



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Inês Gomes Torres

Estudo de Requalificação de Máquinas- -Ferramenta CNC



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Inês Gomes Torres

Estudo de Requalificação de Máquinas- -Ferramenta CNC

Dissertação de Mestrado

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Especialização em Sistemas Mecatrónicos

Trabalho efetuado sob a orientação do

Professor Doutor António A. Caetano Monteiro

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição

CC BY

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

AGRADECIMENTOS

Aproveito este espaço para agradecer a todas as pessoas que contribuíram para este trabalho e sem as quais não teria sido capaz de terminar este percurso académico.

Em primeiro lugar, agradeço ao meu orientador, o Professor Doutro Caetano Monteiro, por todo o conhecimento partilhado, pela disponibilidade, pelo apoio e por não deixar de procurar saber se tinha alguma dúvida ou problema, mesmo quando mais atarefado.

Agradeço, também, ao Engenheiro Filipe Marques, por toda a ajuda, conselhos e partilha, e por garantir que nada me faltasse durante a minha presença nas oficinas.

Um agradecimento especial é dirigido aos meus pais, aos meus irmãos, à Leticia, ao Mateus e ao João, por sempre me apoiarem em todas as minhas escolhas e me incentivarem a arriscar, garantindo que nada me faltasse ao longo destes cinco anos. Não poderia de deixar de agradecer à restante família e amigos, por todo o carinho e conforto que transmitiram em todos os momentos, desculpando a minha ausência.

Como não poderia deixar de ser, agradeço a todos os meus colegas de curso, em especial àqueles com quem privei mais e que tornarem esta experiência ainda mais inesquecível. Destaco uma palavra de maior gratidão para a Rita, a Sofia, a Mariana, o Xico, o Didi, o Pizzi, o Pedro e o Manel, pela forma como me marcaram, pela relação que criamos e por nunca me falharem.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

RESUMO

As máquinas-ferramenta enfrentaram uma evolução constante ao longo dos anos, que foi acentuada com os avanços tecnológicos ao nível da eletrónica verificados no século XX. Isto faz com que um equipamento que apresente boas condições mecânicas acabe por se revelar inoperacional, devido à obsolescência do seu sistema de controlo. Para contornar esta adversidade, é necessário garantir o correto funcionamento das máquinas através de uma manutenção cuidada, documentada, e da procura de uma modernização viável com a composição base do equipamento.

No seguimento deste tema, tem-se o exemplo da fresadora CNC de quatro eixos das Oficinas de Formação e Apoio, do Departamento de Engenharia Mecânica. Esta máquina encontra-se fora de serviço e carece de uma atualização completa dos seus sistemas de controlo, bem como de manuais de utilização e manutenção.

Este tema surge na tentativa de proporcionar uma nova vida à máquina, através da requalificação dos componentes avariados/ultrapassados. Numa fase inicial, faz-se uma pequena introdução ao universo de máquinas-ferramenta, dando a conhecer a sua evolução histórica, a importância de uma manutenção constante e da manufatura sustentável para o prolongamento da vida útil dos equipamentos. Apresenta-se, ainda, a constituição comum deste tipo de máquina-ferramenta de comando numérico, salientando os seus principais sistemas e componentes. De seguida, apresenta-se a fresadora em estudo, dando a conhecer os seus componentes e a função que desempenham. Passando para o desenvolvimento do trabalho em si, todos os resultados obtidos nos testes realizados são apresentados, desde o sistema de acionamento ao sistema pneumático e os dispositivos de segurança. Apresenta-se, ainda, os procedimentos seguidos na montagem e afinação dos componentes mecânicos, e os elementos desenvolvidos para assegurar o correto funcionamento da máquina. Desta secção resultam considerações importantes acerca do estado de conservação da máquina, concluindo-se sobre as suas necessidades ao nível da atualização dos sistemas.

Anexado a esta dissertação encontra-se um conjunto de documentos de apoio à utilização da máquina, como procedimentos de teste, incluindo guias de utilização do inversor e do osciloscópio.

PALAVRAS-CHAVE: comando numérico, manutenção, máquinas-ferramenta, requalificação.

ABSTRACT

Machine tools have faced a constant evolution over the years, which was accentuated with the technological advances in electronics that occurred in the 20th century. This means that equipment that is in good mechanical condition ends up inoperable, due to the obsolescence of its control system. To get around this adversity, it is necessary to guarantee the correct operation of the machines through careful and documented maintenance, and the search for a viable modernization with the basic composition of the equipment.

Following this theme, we have the example of the four axis CNC milling machine of the "Oficinas de Formação e Apoio", of the Mechanical Engineering Department. This machine is out of service and needs a complete upgrade of its control systems, as well as user and maintenance manuals.

This topic arises to give the machine a new life, through the requalification of the broken/outdated components. Initially, a short introduction is made to the machine tool universe, making known its historical evolution, the importance of constant maintenance and sustainable manufacturing for the extension of the equipment's useful life. The common constitution of this type of numerically controlled machine tool is also presented, highlighting its main systems and components. Next, the milling machine under study is presented, making known its components and the function they perform. Passing to the development of the work itself, all the results obtained in the tests performed are presented, from the drive system to the pneumatic system and the safety devices. Also presented are the procedures followed in the assembly and tuning of the mechanical components, and the elements developed to ensure the correct operation of the machine. This section results in important considerations about the state of conservation of the machine, concluding on its needs at the level of system upgrades.

Attached to this dissertation is a set of support documents for the use of the machine, such as test procedures, including guides for the use of the inverter and the oscilloscope

KEYWORDS: numerical control, maintenance, machine tools, requalification.

ÍNDICE

Agradecimentos.....	iii
Resumo.....	v
Abstract.....	vi
Índice.....	vii
Índice de Figuras.....	ix
Índice de Tabelas	xiv
Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos	xv
1. Introdução	1
1.1 Motivação	2
1.2 Objetivos.....	3
2. Estado da Arte	4
2.1 Máquinas-ferramenta	4
2.1.1 Evolução histórica.....	5
2.1.2 Análise de mercado	9
2.1.3 Manufatura Sustentável	12
2.1.4 Importância da manutenção	15
2.2 Composição de uma máquina-ferramenta CNC.....	17
2.2.1 Tipos de fresadora	17
2.2.2 Estrutura	18
2.2.3 Sistemas de acionamento.....	19
2.2.5 Sistemas de transmissão e conversão do movimento	31
2.2.6 Componentes do sistema CNC	35
2.3 Requalificação de máquinas-ferramenta CNC.....	38
2.3.1 Requalificação tradicional	39
2.3.2 Requalificação Inteligente	41
3. Fresadora <i>SwissPerfo</i> “Type CU 200H”	43
3.1 Sistema de controlo	44
3.2 Sistema mecânico.....	45
3.3 Sistema de acionamento	47

3.3.1	Sistema codificador	50
3.3.2	Termistor PTC	50
3.3.3	Travão de imobilização	51
3.3.4	Codificador incremental	52
3.3.5	Sensores de fim de curso	53
3.4	Sistema pneumático.....	55
4.	Desenvolvimento do trabalho	60
4.1	Testes de bancada dos sistemas da máquina (sem carga)	60
4.1.1	Equipamento necessário.....	60
4.1.2	Sensores fim de curso	63
4.1.3	Servomotores	66
4.1.4	Dispositivos de medição	71
4.1.5	Codificador do motor do eixo Z.....	77
4.1.6	Sistema pneumático	79
4.2	Montagem e afinação da árvore.....	83
4.3	Montagem da mesa B	87
4.4	Reestruturação da mesa de troca automática de ferramentas	89
4.5	Teste dos motores na máquina	92
4.6	Discussão de resultados.....	93
5.	Conclusão	95
5.1	Trabalhos futuros	96
6.	Referências Bibliográficas	98
	Apêndice 1 – Interruptor de Pressão	105
	Apêndice 2 – Variador Eletrónico de Velocidade	109
	Apêndice 3 – Osciloscópio	123
	Apêndice 4 – Teste dos Sensores Fim de Curso.....	132
	Apêndice 5 – Estudo de Mercado de Novos Codificadores	136
	Apêndice 6 – Procedimentos de Desmontagem da Árvore.....	138
	Apêndice 7 – Configuração das Molas de Disco	146
	Apêndice 8 – Desenho Técnico do Espaçador	150

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de maquinagem convencional (Adaptado de: [2])	5
Figura 2 - Primeiro torno de madeira (Retirado de: [2])	6
Figura 3 - Evolução da indústria ao longo das 4 revoluções industriais (Adaptado de: [4])	6
Figura 4 – Esquema de ligações entre as máquinas e os sistemas inteligentes, através da interface UMATI (Retirado de: [8])	8
Figura 5 - Análise do consumo e produção de máquinas-ferramenta até 2020 (Retirado de: [11])	9
Figura 6 - Consumo de máquinas-ferramenta dos principais países desta categoria: linha azul – China, linha laranja – Alemanha, linha vermelha – Itália, linha ciano – Japão, linha verde – Coreia do Sul, linha amarela – EUA (Retirado de: [11])	10
Figura 7 – Comparação entres os dados de 2015 e 2019 relativos ao setor da metalurgia e da metalomecânica, estudo realizado para a revista Portugalglobal nº134 (Retirado de: [13])	11
Figura 8 – Ciclo de manufatura sustentável (Retirado de: [15])	13
Figura 9 - Infraestruturas envolvidas na monitorização do estado da máquina-ferramenta (Retirado de: [15])	14
Figura 10 - Plano de manutenção preventiva de uma máquina-ferramenta [Adaptado de: [2]]	15
Figura 11 – Tipos de fresadora quanto à orientação da ferramenta (Retirado de: [21])	18
Figura 12 - Mecanismo de acionamento direto dos eixos (Retirado de: [20])	20
Figura 13 - Estrutura de um motor de ímanes permanentes (Retirado de: [22])	20
Figura 14 - Mecanismo de acionamento da árvore (Retirado de: [20])	21
Figura 15 - Interior de um motor de indução (Retirado de: [23])	22
Figura 16 - Instalação pneumática para alimentação de atuadores pneumáticos (Retirado de: [27]) ...	24
Figura 17 - Componentes de um codificador ótico (Adaptado de: [29])	26
Figura 18 - Codificador incremental: (a) disco típico, (b) correspondência entre a leitura dos sinais (Retirado de: [30])	27
Figura 19 – Diagrama de pulso típico de um codificador incremental, incluindo os seus diferenciais (Retirado de: [31])	27
Figura 20 - Estrutura básica de um codificador absoluto (Adaptado de: [32])	28
Figura 21 – Estados possíveis dos sensores Hall – rotação no sentido horário (Retirado de: [33])	29
Figura 22 - Ciclo de deteção de um sensor do tipo indutivo (Retirado de: [36])	31
Figura 23 - Tipos de guias de deslizamento (Retirado de: [38])	32

Figura 24 - Guia linear de esferas recirculantes (Retirado de: [39])	33
Figura 25 - Guia pressurizada externamente (Retirado de: [2]).....	33
Figura 26 - Fuso de esferas recirculantes com dupla porca (Retirado de: [40]).....	35
Figura 27 - Hardware e software típicos de um sistema CNC (Retirado de: [41])	36
Figura 28 – Principais blocos do PLC (Retirado de: [20])	38
Figura 29 - Acionamento direto vs acionamento indireto (Retirado de: [41])	40
Figura 30 - Sistema de controlo híbrido (Retirado de: [41])	40
Figura 31 - Fresadora <i>SwissPerfo</i> CU 200H	43
Figura 32 – Módulo de controlo da fresadora: (a) armário atual; (b) resultado da atualização do sistema	44
Figura 33 - Sistemas de transmissão e conversão do movimento dos eixos Y, Z e da árvore.....	45
Figura 34 - Localização dos eixos na estrutura da fresadora	46
Figura 35 - Servomotores da fresadora <i>SwissPerfo</i>	48
Figura 36 - Conexões elétricas dos servomotores 1FT50 (Retirado de: [44])	50
Figura 37 - Comportamento do travão quando não é alimentado (Retirado de: [47])	51
Figura 38 - Comportamento do travão quando é alimentado com 24 V CC (Retirado de: [47])	52
Figura 39 - Sensores fim de curso presentes nos eixos de deslocamento.....	53
Figura 40 - Localização dos sensores que desempenham funções secundárias	53
Figura 41 - Sensores presentes na máquina para deteção do movimento do resguardo	54
Figura 42 - Esquema do sistema pneumático da máquina.....	55
Figura 43 - Interruptor de pressão da <i>Telemecanique</i> , modelo XMJ-A0207	57
Figura 44 - Multímetro utilizado nos testes realizados	61
Figura 45 - Fonte de alimentação regulável de 30 V	61
Figura 46 - Variador eletrónico de velocidade da marca OMRON.....	62
Figura 47 - Osciloscópio da marca Philips utilizado	62
Figura 48 – Esquemas de ligações das configurações NPN e PNP [50] [51].....	63
Figura 49 – Ativação do sensor e respetivos valores registados no multímetro e na fonte de alimentação	64
Figura 50 - Processo de ativação do sensor 801 - resguardo aberto.....	64
Figura 51 - Barramento elétrico da fresadora e respetivos fios elétricos de alimentação e que alimenta	65
Figura 52 - Correspondência entre os pinos das unidades do servomotor do eixo Y e os fios da ficha .	66

Figura 53 - Desativação do travão do motor Y com recurso a uma fonte de alimentação de 24 V	67
Figura 54 - Ligações a efetuar entre o servomotor e o variador	68
Figura 55 - Circuito elétrico do teste do tacogerador	72
Figura 56 - Sinais obtidos entre as fases T e R do tacogerador do motor B	72
Figura 57 - Circuito elétrico do teste do sensor Hall.....	73
Figura 58 - Sinais obtidos entre as fases S e R do sensor Hall do motor da árvore	73
Figura 59 - Interior do codificador do motor do eixo X.....	74
Figura 60 - Leitura dos canais do codificador do eixo Y: (a) A+ e A-; (b) B+ e B-; (c) Z+ e Z-.....	76
Figura 61 - Leitura dos sinais do codificador do motor X: (a) canais A+ e B+; (b) canais B+ e A+	76
Figura 62 - Leitura dos canais A+ e Z+ do codificador do motor Y.....	77
Figura 63 - Unidade de tratamento de ar da fresadora.....	79
Figura 64 - Bloco de electroválvulas do sistema pneumático da fresadora.....	80
Figura 65 - Eixo B - (a) mesa, conjunto de retração e veio oco do sistema pneumático; (b) montagem dos componentes anteriores; (c) entradas do sistema pneumático. Retirado de: [45]	80
Figura 66 - Colocação da paleta na mesa B	81
Figura 67 - Secção do barramento elétrico direcionada para o sistema pneumático.....	82
Figura 68 - Configuração final definida	85
Figura 69 - Montagem da árvore: (a) ferramenta criada para bloqueio da rotação do batente; (b) esquema de localização dos pontos para fixação da ferramenta	86
Figura 70 - Sistema de deteção de ferramenta na árvore: (a) relação entre as posições dos sensores e do bloco central; (b) superfícies de deteção dos sensores.....	87
Figura 71 - Interior da estrutura do eixo B, com o motor e codificador devidamente montados.....	88
Figura 72 - Processo de montagem da mesa B na fresadora: (a) grua utilizada para o transporte; (b) mesa suspensa pela grua, com recurso a cintas	88
Figura 73 - Esquema ilustrativo do processo de montagem da mesa B na fresadora.....	89
Figura 74 - Em cima tem-se a peça encontrada já limpa e em baixo, destacado a vermelho, a posição que esta ocupa na fresadora.....	90
Figura 75 - Montagem do conjunto da mesa de troca automática de ferramentas que é atuado pelo sistema pneumático	90
Figura 76 - Resultado da montagem do porta-paletes na mesa de ferramentas.....	91
Figura 77 - Espaçadores desenvolvidos para o conjunto preso ao pistão do cilindro pneumático	91

Figura 78 – Sensor de pressão presente na máquina e respetivo equivalente existente atualmente no mercado.....	106
Figura 79 – Vistas frontal e lateral em corte do interruptor de pressão da <i>Telemecanique</i> (Adaptado de: [61])	106
Figura 80 - Dados técnicos do interruptor de pressão XMJ-A0207 [61]	107
Figura 81 - Curva de operação do interruptor de pressão XMJ-A0207 (Retirado de: [61])	108
Figura 82 – Esquema de ligações dos terminais do interruptor de pressão (Retirado de: [61])	108
Figura 83 - Esquema ilustrativo do funcionamento do retificador (Retirado de: [64]).....	111
Figura 84 – Componentes e esquema de ligações de um variador da marca OMRON (Retirado de: [62])	112
Figura 85 - Diferentes sinais obtidos ao longo da passagem da corrente no variador (Retirado de: [65])	112
Figura 86 – Onda resultante em cada fase à saída do variador (Retirado de: [64]).....	113
Figura 87 - Painel frontal do variador	114
Figura 88 - Opções para seleção da função A044 (Adaptado de: [62])	115
Figura 89 – Representação das ligações a realizar no ponto 1, à esquerda; Localização da ficha e do interruptor de energia essenciais à alimentação do variador de frequência, à direita	117
Figura 90 - Distribuição do painel frontal do modelo PM3350A da Philips	124
Figura 91 - Ponta de prova.....	129
Figura 92 - Configuração das ligações necessárias para o teste do sensor	134
Figura 93 – Valores registados aquando da não deteção de metal e destaque para algumas etapas do procedimento de teste	134
Figura 94 - Árvore e sistema pneumático da fresadora <i>SwissPerfo</i> CU200H	139
Figura 95 - Extração dos componentes presentes na extremidade do sistema.....	140
Figura 96 - Representação do conjunto do pistão cilíndrico e mola, e sequência de montagem	140
Figura 97 - Processo de desmontagem do bloco central, tendo em conta as molas presentes.....	141
Figura 98 - Extração do bloco central do sistema pneumático.....	141
Figura 99 - Desmontagem dos pinos do sistema principal	142
Figura 100 - Configurações possíveis para a disposição dos pinos.....	142
Figura 101 - Zona de encaixe da árvore na fresadora em (a) e no conjunto em (b).....	143
Figura 102 - Fuso da árvore da fresadora <i>SwissPerfo</i>	143
Figura 103 - Fixação do cilindro e batente no fuso.....	144

