso, o resultado para esta condição de projeto é de  $0,0072^\circ$ .

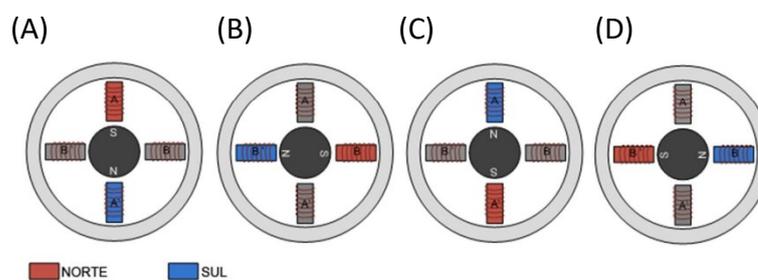
Com o passar dos anos os mecanismos de comunicação foram otimizados, deixando em segundo plano o uso de interfaces analógicas como, por exemplo, a porta paralela DB-25 (IEEE1284 e IEEE488) e porta serial RS-232C, migrando para interface digital *EthernetIP*, *CANOpen*, *EtherCAT*, dentre outras. Essas mudanças proporcionaram taxas de 300 Mbps e melhoraram a precisão do sistema de movimentação (AL-MAEENI *et al.*, 2020).

## 2.2 SISTEMAS ELETROMECAÂNICOS

Em aplicações industriais numericamente controladas, como centros de usinagem e máquinas operatrizes, a precisão na movimentação é um fator crítico para a operação adequada da máquina. Para melhorar a relação custo-benefício e viabilizar projetos de máquinas de pequeno e médio porte, os motores de passo são comumente empregados em equipamentos industriais, e devido à fácil acessibilidade a este componente eletromecânico sua aplicação estende-se até mesmo a projetos desenvolvidos por *hobby*, conhecidos como DIY (*Do It Yourself*) (CUZUOLL; SIQUEIRA, 2023).

Os motores de passo, que são dispositivos eletromecânicos de conversão de energia elétrica em energia mecânica, permitem o controle preciso de variáveis como posicionamento angular, velocidade e aceleração, dentro de suas limitações (FUKUMOTO *et al.*, 2021). De forma geral, ao polarizar cada enrolamento – comumente conhecido como bobina – o rotor orienta-se naquela direção, conforme apresentado na Figura 2.2.

Figura 2.2 – Exemplo de acionamento de motor de passo. Bobinas AA' acionadas (A e C), bobinas BB' acionadas (B e D)

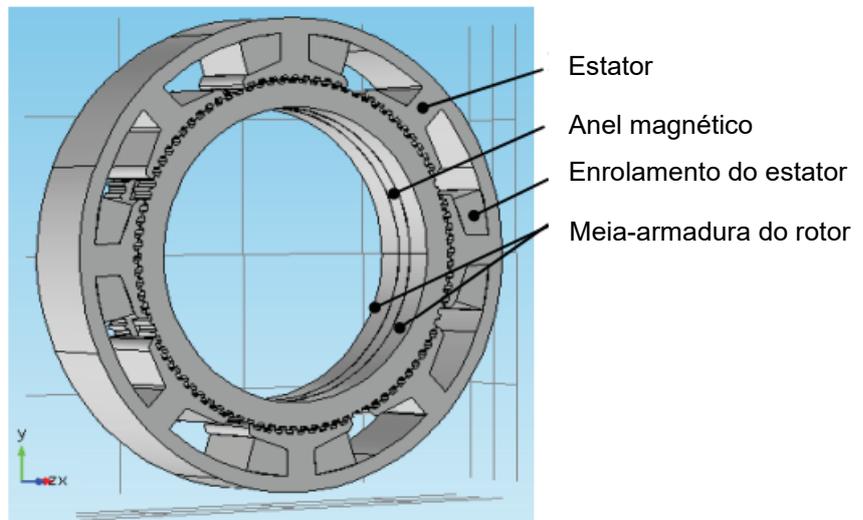


(Adaptado de UNESP, 2013)

Em sua construção mecânica, o número de enrolamentos (quantidade de polos), a estrutura do estator e da armadura do rotor definem a quantidade de pulsos necessários para executar uma revolução (*PPR – Pulse Per Revolution*). Tomando como exemplo a Figura 2.2, seriam necessários 4 pulsos para completar uma volta completa do rotor no sentido horário e a resolução de posicionamento angular seria de 90° por pulso (UNESP, 2013).

Ionicã *et al.* (2021) desenvolveram alguns estudos relacionados à influência da geometria destas características construtivas no desempenho dos motores de passo, avaliando linhas de campo eletromagnético e forças de interação rotor-estator. Na Figura 2.3 é apresentado um exemplo de construção mecânica amplamente utilizado, contando com 200 passos por volta, ou seja,  $360^\circ$  dividido em 200 posições, resultando em uma variação angular de  $1,8^\circ$  para cada passo executado.

Figura 2.3 – Representação dos elementos constituintes de um motor de passo

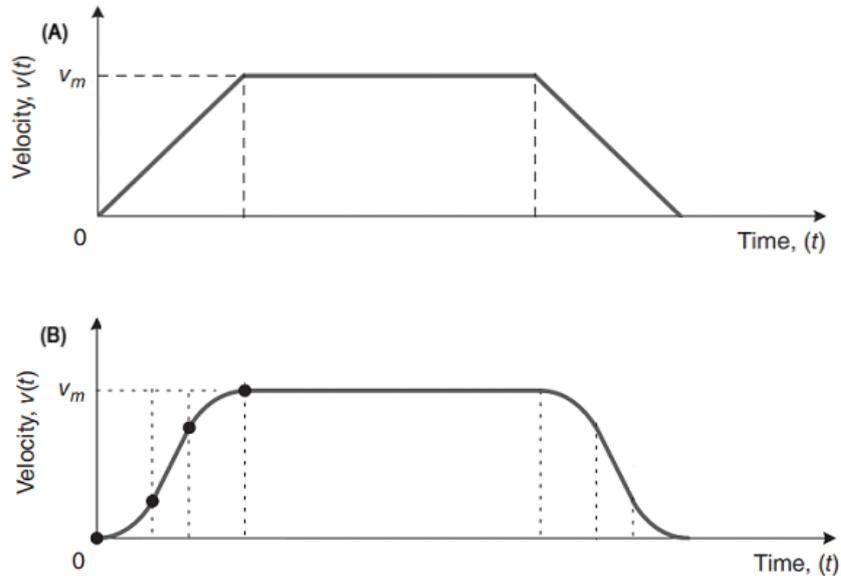


(Adaptado de Ionicã *et al.*, 2021)

## 2.3 SISTEMAS SERVO ACIONADOS

Para definir os sistemas servo acionados aplicáveis à uma máquina-ferramenta é necessário entender a dinâmica do processo executado pelo equipamento. Uma etapa importante é determinar o tipo de perfil de movimento a ser desenvolvido pela massa movida, podendo ser um perfil de velocidade trapezoidal, perfil de velocidade com curva em “S”, dentre outros (GÜROCAK, 2016). Na Figura 2.4 duas representações simplificadas de curvas de velocidade em função do tempo são apresentadas.

Figura 2.4 – Perfil de movimento desenvolvido pela massa movida. (a) Velocidade com perfil trapezoidal e (b) velocidade com perfil em “S”

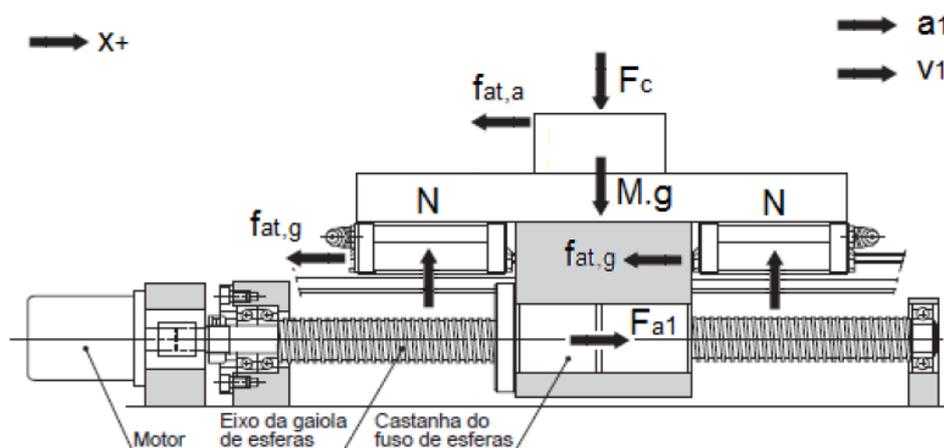


(Adaptado de Gurocak, 2016)

Tendo em mente o perfil de velocidade definido, é necessário construir o modelo matemático que descreve cada eixo, compreendendo as massas movidas no conjunto, forças de atrito, a combinação de mancais a ser utilizada (tipo fixo-fixo, fixo-apoiado, apoiado-apoiado ou fixo-flutuante), o comprimento do fuso de esferas e o diâmetro primitivo (KALATEC®, 2023).

Fortulan (2018) analisou um conjunto servo acionado composto por guias lineares, fuso de esferas recirculantes, motores e massas movidas que participam da dinâmica de um eixo com o intuito de representar os esforços mecânicos envolvidos sobre o fuso e guias, levando em consideração o atrito entre elementos mecânicos. A distribuição de esforços ao longo do conjunto é apresentada na Figura 2.5, onde  $F_c$  é a força vertical aplicada,  $f_{at,a}$  a força de atrito entre a massa  $M$  e a mesa,  $a_1$  o vetor de aceleração,  $v_1$  o vetor de velocidade,  $N$  a força normal de reação dos patins de apoio,  $f_{at,g}$  a força de atrito devido a massa do conjunto,  $F_{a1}$  a força de atrito entre o fuso de esferas recirculantes e a castanha,  $X+$  o sentido positivo para o eixo  $X$ ,  $M$  a massa sobre a mesa e  $g$  a aceleração da gravidade.

Figura 2.5 – Distribuição de esforços mecânicos aplicados e representação dos vetores de velocidade e aceleração de um sistema servo acionado



(Adaptado de Fortulan, 2018)

Além dos esforços mecânicos que atuam sobre as guias, deve-se levar em consideração a velocidade de rotação limite do fuso de esferas. Segundo Kalatec® (2023) em seu referencial teórico de boas práticas de projeto para evitar que a frequência natural do fuso de esferas atinja a faixa de ressonância, deve-se manter a velocidade de rotação limite do fuso em até 80 % da rotação crítica ( $\eta$ ). A rotação crítica é diretamente proporcional ao tipo de montagem dos mancais e ao diâmetro primitivo do fuso de esferas, e inversamente proporcional ao quadrado do comprimento entre mancais de apoio, conforme apresentado na Equação 2.1.

$$\eta = f \frac{dr}{L^2} \quad (2.1)$$

onde,

- $\eta$  indica o número máximo de revoluções por minuto (rpm);
- $dr$  diâmetro primitivo do fuso de esferas recirculantes;
- $L$  comprimento do fuso de esferas recirculantes, e
- $f$  coeficiente definido de acordo com o tipo de combinação de mancais utilizada.

Outro ponto crucial no dimensionamento do motor é o cálculo do torque necessário para movimentar a massa do sistema. Tendo em vista a alta demanda de projeto e dimensionamento de sistemas servo acionados, diversas empresas desenvolveram aplicações que permitem estes cálculos de forma rápida e objetiva,

como, por exemplo, o *Sigma Select* (software desenvolvido pela Yaskawa®) *Motorizer* (software criado pela Mitsubishi Electric Corporation®) e *MotorSizing* (Aplicação web desenvolvida pela Oriental Motor®).

Tomando como exemplo o software *Sigma Select*® desenvolvido pela Yaskawa® (2021), em sua implementação está contida toda a fundamentação teórica relacionada ao cálculo do torque necessário para cada tipo de conjunto servo acionado. Para um sistema servo acionado semelhante ao apresentado por Fortulan (2018), o método de cálculo de torque utilizado por Gürocak (2016) e Yaskawa® (2021) divide a análise em 2 subgrupos: torque de aceleração ( $T_a$ ) e torque de carga ou torque de atrito ( $T_L$ ). As equações utilizadas para o cálculo de cada componente de torque estão descritas a seguir:

$$T_a = J_L \cdot \alpha \quad [N.m] \quad (2.2)$$

$$T_a = J_L \cdot \left( \frac{\pi \cdot \eta_1}{30t} \right) \quad [N.m] \quad (2.3)$$

$$T_a = J_L \cdot \left( \frac{\eta_1}{9.55t} \right) \quad [N.m] \quad (2.4)$$

onde,

$$J_L = J_w + J_s \quad [kg.m^2] \quad (2.5)$$

$$J_w = M \cdot \left( \frac{P}{2\pi} \right)^2 \quad [kg.m^2] \quad (2.6)$$

$$J_s = \left( \frac{\rho\pi}{32} \right) \cdot L \cdot D^4 \quad [kg.m^2] \quad (2.7)$$

$$\eta_1 = V_1 \cdot \left( \frac{60}{2\pi} \right) \quad [rpm] \quad (2.8)$$

para o torque de carga ( $T_L$ ), tem-se:

$$T_L = \frac{F_{ext}}{\eta \cdot i} \cdot \frac{P}{2\pi} \quad [N.m] \quad (2.9)$$

$$F_{ext} = F_f + F_g + F_p \quad [N] \quad (2.10)$$

$$F_{ext} = F_f + W \cdot (\sin \beta + \mu \cdot \cos \beta) + F_p \quad [N] \quad (2.11)$$

O torque total necessário para proporcionar o movimento de acordo com os requisitos de projeto é definido por:

$$T_{total} = (T_a + T_L) \cdot F_s \quad [N] \quad (2.12)$$

onde,

$T_a$	torque de aceleração [N.m]
$J_L$	inércia total do sistema [kg.m <sup>2</sup> ]
$J_w$	inércia da carga [kg.m <sup>2</sup> ]
$J_s$	inércia do fuso de esferas recirculantes [kg.m <sup>2</sup> ]
$\alpha$	aceleração angular [rad/s <sup>2</sup> ]
$\eta_1$	rotação [rpm]
$V_1$	velocidade nominal [mm/s]
$t$	tempo de aceleração [s]
$T_L$	torque de carga ou torque de atrito [N.m]
$F_{ext}$	forças atuantes sobre o sistema [N]
$\eta$	eficiência
$i$	relação de transmissão
$P$	passo do fuso de esferas recirculantes [m/rev]
$F_f$	forças de atrito [N]
$F_g$	componente da força gravitacional aplicada ao fuso de esferas
$F_p$	forças externas atuantes no processo (ex. forças de usinagem)
$W$	massa total em movimento linear
$\beta$	o ângulo entre o sistema de movimentação e o plano horizontal

Fortulan (2018) atentou-se ainda ao cálculo da razão de inércia ( $J_R$ ), que é resultado da razão entre a inércia total do sistema ( $J_L$ ) e a inércia do próprio motor ( $J_m$ ). Uma boa prática de projeto é iniciar a seleção do motor a ser utilizado considerando uma razão de inércia menor ou igual a 5, conforme apresentado na Equação (2.13) (GÜROCAK, 2016), e posteriormente avaliar os motores disponíveis.