Figura 104 - Ajuste da posição da tampa que suporta os pinos: (a) posição do parafuso que bloqueia o movimento do batente desta secção; (b) distâncias a e b que são influenciadas pelo ajuste do batente	144
Figura 105 – Secção transversal de uma mola de disco (Adaptado de: [57])	147
Figura 106 - Configurações das molas de disco: (a) em série; (b) em paralelo; (c) em série e paralelo (Retirado de: [70])	147

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação entre os diferentes tipos de servomotores [20]	23
Tabela 2 - Componentes do sistema mecânico da fresadora	47
Tabela 3 - Descrição dos componentes que compõem o sistema elétrico	49
Tabela 4 - Especificações técnicas do codificador ROD 426 (Adaptado de: [48])	52
Tabela 5 - Correspondência entre o número do sinal no quadro elétrico e o respetivo sensor	54
Tabela 6 - Correspondência entre o terminal do barramento e o solenoide da válvula	56
Tabela 7 - Componentes do sistema pneumático	57
Tabela 8 - Parâmetros de programação do inversor para o teste dos servomotores	68
Tabela 9 - Valores utilizados nos testes dos sensores: (a) fonte de alimentação; (b) osciloscópio	71
Tabela 10 - Correspondência entre o pino e o fio elétrico dos codificadores	74
Tabela 11 - Especificações técnicas do modelo de molas série C, da marca SPIROL [57]	84
Tabela 12 - Valor lógico dos sensores 803 e 804 para as três posições da árvore	86
Tabela 13 - Variador eletrónico de velocidade utilizado e principais características (Retirado de: [63])	110
Tabela 14 - Opções possíveis da função b171 [62]	115
Tabela 15 - Grupos de funções do inversor da OMRON [62]	116
Tabela 16 - Parâmetros de inicialização do variador de frequência [62]	117
Tabela 17 - Parâmetros de programação do motor [62]	118
Tabela 18 - Descrição do comando b031 [62]	122
Tabela 19 - Descrição dos comandos do osciloscópio [67]	125
Tabela 20 - Codificador do eixo Z e respetivas especificações técnicas	137
Tabela 21 - Propostas de compra de um novo codificador para o eixo Z	137

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

Sigla/Acrónimo	Significado
CA	Corrente Alternada
CAD	Desenho Assistido por Computador
CAM	Manufatura Auxiliada por Computador
CC	Corrente Contínua
CN	Comando Numérico
CNC	Comando Numérico Computadorizado
CPS	Sistema Ciber-Físico
CPU	Unidade de Processamento Central
MMI	Interface Homem-Máquina
NCK	Controlo Numérico <i>Kernel</i>
PLC	Controlo Lógico Programável
PNP	Positivo-Negativo-Positivo
PPR	Pulsos Por Revolução
PTC	Coeficiente Positivo de Temperatura
TTL	Lógica Transístor-Transístor

1. INTRODUÇÃO

Uma máquina-ferramenta destina-se ao fabrico de componentes através do movimento mecânico dos seus conjuntos. Trata-se de um sistema complexo que, para além do propósito de maquinagem ou conformação que serve, também inclui diversos tipos de funcionalidades, como o comando, aquisição e tratamento de dados, carga e descarga automáticas de peças e ferramentas, capacidade de diagnóstico e reparação de avarias, entres outras. Caracterizam-se por serem capazes de produzir componentes sem ser necessário recorrer a outro processo, sendo por isso consideradas a base de todas as indústrias.

A necessidade de automatização e flexibilidade dos processos de fabrico conduziu a uma grande evolução neste universo de máquinas, com a transformação de uma máquina de acionamento e medição manual num equipamento automático e capaz de monitorizar o processo, graças ao controlo por comando numérico. Esta mudança contribuiu para o aumento da qualidade do produto final, permitindo obter peças com tolerâncias reduzidas e melhores acabamentos, e para a diminuição do preço de fabrico e até da própria máquina. No entanto, as máquinas-ferramenta operadas por controlo numérico computadorizado (CNC), com o passar do tempo, tendem a tornar-se rapidamente obsoletas devido aos avanços constantes da tecnologia, principalmente dos componentes eletrónicos e informáticos. Será de salientar que, em algumas situações, muitos deles acabam mesmo por ser descontinuados, levando a que no caso de uma possível avaria, a garantia de funcionamento não seja possível. Estes fatores fazem com que os equipamentos se tornem lentos e não cumpram as suas funções básicas, quando comparados com os modelos mais recentes de máquinas-ferramenta.

Um exemplo disso é a fresadora CNC de 4 eixos produzida pela *SwissPerfo*, presente nas Oficinas de Formação e Apoio, do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Minho. Esta máquina apresenta boas condições estruturais e mecânicas, em parte graças às intervenções de manutenção que tem sofrido nos últimos anos. No entanto, encontra-se fora de utilização, uma vez que não reúne as condições necessárias ao seu funcionamento. Esta paragem em muito se deve à fragilidade dos seus sistemas elétricos e de controlo, que possuem componentes que estão obsoletos/avariados e carecem de uma atualização.

Num contexto industrial, uma possibilidade poderia passar por adquirir um novo equipamento tendo em conta o nível de desatualização da fresadora. Além disso, muitas empresas não têm capacidade para dedicar uma equipa ao estudo e requalificação de cada máquina que chega ao fim da sua vida útil.

Em termos pedagógicos, já se justifica tirar partido do facto de a máquina necessitar de procedimentos de manutenção e substituição de componentes, para o desenvolvimento de conhecimentos e de autonomia no seu manuseamento, ao mesmo tempo que se aproxima o modelo daquilo que existe no mercado. Mesmo que o seu funcionamento não se venha a concretizar, todo o trabalho desenvolvido será útil e vantajoso para a formação de um engenheiro/técnico que tenha de lidar com máquinas desta natureza.

Assim, a requalificação nasce como uma alternativa à aquisição de novas máquinas CNC, uma vez que estas implicam um grande investimento. Os componentes mecânicos conseguem ser facilmente substituídos e o mercado apresenta várias soluções possíveis, tendo em conta as características padrão de cada um deles. Quanto aos dispositivos elétricos e de controlo destas máquinas, a tarefa é mais difícil, não por falta de possibilidades, mas porque a oferta é um pouco restrita. Isto é, a implementação de um componente tem de levar em conta questões de compatibilidade com aquilo que já existe na máquina e pode implicar a aquisição de dispositivos extras que contribuam para que ele cumpra a sua função. Antes de se realizar todo este processo de atualização é necessário seguir procedimentos rigorosos de manutenção, de modo a conhecer-se o estado real da máquina e concluir acerca do nível de requalificação necessário.

1.1 Motivação

Estas máquinas revelam-se uma variável importante do ponto de vista político, económico, técnico e pedagógico. Segundo Pruvot [1], dentro das indústrias de base mecânica, este tipo de máquinas só pode ser comparado com a indústria aeroespacial e a do armamento, tratando-se de domínios com grande importância política. Reconhecida como o pilar de um sistema produtivo, a sua prevalência num país é um indicador do seu nível de riqueza, o que leva a que exista uma grande competição entre as principais potências produtoras. Estas procuram estar sempre ocorrentes das novas tecnologias, quer seja para aumentarem a qualidade dos seus produtos, como para se tornarem independentes de terceiros no que diz respeito à produção dos principais elementos dos seus sistemas. Desta forma, os países são capazes de aumentar as suas exportações e lucros, tornando-se referências mundiais neste setor.

Por outro lado, apesar de à priori não parecerem muito atrativas, o estudo e desenvolvimento de uma máquina-ferramenta, bem como as intervenções necessárias para o seu funcionamento, desempenham um papel importante para a formação técnica e científica de um engenheiro. Tal se deve ao contacto Homem-máquina que proporcionam e ao envolvimento do conhecimento de várias áreas,

como a mecânica, a eletrónica, a pneumática, o controlo e os sistemas de informação, produção e gestão. Além de contribuírem para o enriquecimento dos conhecimentos em cada uma destas vertentes, têm um papel importante na preparação e formação dos interessados que pretendem enveredar no ambiente competitivo que é a indústria.

A fresadora em estudo tem sido alvo de trabalhos que visam a sua requalificação desde 2013, primeiro ano de que se tem conhecimento, fruto de dissertações desenvolvidas nas Oficinas de Formação e Apoio. Tal vem reforçar o facto de um projeto de requalificação ser um processo lento e rigoroso, que se agrava com a falta de documentação, de procedimentos, de um manual em si. A capacidade de criação e organização de documentação é uma ferramenta importante e essencial para os futuros utilizadores da máquina. Além disso, contribuir-se-á para o enriquecimento do laboratório de máquinas onde esta está inserida, ao criar métodos de trabalho aplicáveis em mais do que um equipamento.

1.2 Objetivos

O propósito desta dissertação centra-se no estudo de requalificação de uma máquina CNC, incluindo não só a parte estrutural e mecânica, mas também a sua componente elétrica e de controlo. O passo inicial passa pelo estudo dos trabalhos de dissertação já realizados no equipamento, de modo a perceber em que ponto se encontra o processo de requalificação da máquina, assim como a compreender o seu funcionamento. Criada uma base teórica, proceder-se-á a:

- avaliação da integridade de todos os sistemas e subsistemas da máquina;
- testagem dos componentes elétricos e pneumáticos;
- análise de mercado e, se possível, aquisição e substituição dos componentes mecânicos/elétricos/pneumáticos em mau estado de funcionamento;
- manutenção, montagem e afinação de componentes;
- criação de procedimentos de montagem/teste dos diferentes sistemas da máquina;

Em suma, procura agregar-se toda a informação disponível e criada, tendo por finalidade contribuir para o total funcionamento da fresadora *SwissPerfo*. Está prevista a produção de documentação que sirva um manual de montagem e de utilização do equipamento. Desta forma é possível criar uma plataforma de apoio a novos trabalhos que necessitam da utilização de um equipamento de CNC, e à requalificação de máquinas CNC em geral.

2. ESTADO DA ARTE

Neste capítulo procurar-se-á apresentar o universo das máquinas-ferramenta, desde a sua evolução histórica ao seu poder no mercado, passando pela importância que uma manutenção regular e cuidada representa para a viabilidade quer da máquina, quer da fábrica onde está inserida. Além disso, proceder-se-á a uma análise mais concreta em termos de composição, procurando-se elucidar os principais sistemas de um equipamento CNC, entre os quais se encontrará os correspondentes ao da fresadora em estudo. Desta forma, será possível estabelecer a ponte para os capítulos seguintes, tornando mais fácil o entendimento dos conceitos e métodos adotados.

2.1 Máquinas-ferramenta

A indústria da manufatura caracteriza-se por ser uma atividade direcionada para a alteração da forma de matérias-primas, de modo a obter-se uma peça com o tamanho, forma e qualidade de superfície pretendidas. Nos dias de hoje, esta função é maioritariamente realizada por máquinas, auxiliando o Homem no processo produtivo, ou até mesmo substituindo-o.

As tecnologias de manufatura dividem-se entre tecnologias de fabrico com remoção de material indesejado, ou seja, processos de maquinagem, e processos de fabrico sem remoção de material, como é o caso da conformação, fundição e soldadura [2].

A maquinagem pode ser classificada em dois grandes tipos: maquinagem convencional e maquinagem não convencional. A primeira utiliza uma fonte de energia mecânica, ao passo que o segundo tipo recorre a uma fonte de energia não tradicional (química, elétrica ou térmica) para maquinar peças de formas complexas, em materiais mais duros e difíceis de cortar [2]. Relativamente ao método convencional, os seus processos e máquinas dividem-se em dois tipos, tal como se pode observar na Figura 1.

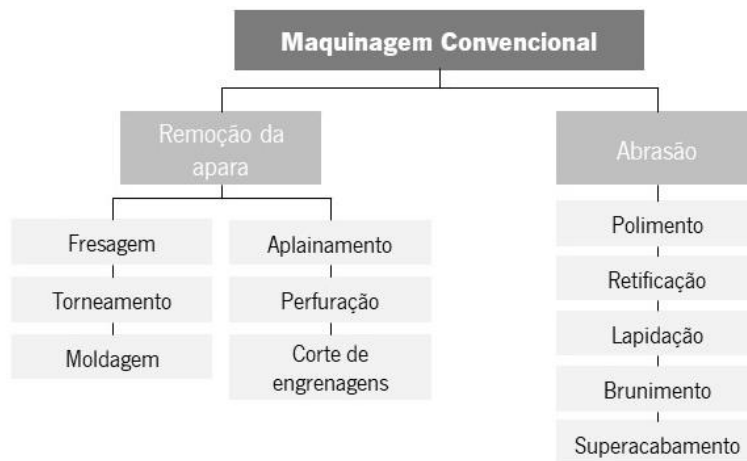


Figura 1 - Tipos de maquinagem convencional (Adaptado de: [2])

As máquinas-ferramenta compõem cerca de 70% do total de máquinas de produção existentes na indústria. Têm como principais funções segurar a peça a ser maquinada, suportar a ferramenta e desenvolver os movimentos necessários para se produzir a geometria da peça final. Dada a sua importância e peso económico, estas devem ser desenvolvidas com o intuito de obter o máximo de estabilidade possível, respondendo a alguns requisitos como [2]:

- Elevada rigidez estática dos elementos da máquina, como por exemplo, da sua estrutura, juntas e árvore;
- Evitar frequências naturais que provoquem vibrações indesejadas da máquina;
- Boa capacidade de amortecimento;
- Altas velocidades e avanços;
- Baixa taxa de desgaste das peças deslizantes;
- Baixo custo de projeto, desenvolvimento, manutenção, reparação e fabrico.

2.1.1 Evolução histórica

As primeiras marcas da criação das máquinas-ferramenta remontam ao período paleolítico (6 000 A.C.), com o desenvolvimento de plainas primitivas ou furadeiras com ferramentas rotativas acionadas a arco, sendo a estrutura em madeira e a ferramenta pedra lascada. Este tipo de acionamento manteve-se como o principal tipo até meados do século XVI. O aspeto de um dos primeiros tornos de madeira é apresentado na Figura 2.

Durante a Idade Média o trabalho era maioritariamente realizado à mão e cada produto era produzido pelo mesmo artesão do início ao fim. Desta forma, a produção em massa era um obstáculo,

uma vez que a velocidade produtiva dependia do Homem, além do facto de este ser muitas vezes o “motor” das ferramentas industriais que existiam naquela altura. O avançar da civilização e a expansão do comércio a nível global, combinados com a necessidade de aumentar os níveis de produtividade, com baixo custo, tempo de produção e boa qualidade, contribuiu para uma procura incessante pela inovação tecnológica a partir do século XVI [3].

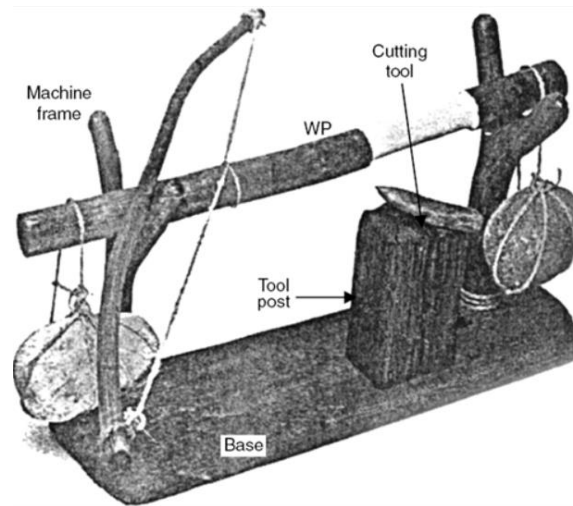


Figura 2 - Primeiro torno de madeira (Retirado de: [2])

A partir do século XVIII entra-se no período de revoluções industriais, que se caracterizaram pela transformação da indústria num meio cada vez mais automatizado e, ao mesmo tempo, sustentável. Na Figura 3 apresenta-se um esquema ilustrativo desta evolução.

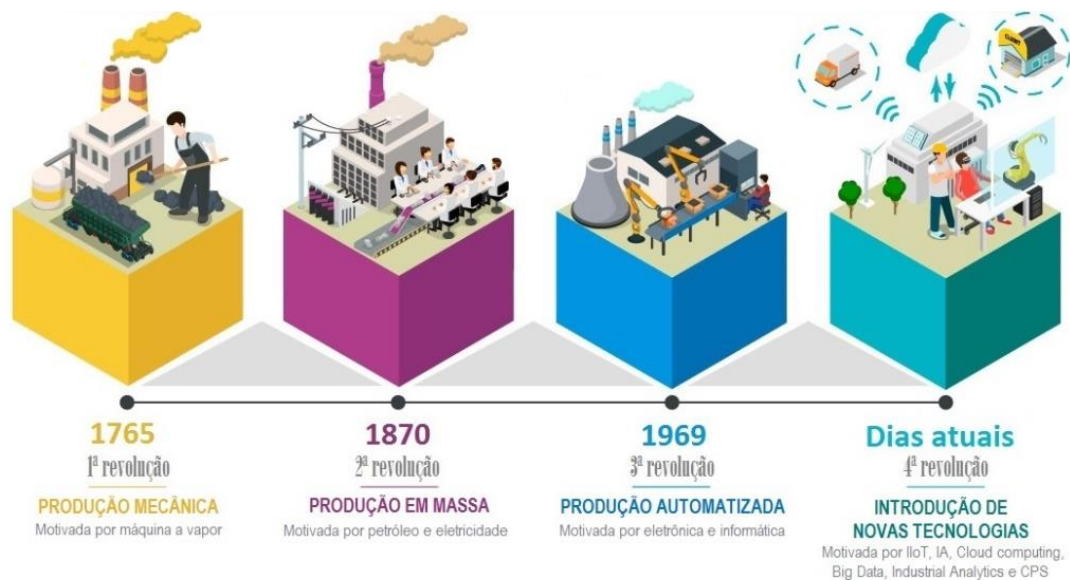


Figura 3 - Evolução da indústria ao longo das 4 revoluções industriais (Adaptado de: [4])

Começando pela primeira revolução, que prevaleceu desde o final do século XVIII até ao início do século XX, assinalou-se a criação da máquina a vapor e deu-se a transição entre sistemas de produção artesanal para processos mecanizados, alimentados a água e vapor [5].

No final do século XIX, entrou-se na era do petróleo e da eletricidade como novas formas de energia, o que conduziu à segunda revolução industrial. Verificou-se, também, o desenvolvimento de sistemas de movimento e controlo mais avançados, o que permitiu o surgimento da primeira máquina-ferramenta numericamente controlada (CN). Estes fatores contribuíram para a produção em massa, uma vez que o controlo do movimento da máquina deixou de ser realizado pelo Homem [5].

A terceira revolução industrial ocorreu a partir da década 70 e foi pautada pelo surgimento das primeiras máquinas CNC, graças ao desenvolvimento da microeletrónica, como microprocessadores, sistemas PLC e semicondutores, e dos computadores. Estas permitem uma fácil edição, teste e simulação de programas sem ser necessário reescrever o programa todo em caso de erro ou necessidade de alterações. A introdução do CAD/CAM na indústria veio reforçar o estabelecimento destas máquinas. O desenvolvimento da robótica também permitiu que tarefas repetitivas e pesadas para o ser humano passassem a ser automatizadas [5].

Em 2011 introduz-se o conceito de Indústria 4.0, onde o principal foco é o fortalecimento da comunicação entre o mundo físico e o mundo digital, com recolha e análise de dados em tempo real para a tomada de decisões por parte da máquina. A combinação entre as diferentes tecnologias utilizadas e criadas visam a criação das chamadas “fábricas inteligentes”. Esta evolução torna-se possível graças aos pilares em que assenta, como por exemplo [6]:

- Sistemas ciber-físicos (CPS), que consistem na associação entre a computação, a rede e os processos físicos;
- Internet das Coisas (IoT), ou seja, máquinas e dispositivos físicos ligados ao mundo digital para troca de dados;
- *Big Data Analytics*, que permite a recolha, armazenamento, catalogação e análise de um grande volume de dados;
- Inteligência Artificial (AI), que dá à máquina uma capacidade autónoma de execução de tarefas e tomada de decisões, à semelhança do ser humano;
- Manufatura aditiva, ou seja, a Impressão 3D;
- Computação em nuvem, que permite o armazenamento de dados e o acesso a estes via web;

- Cibersegurança, que garante a proteção dos dados de produção, permitindo o destaque das empresas devido ao sigilo existente.

Na edição de 2019 da *EMO Hannover*, feira mundial na área da indústria metalomecânica, organizada pela CECIMO (Associação Europeia das Indústrias de Máquinas-ferramenta), realizou-se mais uma exposição mundial das novas tecnologias para os processos de produção. Um dos pontos chave foi a apresentação e demonstração do interface normalizado UMATI – *Universal Machine Tool Interface*, que permite a conexão de máquinas-ferramenta a sistemas de inteligência artificial de nível superior, utilizando como protocolo de comunicação o OPC UA¹, tal como se pode observar na Figura 4. Desta forma, a digitalização dos dados é facilitada e é assegurada a comunicação segura entre as máquinas e com a nuvem. Este avanço na Indústria 4.0 não deixa de fora as pequenas e médias empresas, estando também acessível a elas este tipo de produção moderna [7].

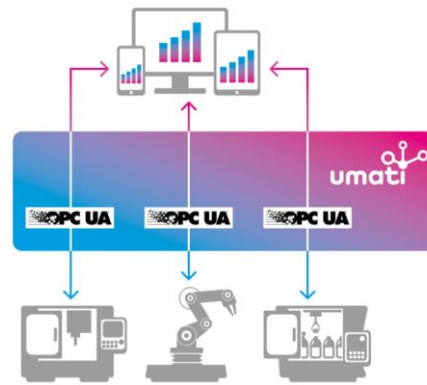


Figura 4 – Esquema de ligações entre as máquinas e os sistemas inteligentes, através da interface UMATI (Retirado de: [8])

Para além disso, foram apresentados os desenvolvimentos realizados ao nível das máquinas-ferramenta, assim como soluções de digitalização e automatização para uma produção moderna, com propostas de softwares inovadores para a comunicação entre as máquinas. Expôs-se, também, inovações nas técnicas de fixação e nas ferramentas de precisão. Apresentaram-se novas funções do sistema CAD/CAM, neste caso para o design dos componentes e para melhorar os processos de simulação da produção e da programação do sistema de controlo. Com base nos temas da atualidade, houve ainda espaço para enfatizar a importância que a mobilidade elétrica e o fabrico aditivo têm para o aumento da eficiência e da precisão dos processos de fabrico. Em [9] fica-se a conhecer as novidades apresentadas em cada um destes tópicos pelas diferentes empresas.

¹ OPC UA – Plataforma de Comunicação Aberta com Arquitetura Unificada: protocolo de comunicação máquina a máquina para automação industrial, que funciona em qualquer sistema operacional.

2.1.2 Análise de mercado

Segundo os relatórios da *Gardner Intelligence*, os anos 2017 e 2018 ficaram marcados por um aumento do consumo de 12 dos 15 principais consumidores de máquinas-ferramenta. No entanto, dada a natureza cíclica desta indústria, em 2019 registou-se uma quebra mundial, provocando uma recessão mundial. Em termos de valores, atingiu-se o nível mais baixo de consumo deste 2010, com uma queda de 13.8% (11.6 mil milhões de euros aproximadamente). Segundo esta mesma fonte, assim como o consumo caiu para o seu nível mais baixo, na produção global de máquinas-ferramenta observou-se o mesmo cenário, com uma queda de 13.3%. Um dos grandes que contribuiu para esta quebra foi a China, que pela primeira vez desde 2008 viu a sua representação no mercado global ficar abaixo dos 30%, mais concretamente 27.2% [10].

O ano de 2020 não foi diferente, verificando-se uma quebra de 20.1% em relação a 2019 (menos 14.9 mil milhões de euros aproximadamente). Inserido numa época de recessão, este ano também foi marcado pela Covid-19 e pelos bloqueios económicos que afetou grande parte dos países. Tais fatores contribuíram para que o mercado das máquinas-ferramenta se afundasse ainda mais. Verificou-se uma nova redução na produção e consumo, com o primeiro a ser relativamente superior ao segundo [11]. Dos resultados obtidos no relatório destaca-se, apesar de ainda pequena, uma deslocação da produção da Ásia para a Europa, uma vez que alguns dos países deste último continente viram a sua quota no mercado global aumentar [10].

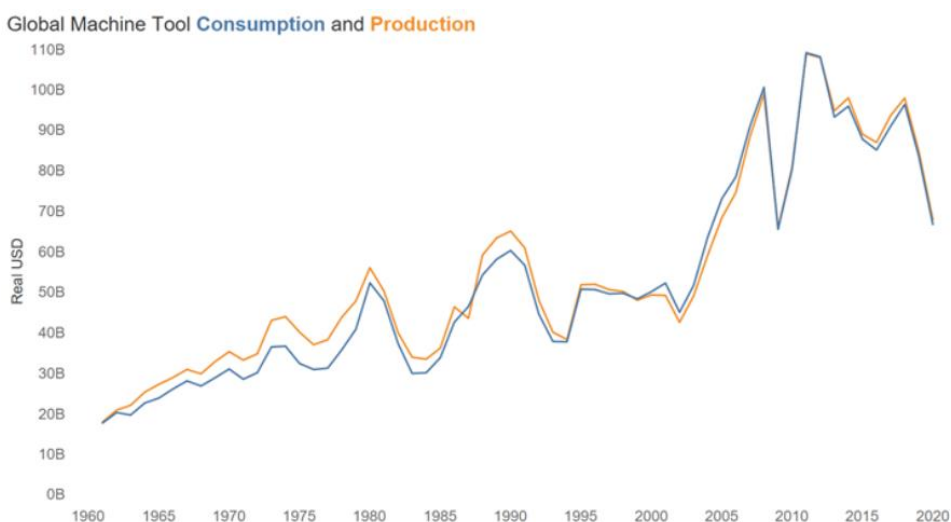


Figura 5 - Análise do consumo e produção de máquinas-ferramenta até 2020 (Retirado de: [11])

Segundo os dados de 2020, os cinco maiores consumidores mantêm o seu lugar, sendo eles a China, os Estados Unidos da América (EUA), a Alemanha, o Japão e a Itália, respetivamente. Houve quatro países que aumentaram o seu consumo em 2020, foi o caso de Marrocos (33%), Indonésia (26%), Finlândia (19%) e Turquia (18%). Já os maiores produtores de máquinas-ferramenta são a China, a Alemanha, o Japão, os EUA, a Itália e a Coreia do Sul. Os EUA subiram um lugar no pódio, ocupando a terceira posição que até 2019 pertencia à Itália. Os países que verificaram um aumento na sua produção foram a Eslovénia (28%), Filipinas (23%), Finlândia (16%) e Bulgária (7%), no entanto, representam apenas uma pequena parte da produção mundial deste tipo de máquinas [11].

A China destaca-se em grande escala quer na produção, quer no consumo, apesar de estar a passar por uma recessão nos últimos anos, como se pode observar na Figura 6. Isto deve-se, em grande parte, à aposta na diversificação de mercados, exportando quantidades menores para mais países. Assim, vai criando relações que a ajudarão a tornar-se cada vez mais numa superpotência global, como aconteceu com os EUA nas décadas de 60 e 70 [11].

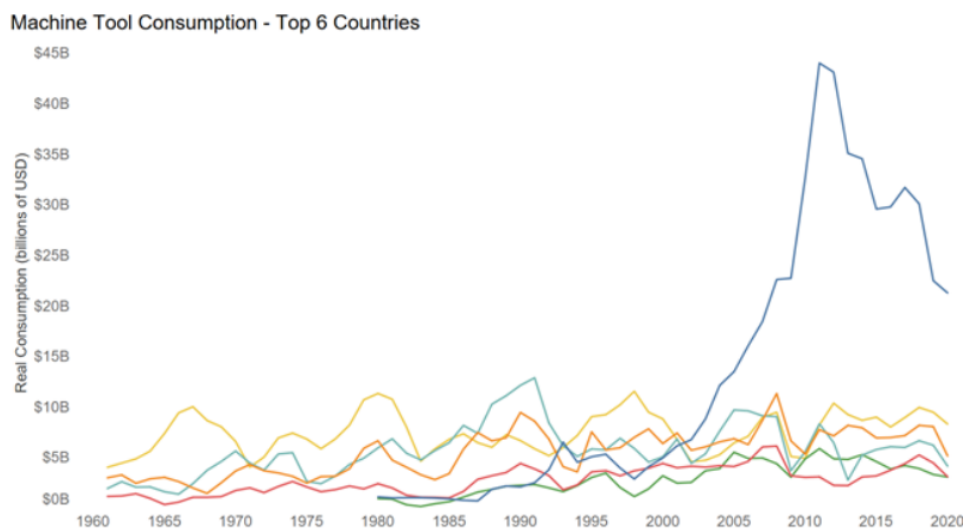


Figura 6 - Consumo de máquinas-ferramenta dos principais países desta categoria: linha azul – China, linha laranja – Alemanha, linha vermelha – Itália, linha ciano – Japão, linha verde – Coreia do Sul, linha amarela – EUA (Retirado de: [11])

Relativamente a Portugal, o setor da metalurgia e da metalomecânica está entre os principais setores da atividade económica portuguesa, uma vez que cria emprego, gera investimento e é responsável por grande parte das exportações. Este setor divide-se pela metalúrgica de base, os produtos metálicos, as máquinas e equipamentos, os veículos automóveis e a fabricação de outro equipamento de transporte. Quanto à posição das máquinas e equipamentos no mercado global, esta tem-se vindo a fortificar cada vez mais, sendo possível encontrar máquinas-ferramenta portuguesas em mais de 200 países. No ano de 2019, as máquinas representaram 13.3 % dos produtos exportados, com um

crescimento de 8 % das vendas para a União Europeia em 2019, e de 12 % em 2020 [12]. Os principais destinos de exportação foram a França, Espanha, Itália e Alemanha [13]. Na Figura 7 pode-se observar o crescimento do setor da metalurgia e da metalomecânica entre os anos de 2015 e 2019.

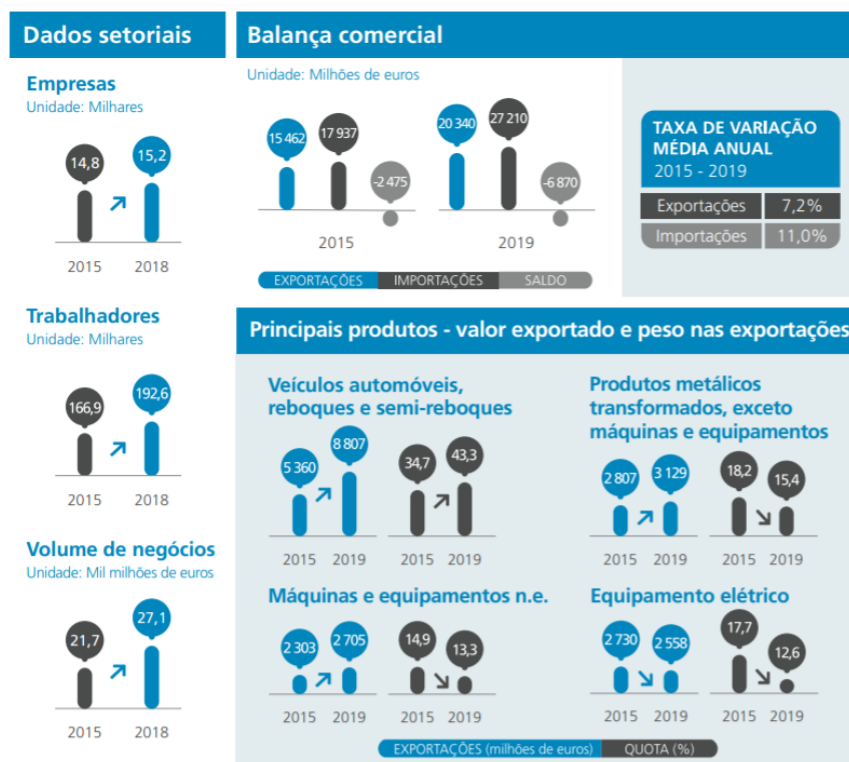


Figura 7 – Comparação entre os dados de 2015 e 2019 relativos ao setor da metalurgia e da metalomecânica, estudo realizado para a revista Portugalglobal n.º 134 (Retirado de: [13])

Algumas das principais empresas portuguesas fabricantes de máquinas-ferramenta para a indústria da metalomecânica são:

- ADIRA – produção de quinadoras hidráulicas, elétricas e híbridas, guilhotinas, células robotizadas;
- CEI by Zipor – fabrico de máquinas de corte por jato de água;
- MAQFORT – produção de uma grande variedade de máquinas-ferramenta;
- SERI – conceção e fabrico de máquinas e equipamentos industriais que trabalham por arranque de apara;
- AMOB – fabrico de máquinas de curvar tubos e perfis;
- AMADA – produção de máquinas a laser, quinadoras, retificadoras, entre outras.

Para continuar o seu crescimento, as empresas têm vindo a apostar em fatores que as diferencie no mercado, através de investimentos na inovação dos processos e produtos, em unidades de investigação e desenvolvimento (I&D), na propriedade industrial, certificações, design e na responsabilidade ambiental [13]. Só assim serão capazes de continuar a responder às exigências de qualidade, precisão, engenharia e agilidade provenientes da sua internacionalização.

Como as máquinas-ferramenta CNC contribuem para a simplificação dos processos de fabrico, com a redução do tempo de produção e dos erros humanos inerentes, e como há uma procura cada vez maior pela automatização no sector industrial, espera-se que estas venham a liderar o mercado a nível mundial. Trata-se de uma indústria que está a ficar cada vez mais competitiva, havendo uma maior preocupação em desenvolver técnicas de fabrico eficientes e sustentáveis [14].

2.1.3 Manufatura Sustentável

Numa fase inicial de produção de máquinas-ferramenta, estas eram caracterizadas por terem apenas um ciclo de vida, desde a conceção até à falha/avaria, findo o qual era necessário trocá-la. Tendo em conta esta desvantagem, procurou-se desenvolver um modo sustentável de fabrico, que contribuisse para uma maior vida útil duradoura e modernização dos equipamentos. Técnicas que contribuem para esta transição passam pelo recurso ao ciclo pós-vida, à técnica de design modular e à fabricação em nuvem [15].

i. Ciclo pós-vida

A manufatura sustentável assenta nos princípios de redução dos impactos ambientais, conservação de energia e dos recursos naturais. Assim, uma máquina ao chegar ao final do tempo estimado de utilização, em que certos componentes se tornam obsoletos, entra no ciclo pós-vida, passando pelo conjunto de etapas da Figura 8. Esta fase tem como objetivo tirar o máximo aproveitamento da composição do equipamento, prolongado a vida útil da máquina através da política dos 6R [15]:

- Recuperar – restabelecimento do nível de desempenho normal da máquina através da reparação/reabilitação de componentes avariados;
- Reciclar – conversão dos componentes residuais, resultantes dos processos de recuperação e remanufactura, em matérias-primas que poderão ser utilizadas para fabricar novos produtos;

- Redesenhar – utilização dos materiais reciclados para desenhar produtos com configurações/funcionalidades melhoradas em relação ao original;
- Reduzir – redução da necessidade de novas matérias-primas, do consumo de energia, das emissões atmosféricas e outros tipos de poluição;
- Remanufactura – restauração do produto para condições semelhantes, ou novas, de modo a ser possível a sua reutilização no novo ciclo de vida;
- Reutilizar – reutilização do produto resultante do ciclo dos 6R.

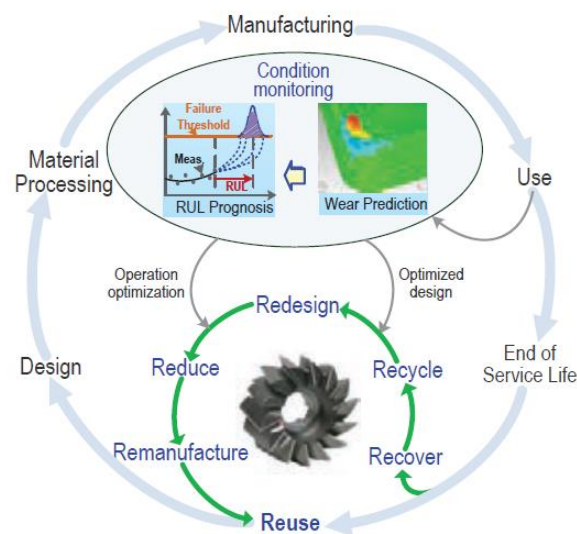


Figura 8 – Ciclo de manufatura sustentável (Retirado de: [15])

ii. Design modular

Para obter máquinas que possibilitem seguir a ideologia de sustentabilidade, deve-se utilizar a técnica de design modular durante a fase da conceção do produto. Esta consiste na construção de um sistema complexo maior a partir da ligação, por interfaces simples, de vários módulos desenvolvidos separadamente. Durante a fase de conceção, é importante definir que componentes da máquina-ferramenta podem ser concebidos como um todo e quais aqueles que devem ser montados segundo técnicas que possibilitem a sua fácil desmontagem e recuperação [16].