$$J_R = \frac{J_L}{J_m} \quad (2.13)$$

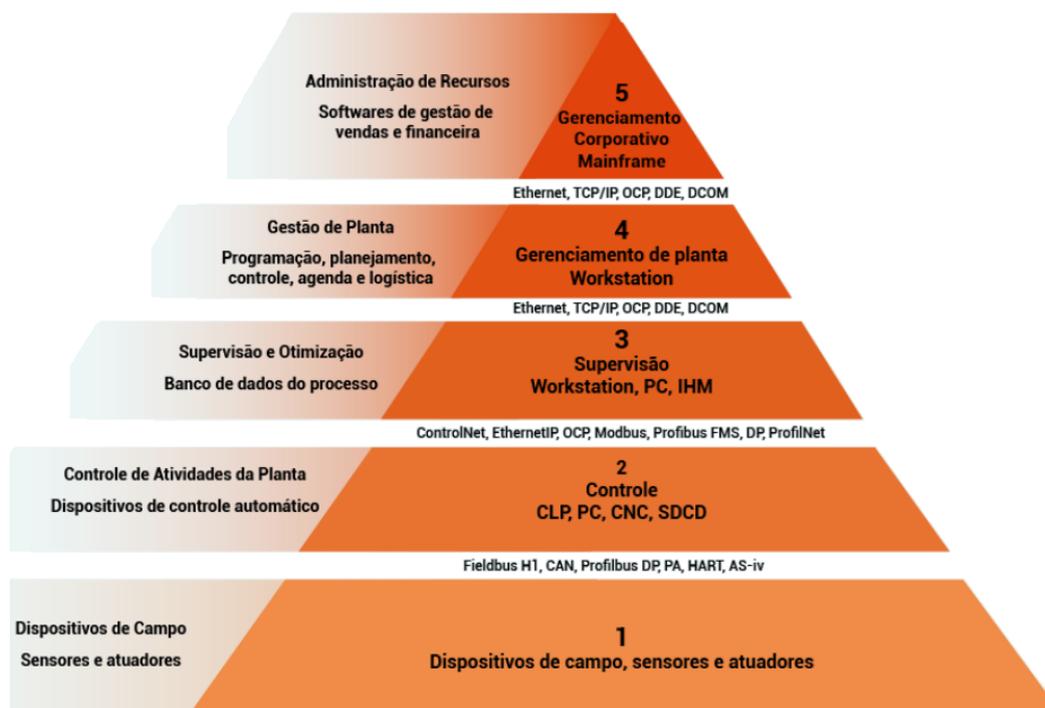
De modo geral, o desempenho do sistema servo acionado tende a aumentar conforme a razão de inércia diminui. Nas situações em que o equipamento se movimenta em elevadas velocidades, executa partidas e paradas frequentes, necessita de um posicionamento preciso e aplica mudanças frequentes no sentido de movimento, recomenda-se uma razão de inércia entre 1 e 2. Um exemplo de aplicação são as máquinas-ferramentas que executam processos de usinagem, removendo material da peça a altas velocidades e mantendo as características dimensionais. Já em sistemas menos criteriosos, por exemplo esteiras transportadoras, os servo acionamentos são projetados com razão de inércia de até 10, podendo chegar até 100 (GÜROCAK, 2016).

## 2.4 REDES INDUSTRIAIS

O setor produtivo de bens e serviços passou por diversas revoluções industriais, onde cada uma delas promoveu um marco tecnológico e agregou novos patamares de produção. Com a informatização interna das empresas fez-se necessária a troca e gestão de informações a nível de chão-de-fábrica, tendo como requisitos a alta confiabilidade de informações e equipamentos, conectividade e interoperabilidade, flexibilidade de capacidade de expansão (TAVARES, 2019).

Entretanto, Martinez *et al.* (2021) ressaltam que o tráfego dessas informações partindo dos sensores e dispositivos na linha de produção e chegando aos gestores das indústrias é subdividido em níveis hierárquicos da estrutura conhecida como pirâmide da automação. Esta representação conceitual sugere níveis de automação definidos pela *Standard ANSI/ISA* (1995) e define estruturas físicas, topologias de rede e padrões de comunicação entre cada nível da automação. Na Figura 2.6 apresenta-se a finalidade de cada nível da pirâmide da automação, bem como os protocolos comumente aplicados a ela.

Figura 2.6 – Estrutura da pirâmide da automação



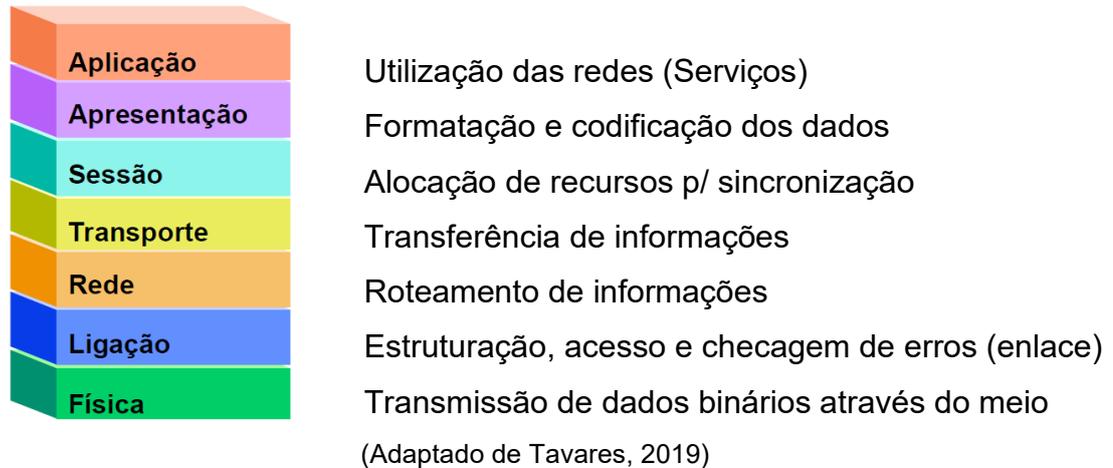
(Adaptado de Froes *et al.*, 2021; Martinez *et al.*, 2021).

Segundo Fourozan (2007), para proporcionar a comunicação entre os níveis de automação e a gestão de recursos, alguns padrões de redes industriais foram desenvolvidos e implementados com base em protocolos de comunicação, bem como na hierarquia apresentada pela pirâmide da automação (Figura 2.6). Os protocolos de comunicação são um conjunto de regras, normas e instruções que permitem a comunicação entre dois ou mais dispositivos de rede.

Com o intuito de possibilitar que equipamentos de diferentes fabricantes pudessem se comunicar por intermédio dessas redes, a *ISO (International Organization for Standardization)* juntamente com a *ITU-T (International Telecommunication Union Standardization)* estabeleceram uma estrutura de comunicação comum para dispositivos definida como modelo *OSI (Open Systems Interconnection)* de redes, em 1982 (DANESH, 2021).

O modelo OSI de redes de comunicação é subdividido em sete camadas, onde cada camada tem sua finalidade e implementa seus protocolos de comunicação entre a camada inferior e superior da rede (Kurose; Ross, 2009). Na Figura 2.7 apresenta-se a divisão das camadas do modelo OSI.

Figura 2.7 – Modelo OSI de estrutura de redes



Diferentes tipos de redes podem ser implementados de acordo com a área de aplicação, topologia e requisitos de projeto. *UNIVERSAL ROBOTS BRASIL (2023)* e *PAHC (2023)* apontaram que as redes do tipo *Profibus*, *DeviceNet*, *AS-Interface*, *Profinet*, *Modbus*, *CANOpen*, *EtherNet/IP* e *EtherCAT* são as mais comumente utilizadas, sendo as quatro últimas os mais comuns em máquinas-ferramentas (*MORATA, 2020*).

Para avaliar as camadas do modelo *OSI* implementadas nos quatro tipos de redes mais comuns em máquinas-ferramentas, na Tabela 2.1 apresenta-se o nível de implementação em cada protocolo, de acordo com o modelo *OSI* de estrutura de redes.

Tabela 2.1 – Camadas implementadas em cada protocolo de comunicação, de acordo com o modelo *OSI* de redes

	<i>Modbus RTU</i>	<i>Modbus TCP/IP</i>	<i>CANOpen</i>	<i>EtherNet/IP</i>	<i>EtherCAT</i>
Aplicação	X	X	X	X	X
Apresentação			X	X	X
Sessão			X	X	X
Transporte			X	X	X <sup>1</sup>
Rede		X	X <sup>2</sup>	X	X
Enlace	X	X	X	X	X
Física	X	X	X	X	X

(Adaptado de *BYRES, FRANZ e MILLER, 2004*; *FINNE, 2022*; *MORATA, 2020*; *TERGOLINA, 2015*; *HUANG et al., 2021*).

<sup>1</sup> Em alguns casos, o TCP/IP não é implementado.

<sup>2</sup> Herança de camadas da rede CAN.

### 2.4.1 MODBUS RTU

Segundo Herath, Ariyathunge e Priyankara (2020), o protocolo *Modbus RTU* (*Remote Terminal Unit*) é um padrão industrial aberto de comunicação desenvolvido pela *Modicon*, que posteriormente pertenceu a *Schneider Electric*<sup>®</sup> e a manutenção atualmente é mantida pela *Modbus Organization*<sup>®</sup> desde abril de 2004. Foi criado no final da década de 1970 com a finalidade de possibilitar a comunicação entre controladores lógicos programáveis (*CLP's*) e demais dispositivos industriais.

Urrea, Morales e Munóz (2016) apresentaram o *Modbus RTU* como sendo um protocolo onde os dados são transmitidos em *bytes* (8 *bits*) e *words* (2 *bytes*) em taxas de transmissão que variam entre 1 200 *bps*<sup>3</sup> e 115 200 *bps* (inversamente proporcional à distância entre dispositivos). Nesse protocolo de comunicação a arquitetura entre dois dispositivos segue a relação mestre/escravo, onde as informações contidas em um dispositivo escravo só serão transmitidas pelo barramento de comunicação após a solicitação destas por um mestre presente na rede.

Urrea, Kern e Morales (2021) verificaram que cada pacote de dados, conhecido como *frame*, possui uma estrutura definida e composta por endereço único do dispositivo escravo, função/comando, dados a serem transmitidos e a checagem cíclica redundante ou *Cyclic Redundancy Check* (*CRC*) para verificação de erros. A estrutura do *frame Modbus RTU* é apresentada na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Estrutura do *frame* de comunicação *Modbus RTU*

Endereço	Código de função	Dados	<i>CRC</i>
1 <i>Byte</i>	1 <i>Byte</i>	1 – 252 <i>Bytes</i>	2 <i>bytes</i>

(Adaptado de URREA, KERN E MORALES, 2021)

Conforme apresentado por Strack (2011), o protocolo de comunicação *Modbus RTU* pode ser implementado em três diferentes meios físicos (barramentos), sendo eles:

- Barramento RS-232 (*Recommended Standard*);
- Barramento RS-422; e
- Barramento RS-485.

<sup>3</sup> Bits por segundo

Dentre os três tipos de barramento o RS-232 (*Full-duplex*) é um dos primeiros barramentos de comunicação desenvolvidos, amplamente utilizado no passado em computadores pessoais, impressoras, balanças de pesagem e outros dispositivos industriais. Apesar da implementação de baixo custo, este tipo de barramento é aplicável apenas em curtas distâncias de comunicação. Outro ponto negativo desse tipo de barramento é a conexão ponto-a-ponto, onde existem apenas um mestre, que atua na requisição de informações, e um escravo na rede (URREA; KERN; MORALES, 2021).

Com o passar dos anos, a comunicação em longas distâncias ainda pelo protocolo *Modbus RTU* fez-se necessária, motivando o desenvolvimento do barramento RS-422 (*Full-duplex*). Esta rede é balanceada (supressão de ruídos) permitindo o envio de informações em cabos até 1 200 m (URREA; KERN; MORALES, 2021).

Similar ao RS-422, o barramento RS-485 (*Half duplex* e *Full-duplex*) veio em seguida e trouxe como foco a comunicação em rede, permitindo a conexão de um dispositivo mestre com múltiplos dispositivos escravos (URREA; KERN; MORALES, 2021). Na Tabela 2.3 apresenta-se as principais diferenças entre cada barramento de comunicação.

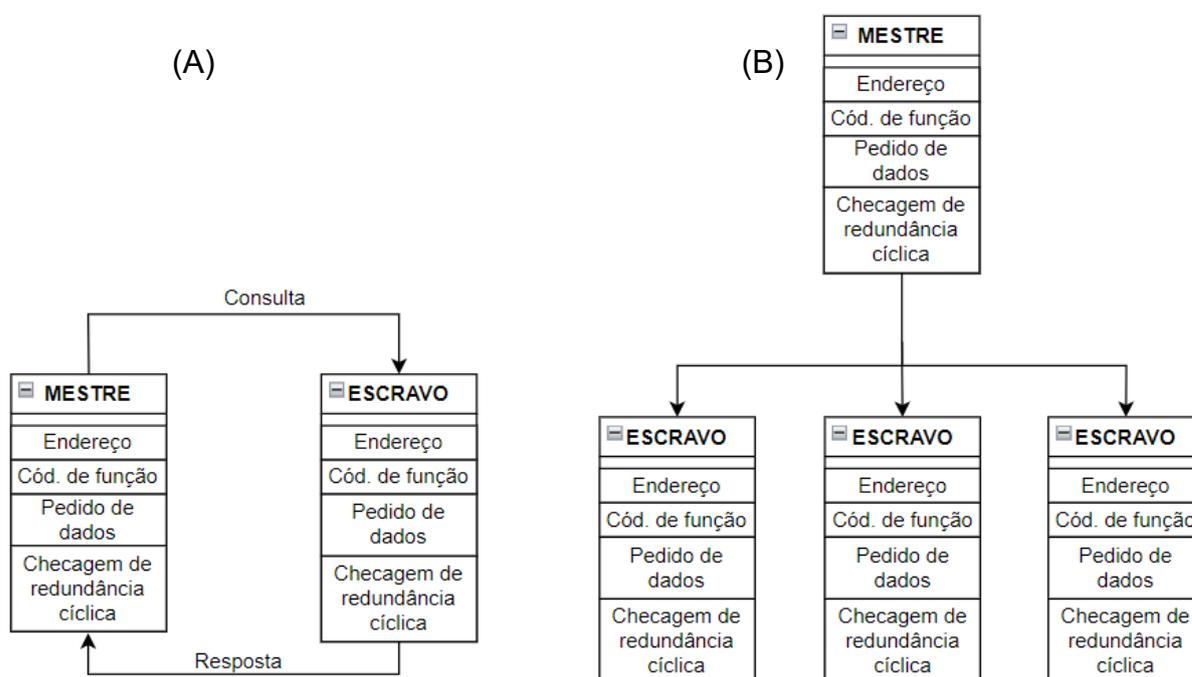
Tabela 2.3 – Particularidades dos barramentos de comunicação RS-232, RS-422 e RS-485

Barramento	RS-232	RS-422	RS-485
Tipo de transferência	<i>Full-Duplex</i>	<i>Full-Duplex</i>	<i>Half-Duplex</i> e <i>Full-Duplex</i>
Distância máx.	15 m (9 600 bps)	1 200 m (9 600 bps)	1 200 m (9 600 bps)
Topologia	Ponto-a-ponto	Ponto-a-ponto	Multiponto
Nº de dispositivos	1	1 (10 dispositivos em modo de recepção)	32 (podendo chegar a 256)

(Adaptado de URREA; KERN; MORALES, 2021)

Conforme descrito por Caldiéri (2016), em redes *Modbus* com barramento de comunicação RS-485 um mestre envia uma mensagem endereçada a um escravo, apenas este retorna uma resposta (*response*) a uma consulta (*query*) do mestre. O dispositivo mestre, além de se comunicar com cada dispositivo da rede de forma individual (*unicast*), pode acessar todos os dispositivos simultaneamente (*broadcast*). As duas situações de comunicação são exemplificadas na Figura 2.8.

Figura 2.8 – (a) Comunicação mestre/escravo e (b) comunicação em modo *broadcast*



(Adaptado de CALDIÉRI, 2016)

Nascimento e Lucena (2003) ressaltaram que o padrão de transmissão do protocolo *Modbus* pode ser configurado em dois modos de trabalho, sendo eles o *ASCII* (*American Code for Information Interchange*) e o *RTU*. No modo *RTU*, para cada palavra de dados da mensagem (a cada 2 *bytes* de mensagem) é enviado apenas um caractere no padrão hexadecimal. Uma das principais vantagens de trabalho no modo *RTU* é o volume de informações enviadas em uma mesma mensagem, otimizando assim a comunicação.