A aplicação deste conceito simplifica o processo de manutenção, substituição e atualização do sistema, uma vez que facilita a intervenção num dos módulos sem que seja necessário modificar os restantes. Desta forma, desenvolvem-se produtos flexíveis e de fácil personalização, com aumento da vida útil e redução de custos a longo prazo [15].

iii. Fabricação em nuvem

A sustentabilidade do fabrico e a competitividade na indústria são influenciadas pela garantia de fiabilidade das máquinas durante o seu ciclo de vida. Posto isto, é necessário proceder a uma monitorização eficaz do estado das máquinas-ferramenta ao nível do consumo de energia e da qualidade final das peças, assim como proceder ao diagnóstico antecipado de falhas e à estimativa da vida útil restante. Só adotando este tipo de metodologias é que se torna possível ter um conhecimento real da condição da máquina e da sua eficiência.

O fabrico em nuvem vem agilizar todo o processo de produção e utilização dos recursos existentes, através do armazenamento dos dados de monitorização do processo e da condição da máquina, para posterior processamento inteligente, tal como se pode observar na Figura 9. Os diagnósticos e prognósticos obtidos são avaliados por pessoal especializado, que transmitem a informação para os clientes, de forma a auxiliar na criação de planos de manutenção e gestão do inventário da máquina [15]. Este conhecimento avançado facilitará a implementação de um dos processos 6R no final do ciclo de vida da máquina-ferramenta, uma vez que são conhecidos os estados dos seus módulos e componentes.

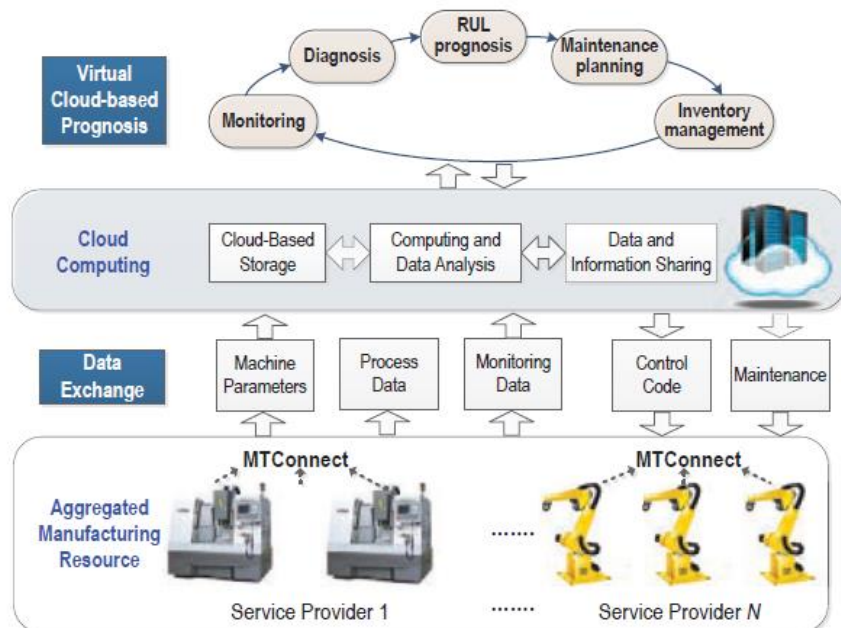


Figura 9 - Infraestruturas envolvidas na monitorização do estado da máquina-ferramenta (Retirado de: [15])

2.1.4 Importância da manutenção

Para o funcionamento ideal das máquinas-ferramenta é necessário que estas sejam alvo de um plano de manutenção que retarde o máximo possível a sua deterioração e que reduza o tempo e frequência de paragem na produção. Para além do facto do mau estado de conservação da máquina colocar em causa a precisão das peças produzidas, também contribui para uma menor produtividade e um maior custo de produção. A manutenção consiste, então, na garantia de disponibilidade dos equipamentos de produção através da deteção de falhas e a sua remoção antes ou após a avaria. Desta forma contribuiu-se para um aumento da fiabilidade funcional, da vida útil e da capacidade de produção. Por outro lado, permite criar documentação, por vezes inexistente, e que possa servir de complemento ao controlo do funcionamento do equipamento.

Existem diferentes tipos de manutenção, conforme se trate de uma intervenção planeada ou não planeada, podendo-se consultar [17] e [18] para uma descrição mais pormenorizada. Resumidamente, a manutenção divide-se em [2]:

- **Manutenção preventiva** – os seus principais objetivos centram-se em reduzir o desgaste da máquina, reduzindo a probabilidade de avaria, e evitar as paragens da produção. O planeamento desta manutenção consiste em pequenas e médias reparações em intervalos de tempo predeterminados. Esta é caracterizada pela frequência de inspeção, identificação de todos os componentes que necessitam de manutenção, criação de registos que sustentem o trabalho e qualificação do operador responsável. Um exemplo do plano de manutenção preventiva de uma máquina-ferramenta é apresentado na Figura 10;

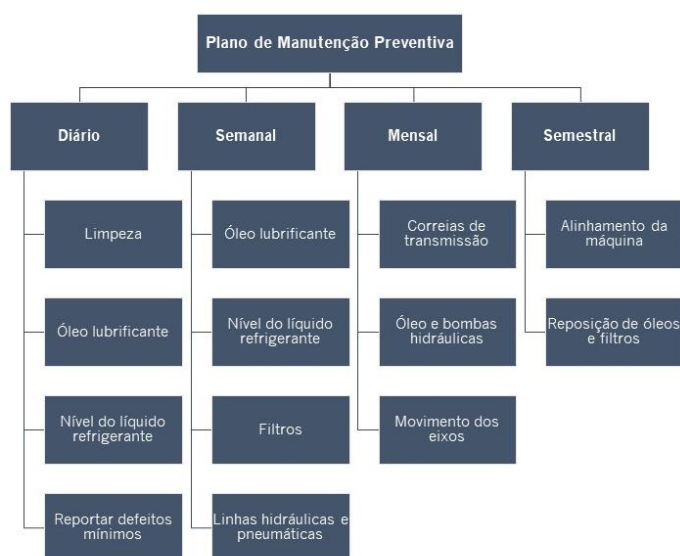


Figura 10 - Plano de manutenção preventiva de uma máquina-ferramenta [Adaptado de: [2]]

- **Manutenção corretiva** – este tipo de manutenção caracteriza-se por uma intervenção imediata em caso de avaria, com reparação/substituição do componente avariado. O histórico destas reparações permite conhecer quais os elementos da máquina que precisam de uma inspeção frequente;
- **Manutenção preditiva** – esta intervenção assenta na avaliação constante das condições do equipamento e recolha de dados, de modo a prever possíveis falhas. Se houver risco de ocorrer uma avaria, procura-se identificar a causa do problema, intervindo na máquina por forma a eliminá-la e sem colocar em causa a funcionalidade do restante equipamento.

Para definir corretamente um plano de manutenção é necessário existirem manuais e registos técnicos que suportem as decisões a tomar. O registo técnico permite estudar as falhas ocorridas e, através destes dados, definir o período ótimo para as ações de manutenção futuras. Este tipo de informação deve permanecer atualizada e completa, contendo dados como data de intervenção, sintomas e causa de falha, tipo de intervenção, mão de obra necessária, materiais utilizados e custos de manutenção associados [17]. Outro material de apoio essencial para as equipas responsáveis pela manutenção são os manuais e documentos técnicos dos equipamentos, tais como [19]:

- Manuais elétricos, pneumáticos, hidráulicos, automação, entre outros;
- Manuais de manutenção, de produção;
- Desenhos técnicos e informações sobre a montagem e ligação dos componentes;
- Especificações técnicas dos equipamentos;
- Documentos de compra, como a garantia, empresa fornecedora;
- Literatura técnica geral;
- Regulamentos, normas, legislação.

2.2 Composição de uma máquina-ferramenta CNC

Uma máquina-ferramenta é considerada a máquina mãe, no sentido em que é a partir dela que se fazem outras máquinas. Tendo em conta a importância que esta representa nos processos de produção da indústria, existiu a necessidade de evoluir os seus sistemas para se contribuir para uma maior precisão e velocidade destes processos. Assim, as máquinas manuais convencionais são cada vez mais raras, dando lugar às máquinas-ferramenta de comando numérico. Tendo em conta que a fresadora em estudo faz parte desta família, interessa apresentar a constituição comum deste tipo de equipamentos, uma vez que, independentemente do tipo e função que executam, possuem uma composição geral semelhante. Aquilo que irá variar será os componentes que contribuem para a máquina executar as suas funções principais.

De modo geral, a construção da máquina, bem como dos seus componentes, deve possuir elevada rigidez para garantir a exatidão da maquinagem, e ser resistente a vibrações e variações de temperatura. Estes fatores são melhorados com a implementação de mecanismos de monitorização e controlo, como codificadores e sensores [20]. A complexidade do conjunto de uma máquina-ferramenta envolve os seguintes sistemas [2]:

- Estrutura;
- Carros e guias de deslizamento;
- Sistema de transmissão de movimento;
- Unidade de potência – sistema de acionamento;
- Sistema de monitorização;
- Sistema de controlo;
- Dispositivos de fixação de ferramentas e da peça.

2.2.1 Tipos de fresadora

As fresadoras são utilizadas para maquinar superfícies planas e produzir contornos e superfícies curvas, assim como podem ser usadas para operações de furação, mandrilagem e roscagem [2].

O processo de fresagem consiste na remoção do metal através de uma fresa rotativa de aresta múltipla, obtendo-se uma taxa de remoção de material e uma qualidade superfície elevadas, aliadas a uma boa precisão.

A orientação que a fresa possui em relação à mesa de trabalho será a base para a classificação primária das fresadoras, existindo três configurações básicas: vertical, horizontal e universal. Para além destas, existem configurações alternativas que dependem do método de controlo, tamanho, número de eixos, finalidade e fonte de energia.



Figura 11 – Tipos de fresadora quanto à orientação da ferramenta (Retirado de: [21])

Tal como se pode observar na Figura 11, numa fresadora vertical, o eixo do fuso é perpendicular ao eixo da mesa. A árvore pode mover-se verticalmente, o que torna a máquina apropriada para operações de grande desbaste, permitindo elevadas profundidades de corte com o mínimo de vibrações.

Por sua vez, uma fresadora horizontal caracteriza-se por a ferramenta ser montada numa árvore horizontal, sendo o eixo do fuso paralelo ao eixo da mesa de trabalho. Este tipo de fresadora pode possuir uma mesa rotativa incorporada, o que irá permitir fresar em vários ângulos.

Uma fresadora que combine os dois tipos anteriores, tornando possível o uso da ferramenta na horizontal ou na vertical, ou sobre um eixo oblíquo, é conhecida como fresadora universal.

2.2.2 Estrutura

A estrutura da máquina consiste no barramento onde serão montados todos os elementos que compõem a máquina e que permitem suportar e mover tanto a peça de trabalho, como a ferramenta de corte. Para além da fixação dos componentes, tem como principais funções [2]:

- evitar a deformação do seus componentes, causada por forças estáticas e dinâmicas;
- garantir a estabilidade, alinhamento e precisão das partes móveis;
- assegurar o amortecimento de vibrações.

As máquinas controladas numericamente acabam por estar sujeitas durante um período maior de tempo às forças dinâmicas que conduzem à remoção de material da peça, quando comparadas com as máquinas controladas manualmente. Assim, é importante assegurar que as estruturas tenham elevada rigidez, baixo peso e que apenas permita vibrações estruturais de baixa frequência.

Tradicionalmente, as estruturas são feitas de ferro fundido, dada a sua elevada resistência e rigidez, associadas a um baixo módulo de elasticidade. Também se pode encontrar estruturas parcialmente feitas de betão, que é mais barato e tem como uma boa característica o facto de ter um excelente amortecimento de vibrações [2]. Ambos possuem estabilidade térmica e química.

2.2.3 Sistemas de acionamento

A obtenção de uma superfície pelo processo de maquinagem implica a coordenação de movimentos dos diferentes conjuntos da máquina, quer sejam primários ou secundários. Como primários entende-se a alimentação dos eixos e da árvore para realizar o corte por remoção da peça. Por outro lado, as funções auxiliares são todas aquelas que contribuem para a preparação da maquinagem da peça e garantia do sucesso da operação. Os acionamentos podem ser de índole rotativa ou linear e, no caso da fresagem, estes devem assegurar um movimento contínuo e preciso [2].

i. Acionamento rotativo

Esta secção engloba os sistemas que transformam as ordens de comando em movimentos físicos da máquina para a geração da superfície de corte, ou seja, deslocamento dos eixos e rotação da árvore.

➤ Acionamento dos eixos

Para o controlo em malha fechada do movimento dos eixos recorre-se, preferencialmente a um servo sistema, compostos pelo controlador, conversor de potência, servomotor e respetiva unidade de medição. De forma resumida, o controlador recebe o sinal de comando e faz girar o motor, sendo a sua rotação transmitida a um fuso. A rotação do fuso converte-se em movimento linear da porca a ele acoplada, o que resulta no movimento da mesa. Através dos sensores existentes no motor, o controlador recebe o feedback da velocidade e posicionamento atingido e, se necessário, volta a emitir um sinal para o ajuste da posição [2]. Na Figura 12 apresenta-se um tipo de mecanismo de acionamento direto dos eixos de translação.

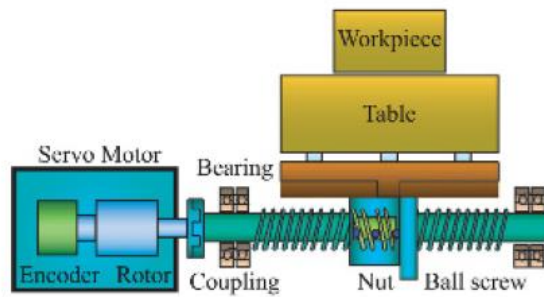


Figura 12 - Mecanismo de acionamento direto dos eixos (Retirado de: [20])

Segundo [20], os motores síncronos de ímãs permanentes têm sido largamente utilizados em máquinas-ferramenta, e a fresadora em estudo é um exemplo disso. Estes tipos de motores possuem enrolamentos de fase no estator e ímãs permanentes no rotor, que podem estar tanto na superfície, criando um campo magnético uniforme, como no seu interior, gerando um campo magnético direto. Distingue-se de outros motores pelo seu tamanho compacto, menor consumo de energia, melhor desempenho e maior relação entre binário e inércia [22]. Na Figura 13 apresenta-se a estrutura deste tipo de motores.

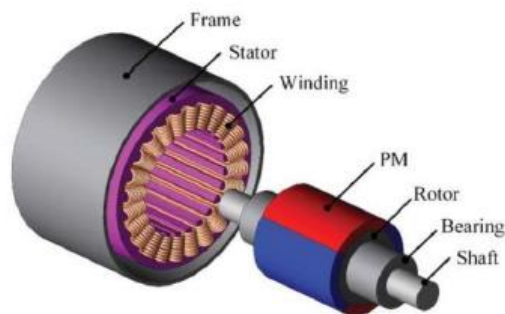


Figura 13 - Estrutura de um motor de ímãs permanentes (Retirado de: [22])

➤ Acionamento da árvore

Por sua vez, a rotação árvore é responsável por gerar a velocidade e o binário de corte necessários. Neste caso, é importante que o motor utilizado neste sistema tenha capacidade de atingir valores elevados destas duas variáveis. Por norma a transmissão da rotação do motor para o sistema em si dá-se através de uma correia, sendo que a relação de transmissão entre estes dois blocos vai influenciar a velocidade a que a ferramenta de corte irá girar.

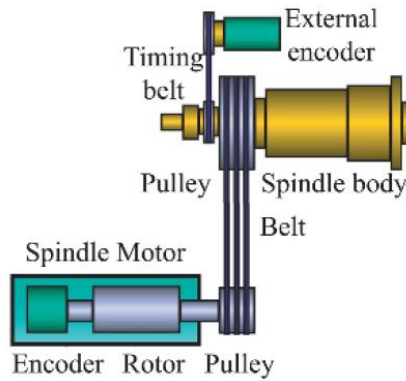


Figura 14 - Mecanismo de acionamento da árvore (Retirado de: [20])

Os motores mais utilizados para este movimento são os motores de indução, dado não possuírem escovas e possuírem características vantajosas no que diz respeito ao tamanho, peso, inércia, eficiência, manutenção e velocidade máxima [20]. Os servomotores síncronos de ímãs permanentes também podem ser utilizados, descartando a necessidade de se recorrer a um codificador externo, uma vez que este tipo de motores possui um sistema de medição interno que informa o controle acerca da velocidade do equipamento.

➤ Principais servomotores utilizados

Os servomotores caracterizam-se por permitirem para baixas velocidades e cortes pesados um binário elevado, e por trabalharem a velocidades elevadas no caso de se precisar de movimentos rápidos. Além disso, reagem de forma rápida e têm boas capacidades de aceleração e desaceleração. Também permitem um controle da velocidade e posição em simultâneo com a geração de movimento. Dos motores que se podem encontrar nas máquinas-ferramenta destacam-se [20]:

- Servomotores de corrente contínua (CC);
- Servomotores síncronos de corrente alternada (CA);
- Servomotores de indução (assíncronos).

Nos servomotores de corrente contínua, a estrutura do estator é cilíndrica e contém um ímã permanente no seu interior. O rotor, por sua vez, possui um eixo com um enrolamento e escovas, que permitem a passagem da corrente para o enrolamento. O controle da velocidade dá-se através de um codificador ou tacogerador fixo num dos extremos do eixo. Sendo motores CC, caracterizam-se pela existência de um comutador no rotor, cuja principal função é a alteração da direção da corrente, gerando o binário necessário ao movimento.