No modo de comunicação *RTU* o *frame* não possui *bytes* que identificam o início e o término de uma mensagem. Para reconhecer a estrutura de uma nova mensagem é necessária a ausência de informações no barramento de comunicação por no mínimo 3,5 vezes o tamanho da palavra de dados. É possível conectar até 247 dispositivos nos endereços 1 a 247, e o endereço 0 é utilizado para o envio de mensagens em *broadcast*. Os endereços de 248 a 255 são reservados (CALDIÉRI, 2016).

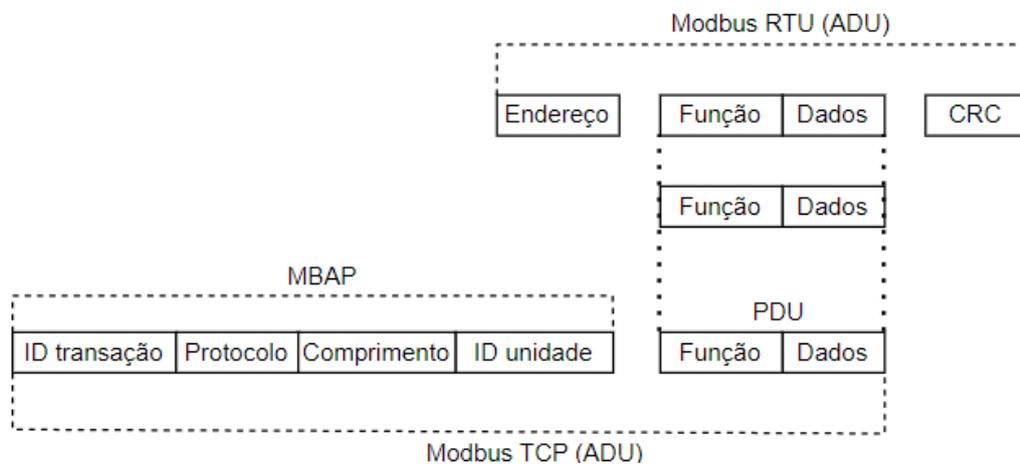
#### 2.4.2 MODBUS TCP/IP

Este padrão de comunicação é uma evolução do *Modbus RTU* apresentado anteriormente, onde sua implementação é baseada em redes *TCP/IP*. De modo geral, esta padronização tem como objetivo transmitir mensagens estruturadas no modelo *Modbus* através do meio físico de redes *TCP/IP*, amplamente utilizados em ambientes industriais (SWALES, 1999).

Segundo Goldengerg e Wool (2013), outra vantagem do protocolo *Modbus TCP/IP* em relação ao seu antecessor é a facilidade de comunicação de dispositivos industriais (*CLP's* e Interfaces Homem-Máquina - *IHM's*) diretamente com sistemas *SCADA* (*Supervisory Control and Data Acquisition*). A implementação e expansão da rede, utilizando *switches* ou *hubs* industriais, cabeamento de rede via par trançado e conectores tipo RJ45 viabiliza sua aplicação em indústrias e empreendimentos que estão em constante expansão da produção.

O mecanismo de controle de acesso à rede é o *CSMA-CD* (*Carrier Sence Multiple Access – Colision Detection*), mecanismo desenvolvido especificamente para redes *Ethernet*, e os dispositivos enquadram-se no modelo cliente/servidor de comunicação (TERGOLINA, 2014). Segundo Lai, Gao e Liu (2020) o *frame* de dados transmitido neste protocolo consiste em duas partes, sendo o cabeçalho do protocolo de aplicação *Modbus* (*Modbus Application Protocol - MBAP*) e a unidade de dados do protocolo (*Protocol Data Unit - PDU*). Na Figura 2.9 apresenta-se a estrutura do *frame* de dados do padrão *Modbus TCP/IP*.

Figura 2.9 – Comparação do *frame* de dados *Modbus TCP/IP* com o *frame* de dados *Modbus RTU*



(Adaptado de XUAN, YONGZHONG, 2019).

O cabeçalho *MBAP* possui 7 *bytes*, sendo composto pelos campos de identificação de transação (2 *bytes*), identificador de protocolo (2 *bytes*), contagem de todos os próximos *bytes* (2 *bytes*) e identificador de unidade (1 *byte*) utilizado para identificar o escravo da rede que se deseja comunicar. A checagem de erros de comunicação já é implementada em redes *Ethernet*, tornando-se desnecessário o envio de *CRC*. Levando em consideração que o *Modbus TCP* pode operar em redes *Ethernet* existentes, a porta de acesso *TCP 502* é definida como porta padrão para o *Modbus TCP* (GAMESS; SMITH; LII, 2020).

O código de função, tanto no *Modbus RTU* quanto *TCP/IP*, indica ao dispositivo escravo qual tabela de dados o mestre quer acessar, ler ou escrever novas informações (GAMESS; SMITH; LII, 2020). Na Tabela 2.4 alguns códigos de função comumente utilizados são apresentados.

Tabela 2.4 – Operações comuns do protocolo *Modbus*

<b>Código (hex)</b>	<b>Operação</b>
0x01	Leitura de bobinas ( <i>coil</i> )
0x02	Leitura de entradas discretas
0x03	Leitura de bloco de registradores tipo <i>holding</i>
0x04	Leitura de registradores de entrada
0x05	Escrita de um único <i>bit</i> em uma bobina ( <i>coil</i> )
0x06	Escrita em um único registrador tipo <i>Holding</i>
0x0F	Escrita em múltiplas bobinas ( <i>coil</i> )
0x10	Escrita em múltiplos registradores tipo <i>Holding</i>
0x17	Leitura / escrita de registradores tipo <i>holding</i>

(Adaptado de GAMESS; SMITH; LII, 2020).

### 2.4.3 CANOpen

A rede *CANOpen* foi desenvolvida em 1994, onde um grupo de empresas entendeu a necessidade de uma rede completa e preparada para diferentes aplicações no contexto industrial. Baseada na rede *CAN (Controller Area Network)*, uma rede de extrema robustez criada em 1980 para atender aplicações embarcadas em veículos automotores, o *CANOpen* é uma rede de comunicação preparada para diversas aplicações em indústrias automobilísticas, engenharia médica, transportes e demais setores que envolvem automação industrial (SANTOS, 2017).

Dentre as características do *CANOpen*, pode-se destacar a comunicação baseada em eventos, todos os dispositivos (nós) com os mesmos direitos (podendo

ser uma rede multi-mestre), custos competitivos, novos nós podem ser inseridos no barramento dinamicamente, alta imunidade a ruídos e interferências, possibilita a detecção e sinalização de erros e suporta tanto a comunicação *Multicasting* quanto *Broadcasting* (SILVA, 2011).

O protocolo CAN de forma individual implementa apenas as camadas física e enlace de dados de acordo com o modelo OSI//ISO. Toda a implementação do *CANOpen* herda a estrutura destas camadas da rede CAN. Entretanto, o desenvolvimento da camada de aplicação fez-se necessário e foi criado com base em uma série de requisitos básicos para a estrutura *CANOpen* (SILVA, 2011).

Um equipamento no barramento CAN define diversos mecanismos de controle de erros, aumentando assim sua confiabilidade e reduzindo erros de transmissão. O dispositivo CAN possui contadores internos que são incrementados a cada erro de transmissão/recepção, e decrementados a cada envio de um telegrama bem-sucedido. Com base na quantidade de erros acumuladas, o dispositivo pode ser colocado em 3 estados: *Warning*, *Error Passive* e *Bus-Off* (WEG, 2010).

Com relação à estrutura de dados do *CANOpen*, a subdivisão em objetos de comunicação permite a organização do protocolo em níveis de prioridade das mensagens do dicionário de objetos, conforme apresentado por Fan, Ran e Zhi-hui (2011). Os tipos<sup>4</sup> de objetos são:

- *Service Data Object (SDO)*;
- *Process Data Object (PDO)*;
- *Network Management (NMT)*;
- *Emergency Object (EMCY)*; e
- *Synchronization Object (SYNC)*;

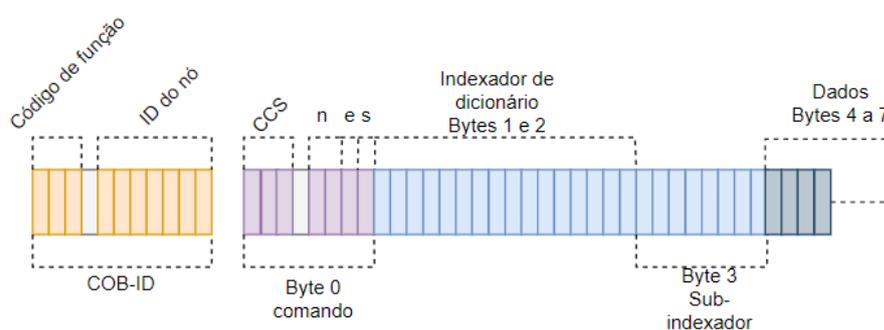
Durante a programação e configuração de redes *CANOpen*, os mecanismos mais utilizados na comunicação entre dispositivos são tratados nos dicionários de objetos do tipo *SDO* e *PDO*. Esses objetos padronizados possuem parâmetros que descrevem o comportamento de um nó na rede *CANOpen* (DENARDIN, 2022).

---

<sup>4</sup> Foram explicados no parágrafo seguinte apenas os objetos relevantes e que nos permite operar nessa rede (SDO e PDO). A estrutura dos demais objetos são similares ao SDO e PDO, diferindo apenas com relação ao nível de prioridade e tipo de aplicação.

O objeto *SDO* permite que um nó possa ler ou editar valores no dicionário de objetos de outro nó em uma rede *CANOpen*, comportando-se de acordo com as relações do tipo cliente/servidor. Dessa forma, um cliente *SDO* inicia uma comunicação com um único servidor *SDO* com o objetivo de atualizar ou ler uma entrada do dicionário de objetos, permitindo a configuração remota de dispositivos a partir de um cliente. Na Figura 2.10 é apresentada a estrutura de transmissão do objeto *SDO* (DENARDIN, 2022).

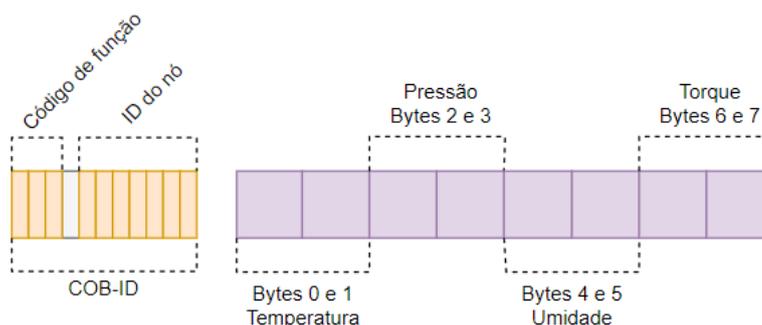
Figura 2.10 – Estrutura do objeto *SDO* no protocolo *CANOpen*



(Adaptado de Denardin, 2022)

Com relação ao compartilhamento de dados operacionais em tempo real entre nós da rede *CANOpen*, o objeto responsável é o *PDO*. Alguns exemplos de dados enviados por *PDO's* são sinais de sensores de temperatura, pressão, vazão, nível de tensão, corrente, torque *etc.* Similar a estrutura do objeto *SDO*, o *PDO* também possui 8 *bytes* de comunicação. Entretanto, o *PDO* não possui cabeçalho para identificar quais índices e subíndices serão modificados e sua finalidade é essencialmente transmitir dados de sensores. Na Figura 2.11 é exemplificada a transmissão de informações de temperatura, pressão, umidade e torque (2 *bytes* cada), respectivamente, em um único *PDO* (DENARDIN, 2022).

Figura 2.11 – Estrutura do objeto *PDO* no protocolo *CANOpen*



Vale ressaltar que a leitura/escrita de dados de sensores poderiam ser realizadas através de *SDO's*, mesmo não sendo a maneira mais correta. Nos objetos *SDO's* tem-se apenas 4 *bytes* disponíveis para transmissão de informação, visto que os outros 4 *bytes* iniciais já são utilizados para controle de *upload* ou *download* (1 *byte*), *index* (2 *bytes*) e *sub-index* (1 *byte*) (DENARDIN, 2022).

#### 2.4.4 ETHERCAT

Nos últimos anos, o número de aplicações industriais e de automação de fábricas que passaram a utilizar meios de comunicação via *Ethernet* e suas variantes cresceu significativamente. Estas redes trazem como benefício a redução de custos de infraestrutura (utilizando *switches*, *hubs*, roteadores e cabos de rede), diferentes topologias possíveis e, principalmente, altas taxas de comunicação e transferência de dados, quando comparada a protocolos anteriores (ORFANUS *et al.*, 2013).

Entretanto, Paprocki e Erwinski (2022) demonstraram que redes *Ethernet Standard TCP/IP* podem não ser a melhor solução para aplicações que dependem de controle preciso de movimentos presentes na indústria, devido a algumas particularidades relacionadas ao determinismo e velocidade. Grande parte das aplicações industriais envolvem requisitos de precisão e sincronização entre eixos mecânicos de movimentação e *drives* controladores, como máquinas CNC, braços robóticos, linhas de produção e equipamentos específicos.

Com o objetivo de solucionar problemas relacionados ao determinismo e sincronização do *Ethernet Standard TCP/IP* novos padrões foram desenvolvidos, e temos como exemplo o *EtherNetIP (Industrial Protocol)*, *Profinet*, *EtherCAT*, *Powerlink* e *Sercos III*, sendo os três primeiros mais comumente utilizados (ZURAWSKI, 2015).

Pesquisas desenvolvidas por Wu e Xie (2019), Correa e Almeida (2019) avaliaram essas três variantes do padrão *Ethernet* mais utilizadas, que são *EtherNetIP*, *Profinet* e *EtherCAT*. (WU; XIE, 2019) apresentaram resultados de testes de comunicação onde o protocolo *EtherCAT* possui o menor tempo de ciclo de barramento – chegando a obter 106,26  $\mu\text{s}$ /ciclo e podendo chegar a 20  $\mu\text{s}$ /ciclo. Já (CORREA; ALMEIDA, 2019) ressaltaram que apesar do ótimo desempenho proporcionado pela rede *EtherCAT* em algumas pesquisas, a velocidade de comunicação pode ser significativamente alterada de acordo com a topologia da rede.

Segundo *EtherCAT® Technology Group* (2012) os principais aspectos que destacam o *EtherCAT* em relação ao *Ethernet/IP* e *Profinet* são:

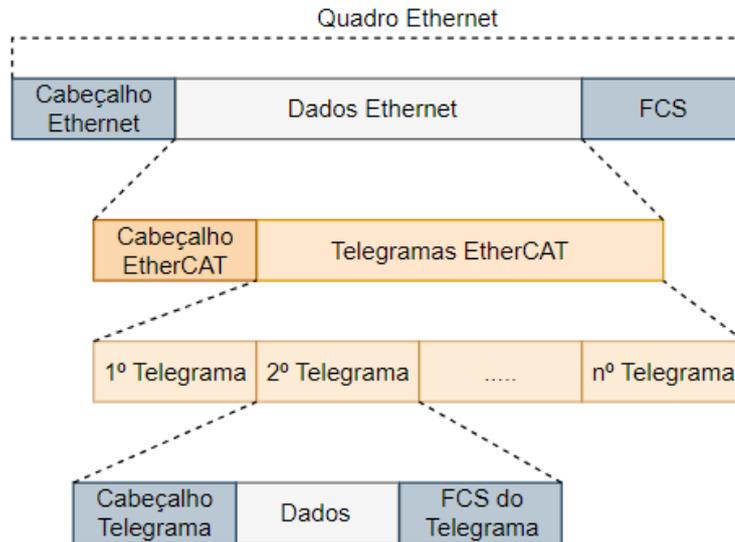
- Menor custo relativo de implementação (engenharia, hardware, estrutura);
- Dispositivos I/O, sensores, atuadores, displays e periféricos estão na mesma camada de rede;
- Altas taxas de comunicação;
- Compatibilidade com qualquer dispositivo *Ethernet* ou Rede *Ethernet*;
- Cada nó mede a diferença de tempo entre a saída e a chegada de *frames*, permitindo cálculo de latência<sup>5</sup> e *jitter*<sup>6</sup> de cada nó;
- Sincronização precisa (<1µs) e ajuste de *clock* distribuído;
- Possibilidade de acoplar ponte *EtherCAT*;
- *EtherCAT* usa *frames* Ethernet padrão (IEEE 802.3);
- Monitoramento contínuo de nós, permitindo diagnósticos avançados e com localização exata de cada dispositivo;
- Facilidade de configuração de novos dispositivos na rede (.XML);
- Módulos dedicados à segurança implementados em qualquer ponto do barramento.

Conforme apresentado em Corrêa e Almeida (2019), Zanuso *et al.* (2020) e Knezic, Dokic e Ivanovic (2010) o protocolo *EtherCAT* é encapsulado em um quadro *Ethernet* padrão herdando algumas características como o *Ethernet header* e *FCS* (*Frame Check Sequence*). Como o protocolo *EtherCAT* é desenvolvido para alto desempenho e altas taxas de comunicação, o uso da implementação *TCP/IP* da camada de transporte é dispensado em algumas situações. Na Fig. (2.12) observa-se a estrutura simplificada de um *frame EtherCAT*.

---

<sup>5</sup> Tempo de tráfego de um pacote de dados entre dois pontos da rede.

<sup>6</sup> Taxa de variação da latência da rede.

Figura 2.12 – Dados *EtherCAT* encapsulados no quadro *Ethernet*

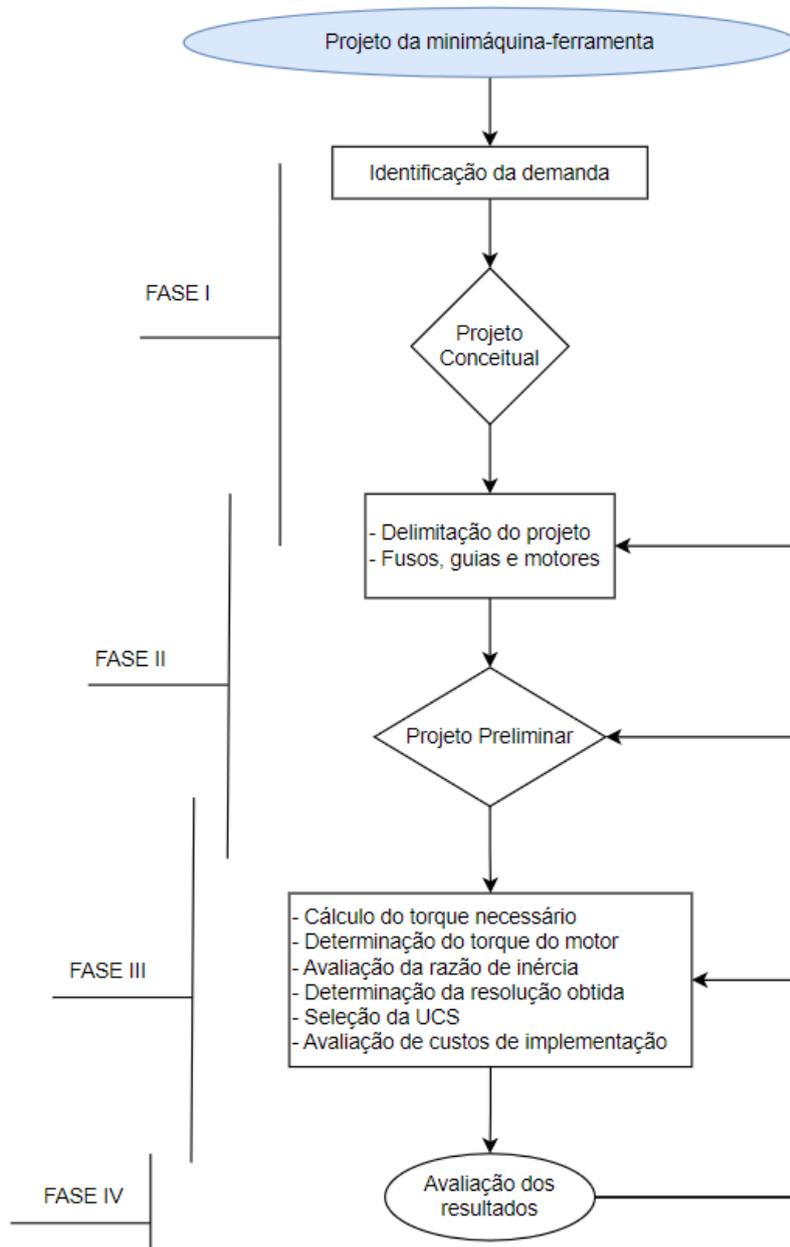
(Adaptado de Zanuso *et al.*, 2020)

Shi *et al.* (2022) descreve que um *frame EtherCAT* pode conter diversos datagramas, de forma que um mestre é capaz de se comunicar com vários escravos acessando múltiplas variáveis a partir de uma única mensagem. Para identificar o tipo de acesso que o mestre necessita executar, o cabeçalho *EtherCAT* leva registros de leitura, escrita, ou leitura/escrita, bem como o endereço do escravo a ser acessado. Ao receber a mensagem, o escravo processa as informações solicitadas pelo mestre e adiciona-as ao final da mesma mensagem em datagramas disponíveis, não sendo necessária a execução de dois ciclos de transmissão (otimizando a taxa de comunicação).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia de projeto desta pesquisa inclui o desenvolvimento de um fluxograma baseado nos trabalhos de Pahl e Beitz (1988, 2013). Na Figura 3.1 é apresentado o fluxograma das etapas de projeto da minimáquina-ferramenta multifuncional CNC.

Figura 3.1 – Fluxograma do projeto de minimáquina-ferramenta multifuncional CNC de estrutura de granito sintético (GS)



As atividades de projeto foram realizadas a partir do levantamento bibliográfico e experiência do grupo de pesquisa relacionado ao projeto mecatrônico e construção de máquinas-ferramentas de precisão considerando os sistemas eletromecânicos, softwares e hardwares de aplicação e principais redes industriais aplicadas à indústria. Logo após a identificação da demanda foram estabelecidas as condições de contorno do projeto mecatrônico e foram definidos o conjunto eletrônico de controle, softwares e sistemas servo acionados.

Sabendo das necessidades de projeto, foram selecionados os elementos mecatrônicos de máquinas disponíveis e realizados ciclos iterativos de projetos preliminares visando identificar opções que atendessem o desempenho de engenharia, disponibilidade comercial e custo, obter o melhor conjunto de controle de movimento para atender o conceito de minimáquina-ferramenta multifuncional CNC capaz de realizar operações aditivas e subtrativas de manufatura. As combinações de sistemas mecatrônicos levam em conta a relação custo x benefício e limitações financeiras enfrentadas pelo projeto.

O projeto foi dividido em três fases (Fig. 3.1), detalhadas nos subcapítulos a seguir, quais sejam: (3.1) identificação da demanda, (3.2) projeto conceitual e (3.3) projeto executivo.

### 3.1 IDENTIFICAÇÃO DA DEMANDA

A indústria nacional atualmente supre suas necessidades tecnológicas em máquinas-ferramenta em grande parte com tecnologias advindas do mercado estrangeiro. As unidades de controle, softwares de gerenciamento da movimentação destas máquinas e controladores numéricos são uma demanda local ainda não suprida e/ou com elevado custo de desenvolvimento, motivando o público a movimentar-se em direção ao mercado da importação, mesmo que em prazos extensos.

## 3.2 PROJETO CONCEITUAL

A etapa do desenvolvimento do projeto conceitual trata as delimitações do projeto no Cap. (3.2.1) e apresenta requisitos de projeto mecânico definidos por Alves (2022) na primeira fase de projeto.

### 3.2.1 ANÁLISE DE REQUISITOS

As condições de contorno adotadas nesta pesquisa foram baseadas em trabalhos desenvolvidos no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), experiência do grupo de pesquisa e revisão bibliográfica do estado da arte relacionado ao projeto de máquinas-ferramentas. As condições adotadas foram:

- Metodologia baseada em Rodrigues (2022) e Alves (2022);
- Sistema de coordenadas cartesianas: três eixos de translação ortogonais entre si e um eixo de rotação (ferramenta) paralelo a um dos eixos de translação;
- O equipamento utilizará sistemas lineares constituídos por guias lineares de rolos e dimensões básicas 1 000 mm no eixo X, 760 mm no eixo Y e 760 mm no eixo Z, e fusos de esferas recirculantes de 20 mm de diâmetro, passo de 10 mm/rev com castanha dupla com pré-carga para evitar folgas (*backlash*), e mancais de apoio com rolamentos de contato angular montados com pré-carga, conforme definido por Alves (2022);
- Esforços externos de usinagem de 100 N;
- Velocidades nominais de avanço de 100 mm / s;
- Previsão de expansão do sistema mecatrônico em atualização futura do quarto e quinto eixos;
- Tempo de aceleração de 0,1 segundos;
- Resolução mínima de posicionamento de 1  $\mu\text{m}$ , para permitir a execução de processos de manufatura de precisão;
- Unidade de controle numérico baseada em *LinuxCNC*;

- Protocolos de comunicação reconhecidos no mercado internacional e com capacidade de expansão tecnológica, adequação a redes industriais existentes, viabilidade financeira de implementação e possibilidade de extração de informações para diagnósticos de falha e enquadramento na indústria 4.0.

Para a obtenção da resolução mínima de posicionamento desejada considerou-se dois subgrupos mecâtrônicos distintos e importantes: o sistema de guias lineares, responsável por determinar os graus de liberdade de movimentação de cada eixo, e o sistema de fusos de esferas recirculantes e motores, que permitem a transmissão de movimento.

Considerando os elementos lineares identificados por Alves (2022) e apresentados na Tabela 3.1, quais sejam:

Tabela 3.1 – Relação de guias e patins considerados nos dez protótipos

Item	Número de série	Tipo
1	HGL30HAZAP	Patins
2	HGH35HAZAP	Patins
3	HGW30HCZAP	Patins
4	HGR30R760P	Guia
5	HGR30R1000P	Guia
6	HGR35R1000P	Guia
7	RGW25CC	Patins
8	RGH30HA	Patins
9	RGW30HC	Patins
10	RGH35HA	Patins
11	RGR25R1000H	Guias
12	RGR30R1000P	Guias
13	RGR35R1000P	Guias
14	20-10K4-FSC-L	Fusos

(Adaptado de Alves, 2022)

Além dos elementos lineares, Alves (2022) definiu os tipos de motores utilizados em cada eixo, sendo selecionado um motor de passo com padrão de construção NEMA<sup>7</sup> 34. Entretanto, a análise das curvas de torque, curvas de velocidade e razão de inércia serão analisadas neste trabalho.

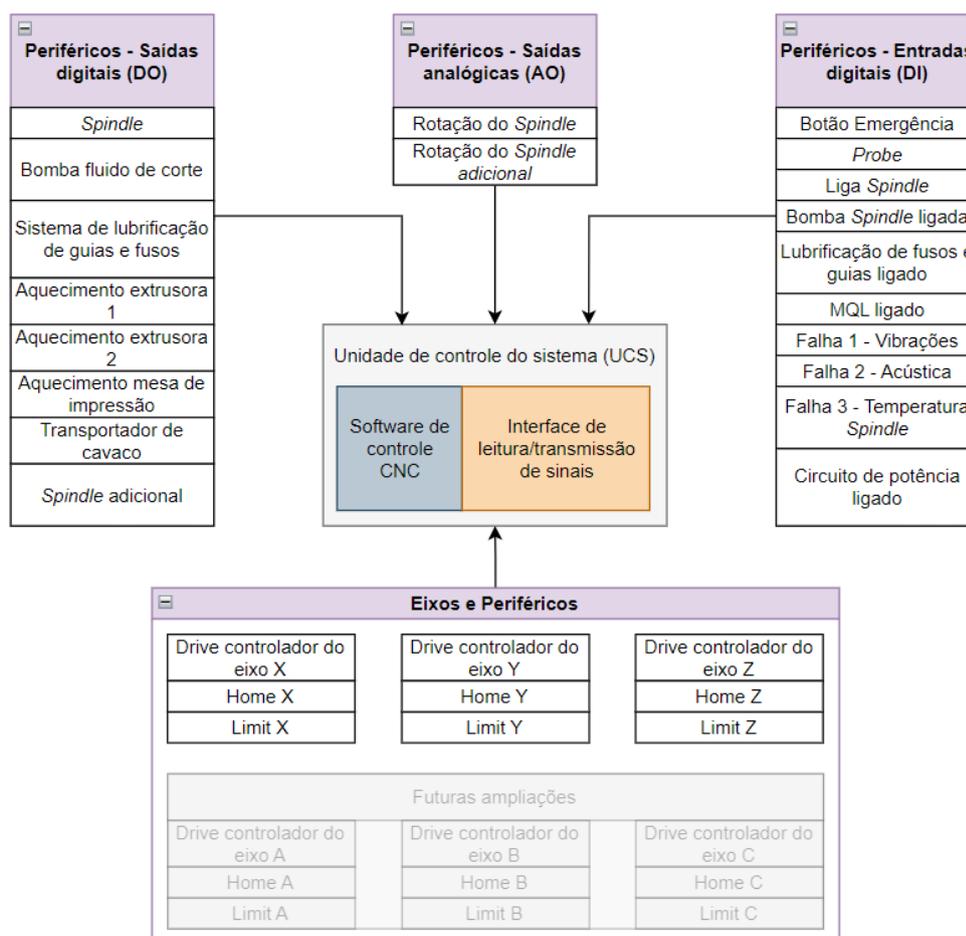
<sup>7</sup> *National Electrical Manufacture Association (NEMA)* trabalha na padronização de componentes elétricos afim de promover a construção de componentes e produtos padronizados a fim de acelerar, economizar e garantir a segurança de produtos e serviços de todo o mundo.

### 3.3 PROJETO PRELIMINAR

O projeto preliminar demandou três ciclos iterativos de projeto, onde no primeiro ciclo foi avaliada e complementada a escolha dos motores de passo selecionados por Alves (2022) e nos ciclos seguintes apresentou-se alternativas para a seleção de motores, *drives* controladores e Unidade de Controle do Sistema (UCS) não abordadas em seu trabalho.

Para definir a estrutura da UCS a ser utilizada e avaliar a capacidade de expansão tecnológica da minimáquina-ferramenta, foi realizado o levantamento de todos os dispositivos periféricos aplicados, além dos motores utilizados em cada eixo. Na Figura 3.2 são apresentados os motores e periféricos que compõem o equipamento, de acordo com a classificação dos tipos de sinais elétricos<sup>8</sup>.

Figura 3.2 – Levantamento de eixos e dispositivos periféricos integrados à máquina-ferramenta multi-processos para manufatura aditiva e subtrativa



<sup>8</sup> Os sinais elétricos de dispositivos periféricos classificam-se em 4 subgrupos: *Digital Output (DO)*, *Digital Input (DI)*, *Analog Output (AO)*, e *Analog Input (AI)*.