Os servomotores síncronos CA possuem no estator três enrolamentos de fase que são alimentados por corrente alternada trifásica, gerando assim um campo magnético rotativo. Como o rotor consiste num eixo e num íman permanente, será atraído por este campo, daí a não utilização de escovas. Os motores síncronos de ímanes permanentes inserem-se nesta categoria. O controlo da posição e velocidade fazem-se através da implementação de sensores de velocidade no eixo do motor. Caracterizam-se por rodar a uma velocidade constante, independentemente das cargas aplicadas. No entanto, não conseguem arrancar diretamente da rede, porque não conseguem fazer um arranque assíncrono. Este tipo de acionamento deve ser feito com recurso a um equipamento capaz de variar a frequência de alimentação do motor, de modo que este atinja a velocidade síncrona. Desta forma, é possível controlar a velocidade e o binário dos motores de corrente alternada através de equipamentos especiais, como por exemplo, um variador eletrónico de velocidade.

O terceiro tipo de servomotores apresenta uma composição e funcionamento semelhantes aos de um motor de indução convencional, apresentado na Figura 15. Os enrolamentos do estator são alimentados com corrente trifásica da rede. O rotor é constituído por um eixo com um material condutor, podendo ser em gaiola de esquilo (as barras do rotor estão permanentemente em curto-circuito, ligadas entre si nos topos por anéis condutores) ou bobinado, indicado para binários de arranque mais elevados [23]. Ao receber a corrente proveniente da bobina do estator, uma corrente é induzida na bobina do rotor, gerando o binário de acionamento. Ou seja, o campo magnético gerado no rotor vai procurar alinhar-se com o do estator, produzindo assim o movimento de rotação no rotor. Estes não irão girar à mesma velocidade, sendo a velocidade do rotor inferior. A esta diferença entre a velocidade síncrona e a velocidade do motor dá-se o nome de deslizamento ou escorregamento [24].

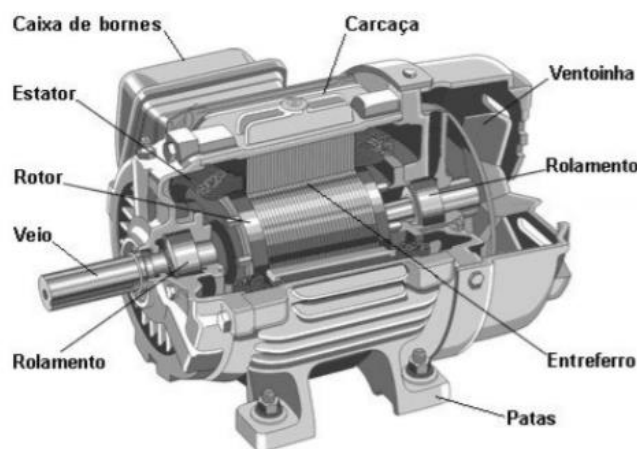


Figura 15 - Interior de um motor de indução (Retirado de: [23])

Para melhor se entender as vantagens e desvantagens de cada um destes tipos, apresenta-se na Tabela 1 uma comparação entre eles.

Tabela 1 - Comparação entre os diferentes tipos de servomotores [20]

	Servomotor CC	Servomotor síncrono CA	Servomotor de indução
Vantagens	- Preço baixo - Gama de velocidades elevada - Controlo simples	- Sem escovas - Paragem simples	- Estrutura simples - Não necessita de sensores de posição
Desvantagens	- Dissipação de calor - Manutenção constante devido às escovas - Ruído - Necessita de sensor de posição	- Construção complexa - Binário variável - Vibrações devido a frequências elevadas - Necessita de sensor de posição	- Paragem dinâmica impossível - Perda de calor
Binário	- Baixo	- Baixo/Médio	- Médio/Alto

ii. **Acionamento linear**

Existem máquinas-ferramenta que também recorrem ao acionamento linear, quer para o deslocamento dos eixos, quer para a execução de funções auxiliares. Tal como o nome indica, este tipo de acionamento proporciona um deslocamento linear, eliminando a necessidade da existência de um sistema conversor do movimento. Os principais tipos são:

- Atuadores piezoelétricos;
- Motores elétricos lineares;
- Atuadores hidráulicos;
- Atuadores pneumáticos.

O primeiro atuador só permite cursos reduzidos e o segundo apresenta um custo elevado de aquisição e de manutenção. Já o terceiro, apesar de ser indicado para aplicações que requerem forças elevadas, são problemáticos ao nível do controlo da posição e velocidade e pode implicar custos elevados se aplicados em máquinas de pequeno porte.

Posto isto, os atuadores lineares pneumáticos são os mais encontrados neste tipo de máquinas, especialmente no acionamento de funções secundárias, como os sistemas de fixação da ferramenta de

corde ou da peça de trabalho, ou para a lubrificação da superfície de corte. Para desempenhar estas funções, as máquinas CNC recorrem a sistemas electropneumáticos, uma vez que proporcionam uma fácil manutenção, limpeza, baixo custo de produção e baixo consumo de energia [25]. Além disso, contrariamente ao funcionamento de atuadores pneumáticos isolados, esta combinação monitorizada contribui para um processo de maquinação mais eficiente e fiável, uma vez que o seu controlo é feito através de um PLC [26].

Podem ser utilizados atuadores de simples efeito ou de duplo efeito, conforme a necessidade da aplicação. No geral, o conjunto caracteriza-se por utilizar uma alimentação elétrica de 24 V para os solenoides de atuação das válvulas. A pressão de operação nominal, que garante a integridade de todos os equipamentos, é de 6 bar [25]. Na Figura 16 tem-se um exemplo de uma instalação pneumática, onde se pode ver uma unidade de tratamento de ar FRL composta por um filtro de partículas, um regulador de pressão e um lubrificador. Só depois de tratado é que o ar é encaminhado para os atuadores pneumáticos.

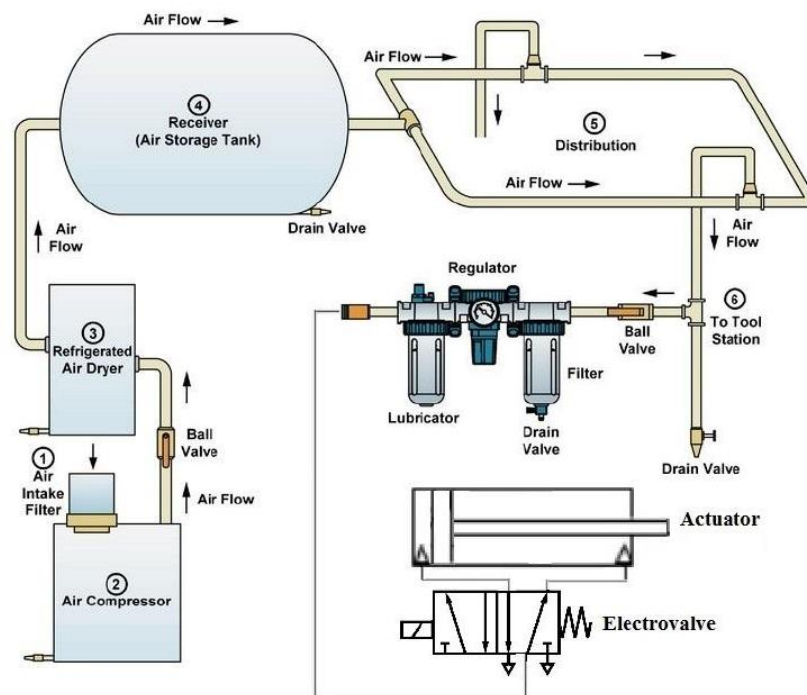


Figura 16 - Instalação pneumática para alimentação de atuadores pneumáticos (Retirado de: [27])

2.2.4 Sensorização e sistemas de controlo

O controlo em malha fechada dos equipamentos CNC só é possível graças aos sistemas de monitorização implementado nos seus componentes ou estrutura. Para além de um controlo rigoroso do processo de maquinagem, asseguram a integridade da máquina e contribuem para obtenção de superfícies de extrema qualidade.

Começando pelos mecanismos de leitura dos motores, destacam-se os codificadores, as unidades de medição integradas no próprio eixo do motor e os termístores. Distribuídos pela máquina poderá ter-se sensores fim-de-curso, caracterizados por serem sensores indutivos de proximidade que servem de controlo e verificação da execução de funções.

i. Codificadores

Um codificador é um sensor de movimento mecânico que gera sinais digitais em resposta ao movimento angular ou linear do eixo, dando informações ao sistema de controlo em relação à posição, velocidade e direção do sistema que controla [28]. Existem dois tipos de tecnologias de codificadores: os lineares e os rotativos. Quanto à tecnologia, estes podem ser magnéticos ou óticos. Os codificadores rotativos óticos são os mais aplicados no controlo de máquinas CNC, pelo que só se irá abordar as tecnologias destes.

Os tipos de saída dos codificadores óticos categorizam-se em dois grupos: os incrementais e os absolutos. Em termos de constituição, ambos os tipos são semelhantes, sendo compostos por [28]:

- interface mecânica – consiste no eixo (oco ou sólido), na flange e na carcaça, que permitem a fixação do codificador ao local de montagem;
- emissor (LED) – produz o feixe de luz que irá passar pelo disco;
- disco – define o código de transmissão dos pulsos, sendo nele gravado um padrão de segmentos alternados entre transparentes e opacos;
- recetor – composto por sensores detetores de luz (fotodíodos ou fototransístores), é na sua superfície que é projetado o feixe de luz intermitente devido à passagem pelo disco. Converte as variações de luz nas variações elétricas correspondentes, dando assim forma aos pulsos elétricos;
- interface elétrica – circuito de descodificação responsável pela transmissão do sinal para a unidade de controlo, como por exemplo uma placa de interface ou um PLC.

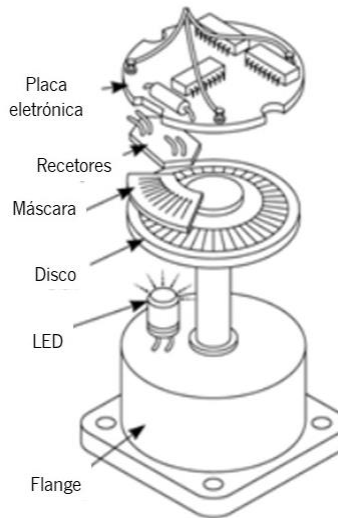


Figura 17 - Componentes de um codificador ótico (Adaptado de: [29])

Conhecida a estrutura básica de um codificador ótico passa-se para a apresentação dos tipos de equipamentos mais comuns em máquinas-ferramenta CNC [28].

➤ Codificador rotativo incremental

Também conhecido como codificador em quadratura, são compostos por um disco transparente com várias secções opacas, igualmente espaçadas, tal como se pode observar na Figura 18(a). Da rotação do codificador irá resultar um conjunto de pulsos de onda quadrada, espaçados equitativamente entre si, que irão comutar entre o sinal de saída zero (baixo) e o sinal igual à tensão de alimentação (alto). O valor máximo de pulsos por revolução (ppr) corresponde à resolução/capacidade do equipamento.

Podem ter só um sinal de saída A, mas por norma apresenta dois, tipicamente chamados A e B, que se encontram configurados com um desvio de 90°. Um impulso completo corresponde a 360° elétricos, logo, a cada 90° o codificador irá produzir uma aresta ascendente ou descendente em uma das saídas, que corresponderá a uma contagem. Desta forma, é possível detetar o sentido de rotação do codificador, ou seja, o dispositivo estará a rodar no sentido dos ponteiros do relógio quando o canal A está a subir 90° à frente do canal B, e rodará no sentido oposto, quando B sobe primeiro que A [28].

Uma desvantagem deste tipo de equipamento é o facto de, caso ocorra uma perda de potência, a contagem até então realizada é perdida. Ao retomar o seu funcionamento é necessário referenciar uma posição inicial para que seja possível reinicializar o contador. Por forma a contornar este inconveniente, alguns codificadores também emitem uma vez por rotação um sinal conhecido por Z, durante 90° na

mesma posição, podendo ser usado como um ponto de referência. Este canal vai servir, então, como posição inicial para que seja possível retomar a contagem ou o seguimento da posição. Na Figura 18(b) apresenta-se um exemplo de correspondência entre a leitura dos recetores e os sinais resultantes.

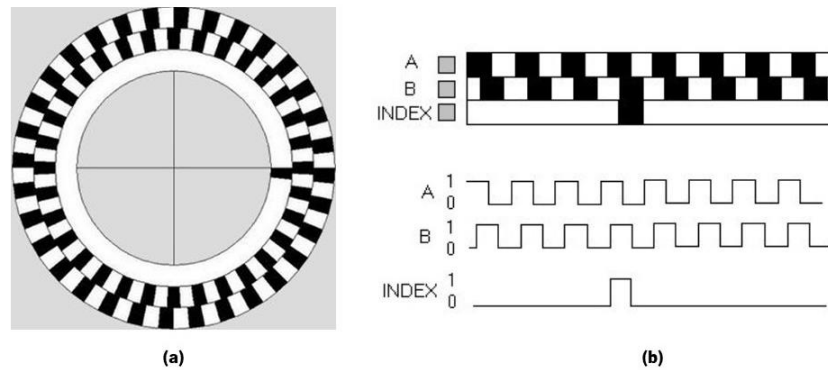


Figura 18 - Codificador incremental: (a) disco típico, (b) correspondência entre a leitura dos sinais (Retirado de: [30])

Para além destes sinais, poderão existir sinais diferenciais adicionais, tal como se pode observar na Figura 19, que correspondem aos sinais A, B e Z invertidos. Se o controlador ao comparar cada um destes com o seu par obter uma relação de igualdade invertida, é possível garantir que não há erros durante a transmissão.

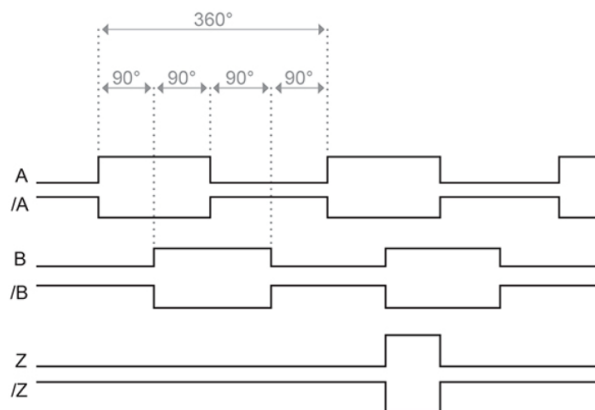


Figura 19 – Diagrama de pulso típico de um codificador incremental, incluindo os seus diferenciais (Retirado de: [31])

Os codificadores incrementais possuem um controlador de saída para converter a saída do recetor num sinal digital de onda quadrada, podendo ser do tipo *Push-Pull* (HTL) ou *Differential Line Driver* - RS422 (TTL). Quer para um, quer para outro, as tensões de entrada serão interpretadas como altas (lógica 1) ou baixas (lógica 0) [31].

Os circuitos *Push-Pull* fornecem um nível de sinal que corresponde à tensão de alimentação aplicada, variando esta entre os 8 VCC e os 30 VCC. Nos circuitos HTL – *High-Threshold-Logic*, quando

o sinal de saída se encontra acima de 3 V será considerado lógica 1, ao passo que, quando este é inferior a 1 V, será interpretado como lógica 0. De referir que, para este tipo de circuito o nível elevado do sinal de saída depende da tensão de alimentação, sendo que, como a diferença entre a lógica 0 e 1 é maior, este será mais imune a interferências e ao ruído elétrico.

Por sua vez, os circuitos RS422 fornecem um nível de sinal constante de 5 V, não dependendo este da tensão de alimentação. Esta pode pertencer a duas gamas: uma de 4.75 VCC a 5.5 VCC, e outra de 8 VCC a 30 VCC. No caso do tipo TTL – *Transistor-Transistor-Logic*, um sinal acima de 2 V é interpretado como lógica 1 e um sinal inferior a 0.8 V como lógica 0, variando a tensão de saída entre 0 V e 5 V. O uso dos sinais diferenciais faz com que a saída esteja em conformidade com a norma RS422. Além disso, as saídas diferenciais apresenta maior capacidade de resposta e maior imunidade ao ruído, tendo para isso de o recetor ser também um diferencial.

Estes codificadores caracterizam-se por serem de baixo custo, construção simples e por necessitarem de poucos cabos para transmitir o sinal. Na fresadora da *SwissPerfo* pode-se encontrar dispositivos destes nos motores dos eixos de translação e nos mecanismos de transmissão da mesa rotativa, como se verá mais adiante.

➤ Codificador rotativo absoluto

Neste tipo de dispositivo, o disco é composto por padrões de círculo concêntrico, os recetores são em maior número e apresentam uma disposição diferente da estrutura incremental. Na Figura 20 apresenta-se um exemplo da estrutura deste tipo de codificadores.

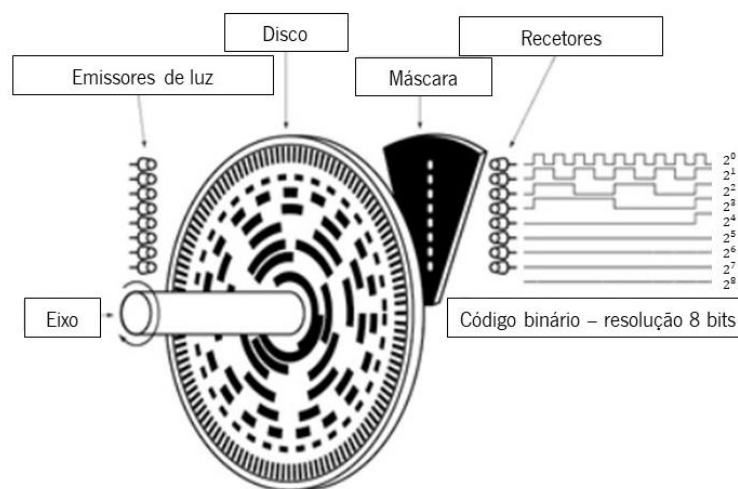


Figura 20 - Estrutura básica de um codificador absoluto (Adaptado de: [32])

O sinal de saída está na forma de bits digitais, uma vez que este é traduzido em código cinzento à medida que os recetores detetam a passagem de luz. Assim, cada posição terá uma configuração única de bits. Esta característica distingue-os dos anteriores no sentido em que, no caso de uma interrupção ou perda de potência, o valor da posição não é perdido e não é necessário retomar a um ponto de referência. No entanto, precisam de tantos fios de saída como o número de bits, pelo que irão ter um tamanho maior e, conseqüentemente, um preço mais elevado [20].

ii. Unidades de medição do motor

Como os servomotores CA não possuem escovas é necessário uma unidade de medição para controlar o seu funcionamento. Têm, então, no interior do motor um sistema codificador, composto por um sensor de velocidade, tacogerador, e por sensores de posição, mais concretamente sensores de efeito Hall ou sensores magneto-resistivos.