De acordo com a Figura 3.2 a UCS deverá permitir a implementação de 8 saídas digitais, 2 saídas analógicas e 13 entradas digitais, bem como os eixos principais e futuras ampliações. Os custos envolvidos nos ciclos de projeto foram levantados para analisar a viabilidade de cada aplicação, levando em consideração a possibilidade de expansão tecnológica e implementação de novos dispositivos periféricos ao sistema. A sequência de análise realizada em cada ciclo de projeto foi definida como: torque necessário em cada eixo, capacidade de torque do motor selecionado, razão de inércia, limites de velocidade do motor, UCS necessária para controlar o motor, resolução, disponibilidade de sinais elétricos para conexão de todos os periféricos à UCS, e visão geral de custos.

### 3.3.1 PROTÓTIPO 1

No protótipo 1, considerou-se como ponto de partida a escolha de motores de passo adotada por Alves (2022). Em seu trabalho foram escolhidos motores em conformidade com o padrão NEMA 34, entretanto é importante ressaltar que a escolha do padrão define apenas as características construtivas e dimensionais de um motor de passo, sendo necessário definir posteriormente os requisitos de torque, velocidade, resolução, e por fim definir o modelo do motor. O protótipo 1 complementa a escolha de Alves (2022) e apresenta os cálculos necessários para a seleção do modelo do motor de passo NEMA 34.

Inicialmente, avalia-se o torque necessário para obter os requisitos de projeto de cada eixo. Para calcular o torque necessário em cada eixo da minimáquina-ferramenta definiu-se o comprimento dos fusos de esferas recirculantes dos eixos X, Y e Z, aplicou-se as delimitações de projeto apresentadas no Capítulo 3.2.1 e foi adotado um fator de segurança ( $F_S$ ) no cálculo do torque total ( $T_{total}$ ) igual a 2. Na Tabela 3.2 observa-se os dados de projeto utilizados.

Tabela 3.2 – Dados técnicos necessários para o cálculo do torque em cada eixo no protótipo 1

Variável	Descrição	Eixo	Unidade	Valor considerado
$M_x$	Massa movida X	X	kg	125
$L_x$	Comprimento do fuso X	X	m	0,570
$\beta_x$	Ângulo entre o sistema de movimentação e o plano horizontal	X	°	0
$M_y$	Massa movida Y	Y	kg	90
$L_y$	Comprimento do fuso Y	Y	m	0,470
$B_y$	Ângulo entre o sistema de movimentação e o plano horizontal	Y	°	0
$M_z$	Massa movida Z	Z	kg	55
$L_z$	Comprimento do fuso Z	Z	m	0,370
$B_z$	Ângulo entre o sistema de movimentação e o plano horizontal	Z	°	90
$V_1$	Velocidade nominal	X, Y e Z	mm / s	100
$t$	Tempo de aceleração	X, Y e Z	s	0,1
$F_p$	Forças externas de usinagem	X, Y e Z	N	100
$D_{x, y, z}$	Diâmetro do fuso	X, Y e Z	m	0,020
$P_{x, y, z}$	Passo do fuso	X, Y e Z	m / rev	0,010
$i$	Relação de transmissão	X, Y e Z	-- <sup>9</sup>	1
$\eta$	Eficiência	X, Y e Z	%	80
$\mu$	Coefficiente de atrito (fuso)	X, Y e Z	-- <sup>7</sup>	0,3
$\rho$	Massa específica do fuso	X, Y e Z	Kg/m <sup>3</sup>	7900
$F_s$	Fator de segurança	X, Y e Z	-- <sup>7</sup>	2

Com base nas Equações 2.4 a 2.12, os resultados dos cálculos de torque necessário em cada eixo são apresentados na Tabela 3.3:

---

<sup>9</sup> Variável adimensional

Tabela 3.3 – Resultados do torque necessário em cada eixo para o protótipo 1

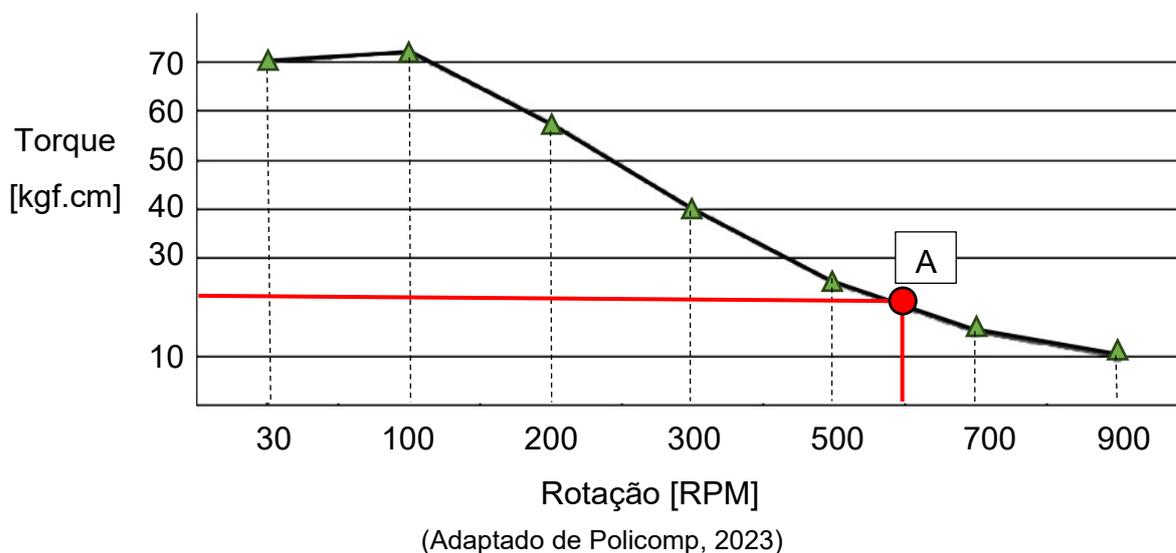
Variável	Descrição	Eixo	Unidade	Resultados
$J_{W, x}$	Inércia da carga	X	kg.m <sup>2</sup>	$3,167 \times 10^{-4}$
$J_{S, x}$	Inércia do fuso de esferas recirculantes	X	kg.m <sup>2</sup>	$0,707 \times 10^{-4}$
$J_{L, x}$	Inércia total do sistema	X	kg.m <sup>2</sup>	$3,870 \times 10^{-4}$
$\eta_{1, x}$	Rotação nominal	X	rpm	600
$T_{a, x}$	Torque de aceleração	X	N.m	0,243
$F_{ext, x}$	Forças atuantes sobre o sistema	X	N	467,875
$T_{L, x}$	Torque de carga	X	N.m	0,931
$T_{total, x}$	Torque total	X	N.m	2,348
$J_{W, y}$	Inércia da carga	Y	kg.m <sup>2</sup>	$2,280 \times 10^{-4}$
$J_{S, y}$	Inércia do fuso de esferas recirculantes	Y	kg.m <sup>2</sup>	$0,583 \times 10^{-4}$
$J_{L, y}$	Inércia total do sistema	Y	kg.m <sup>2</sup>	$2,863 \times 10^{-4}$
$\eta_{1, y}$	Rotação nominal	Y	rpm	600
$T_{a, y}$	Torque de aceleração	Y	N.m	0,179
$F_{ext, y}$	Forças atuantes sobre o sistema	Y	N	364,870
$T_{L, y}$	Torque de carga	Y	N.m	0,726
$T_{total, y}$	Torque total	Y	N.m	1,811
$J_{W, z}$	Inércia da carga	Z	kg.m <sup>2</sup>	$1,390 \times 10^{-4}$
$J_{S, z}$	Inércia do fuso de esferas recirculantes	Z	kg.m <sup>2</sup>	$0,459 \times 10^{-4}$
$J_{L, z}$	Inércia total do sistema	Z	kg.m <sup>2</sup>	$1,850 \times 10^{-4}$
$\eta_{1, z}$	Rotação nominal	Z	rpm	600
$T_{a, z}$	Torque de aceleração	Z	N.m	0,116
$F_{ext, z}$	Forças atuantes sobre o sistema	Z	N	639,550
$T_{L, z}$	Torque de carga	Z	N.m	1,272
$T_{total, z}$	Torque total	Z	N.m	2,776

O próximo passo consiste em avaliar os limites de velocidade e torque do motor de passo selecionado. Nos motores de passo, o torque de saída é inversamente proporcional à velocidade de rotação nominal, de forma que o gráfico de velocidade x torque descreve uma curva similar a uma parábola, que será analisada durante a seleção do motor de passo. De acordo com a Tabela 3.3 observa-se que o eixo Z apresenta condições de dimensionamento desfavoráveis, visto que o maior torque total necessário ( $T_{total, z}$ ) e rotação nominal ( $\eta_{1, z}$ ) são obtidos nos cálculos desse eixo. Entretanto, as condições de torque e rotação nominais dos eixos são similares.

Considerando a escolha do padrão *NEMA* 34 aplicado por Alves (2022) e avaliando o pior cenário (eixo Z), foi selecionado para os três eixos X, Y e Z o motor de passo com maior torque disponível e melhor desempenho, descrito pelo modelo 86HS156-5504A14-B35 com torque máximo de aproximadamente 11,77 N.m (120 kgf.cm) e comercializado nacionalmente pela empresa Policomp (2023),

avaliando posteriormente o seu regime de operação. A curva de velocidade x torque do motor em questão é apresentada na Figura 3.3.

Figura 3.3 – Curva característica de velocidade x torque do motor de passo modelo 86HS156-5504A14-B35 com torque máximo de de 11,77 N.m (120 kgf.cm). A curva foi levantada sob condições de teste de 60 Vac, 5,83 A e 1 600 PPR



Com o auxílio do programa *GetData Graph Digitizer*<sup>®</sup> o ponto A destacado na Figura 3.3 foi extraído, indicando que para uma rotação de 600 rpm o torque de saída do motor de passo selecionado é de aproximadamente 2,42 N.m (24,67 kgf.cm).

Em seguida, deve-se verificar a razão de inércia do sistema. A partir da Equação 2.13, considerando a inércia total do eixo Z ( $J_{L,z}$ ) igual a  $1,85 \times 10^{-4}$  kg.m<sup>2</sup> e a inércia do motor ( $J_m$ ) igual a  $1,05 \times 10^{-4}$  kg.m<sup>2</sup> (OCEANTECH<sup>®</sup>, 2023) a razão de inércia ( $J_R$ ) obtida é de 1,76.

Outro passo importante para a avaliação do tipo de motor de passo escolhido é a resolução obtida. Para calcular a resolução, é importante ressaltar que a curva característica de velocidade x torque do motor de passo apresentada na Figura 3.3 foi obtida levando em consideração algumas configurações iniciais que impactam na curva, quais sejam: tensão de alimentação do driver controlador definida em 60 Vac (Volts em corrente alternada), corrente elétrica de 5,83 A (Ampere) e 1 600 PPR. A modificação da quantidade de pulsos por revolução, corrente elétrica e tensão fornecidas, resulta em outra curva com características que diferem da curva apresentada. Dessa forma, na condição em que a UCS envia um sinal com a menor

divisão possível (1 único pulso) para o *driver* configurado nessas condições, o deslocamento angular é obtido por:

$$\Delta\theta = \frac{360^\circ}{P_R} \cong \Delta\theta = 0,225^\circ \quad (3.1)$$

Considerando o fuso de esferas recirculantes do eixo Z com passo 10 mm/rev, tem-se:

$$\Delta L = \left( \frac{\Delta\theta}{360} \right) \cdot P \cong \Delta L = 0,00625 \text{ [mm]} \quad (3.2)$$

Onde,

$\Delta\theta$  deslocamento angular [ ° ]

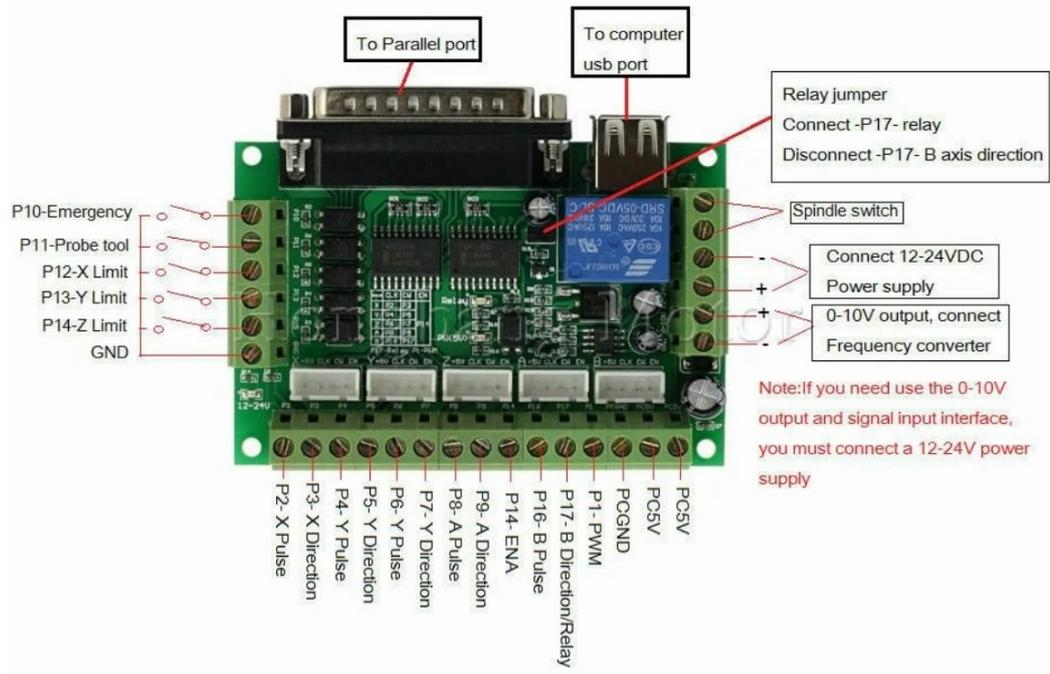
$P_R$  pulsos necessários – configurado no *driver* controlador – para completar uma volta no motor [PPR]

$\Delta L$  deslocamento linear do conjunto acionado [mm]

Em seguida, deve-se avaliar a UCS necessária para comunicar-se com todos os motores e periféricos. Para atender essa demanda de comunicação, no protótipo 1 foram selecionadas 3 placas controladoras do modelo *BOB 5 eixos*, conectadas à porta paralela DB25. O computador que compõe a UCS deve suportar a conexão de 1 controladora *onboard*<sup>10</sup> e 2 controladoras *offboard*<sup>11</sup>. A partir do uso das 3 placas obtém-se 26 saídas digitais, 3 saídas analógicas de 0 V a 10 V, e 15 entradas digitais. Na Fig. (3.4) é possível visualizar os pontos de conexão de cada placa controladora.

<sup>10</sup> Ponto de conexão integrado à placa mãe.

<sup>11</sup> Uma placa externa adicional deverá ser encaixada em slots de expansão da placa mãe.

Figura 3.4 – Sinais de entrada e saída da placa controladora modelo *BOB 5 eixos*(Adaptado de *LinuxCNC*, 2024)

A taxa de comunicação entre a placa controladora *BOB 5 eixos* e o computador é limitada a 25 kHz, enviando um sinal de até 25 000 ( $PP_{m\acute{a}x}$ ) pulsos por segundo para cada eixo. Tendo em vista essa limitação, considerando a condição de envio máximo de pulsos por segundo da placa controladora e considerando que o *driver* controlador do motor de passo selecionado encontra-se configurado em 1 600 PPR, a velocidade de deslocamento limite de cada eixo é definida por:

$$V_{lim} = \left( \frac{PP_{m\acute{a}x}}{P_R} \right) \cdot P \cong V_{lim} = 156,25 \text{ [mm/s]} \quad (3.3)$$

Levando em consideração os motores de passo e placas controladoras selecionadas, na Tab. (3.4) é possível verificar os custos principais relacionados aos sistemas mecatrônicos do protótipo 1.

Tabela 3.4 – Levantamento de custos dos principais sistemas mecatrônicos do protótipo

Descrição	Quantidade	Valor (un)	Total
<b>Motor de passo 86HS156-5504A14-B35</b>	3	R\$ 492,76	R\$ 1 478,28
<b>Driver controlador DM860A</b>	3	R\$ 386,40	R\$ 1 159,20
<b>Controladora BOB 5 eixos</b>	3	R\$ 85,50	R\$ 256,50
<b>TOTAL</b>			<b>R\$ 2 893,98</b>

### 3.3.2 PROTÓTIPO 2

No protótipo 2, os dados técnicos necessários para o cálculo do torque apresentados na Tabela 3.2 serão mantidos. Entretanto, para avaliar a influência do passo do fuso no sistema mecatrônico, aqui serão adotados os fusos de esferas recirculantes com passo ( $P_{x, y, z}$ ) igual a 5 mm/rev.

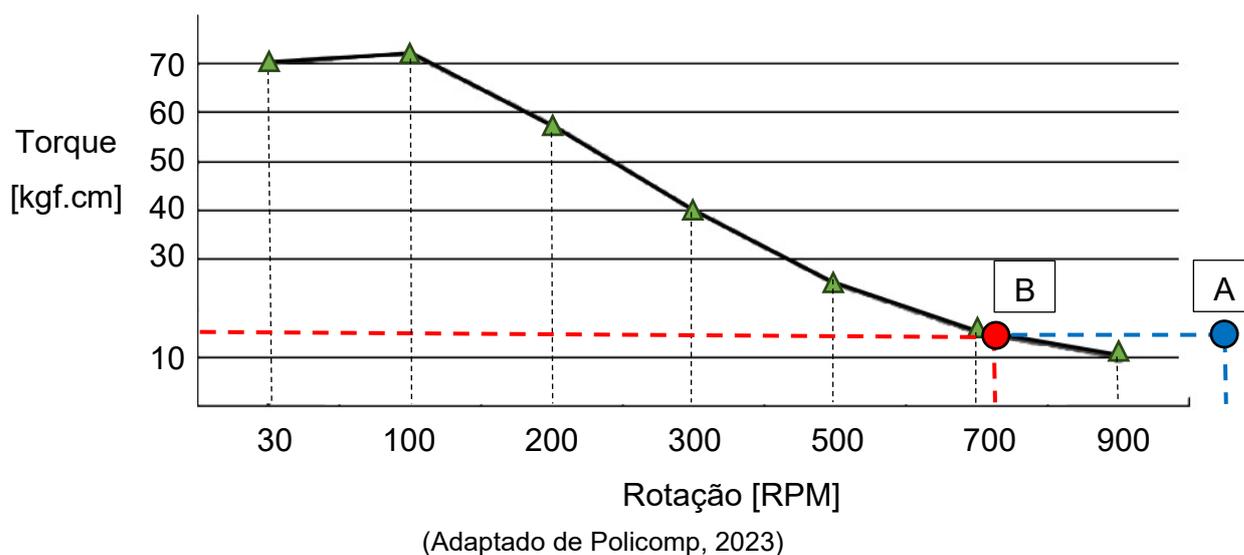
Seguindo as etapas de desenvolvimento do projeto, avalia-se o torque necessário para obter os requisitos definidos em cada eixo. Aplicando as delimitações de projeto apresentadas no Capítulo 3.2.1, empregando as Equações 2.4 a 2.12 e adotando um fator de segurança ( $F_S$ ) no cálculo do torque total ( $T_{total}$ ) igual a 2, os resultados de torque necessários em cada eixo para o protótipo 2 são apresentados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Resultados do torque necessário em cada eixo para o protótipo 2

Variável	Descrição	Eixo	Unidade	Resultados
$J_{W, x}$	Inércia da carga	X	kg.m <sup>2</sup>	$0,792 \times 10^{-4}$
$J_{S, x}$	Inércia do fuso de esferas recirculantes	X	kg.m <sup>2</sup>	$0,707 \times 10^{-4}$
$J_{L, x}$	Inércia total do sistema	X	kg.m <sup>2</sup>	$1,499 \times 10^{-4}$
$\eta_{1, x}$	Rotação nominal	X	rpm	1200
$T_{a, x}$	Torque de aceleração	X	N.m	0,188
$F_{ext, x}$	Forças atuantes sobre o sistema	X	N	467,875
$T_{L, x}$	Torque de carga	X	N.m	0,465
$T_{total, x}$	Torque total	X	N.m	1,307
$J_{W, y}$	Inércia da carga	Y	kg.m <sup>2</sup>	$0,569 \times 10^{-4}$
$J_{S, y}$	Inércia do fuso de esferas recirculantes	Y	kg.m <sup>2</sup>	$0,583 \times 10^{-4}$
$J_{L, y}$	Inércia total do sistema	Y	kg.m <sup>2</sup>	$1,152 \times 10^{-4}$
$\eta_{1, y}$	Rotação nominal	Y	rpm	1200
$T_{a, y}$	Torque de aceleração	Y	N.m	0,145
$F_{ext, y}$	Forças atuantes sobre o sistema	Y	N	364,870
$T_{L, y}$	Torque de carga	Y	N.m	0,363
$T_{total, y}$	Torque total	Y	N.m	1,015
$J_{W, z}$	Inércia da carga	Z	kg.m <sup>2</sup>	$0,348 \times 10^{-4}$
$J_{S, z}$	Inércia do fuso de esferas recirculantes	Z	kg.m <sup>2</sup>	$0,459 \times 10^{-4}$
$J_{L, z}$	Inércia total do sistema	Z	kg.m <sup>2</sup>	$0,807 \times 10^{-4}$
$\eta_{1, z}$	Rotação nominal	Z	rpm	1200
$T_{a, z}$	Torque de aceleração	Z	N.m	0,101
$F_{ext, z}$	Forças atuantes sobre o sistema	Z	N	639,550
$T_{L, z}$	Torque de carga	Z	N.m	0,699
$T_{total, z}$	Torque total	Z	N.m	1,475

Como o motor de passo do protótipo 1 inicialmente foi mantido para o protótipo 2, cujo modelo é o 86HS156-5504A14-B35 com torque máximo de aproximadamente 11,77 N.m (120 kgf.cm), a curva de velocidade x torque será novamente analisada para a pior condição (eixo Z) apresentada na Tabela 3.5. Os novos pontos de interesse da curva do motor em questão estão representados na Figura (3.5).

Figura 3.5 – Curva característica de velocidade x torque do motor de passo modelo 86HS156-5504A14-B35 com torque máximo de 11,77 N.m (120 kgf.cm). A curva foi levantada sob condições de teste de 60 Vac, 5,83 A e 1 600 PPR



Na Figura 3.5 observa-se que o ponto A, que define o torque necessário  $T_{total, z}$  de 1,475 N.m (15,04 kgf.cm) e rotação de 1200 rpm encontra-se fora da faixa de operação do motor selecionado. Para atender ao requisito de torque  $T_{total, z}$  o motor de passo deverá operar em uma rotação máxima de aproximadamente 761,45 rpm (ponto B), extraída com o auxílio do *GetData Graph Digitizer*<sup>®</sup>. Diante desta condição, a velocidade de deslocamento limite fica restrita a  $V_{lim}$  63,45 mm/s.

Com relação a razão de inércia, e considerando a Equação 2.13, a inércia total do eixo Z ( $J_{L, z}$ ) igual a  $0,807 \times 10^{-4}$  kg.m<sup>2</sup> e a inércia do motor ( $J_m$ ) igual a  $1,05 \times 10^{-4}$  kg.m<sup>2</sup> (OCEANTECH<sup>®</sup>, 2023) a razão de inércia ( $J_R$ ) obtida é de 0,768.

Avaliando a resolução – levando em consideração as configurações iniciais que impactam na curva – e aplicando as Equações 3.1 e 3.2 na condição em que a UCS envia um sinal com a menor divisão possível (1 único pulso) para o *driver* configurado nessas condições, o deslocamento angular é obtido por:

$$\Delta\theta = \frac{360^\circ}{P_R} \cong \Delta\theta = 0,225^\circ$$

Aqui, o fuso de esferas recirculantes do eixo Z para o protótipo 2 selecionado possui passo 5 mm/rev. Logo,

$$\Delta L = \left( \frac{\Delta\theta}{360} \right) \cdot P \cong \Delta L = 0,00312 [mm]$$

Considerando que o protótipo 2 apresenta o impacto causado nos motores de passo de acordo com a escolha do passo do fuso de esferas recirculantes, a UCS necessária para o protótipo 2 é mantida conforme apresentada no protótipo 1. Os custos dos principais sistemas mecatrônicos do protótipo 2 não se alteram. Com relação às limitações de velocidade de deslocamento  $V_{lim}$  causadas pela taxa de comunicação entre a placa e o *driver* controlador, e considerando a controladora modelo *BOB 5* eixos com taxa de 25 kHz, após a mudança no passo do fuso de esferas recirculantes a velocidade de deslocamento limite do eixo Z calculada a partir da Equação 3.3 é definida por:

$$V_{lim} = \left( \frac{PP_{m\acute{a}x}}{P_R} \right) \cdot P \cong V_{lim} = 78,12 [mm/s]$$

### 3.3.3 PROTÓTIPO 3

No protótipo 3, considerou-se o uso de servomotores industriais com *encoder* de alta resolução para substituir motores de passo aplicados anteriormente. O uso de servomotores agregam vantagens como torque constante em altas rotações, possibilidade de operação cíclica e altas resoluções de posicionamento.

Com relação aos *drivers* controladores de servomotores, além da possibilidade de comunicação via sinal pulso e direção para controles de posição e velocidade – nesse caso, limitada pela frequência máxima de saída da controladora que compõe a UCS – os *drivers* controladores implementam protocolos de comunicação que permitem a conexão em redes, como o *Modbus RTU*, *Modbus TCP/IP*, *EthernetIP* e *EtherCAT*.

Considerando os dados técnicos necessários para o cálculo do torque apresentados na Tabela 3.2, utilizando fusos de esferas recirculantes com passo ( $P_{x,y,z}$ ) de 5 mm/rev, aplicando as delimitações de projeto aplicadas no Capítulo 3.2.1 e empregando as Equações 2.4 a 2.12, os resultados de torque necessários em cada eixo para o protótipo 3 são apresentados na Tabela 3.5.

Observa-se que em termos matemáticos, os resultados de torque e velocidade necessários em cada eixo obtidos no protótipo 3 são idênticos ao protótipo 2. Entretanto, para avaliar a seleção de servomotores na substituição de motores de passo a curva de velocidade x torque apresenta condições de operação que diferem ambas as escolhas.

Diante desta condição, o conjunto mecatrônico selecionado para substituir motores de passo e *drivers* controladores no protótipo 3 é composto por 2 servomotores fabricados pela *Leadshine*® modelo ELM1H - 0750MA80F para os eixos X e Y, 1 servomotor *Leadshine*® modelo ELM1H - 0750MA80E para o eixo Z e 3 *drivers* controladores *Leadshine*® modelo EL7-EC750F. As características de cada componente são apresentadas na Tabela 3.6.

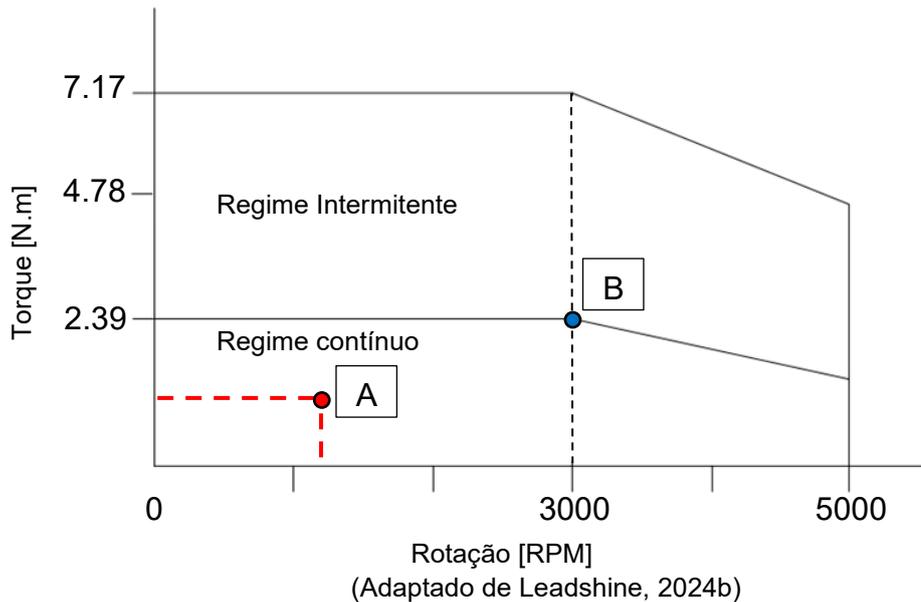
Tabela 3.6 – Principais dados técnicos do conjunto mecatrônico aplicado ao protótipo 3

Item	Código	Descrição técnica	Quantidade
<b>Servomotor</b>	0750MA80F	Potência de 750 W, tensão de alimentação de 3Ø220 Vac, Torque nominal de 2,39 N.m e torque, rotação nominal de 3000 rpm, <i>encoder</i> magnético de 23 <i>bits</i> , <b>sem freio</b> e índice de proteção IP67	2
<b>Servomotor</b>	0750MA80E	Potência de 750 W, tensão de alimentação de 3Ø220 Vac, Torque nominal de 2,39 N.m e torque, rotação nominal de 3000 rpm, <i>encoder</i> magnético de 23 <i>bits</i> , <b>com freio</b> e índice de proteção IP67	1
<b>Driver controlador</b>	EL7-EC750F	Potência de 750W, tensão de entrada de 1Ø220 Vac, corrente nominal de 5,5 A, comunicação <i>EtherCAT</i> , modo de controle de torque, velocidade e posição, 4 DI e 3 DO.	3

(Adaptado de Leadshine, 2024a e Leadshine, 2024b).

Para verificar a capacidade de torque e limites de velocidade do servomotor, a curva de velocidade x torque disponibilizada pelo fabricante é apresentada na Fig. (3.6). Deve-se levar em consideração o pior cenário de dimensionamento (eixo Z) do conjunto mecatrônico, com demanda de torque total ( $T_{total,z}$ ) de 1,475 N.m e rotação nominal ( $\eta_{1,z}$ ) de 1 200 rpm, conforme apresentado na Tab. (3.5).

Figura 3.6 – Curva característica de velocidade x torque do servomotor Leadshine® modelo ELM1H – 0750MA80F



De acordo com a curva característica do servomotor selecionado, a condição de operação do eixo Z no protótipo 3 da minimáquina-ferramenta representados pelo ponto A na Figura 3.6 encontra-se na região central da faixa de regime contínuo do servomotor, proporcionando uma margem de segurança de torque e rotação de aproximadamente 38,2 % e 60%, respectivamente, levando em consideração os limites de operação em regime contínuo definidos pelo ponto B.

No passo seguinte, deve-se verificar a razão de inércia do sistema. A partir da Equação (2.13), considerando a inércia total do eixo Z ( $J_{L,z}$ ) igual a  $0,807 \times 10^{-4} \text{ kg.m}^2$  e a inércia do motor ( $J_m$ ) igual a  $1,65 \times 10^{-4} \text{ kg.m}^2$  (LEADSHINE, 2024b) a razão de inércia ( $J_R$ ) obtida é de 0,458.