O efeito Hall consiste na deteção de uma diferença de potencial entre as duas faces laterais do condutor, provocada por um campo magnético perpendicular ao fluxo da corrente. O seu princípio de funcionamento assenta na produção de um sinal digital de saída ON ou OFF aquando da deteção de um campo magnético [32]. Já os sensores magneto-resistivos detetam uma alteração na resistência provocada por um campo magnético externo. Quando aplicados em servomotores permitem tanto controlo da posição como da velocidade.

Estes sensores de posição possuem cinco fios, três são utilizados para as saídas individuais, os outros dois são para ligar a 5 VCC e para a ligação à Terra. Por norma são montados com 120° entre si, obtendo-se seis estados digitais por cada ciclo, como se pode observar na Figura 21, que por sua vez correspondem a seis posições do rotor. [33].

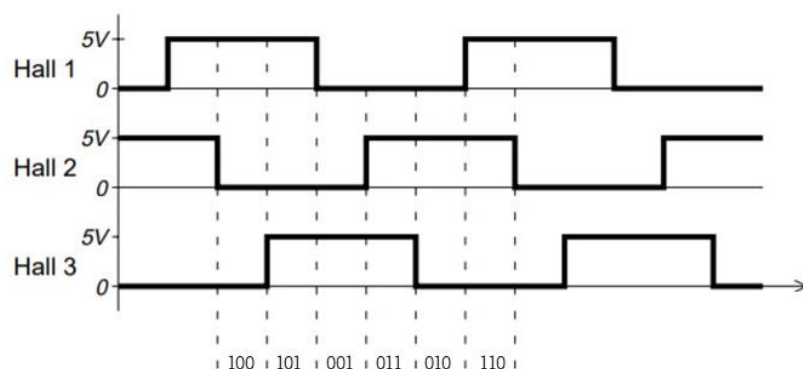


Figura 21 – Estados possíveis dos sensores Hall – rotação no sentido horário (Retirado de: [33])

Por outro lado, os tacogeradores são geradores CC de íman permanente cuja tensão de saída é proporcional à velocidade do motor. O tacogerador permite determinar a velocidade do motor a partir da tensão de saída deste dispositivo, dado esta ser proporcional ao número de rotações por unidade de tempo. Comporta-se como um pequeno gerador, que irá converter as frequências instantâneas produzidas pela rotação do rotor em sinais elétricos proporcionais, enviados para o comando.

iii. Termistor

Dentro dos sensores de temperatura existentes, os mais comuns para o controlo da condição térmica do motor são os termístores. Trata-se de um dispositivo semiconductor cuja resistência vai variar de acordo com a temperatura a que este está sujeito. Essa variação pode ser positiva ou negativa, e é esta diferença que conduz aos dois grupos de termístores: o NTC (coeficiente negativo de temperatura) e o PTC (coeficiente positivo de temperatura).

Num termistor PTC a resistência aumenta com o aumento da temperatura, pelo que o coeficiente de variação é positivo. São utilizadas para aplicações em que é necessária uma mudança súbita da resistência para uma temperatura crítica definida, como por exemplo, proteção contra excesso de corrente [34].

Contrariamente ao anterior, um termistor NTC caracteriza-se por a resistência diminuir com o aumento da temperatura. São preferidos devido à sua elevada fiabilidade e robustez, baixo preço e resposta rápida. Como aplicações, destaca-se a sua utilização para a deteção e controlo da temperatura [34].

No geral apresentam propriedades como: elevada sensibilidade, tamanho reduzido e gama de temperaturas entre -100 °C e 300 °C [35]. O valor da sua resistência vai aumentar ou diminuir para uma dada faixa de temperaturas, em maior ou menor grau, dependendo da curva característica do dispositivo.

iv. Sensores fim de curso

Este tipo de dispositivo é utilizado para a deteção da presença ou ausência de um objeto, através de um sensor eletrónico sem contacto. Estes interruptores de limite podem ser do tipo indutivo ou capacitivo.

Os sensores indutivos de proximidade são utilizados em pontos limite estratégicos para a deteção de objetos metálicos. São aplicados para o controlo do movimento, deteção da posição avançada ou recuada de componentes, controlo de processos e do funcionamento da máquina. Caracterizam-se pelo

bom alcance, custo e podem ser usados em ambientes sujos ou com poeiras. São compostos por 4 elementos e a relação entre estes pode ser visualizada na Figura 22 [36]:

- sensor com núcleo de ferrite envolvido por uma bobina;
- circuito oscilador;
- circuito detetor;
- circuito de saída do sinal.

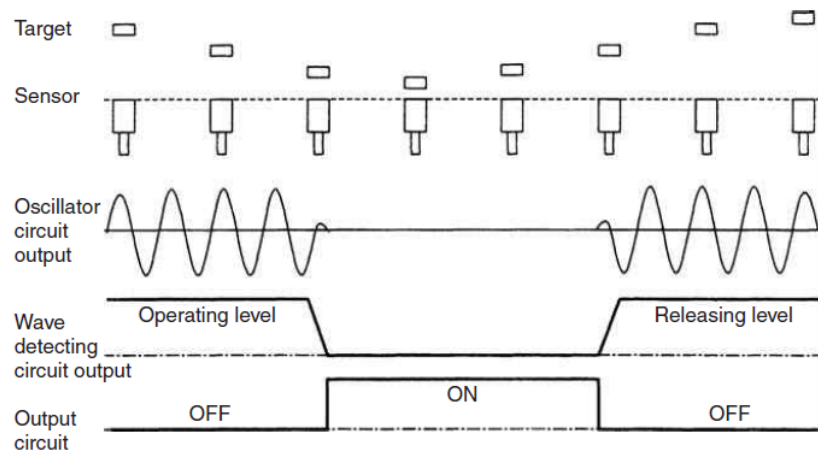


Figura 22 - Ciclo de detecção de um sensor do tipo indutivo (Retirado de: [36])

Já os capacitivos, apresentam a mesma composição que os anteriores, no entanto, utilizam meios de detecção diferentes. O sensor destes dispositivos tem um funcionamento semelhante ao de um condensador, que possui duas placas de um material condutor, tendo entre elas um material isolante. Neste caso, uma das placas capacitivas faz parte do sensor, a face do sensor é o isolante e o alvo é a outra placa. Contrariamente aos sensores indutivos, a oscilação ocorre na proximidade de um objeto. Possuem uma melhor resolução e são capazes de detetar mais materiais que os sensores indutivos, desde materiais metálicos mais leves e pequenos a materiais não metálicos. Tendo em conta a sua capacidade, são utilizados para detetar o nível de líquidos, para o controlo dos níveis de material presente e no controlo de processos [36].

2.2.5 Sistemas de transmissão e conversão do movimento

Os deslocamentos que caracterizam a máquina são assegurados pelos elementos que compõem estes dois sistemas. O primeiro é responsável pela transmissão de movimento gerado pela fonte de potência até ao segundo conjunto, que está encarregue de o converter para o tipo de movimento desejado.

i. Guias lineares

As guias são elementos de apoio ao longo dos quais as diferentes partes da máquina se movimentam, com rigor e suavidade da trajetória. Dada a importância da sua função, este tipo de componente deve ser capaz de garantir uma elevada precisão e rigidez, boa acessibilidade para uma lubrificação eficaz, resistência ao desgaste e um contacto adequado em toda a área de deslizamento [2].

Neste tipo de componentes é importante se verificar a ausência da reação “*stick-slip*”. Resumidamente, este fenómeno ocorre quando duas superfícies em contacto ficam juntas até que a força aplicada seja suficiente para provocar o deslizamento de uma sobre a outra. Isto irá verificar-se para velocidades baixas, uma vez que o atrito nestas condições é maior. Vencida a força de atrito, a velocidade aumenta progressivamente ultrapassando, por vezes, a força desejada para o conjunto. Este acontecimento pode-se repetir, o que vai contribuir para erros de posicionamento. Posto isto, deve-se garantir o atrito mínimo constante na zona de contacto [37].

Na construção de uma máquina-ferramenta podem ser encontrados diferentes tipos de guias, classificando-se estas segundo três grupos de movimentos [2]:

- Guias de deslizamento – planas, cilíndricas, em “V”, rabo de andorinha;
- Guias de elementos rolantes – abertas, fechadas, esfera;
- Guias de pressurização externa.

O primeiro tipo caracteriza-se pelo deslizamento se dar pelo contacto direto entre as superfícies, o que exige boas condições de lubrificação de modo a diminuir o atrito e, conseqüentemente, o desgaste dos componentes. Apesar disso, apresentam uma elevada capacidade de carga e rigidez. As guias com a forma rabo de andorinha, ou as guias planas, encontram grande aplicação nas máquinas CNC mais antigas, ao passo que as guias em V surgem nas máquinas mais recentes [37]. Os tipos de guias de deslizamento podem ser observados na Figura 23.

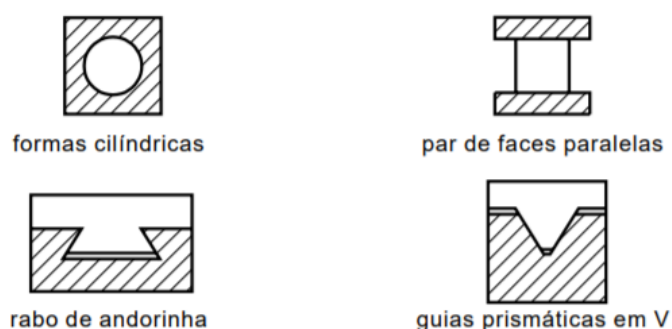


Figura 23 - Tipos de guias de deslizamento (Retirado de: [38])

Por sua vez, nas guias lineares de elementos rolantes são inseridos rolos, agulhas ou esferas entre as partes móveis, como se pode observar na Figura 24. Este tipo de aplicação tem um grande contributo para a redução do atrito. São preferidas para aplicações que requerem sensibilidade no posicionamento, repetibilidade de movimento e velocidades elevadas.

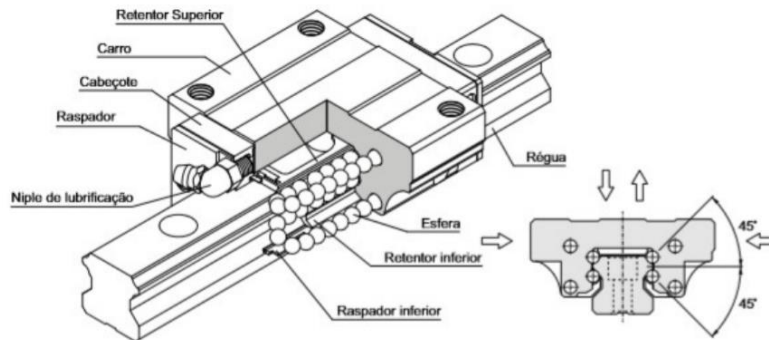


Figura 24 - Guia linear de esferas recirculantes (Retirado de: [39])

Por último, as guias pressurizadas destacam-se das anteriores pelo facto de não haver contacto direto entre as superfícies. Esta separação é garantida por uma película fina de fluido pressurizado, água ou óleo entre os elementos móveis. Aparenta ser o sistema ideal, dada a elevada rigidez, uniformidade do movimento, baixo atrito e boa capacidade de dissipação do calor. No entanto, o facto de necessitar de uma manutenção regular e cuidada, para além do rigor de fabrico, faz com que a sua aplicação seja menos viável do ponto de vista económico.

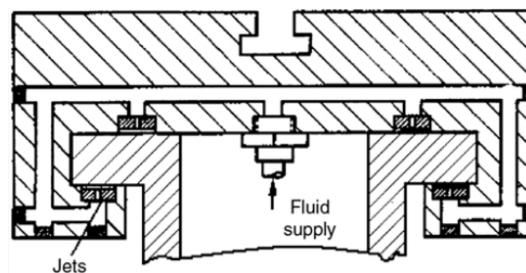


Figura 25 - Guia pressurizada externamente (Retirado de: [2])

ii. Sistemas de transmissão movimento

A transmissão de movimento pode-se dar de forma direta, ou seja, com o motor diretamente ligado ao fuso, ou através do dimensionamento de uma cadeia cinemática. A primeira é a configuração ideal, uma vez que evita perda de potências ou folgas, no entanto o preço é mais elevado. Já a segunda opção exige um dimensionamento rigoroso para se obter um posicionamento exato das ferramentas de corte.

Incidindo na complexidade das cadeias cinemáticas, estas podem ser compostas por diferentes elementos, sendo os mais utilizados em máquinas-ferramenta os seguintes:

- Trens de engrenagens;
- Parafuso sem-fim;
- Pinhão-cremalheira;
- Correia e polia sincronizadora;
- Correntes.

Dentro das opções existentes, a transmissão por meio de correias é a mais simples e flexível, com boa capacidade de absorção de vibrações [2]. Estas capacidades são melhoradas conforme o tipo de correia utilizado, sendo que as planas e as dentadas são as mais encontradas na categoria da máquina em estudo. De referir que para maquinagem a altas velocidades este tipo de transmissão já não é tão aconselhado.

As engrenagens, apesar de permitirem elevadas capacidades de transmissão e terem uma vida útil longa, são de aplicação mais complexa e mais caras. Por sua vez, as correntes têm um princípio de funcionamento semelhante às correias, mas são mais direcionadas para aplicações sensíveis a escorregamentos e em que a potência a transmitir é elevada [3].

iii. Sistema de conversão de movimento

O principal objetivo deste sistema é converter o movimento de rotação dos dispositivos de acionamento em deslocamento linear dos conjuntos da máquina. Os elementos mais comuns responsáveis por este tipo de tarefa são os fusos, que se podem dividir entre:

- Fusos trapezoidais;
- Fusos de esferas recirculantes;
- Fusos de rolos;
- Fusos hidroestáticos.

No universo das máquinas-ferramenta o segundo elemento é o mais utilizado, quer seja utilizado um sistema de controlo aberto ou fechado, uma vez que satisfaz as exigências da aplicação. Isto é, garante a ausência de folgas devido à configuração da porca, um atrito reduzido e a repetibilidade e exatidão do deslocamento. Caracteriza-se pela inserção de pistas de esferas na porca do fuso, que vão voltando ao ponto inicial desta à medida que se dá o movimento. No caso de se pretender um

deslocamento bidirecional dos carros dos eixos, sem erros no posicionamento, deve existir um mínimo, ou até ausência, de folga entre o fuso e a porca. Tal é conseguido através da utilização de duas porcas com pré-carga inicial superior à força máxima de operação, como se pode ver na Figura 26 [37]. Para além das vantagens mencionadas anteriormente, destaca-se ainda o facto de precisar de uma menor potência de acionamento, a ausência de *stick-slip* e maiores velocidades.

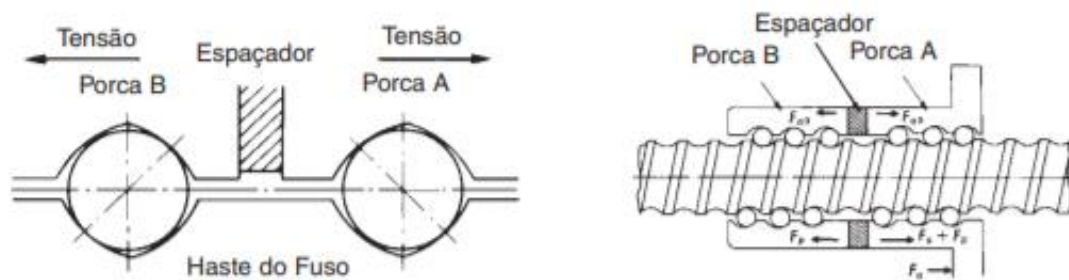


Figura 26 - Fuso de esferas recirculantes com dupla porca (Retirado de: [40])

Os fusos de rolos proporcionam um movimento livre de folgas e um controlo da posição mais preciso, no entanto são muito mais caros do que os de esferas. Já os hidrostáticos surgem como uma alternativa aos fusos prediletos, são adequados para suportar cargas mais elevadas com reduzido desgaste [37].

2.2.6 Componentes do sistema CNC

O sistema CNC é composto por 3 sistemas que partilham uma relação de interdependência: a unidade do comando numérico, a unidade de acionamento e a unidade do controlador.

Nesta secção apresentar-se-á o sistema base do CNC, ou seja, o comando numérico, cuja aparência e constituição podem ser observadas na Figura 27. Da sua composição fazem parte:

- MMI – Interface Homem-Máquina;
- NCK – Controlo Numérico *Kernel*;
- PLC – Controlo Lógico Programável.

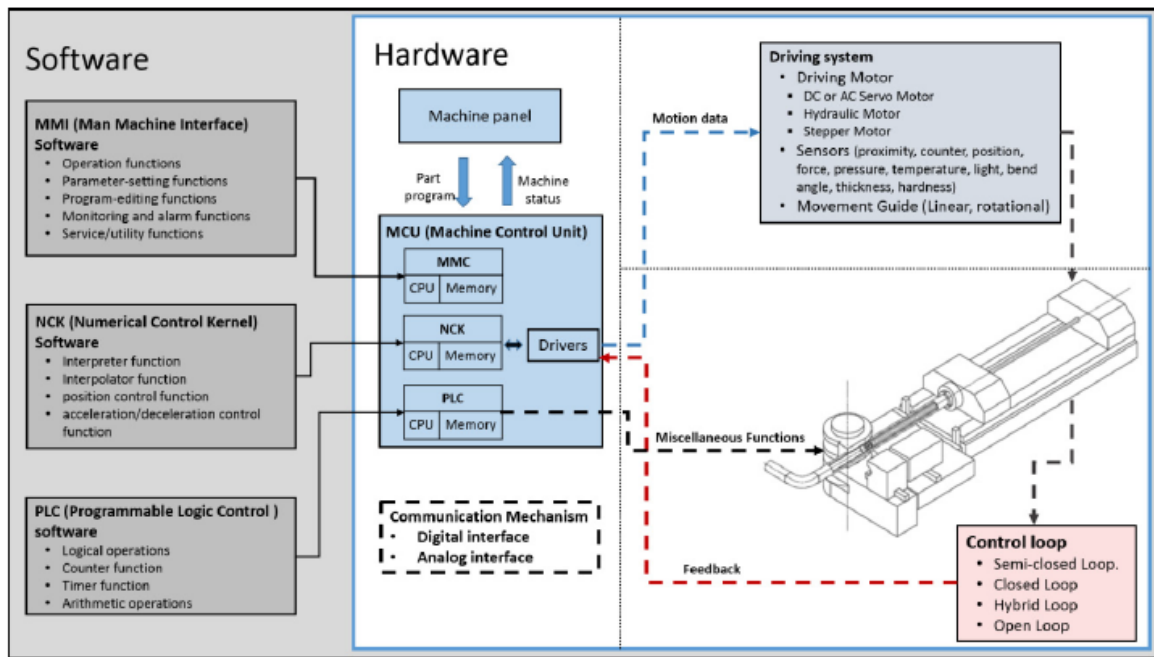


Figura 27 - Hardware e software típicos de um sistema CNC (Retirado de: [41])

i. MMI

É através desta unidade que se estabelece a comunicação entre o operador e a máquina, desempenhando funções de 5 grupos principais [20]:

- funções de operação – são as mais utilizadas, uma vez que permitem o suporte da operação de maquinagem e apresentação do estado real da máquina.;
- funções de parametrização – consiste na definição de parâmetros para uso interno e dividem-se em parâmetros da máquina, parâmetros do programa peça (a serem definidos durante a sua edição) e parâmetros de personalização (utilizados para adaptar a máquina aos requisitos do operador);
- funções de edição do programa – permitem editar e modificar o programa da peça;
- funções de monitorização e alarme – informam o operador do estado da máquina e, se necessário, executam as ações necessárias para a correção de problemas;
- funções de serviço – trata-se de funções extra para auxiliar a operação, como por exemplo, o serviço de arquivo para a cópia de parâmetros internos e a função de comunicação que permite que os computadores associados comuniquem entre si.

ii. NCK

Trata-se do núcleo do sistema, sendo responsável pelas funções mais importantes que permitem o controlo do servo-sistema e fabricação da peça. Enumeram-se as seguintes tarefas [20]:

- interpretação do programa da peça e cálculo da posição para onde os eixos se devem mover;
- realização da interpolação de linhas, círculos e parábolas, para o cálculo dos deslocamentos dos eixos;
- controlo da aceleração/desaceleração dos dados interpolados, de modo a minimizar vibrações mecânicas e choques;
- controlo da posição para minimizar o erro entre a posição real e a posição desejada;
- compensação de erros com base na interpretação do programa.

iii. PLC

Este sistema é responsável pelo controlo lógico, ou seja, pela programação e controlo de todas as entradas e saídas. Além disso, está em constante comunicação com o NCK, de modo a garantir que sempre que uma operação é iniciada, todas as condições estão reunidas. No geral, controla todo o comportamento da máquina, exceto o servo-sistema, através da execução de programas lógicos sequenciais. A sua utilização apresenta as seguintes vantagens:

- Escalabilidade;
- eficiência económica;
- miniaturização;
- fiabilidade;
- elevado desempenho.

Resumidamente, o funcionamento desta unidade consiste na criação e compilação do programa para uma dada aplicação, num dispositivo conhecido como programador. Depois de ser convertido para a linguagem de interpretação de um PLC, o programa é transmitido para a Unidade Central de Processamento (CPU). Ao mesmo tempo, o estado do PLC é enviado para o programador de modo a tornar possível a monitorização da sua atividade. Dentro do CPU tem-se o módulo “Executor”, que é o responsável por ler o programa e executar a sequência de operações lógicas definidas. Este vai, então, ler os sinais de entrada, realizar as operações necessárias e enviar as ordens para os pontos de saída. Na Figura 28 apresenta-se a lógica de funcionamento aqui explicada [20].

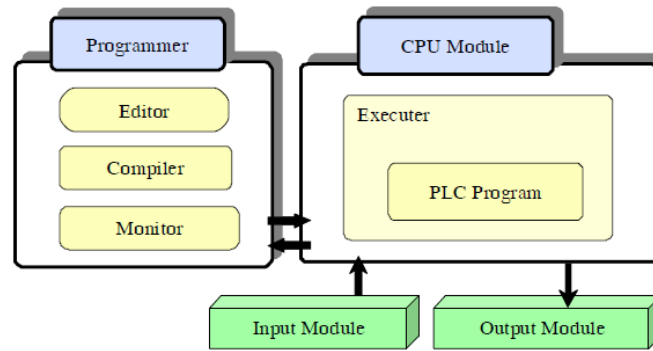


Figura 28 – Principais blocos do PLC (Retirado de: [20])

2.3 Requalificação de máquinas-ferramenta CNC

As frequências das reparações de natureza corretiva revelam uma necessidade de requalificação ou substituição da máquina-ferramenta. O processo de requalificação e adaptação de uma máquina-ferramenta antiga ou avariada para uma versão atualizada da indústria pode ser uma solução mais simples, económica e rápida, do que a compra de novas máquinas-ferramenta. No entanto, esta só deve ser realizada se não exceder os 50% de custo de compra de um novo equipamento [15].

Tendo em conta que cada componente tem um limite de vida útil a partir do qual já não serve o inicial propósito, este processo assenta, em grande parte, na substituição por novos componentes, que sejam compatíveis e, ao mesmo tempo, atuais. [2].

A requalificação trata-se de um processo de otimização da máquina, mais concretamente, da precisão, velocidade e dos trabalhos de manutenção necessários. Tem como principais benefícios a poupança de energia, melhoria do tempo médio entre falhas e reparações, melhoria da performance, atualização dos documentos de suporte, tudo isto com o menor custo possível. Este processo envolve um conjunto de procedimentos que vão desde a avaliação das condições da máquina, à reparação/substituição de componentes, limpeza, montagem, calibração e testes. No que diz respeito à substituição, existem dois tipos de requalificação [41]:

- Requalificação tradicional;
- Requalificação inteligente.

Para que seja possível proceder à segunda requalificação é necessário passar pela tradicional primeiro, uma vez que os sistemas inteligentes só conseguem comunicar entre si através dos dispositivos que fornecem esses dados. Por outro lado, antes de se realizar qualquer tipo de adaptação da máquina,

é necessário ter conhecimento do nível de avanço tecnológico das máquinas-ferramenta utilizadas nas fábricas. É necessário ter em conta que dado as rápidas modificações que este setor tem sofrido, não há uma linha homogénea de modelos, daí ter de se procurar basear nos modelos mais recentes no mercado.

2.3.1 Requalificação tradicional

O conjunto de processos inerentes a este conceito têm como principal objetivo melhorar o desempenho da máquina através da atualização dos sistemas de controlo e de movimento. Para tal, primeiro deve-se conhecer ou selecionar o hardware e software principais que compõem o sistema de controlo, filtrando-se desta forma os componentes que deverão ser alvo de requalificação.

i. Sistema de acionamento

Máquinas-ferramenta mais antigas normalmente possuem servomotores CC ou servomotores síncronos CA. Nos dias de hoje encontra-se modelos mais avançados e adequados para as operações de produção, como por exemplo os servomotores CA do tipo indutivo. Esta alteração proporciona as seguintes vantagens [41]:

- maior precisão;
- possibilidade de ajuste de velocidade;
- necessidade de pouca manutenção;
- binário elevado quer seja para baixas ou altas velocidades, com uma maior estabilidade na aceleração e desaceleração;
- vida útil influenciada pelo estado dos rolamentos, que podem ser facilmente substituídos.

ii. Sistema de transmissão e conversão de movimento

Modelos antigos das guias do tipo rabo de andorinha devem de ser substituídos por modelos que consistem num contacto deslizante através de guias lineares de esferas ou de rolos. Tal mudança contribui para uma maior robustez e precisão da máquina, bem como uma maior capacidade de carga e menor atrito no movimento. Já o fuso, que antigamente era de chumbo, deve ser substituído pelo fuso de esferas recirculantes ou de rolos planetários.

O tipo de acionamento do movimento dos eixos da máquina também influencia o seu desempenho. Isto é, se for utilizado um acionamento indireto, que consiste na ligação do motor ao fuso por meio de uma correia em V ou uma corrente, a máquina estará sujeita a maiores condições de desgaste, atrito e ruído, e, conseqüentemente, menor precisão [41]. O método de acionamento direto assume maior preferência, uma vez que o motor é diretamente ligado ao fuso por meio de acoplamentos. Desta forma, folgas existentes da configuração indireta serão eliminadas, assim como problemas de escorregamento e variação do binário. Por outro lado, apresentam um controlo mais fácil e o centro dos eixos do fuso e do motor são coincidentes, tal como se pode observar na Figura 29.

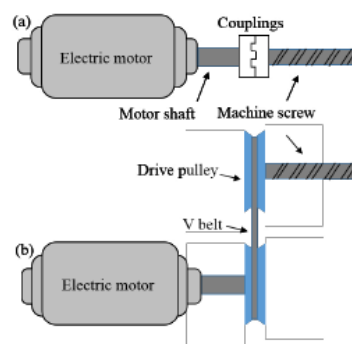


Figura 29 - Acionamento direto vs acionamento indireto (Retirado de: [41])

iii. Sensorização e sistemas de controlo

O sistema de feedback também deve passar por um processo de requalificação capaz de o transformar num sistema híbrido. Este resulta da combinação do controlo em malha semifechada (baixa precisão, depende da precisão do fuso) e do controlo em malha fechada (precisão boa, mas afetada pela rigidez da máquina, perdas de movimento ou escorregamentos). Na Figura 30 tem-se um esquema ilustrativo da lógica de funcionamento de um sistema híbrido.

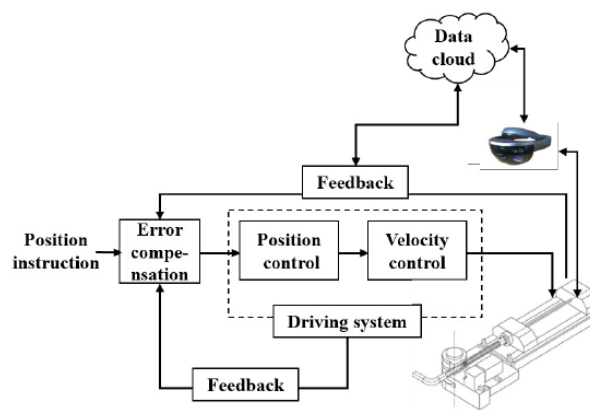


Figura 30 - Sistema de controlo híbrido (Retirado de: [41])

Esta conversão passa pela adição de um codificador ligado ao eixo do motor e um sensor de posição inteligente. A conjugação dos dados obtidos de cada um dos dispositivos permite conhecer o erro de posição real, contribuindo para uma maior precisão e possibilidade de compensação de erros no instante. Além disso, um sistema híbrido pode ser modificado diretamente e ligado à nuvem de dados, através de interfaces inteligentes.

iv. Componentes do sistema CNC

Por outro lado, para além das modificações mencionadas anteriormente, para um alto desempenho é necessário manter a CPU atualizada. O componente principal deste conjunto é o NCK, dado ser aquele que afeta o desempenho, nível de precisão e velocidade das máquinas-ferramenta. Entre as melhorias que se pretende alcançar, destaca-se o facto de se procurar alargar a memória de capacidade de processamento da máquina, entre outras alterações ao nível do software. Além disso, a alteração dos mecanismos de comunicação terá um grande impacto, uma vez que se passa de uma interface analógica (utilização de porta série RS232C ou porta paralela IEEE488) para uma digital (redes locais: *Ethernet, CAN-bus, EtherCAT, WLAN*) [41].

2.3.2 Requalificação Inteligente

O conjunto de ações necessárias à requalificação tradicional de uma máquina-ferramenta melhoram consideravelmente o seu desempenho. No entanto, não garante a inteligência exigida pela Indústria 4.0, principalmente no que diz respeito à independência da máquina do Homem e à comunicação através da nuvem entre elas. Um passo dado nesse caminho passa pela atualização da MMI da CPU, de modo a permitir uma comunicação avançada, tomada de decisões em tempo real e diagnósticos rápidos. Os objetivos deste processo é alcançar esta adaptação com o menor custo possível e ações necessárias, de modo a tornar as empresas mais competitivas e produtivas.

A implementação de sensores inteligentes na máquina e do controlo destes através de um sistema ciber-físico, possibilita a recolha em tempo real dos dados de variáveis como temperatura, vibrações, posições. A informação recolhida pode ser enviada de forma autónoma para a plataforma da nuvem, o que permite um maior controlo das condições das instalações da fábrica e dos seus equipamentos. Deste modo, permite-se a comunicação e cooperação entre as diferentes máquinas requalificadas, e entre estas e os operadores através de diferentes protocolos de comunicação. Enfatiza-se, assim, a criação das fábricas inteligentes [41].

Os sistemas ciber-físicos influenciam em grande escala este tipo de requalificação ao oferecer opções de interfaces inteligentes para as máquinas ultrapassadas. Estes permitem adaptar os protocolos que até então estas utilizavam, para protocolos padrões modernos, como por exemplo o OPC-UA já mencionado.

3. FRESADORA *SWISSPERFO* “TYPE CU 200H”

A fresadora *SwissPerfo* em estudo, mostrada na Figura 31, é uma fresadora horizontal CNC de 4 eixos: os correspondentes aos movimentos lineares, X, Y e Z, e um adicional, o eixo B, a que corresponde uma rotação da mesa de trabalho em torno do eixo Y. Para além dos deslocamentos nos eixos principais e da rotação da árvore principal, apresenta funcionalidades secundárias como a subida e descida do resguardo de proteção, os sistemas de fixação do porta-peças e da ferramenta de corte, e o sistema de lubrificação. Esta máquina era comandada por um PLC da Siemens, modelo SINUMERIK 820 M, e o controlo dos servomotores realizado pelo servo-sistema SIMODRIVE 610.



Figura 31 - Fresadora *SwissPerfo* CU 200H

Este equipamento encontra-se inoperacional e a necessitar de uma atualização completa do seu sistema de controlo. No entanto, para que esta seja possível, deve-se proceder a um estudo completo da máquina, entender o propósito de cada dispositivo, realizar testes de funcionamento, substituir os componentes obsoletos/avariados, e catalogar todos os tipos de sinais e necessidades de alimentação. Deste modo, as fragilidades da máquina são limadas e esta fica pronta para a implementação de um novo controlo.

Assim, numa primeira fase, é necessário conhecer a constituição da fresadora e perceber como os diferentes sistemas se interligam entre si. Neste capítulo procede-se, então, à sua apresentação, tendo por base trabalhos existentes e pesquisas realizadas.

3.1 Sistema de controlo

O controlo da fresadora era realizado através do controlador SINUMERIK 820 M da Siemens, composto pelo núcleo de controlo, o PLC e a interface Homem-máquina. O funcionamento da máquina era assegurado pela comunicação entre os sistemas de medição e comando presentes, pelo que o controlador tinha as seguintes funções:

- receção dos sinais provenientes dos codificadores e dos sensores;
- envio de sinais de comando analógicos ao servo amplificador (SIMODRIVE 610), para acionamento dos motores;
- controlo das ordens emitidas.

Este sistema era responsável por ler os sinais provenientes dos sensores, mais concretamente do tacogerador e do codificador, e enviar ordens para o sistema servo, de modo a ajustar a alimentação dos motores e obter os deslocamentos desejados. Desta forma, tinha-se um controlo em malha fechada.

Dado o avanço tecnológico no controlo de máquinas, este módulo já se encontra desatualizado e incapaz de cumprir a sua função. Uma das suas principais desvantagens é a memória bastante reduzida que possui. Tal como se pode observar na Figura 32(a), este sistema estava todo acomodado num armário de grandes dimensões, separado da máquina, e a comunicação entre o operador e máquina era realizada através do computador fixo na porta do armário.

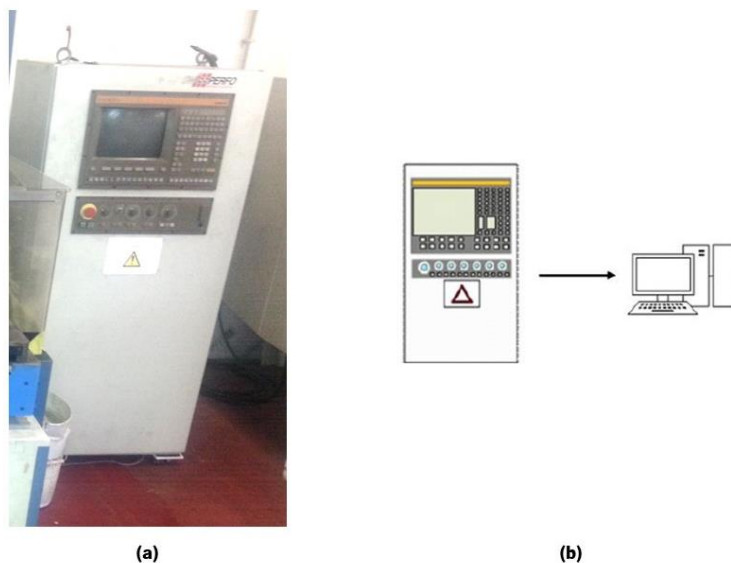


Figura 32 – Módulo de controlo da fresadora: (a) armário atual; (b) resultado da atualização do sistema

Um dos próximos passos a realizar é reduzir este bloco a um computador e às placas necessárias para o controlo dos diferentes sistemas da máquina, como se pode observar na Figura 32(b). Assim, o espaço necessário à sua alocação será reduzido e, além disso, será mais prático e intuitivo, devido à existência de interfaces mais fáceis de utilizar. A utilização de um sistema operativo permitirá, também, uma maior capacidade de memória. Estudos para a requalificação do sistema de controlo já foram iniciados, tendo-se como base [42].

3.2 Sistema mecânico

Os eixos responsáveis pelos deslocamentos lineares da fresadora apresentam configuração semelhante entre si, sendo compostos por guias lineares e uma transmissão de movimento por correia trapezoidal. A conversão do movimento rotativo em movimento linear dá-se através de um fuso de esferas recirculantes com dupla porca, protegido por uma manga telescópica. Já a rotação da árvore é assegurada pela transmissão de movimento do motor através de uma correia trapezoidal. Na Figura 33 é possível observar este tipo de sistemas para o caso dos eixos Y e Z, bem como a correia que transmite o movimento do motor à árvore.