Considerando a utilização do encoder magnético de 23 *bits*<sup>12</sup> integrado ao servomotor, a resolução mínima de posicionamento angular obtida em servomotores é definida por:

$$\Delta\theta = \frac{360^\circ}{2^n} \cong \Delta\theta = 0,00004292^\circ \quad (3.4)$$

Considerando o fuso de esferas recirculantes do eixo Z com passo 5 mm/rev, tem-se:

<sup>12</sup> São necessárias  $2^n = 2^3$  divisões para completar 1 volta ( $360^\circ$ ) no encoder do servomotor.

$$\Delta L = \left( \frac{\Delta\theta}{360} \right) . P \cong \Delta L = 0,0000006 [mm] \quad (3.5)$$

Devido a possibilidade de comunicação direta entre o computador integrado à UCS e os *drivers* controladores dos servomotores via porta *Ethernet*, a partir da implementação do *EtherCAT*<sup>13</sup> entre o *linuxCNC* e os *drivers*, o uso de uma placa controladora via porta paralela DB-25 ou *USB* não é necessário. Entretanto, para possibilitar a conexão de dispositivos periféricos e permitir futuras expansões do projeto, faz-se necessário o uso de um módulo expansível de entradas e saídas analógicas e digitais que permita a integração com a UCS. O módulo selecionado é desenvolvido pela criadora do protocolo de comunicação *EtherCAT*, a *Beckhoff Automation*<sup>®</sup>.

Inicialmente, deve-se definir o módulo capaz de comunicar-se tanto com a rede *EtherCAT* quanto com os cartões de expansão de entradas e saídas de sinais integrados a ele. Esse módulo é conhecido como acoplador de rede. Para atender as demandas de projeto do protótipo 3, foi selecionado o acoplador de rede modelo EK - 1100 desenvolvido pela *Beckhoff*. Os cartões de expansão a serem conectados ao acoplador de rede foram selecionados e encontram-se disponíveis na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Acoplador de rede *EtherCAT* e cartões de expansão aplicados ao protótipo 3

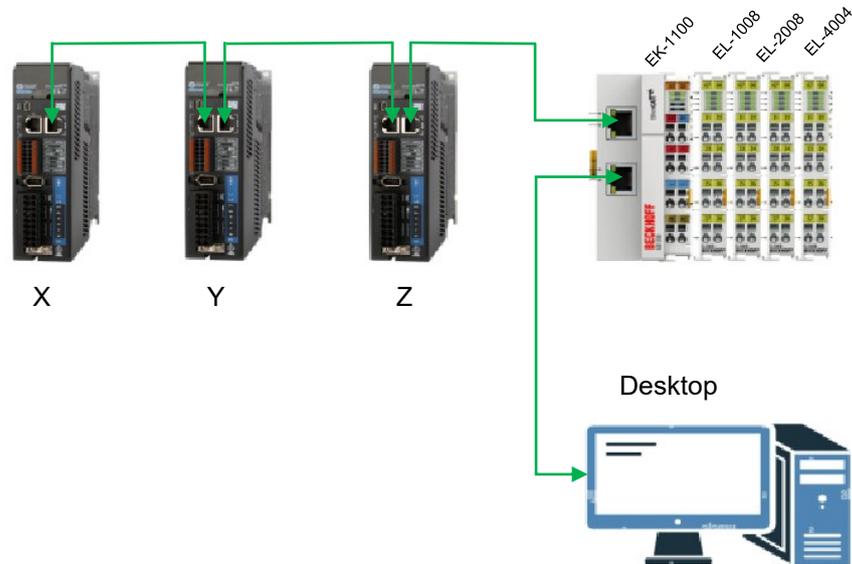
Fabricante	Código	Descrição técnica	Quantidade
<b>Beckhoff Automation</b>	EK - 1100	Acoplador de rede <i>EtherCAT</i> p/ barramento e-bus; 100Mbit/s; conector de rede rj45; corrente de 2A para o barramento; conexão de até 65534 terminais <i>EtherCAT</i> ;	1
<b>Beckhoff Automation</b>	EL - 1008	Terminal c/ 8 canais de entrada digital 24vdc; entrada de 3ms;	2
<b>Beckhoff Automation</b>	EL - 2008	Terminal c/ 8 saídas digitais 24vdc 0.5a	2
<b>Beckhoff Automation</b>	EL - 4004	Terminal c/ 4 canais de saída analógica 0...10v 12bit; sistema de 2 fios	1

De acordo com os dados apresentados na Tabela 3.7 a quantidade de entradas e saídas analógicas obtidas são: 16 entradas digitais, 16 saídas digitais e 4 saídas analógicas. Caso sejam necessárias futuras ampliações, o acoplador de rede suporta

<sup>13</sup> O *LinuxCNC* possui bibliotecas que permitem a implementação do *Master EtherCAT*, possibilitando a visualização dos escravos de rede via terminal.

a comunicação com até 65534 terminais *EtherCAT*. A topologia de rede definida no protótipo 3 está representada na Figura 3.7.

Figura 3.7 – Topologia da rede EtherCAT aplicada no protótipo 3



Levando em consideração os servomotores, módulo acoplador de rede *EtherCAT* e terminais, na Tabela 3.8 é possível verificar os custos principais relacionados aos sistemas mecatrônicos do protótipo 3.

Tabela 3.8 – Levantamento de custos dos principais sistemas mecatrônicos do protótipo 3

Descrição	Quantidade	Valor (un)	Total
Conjunto de servomotores + Drivers 750 W	3	R\$ 4 654,11	R\$ 13 962,33
Acoplador de rede <i>EtherCAT</i>	1	R\$ 1 668,95	R\$ 1 668,95
Terminais de entrada e saída	3	R\$ 1 575,98	R\$ 4 727,94
<b>TOTAL</b>			<b>R\$ 20 359,25</b>

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram idealizados e analisados três protótipos gradativamente evoluídos, considerando o torque necessário do eixo com maiores condições de torque e velocidade (eixo Z) e os principais aspectos que impactam no desempenho do equipamento, como a razão de inércia, resolução, UCS, e os custos principais de cada protótipo. Para desenvolver a minimáquina-ferramenta o Projeto de Pesquisa APQ - 01759-17 disponibiliza R\$ 56 950,00 em recursos financeiros, sendo alocado aproximadamente 35% do recurso para o sistema mecatrônico (incluindo sistemas servo acionados e UCS). O resultado das três iterações de projeto é o protótipo 3, o qual foi analisada as condições de operação para investigar o desempenho da minimáquina frente aos requisitos de processo definidos. Os principais requisitos analisados são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Levantamento de custos dos principais sistemas mecatrônicos do protótipo 3

Passo	Requisito analisado	Protótipo 1	Protótipo 2	Protótipo 3
1	Torque necessário no eixo Z [N.m]	2,776	1,475	1,475
2	Limite de torque do motor [N.m]	2,42	N/A <sup>14</sup>	2,39 <sup>15</sup>
3	Razão de inércia	1,76	0,768	0,458
4	Resolução do sistema ( $\Delta L$ ) [mm]	0,00625	0,00312	0,0000006
5	UCS	3 x BOB 5 eixos	3 x BOB 5 eixos	N/A <sup>16</sup>
6	Custos principais do protótipo	R\$ 2 893,98	R\$ 2 893,98	R\$ 20 359,25

Analisando o protótipo 1, dois requisitos de projeto mecânico não foram atendidos no eixo Z da minimáquina-ferramenta, quais sejam: torque necessário ( $T_{total, z}$ ) e resolução do sistema ( $\Delta L$ ). No Capítulo 3.2.1, delimitação do projeto, foi definida uma capacidade de deslocamento linear mínima de 1  $\mu\text{m}$ . Para atender a esse requisito o conjunto mecatrônico deve oferecer a capacidade de movimentar-se 0,1  $\mu\text{m}$ , ou seja, deve-se permitir um deslocamento linear  $\Delta L$  igual a 0,0001 mm.

<sup>14</sup> Torque necessário encontra-se fora da faixa de operação do motor de passo. Reduzindo a rotação para 761,45 rpm é possível obter o torque de 1,475 Nm. Entretanto, as velocidades de avanço não serão atingidas.

<sup>15</sup> Em regime intermitente, é possível obter até 7,17 Nm a 3000 rpm.

<sup>16</sup> Implementado o uso de acoplador de rede EtherCAT e terminais de entrada e saída de sinais.

Com relação a resolução, uma alternativa para atingir a o requisito de projeto é o uso de um *driver* controlador do motor de passo que possibilita a configuração de 100 000 pul/rev, em conjunto com a placa controladora que integra a UCS com saída mínima de 1 MHz por eixo. Já o torque necessário no protótipo 1 pode ser obtido a partir da redução da massa movida no eixo Z. Entretanto, deve-se avaliar essa possibilidade de modificação no projeto mecânico desenvolvido por Alves (2022).

Para permitir a integração da minimáquina-ferramenta às topologias da indústria 4.0, as informações de processo do protótipo 1 podem ser transmitidas de duas formas: o uso de periféricos industriais adicionais que integram o equipamento a estruturas de *Cloud Computing* por meio do uso de *IIoT*, e aplicação de dispositivos embarcados (Esp32®, Arduino®, BeagleBone®) para transmissão de informações empregando diferentes protocolos e técnicas de modulação de sinais (e.g. *MQTT*<sup>17</sup> + *LoRa*<sup>18</sup>).

No protótipo 2, apesar da redução significativa do torque necessário ( $T_{total, z}$ ) com a utilização do fuso de esferas recirculantes com passo 5 mm/rev, houve o aumento na rotação necessária para atender os requisitos de projeto, visto que em motores de passo o torque e velocidade são grandezas inversamente proporcionais. Como consequência, a faixa de operação calculada encontra-se fora dos limites de operação do conjunto mecatrônico selecionado. Outro ponto negativo é que a resolução obtida no protótipo 2 não atende ao requisitos de projeto definidos.

Já no protótipo 3, as dificuldades encontradas com relação a velocidade de operação e resolução encontradas no protótipo 1 são solucionadas a partir da substituição do motor de passo pelo servomotor, em conjunto com a utilização do fuso de esferas selecionado no protótipo 2 para reduzir o torque. O servomotor selecionado possui margem de segurança de operação e configuração, tanto com relação ao torque necessário quanto à velocidade. Os custos de implementação do protótipo 3 enquadraram-se nos recursos financeiros disponibilizados para o sistema mecatrônico.

No protótipo 3, a integração da minimáquina-ferramenta às topologias da indústria 4.0 conta com uma terceira opção, além das soluções aplicáveis ao protótipo 1. Considerando o acoplador de rede *Beckhoff*® selecionado, a conexão do equipamento com estruturas de *Cloud Computing* por meio de *IIoT*, ou a conexão com sistemas de gestão de recursos *ERP* (*Enterprise Resource Planning*) e *MES*

---

<sup>17</sup> *Message Queuing Telemetry Transport*.

<sup>18</sup> *LoRa (Long Range)*: técnica de modulação de longo alcance

(*Manufacturing Execution Systems*) é simplificada, interligando o nível 1 da pirâmide da automação (dispositivos de campo, sensores e atuadores) diretamente com o nível 5 (gerenciamento de recursos empresariais e interconectividade entre máquinas).

Outras estruturas de redes de comunicação podem ser aplicadas ao protótipo 3, como por exemplo o *ModBus RTU*, *ModBus TCP* e *CANOpen*. Entretanto, levando em consideração as características de desempenho, determinismo, alta capacidade de sincronização, possibilidade de expansão e adição de novos periféricos, facilidade de integração à UCS, intercambialidade com outras redes, integração à indústria 4.0, e custos de implementação, o uso EtherCAT traz benefícios significativos ao projeto.



## 5 CONCLUSÃO

Diante do trabalho proposto, pode-se objetivamente concluir que:

O projeto mecatrônico da minimáquina-ferramenta multifuncional de precisão de granito sintético (GS) cumpriu seu objetivo em avançar o desenvolvimento científico e tecnológico do projeto de minimáquinas-ferramenta de precisão.

Alguns requisitos de projeto, como a substituição de motores de passo padrão *NEMA* por servomotores, devem ser atualizados.

Apesar da existência de *softwares* que possibilitam o dimensionamento de motores de passo e servomotores, os cálculos da dinâmica de máquinas devem ser desenvolvidos com base na literatura disponível, avaliando criteriosamente o impacto de cada requisito de projeto no dimensionamento do conjunto mecatrônico.

Os protótipos de 1 e 2 foram necessários para que o autor se qualificasse com as técnicas de projeto, familiarização dos elementos de máquinas que compõem uma máquina-ferramenta, visualização geral do projeto e estudos de otimização visando um olhar sistêmico de projeto, a integração e comunicação entre os dispositivos da UCS, e validação do equipamento.

O protótipo 3 fechou o segundo ciclo de projeto e mostrou todo o caminho a seguir nas próximas fases de trabalho. Trouxe clareza quanto às necessidades urgentes de avaliar topologias, estruturas e protocolos de comunicação da UCS.

A literatura sobre as redes industriais permitiu reunir as características específicas de cada protocolo de comunicação, bem como os barramentos de transmissão. Porém, o desempenho real de cada protocolo é variável e sofre influência da qualidade de conexões e cabeamentos utilizados na estruturação da rede industrial, distância entre dispositivos, topologias de rede adotadas, dentre outros fatores.

Apesar da dificuldade em comparar diferentes protocolos de comunicação devido à fatores externos que alteram o desempenho de redes, a literatura mostra que considerando algumas características específicas de implementação e estruturação dos protocolos apresentados, o melhor desempenho, em condições iguais, é desse protocolo.

A vasta quantidade de elementos de máquinas ofertadas no mercado possibilitou a adequação destes no projeto de forma fácil e rápida. Destaca-se o fornecimento de

informações de qualidade sobre cada elemento de máquina e sua consequente aplicação por parte dos fabricantes e fornecedores. Assim, a tarefa principal foi avaliar a interconectividade destes componentes à UCS.

O projeto da minimáquina-ferramenta cumpriu sua função de direcionar e trazer clareza sobre os aspectos de projeto do conjunto mecatrônico e capacidade de integração à indústria 4.0.

A análise de desempenho de cada rede industrial apresentada nesse trabalho é necessárias e será realizada em trabalhos futuros. Os resultados obtidos apontam que é possível empregar tecnologias de ponta para criar uma estrutura multifuncional com custos menores de fabricação, montagem e manutenção.

## 6 PROPOSTAS PARA FUTUROS TRABALHOS

- Estruturar redes industriais em laboratório com protocolos de comunicação *ModBus RTU*, *ModBus TCP*, *CANOpen* e *EtherCAT*, submetidas a condições de operação iguais, para avaliar comparativamente o desempenho de cada rede;
- Simulação dinâmica do uso dos servomotores em substituição aos motores de passo definidos na fase de projeto anterior;
- Avaliar o tipo de acoplamento flexível a ser utilizado na conexão entre servomotores e fusos de esferas recirculantes;
- Projeto de um motor *Spindle* com faixa de operação variável e aplicação específica na usinagem de metais, com troca automática de ferramentas; e
- Desenvolvimento da interface gráfica para máquinas multi-processos implementada no sistema *LinuxCNC*, disponibilizando múltiplas telas na mesma aplicação, de acordo com o processo de manufatura a ser executado.



## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABD-ALRAZZAQ, M. AHMED, M. YOUNES, M. A computer numerical control (CNC) multi-pass spinning solution to a center lathe retrofit. SN Applied Sciences. Switzerland. 2018. DOI: 10.1007/s42452-018-0007-x.
- AL-MAEENI, S. KUHNHEN, C. ENGEL, B. SCHILLER, M. Smart retrofitting of machine tools in the contexto of industry 4.0. Procedia CIRP, vol. 88. 369 – 374 pp. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.05.064>.
- ALVES, L. Projeto mecânico de minimáquina-ferramenta multifuncional de precisão de granito sintético. Faculdade de Engenharia Mecânica, UFU, Uberlândia-MG. 2022; 146 p.
- BYRES, E. FRANZ, M. MILLER, D. The use of attack trees in assessing vulnerabilities in SCADA systems. Disponível em: [https://www.researchgate.net/figure/The-MODBUS-protocol-family-OSI-stack-representation\\_fig1\\_228952316](https://www.researchgate.net/figure/The-MODBUS-protocol-family-OSI-stack-representation_fig1_228952316). Acesso em: 04/12/2023.
- CALDIÉRI, M. Implementação do Modbus para aplicação em Sistema de controle via rede sem fio. Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Bauru - SP. 2016
- CORRÊA, T. ALMEIDA, L. Hardware support to minimize the end-to-end delay in ethernet-based ring networks. Electronics. 2019. DOI: 10.3390/electronics8101097.
- CUZUOLL, G. SIQUEIRA, J. Projeto de construção de uma router CNC utilizando RNR Ecomotion. Instituto Federal do Espírito Santo, Campus Araçuz, Curso de Engenharia Mecânica. Aracruz- ES. 2023. 89 p.
- DANESH, A. SWOT. Analysis for Opens Systems Interconnection (OSI) Reference Model. Telecommunications and Internet Technologies, Marter’s degree program, University of Applied Sciences Technikum, Vienna, Austria. 2021.
- DENARDIN, G. Introdução ao protocolo CANopen. Data de publicação: 02/12/2022. Disponível em: < <https://www.youtube.com/watch?v=zuWOYC6D-EY&list=WL&index=5&t=3752s>>. Acesso em: 15/12/2023.
- ENDING CNC. CNC720 4 – Axis Ethernet 400 kHz Modbus-RTU 24V. Disponível em: <<https://edingcnc.com/product/cnc720/>>. Acesso em: 15/11/2023.
- ETH. The first transistor. Swiss Federal Institute of Technology. Disponível em: <[https://qudev.phys.ethz.ch/static/content/QSIT15/QSIT15\\_V01\\_slides.pdf](https://qudev.phys.ethz.ch/static/content/QSIT15/QSIT15_V01_slides.pdf)>. Acesso em: 15/12/2023.
- ETHERCAT® TECHNOLOGY GROUP. A Rede Ethernet de Campo. ETG Headquarters, Nuremberg – Germany. 2012. Disponível em: < [https://www.ethercat.org/download/documents/EtherCAT\\_Introduction\\_PT.pdf](https://www.ethercat.org/download/documents/EtherCAT_Introduction_PT.pdf)>. Acesso em: 09/11/2023

FAN, Y. RAN, C. ZHI-HUI, C. Communication of the Wind Turbine Testing System Based on CANOpen Protocol. IEEE Power Engineering and Automation Conference, 2011.

FINNE, J. Implementation of Unit Test Cases and Simulated ESM-30 Module for Validating the Integration of a Nes CANopen Stack into WMAP. Degree Thesis for Bachelor of Engineering, Electrical and Automation Technology. Yrkeshögskolan Novia, Vaasa. 2022.

FORTULAN, C. Aula 08 – Motores Elétricos. Notas de Aula. Universidade de São Paulo – USP. São Carlos, SP. 2018.

FOUROZAN, B. Data communications and networking. 4. Ed. Nova York: Higher Education, 2007. 1134 p.

FROES, M. REIS, M. MARQUES, S. BORGES, A. CARNIETO, D. RODRIGUES, F. NUNES, M. Redes Industriais: protocolos de automação e pirâmide de automação. Mostra Científica, Cultural e Tecnológica de 2021. Instituto Federal, Campus Presidente Epitácio, São Paulo. 2021.

FUKUMOTO, H. YAMAGUCHI, T. ISHIBASHI, M. FURUKAWA, T. *Developing a Remote Laboratory System of Stepper Motor for Learning Support*. IEEE Transactions on Education, vol. 64, no. 3, pp. 292-298. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1109/TE.2020.3042595>.

GAMESS, E. SMITH, B. LII, G. Performance Evaluation of Modbus TCP in Normal Operation and Under a Distributed Denial of Service Attack. International Journal of Computer Networks and Communications. Volume 12. 2020. DOI: <https://doi.org/10.5121/ijcnc.2020.12201>.

GOLDENBERG, N. WOOL, A. Accurate modeling of Modbus/TCP for intrusion detection in SCADA systems. International Journal of Critical Infrastructure Protection. Volume 6. 2013. 63 - 75 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2013.05.001>.

GÜROCAK, H. Industrial Motion Control. 1ª Edição. Wiley, Chichester, United Kingdom. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118403211>.

HERATH, K. ARIYATHUNGE, S. PRIYANKARA, H. Development of a Data Acquisition and Monitoring System Based on MODBUS RTU Communication Protocol. International Journal of Innovative Science and Research Technology. Volume: 5. 2020. DOI: <https://doi.org/10.38124/IJISRT20JUN479>.

HUANG, R. CHEN, Y. CHEN, Y. CHENG, C. TSAI, M. LEE, A. Advanced Application of Centralized Control for a Scanning Mirror System Vased on EtherCAT Fieldbus. International Journal of Control, Automation and Systems. 2021. 1205-1214 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12555-019-0754-5>.

IONICĂ, I. MODREANU, M. MORECA, A. BOBC, C. Geometry Influence on the Electromagnetic Torque Calculation of a Stepper Motor. 2021 12<sup>th</sup> international Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE). Bucharest, Romania, 2021, pp. 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1109/ATEE52255.2021.9425333>.

KUROSE, James F.; ROSS, Keith W. Camadas de protocolo e seus modelos de serviço: Arquitetura de camadas. In: KUROSE, James F.; ROSS, Keith W. Redes de computadores e a internet: uma abordagem top-down. 5. ed. [S. l.]: Pearson, 2009. cap. 1.5, p. 35-40.

TAVARES, J. Redes Industriais – INTRODUÇÃO. Faculdade de Engenharia Mecânica – FEMEC. Universidade Federal de Uberlândia – UFU. Uberlândia – MG. 2019.

JIA, B. LAI, S. WANG, F. LIU, L. ZHANG, G. LI, J. Fabrication of a probe-lens device for scanning super-resolution imaging platform. IEEE 12<sup>th</sup> International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS). Los Angeles, CA, USA. 2017. 327 – 332 pp. DOI: [10.1109/NEMS.2017.8017035](https://doi.org/10.1109/NEMS.2017.8017035).

KALATEC®. 1 – 4 Screw Shaft Design. Disponível em: [www.kalatec.com.br](http://www.kalatec.com.br).

Acesso em: 13/12/2023.

KNEZIC, M. DOKIC, B. IVANOVIC, Z. Topology aspects in EtherCAT networks. Proceedings of 14<sup>th</sup> International Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC. Ohrid, Macedonia. 2010. DOI: [10.1109/EPEPEMC.2010.5606688](https://doi.org/10.1109/EPEPEMC.2010.5606688)

PAHL, Gerard; BEITZ, Wolfgang. Engineering Desing: A Systematic Approach. Editado por Ken Wallace. 1a Edição. The Design Council, Reino Unido, 1988. 212 p.

PAHL, Gerard; BEITZ, Wolfgang; FELDHUSEN, Jörg; GROTE, Karl-Heinrich. Projeto na Engenharia: Fundamentos do desenvolvimento eficaz de produtos, Métodos e Aplicações. 6a Edição. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 2013. 412 p. 455 desenhos e ilustrações.

LAI, Y. GAO, H. LIU, J. Vulnerability Mining Method for the Modbus TCP Using an Anti-Sample Fuzzer. College of Computer Science, Faculty of Information Technology, Beijing University of Technology. Beijing, China. 2020

LEADSHINE. EL7-EC750F. Disponível em: <https://www.leadshine.com/product-detail/EL7-EC750F.html>. Acesso em: 03/01/2024a

LEADSHINE. ELM1H-0750MA80F. Disponível em: <https://www.leadshine.com/product-detail/ELM1H-0750MA80F.html>. Acesso em: 03/01/2024b

LEISERSON, C. THOMPSON, N. EMER, J. KUSZMAUL, B. LAMPSON, B. SANCHEZ, D. SCHARDL, T. There's plenty of room at the Top: What will drive computer performance after Moore's law. Science 368; eaam99744 (2020). Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aam9744> . Acesso em

11/12/2023. DOI: 10.1126/science.aam974. DOI:  
<https://doi.org/10.1126/science.aam9744>

LINUXCNC. *BOB wiring*. Linux CNC Forum. Disponível em:  
<<https://forum.linuxcnc.org/27-driver-boards/49414-bob-wiring>>. Acesso em  
01/01/2024.

MARTINEZ, E. PONCE, P. MACIAS, I. MOLINA, A. Automation Pyramid as  
Constructor for a Complete Digital Twin, Case Study: A Didactic Manufacturing  
System. Tecnológico de Monterrey, Department of Mechatronics, School of  
Engineering and Sciences, Mexico City Campus, Mexico City, Mexico. 2021. DOI:  
<https://doi.org/10.3390/s21144656>.

MOORE, S, K. Another step toward the end of Moore's law: Samsung and TSMC  
move to 5-nanometer manufacturing. IEEE Spectrum, vol. 56, no. 6, pp. 9-10, Junho  
de 2019. DOI: 10.1109/MSPEC.2019.8727133

MORATA, H. Ethernet Industrial, conceitos e diferenças. 29 de setembro de 2020.  
*LinkedIn*: Henrique Morata. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/ethernet-industrial-conceitos-e-diferen%C3%A7as-henrique-morata/?originalSubdomain=pt>.  
Acesso em: 10/11/2023.

NASCIMENTO, J. LUCENA, P. Protocolo *Modbus*. LECA – Universidade Federal do  
Rio Grande do Norte. 2003.

OCEANTECH®. NEMA 34 – 120kgf NEMA 34 BIPOLAR 4 FIOS. OceanTech®  
Automation. Disponível em: <<https://oceantech-automation.com.br/produtos/nema-34-120kgf-nema-34-bipolar-4-fios/>>. Acesso em: 25/12/2023.

ORFANUS, D. INDERGAARD, R. PRYTZ, G. WIEN, T. EtherCAT-based platform for  
distributed control in high-performance industrial applications. IEEE 18th Conference  
on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA). Cagliari - Italy. 2013.  
1 - 8 pp. DOI: 10.1109/ETFA.2013.6647972

Paprocki, M.; Erwiński, K. Synchronization of Electrical Drives via EtherCAT Fieldbus  
Communication Modules. *Energies* 2022, 15, 604.  
<https://doi.org/10.3390/en15020604>

PAHC. Protocolos de redes industriais: quais são os principais? Disponível em:  
<https://pahcautomacao.com.br/protocolos-de-redes-industriais-quais-sao-os-principais/>. Acesso em: 10/11/2023.

POLICOMP. Motor de passo *NEMA 34 – 120 kgf.cm*. Policomp componentes  
industriais. Disponível em:  
<<https://www.lojapolicompcomponentes.com.br/produtos/motor-de-passo-nema-34-120kgf-cm/>>. Acesso em: 25/12/2023.

RODRIGUES, E. S. Projeto geométrico e estrutural de minimáquina-ferramenta  
multifuncional de precisão. Faculdade de Engenharia Mecânica, UFU, Uberlândia -  
MG. 2022. 132 p.

SANTOS, L. Conheça sobre *CANOpen*, protocolo de Rede Industrial. 31 de Janeiro de 2017. Disponível em: <http://blog.murrelektronik.com.br/protocolos-de-redes-canopen/>. Acesso em: 18/11/2023.

SHI, H. LIN, W. LIU, C. YU, J. A novel heterogeneous parallel system architecture based EtherCAT hard real-time master in high performance control system. *Electronics*. Vol 11. 14 pp. 2022. DOI: 10.3390/electronics11193124.

SILVA, D. Implementação de uma rede CANOpen para controle de veículos autônomos. Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte, 2011.

STRACK, G. Módulo de I/O Remoto MODBUS. Projeto de Diplomação - Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

SWALES, A. Open Modbus/TCP specification. Edição 1. 29 de março de 1999. Disponível em: [http://www.tuomio.fi/ananas/Open\\_ModbusTCP\\_Standard.pdf](http://www.tuomio.fi/ananas/Open_ModbusTCP_Standard.pdf). Acesso em: 04/12/2023.

TERGOLINA, R. Rede Industrial *Fieldbus Modbus*. Engenharia de Controle e Automação, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. Primeiro semestre de 2014. Disponível em: [https://www.politecnica.pucrs.br/professores/tergolina/Redes\\_e\\_Protocolos\\_Industriais/APRESENTACAO\\_-\\_Aula\\_09\\_Modbus.pdf](https://www.politecnica.pucrs.br/professores/tergolina/Redes_e_Protocolos_Industriais/APRESENTACAO_-_Aula_09_Modbus.pdf). Acesso em: 15/11/2023.

TERGOLINA, R. O Modelo OSI – Open Systems Intercnection. Engenharia de Controle e Automação, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. Segundo semestre de 2015. Disponível em: [https://www.politecnica.pucrs.br/professores/tergolina/Redes\\_e\\_Protocolos\\_Industriais/APRESENTACAO\\_-\\_Aula\\_04\\_Modelo\\_OSI.pdf](https://www.politecnica.pucrs.br/professores/tergolina/Redes_e_Protocolos_Industriais/APRESENTACAO_-_Aula_04_Modelo_OSI.pdf). Acesso em: 04/12/2023.

UNESP. Motor de passo – aula 3. Faculdade de Engenharia – Campus Ilha Solteira. Universidade Estadual Paulista – UNESP. 2013. Disponível em: <<https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/aula3-motor-de-passo-2013-1-13-03-2013-final.pdf>>. Acesso em: 09/12/2023.

UNIVERSAL ROBOTS BRASIL. Redes industriais: O que são, principais tipos e para que servem. Disponível em: <https://www.universal-robots.com/br/blog/redes-industriais-o-que-s%C3%A3o-principais-tipos-e-para-que-servem/>. Acesso em: 10/11/2023.

URREA, C. MORALES, C. MUNÓZ, R. Design and implementation of an error detection and correction method compatible with MODBUS-RTU by means of systematic codes. *Measurement*. Volume 91. September 2016. 266 – 275 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.05.055>.

URREA, C. KERN, J. MORALES, C. Error detection and correction to enhance the data rate of smart metering systems using Modbus-RTU. *Electrical Engineering* 103. 2021. 115-124 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00202-020-01067-7>.

VALLDER. User Manual of 5 Axis Breakout Board Interface Adapter. Disponível em: <[www.vallder.com](http://www.vallder.com)>. Acesso em: 15/11/2023.

XUAN, L. YONGZHONG, L. Research and Implementation of Modbus TCP Security Enhancement Protocol. *Journal of Physics Conference Series*, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1213/5/052058>.

ZANUSO, G. FODOR, V. PERETTI, L. WALLMARK, O. Multi-drive control and condition monitoring in networked electric drives with EtherCAT. *International Conference on Electrical Machines (ICEM)*. Gothenburg, Sweden. 2020. 1178 - 1184 pp. DOI: [10.1109/ICEM49940.2020.9271025](https://doi.org/10.1109/ICEM49940.2020.9271025).

ZURAWSKI, R. *Industrial Communication Technology Handbook*. CRC Press: Boca Raton, FL, USA. 2015.

WiXHC®. Placa controladora mach3 usb cnc mach 3 motor de passo de placa de fuga. Disponível em: < <https://www.wixhc.cn/pt/product/motion-control-card-mkx-iv>>. Acesso em: 10/12/2023.

WEG. Manual do Usuário CANopen. Série PLC300. Número do documento: 10000849433/01. Novembro de 2010. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h36/h4f/WEG-plc300-comunicacao-canopen-10000849433-manual-portugues-br.pdf>. Acesso em: 14/12/2023

WU, X. XIE, L. Performance evaluation of industrial Ethernet protocols for networked control application. *Control Engineering Practice*, Vol. 84. 2019. 208 – 217 pp. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2018.11.022>.

YASKAWA Sigma Select®. Versão V1.0.9.6. YASKAWA America, 2021. Disponível em: < [https://www.yaskawa.com/products/motion/sigma-7-servo-products/software-tools/sigmaselect/-/content/\\_1d4c2d21-7ea3-41cb-a040-5c0dd40ec14c\\_DownloadSoftware](https://www.yaskawa.com/products/motion/sigma-7-servo-products/software-tools/sigmaselect/-/content/_1d4c2d21-7ea3-41cb-a040-5c0dd40ec14c_DownloadSoftware)>. Acesso em: 28/09/2023.