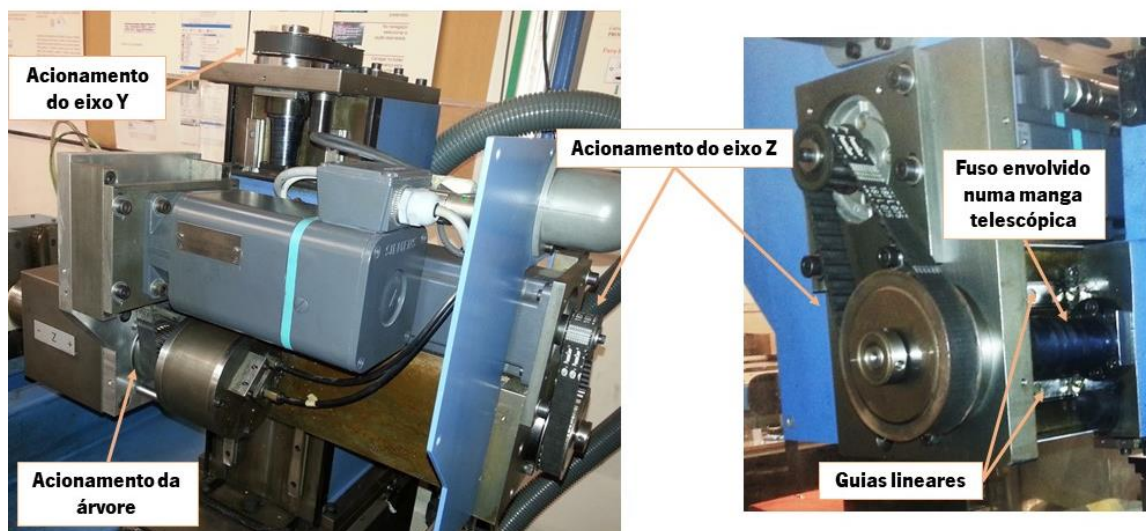


Figura 33 - Sistemas de transmissão e conversão do movimento dos eixos Y, Z e da árvore

Por sua vez, a rotação da mesa do eixo B apresenta um sistema de transmissão de movimento mais complexo, havendo duas desmultiplicações, em primeiro lugar entre o motor e o parafuso sem-fim e, depois, entre este último e a roda coroa acoplada no veio da mesa. Desta forma, obtém-se uma velocidade de rotação da mesa muito inferior à do motor, ideal para as operações de maquinagem.

Paralelamente a este sistema, tem-se a transmissão de movimento entre o veio da mesa e o codificador do eixo B, através de uma correia trapezoidal, para medição da posição desta. Em [43] é possível encontrar um estudo mais detalhado da cadeia cinemática do eixo B.

É de salientar a importância das molas de compressão que permitem a elevação da mesa de trabalho para fixação da palete que transporta a peça a maquinar. Já a fixação da ferramenta de corte é assegurada por molas de disco.

Na Figura 34 pode-se observar a localização dos conjuntos mecânicos de acionamento de cada eixo na fresadora.

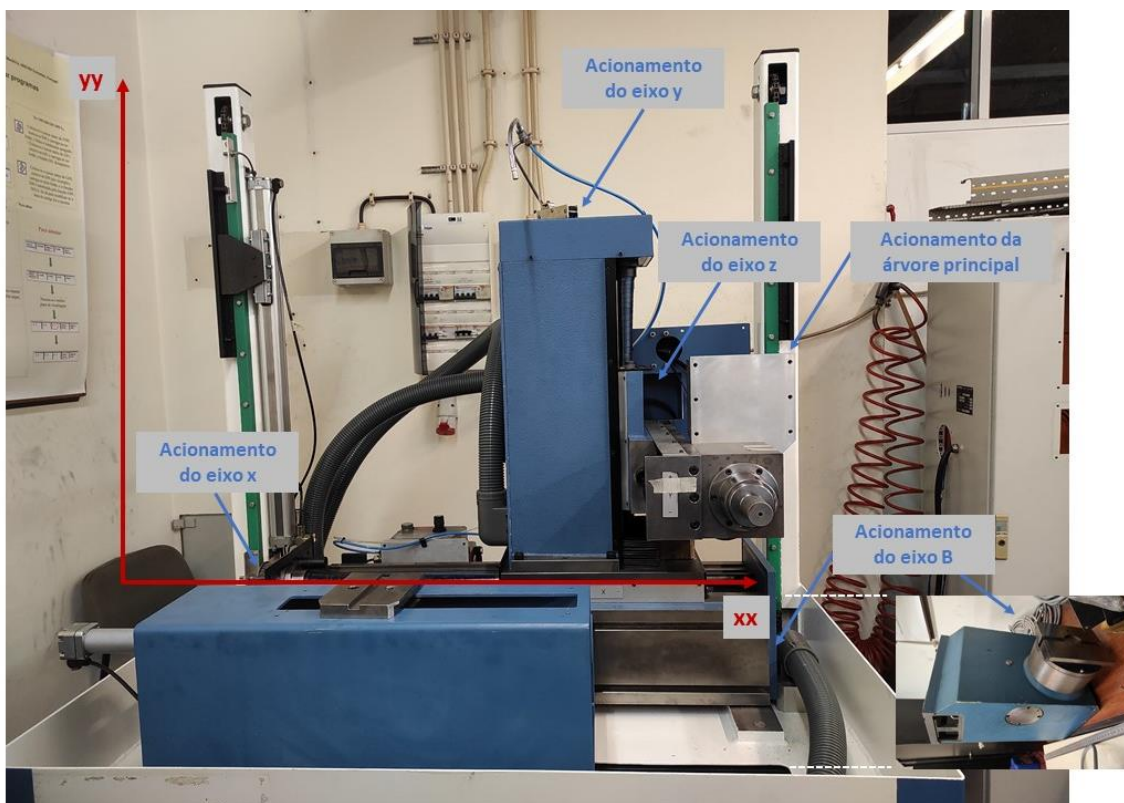


Figura 34 - Localização dos eixos na estrutura da fresadora

Na Tabela 2 apresenta-se os principais componentes que asseguram o sistema mecânico da fresadora, bem como, os respetivos modelos para consulta das especificações técnicas.

Tabela 2 - Componentes do sistema mecânico da fresadora

Componente	Qtd	Função	Modelo
Correia trapezoidal	5	(1) Transmissão do movimento de rotação do motor ao fuso de esferas, no caso dos eixos de translação (2) Transmissão do movimento do motor do eixo B ao parafuso sem-fim (3) Transmissão do movimento do veio da mesa B ao codificador	(1, 2) Gates187L-075 (3) Gates 180MXL/370A
Correia HTD	1	Transmissão do movimento de rotação para a árvore	HTD 475-5M-25
Corrente	2	Sistema de elevação da cortina de proteção	(N/A)
Fuso e porca de esferas recirculantes	3	Conversão do movimento de rotação num movimento de translação dos eixos principais	UMBRAGROUP, S1D20-5M3
Guia linear	6	Assegurar o movimento de translação dos eixos principais, garantindo paralelismo no deslocamento	THK, SR 20
Patim de esferas	12		THK, SR 20TB

3.3 Sistema de acionamento

A fresadora *SwissPerfo* possui cinco servomotores síncronos de ímanes permanentes, presentes na Figura 35, quatro deles responsáveis pelo acionamento dos eixos principais e um último responsável pela rotação da árvore principal. Estes equipamentos pertencem à série 1FT5 da Siemens, desenvolvida especialmente para máquinas-ferramenta, como centros de maquinagem, tornos e fresadoras, juntamente com a unidade de comando SIMODRIVE 610. É de salientar que estes equipamentos já foram descontinuados em 2010, pelo que, em caso de avaria, pode ser necessário introduzir novos motores.

Os servomotores dos eixos têm uma velocidade de 3 000 rpm, para um binário de 1.50 Nm e uma corrente nominal de 4.40 A. Já o motor da árvore apresenta uma velocidade de 6 000 rpm, um binário de 2.10 Nm e corrente de 12.4 A. Caracterizam-se por possuírem proteção térmica através da presença de termistores PTC nos enrolamentos do estator. Além disso, possuem um sistema codificador fixado no veio, composto pelos seguintes sensores:

- tacogerador analógico integrado;

- três sensores Hall, no caso dos motores dos eixos, e três elementos magnéticos com sensores Hall na sua constituição, no caso do motor da árvore [44]

Além destes, os motores dos eixos ainda possuem um codificador incremental para um controlo rigoroso da velocidade e posição dos eixos. É através destes que se controla a quantidade de deslocamento que o motor deve realizar. O motor da árvore não necessita deste tipo de equipamentos, dado não ser necessário um controlo preciso da posição.

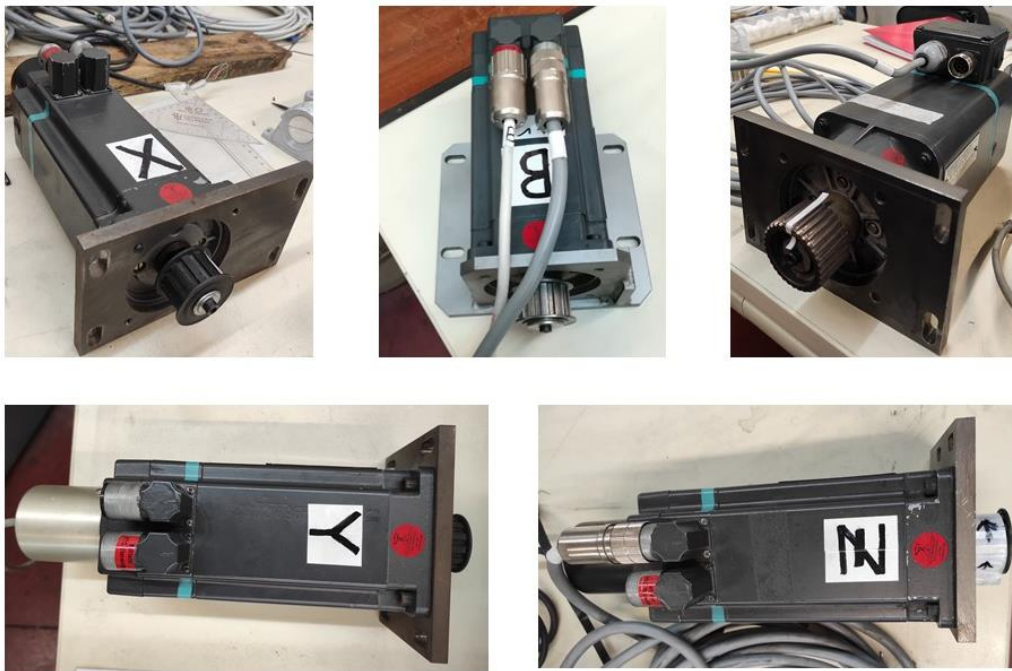


Figura 35 - Servomotores da fresadora *SwissPerfo*

Esta máquina também se encontra equipada com sensores de fim de curso, que fornecem ao controlo pontos de referência. Estes dispositivos são essenciais para uma eventual perda de posição dos eixos, ocorrência que é acentuada pelo uso de codificadores incrementais. São importantes em casos de paragem de emergência, por forma a evitar o choque com a estrutura da máquina, e confirmam a realização de tarefas secundárias.

Na Tabela 3 apresentam-se os modelos dos principais componentes que compõem este sistema. Dada a complexidade deste sistema e como foi alvo de um estudo mais pormenorizado na fase de testes, apresenta-se, de seguida, uma descrição mais detalhada e as principais características dos dispositivos. Desta forma, aquando da fase de testes, é possível obter-se uma melhor perceção dos resultados.

Tabela 3 - Descrição dos componentes que compõem o sistema elétrico

Componente	Qtd	Função	Modelo
Servomotor	5	Acionamento dos eixos de movimento da máquina (1) e da rotação da árvore (2).	(1) Siemens, 1FT5044-0AF01-1-Z (2) Siemens, 1FT5062-0AK01-2
Unidade de medição dos servomotores	5	Permite determinar a velocidade de rotação e a posição do rotor dos motores dos eixos (1) e da árvore (2).	(1) Siemens, 1FU1030 (2) Siemens, 1FU1050
Termistor PTC	9	Controla a temperatura dos servomotores, impedindo que estes entrem em sobreaquecimento	Siemens, Q63100-P426-M135
Travão de imobilização	1	Assegura a imobilização do eixo que possui o motor com esta funcionalidade, quer seja por ordem do controlo, quer seja numa paragem de emergência ou perda de energia	Siemens, EBD 0.2B
Codificador incremental	4	Controlo da posição e velocidade de movimento nos eixos.	Motores X, Y e Z: Heidenhain, ROD 426.016 Motor B: Leine & Linde
Sensores fins de curso	11	Detetar o fim de curso em cada eixo (1) e as posições avançada e recuada da paleta de ferramentas (1) e da cortina (2). Além destes tem-se, ainda, os sensores que verificam o aperto da paleta e a fixação (ou ausência) do porta-ferramentas (1)	(1) Balluff, BES-516-300-S166-PU-5 (2) Balluff, BES-516-324-E4-C-PU-5

Na Figura 36 tem-se um exemplo das conexões elétricas típicas dos motores da fresadora, incluindo:

- unidade de potência – M;
- o tacogerador – G;
- os sensores Hall – LG.

Salienta-se que a correspondência de cores poderá não estar totalmente de acordo com a existente, mas isso será abordado mais à frente. Nas explicações seguintes, sempre que se referir um pino, a figura utilizada como fonte é esta.

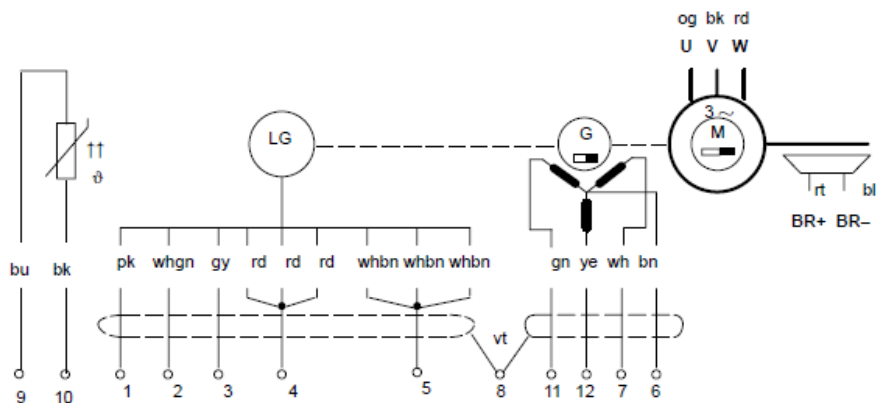


Figura 36 - Conexões elétricas dos servomotores 1FT50 (Retirado de: [44])

3.3.1 Sistema codificador

O sinal de saída do tacogerador será composto por três ondas trapezoidais defasadas entre si 120°, cuja amplitude da onda permite determinar a velocidade do motor. Possui quatro fios, três deles para cada uma das fases T, R e S (pinos 7, 11 e 12, respectivamente), e um quarto é o fio comum (pino 6).

No caso dos sensores de efeito Hall, o sinal de saída será composto por três ondas trapezoidais, defasadas entre si 120°, que permitem determinar a sequência de alimentação dos enrolamentos do estator. Cada sensor é composto por três fios:

- dois para a fonte, estando os fios de 5 VCC dos três sensores ligados em conjunto (pino 4), assim como os fios de 0 VCC (pino 5);
- um fio para o sinal de saída, formando o conjunto S, T e R (pinos 1, 2 e 3, respectivamente).

3.3.2 Termistor PTC

Apresenta uma resistência inferior a 250 Ω quando frio (20° C) e, para uma temperatura de resposta de 155° C \pm 5° C, já será de aproximadamente 1000 Ω . Os fios correspondentes desta unidade correspondem aos pinos 9 e 10. Ao verificar-se a passagem do limite de temperatura, a unidade de disparo 3UN do motor, em combinação com o termistor, irá desativá-lo. Segundo [45], os motores dos eixos possuem 2 termístores ligados em série, e o da árvore apenas um.

3.3.3 Travão de imobilização

O servomotor do eixo Y encontra-se equipado com um travão eletromagnético de desligamento, também conhecido por travão à prova de falhas, que permite controlar o movimento do eixo vertical. A sua designação advém do facto de este ser ativado quando deixa de ser alimentado, o que faz com que o servomotor pare de imediato, mantendo a mesma posição com reduzida ou nenhuma folga.

No que diz respeito a esta família de travões eletromagnéticos, os modelos acionados por mola e de ímanes permanentes são os mais comuns em aplicações que requerem um binário elevado com baixa folga. Neste caso, trata-se de um travão de íman permanente com apenas um disco, modelo EBD.0.2B, com correspondência para a família de motores 1FT504. São compostos por uma caixa magnética com uma bobina eletromagnética e ímanes permanentes, formando a superfície de travagem estacionária. Por sua vez, a superfície de travagem móvel tem um disco de armadura e um cubo que estão montados no eixo do motor. Quando o travão não está a ser alimentado, caso da Figura 37, os ímanes permanentes criam um fluxo magnético que atrai a superfície de travagem móvel contra si, gerando uma força de travagem que impedirá o eixo de rodar [46].

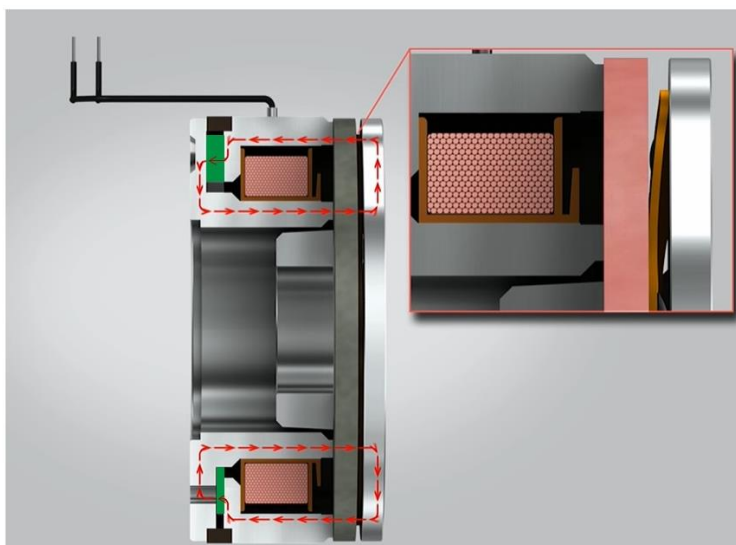


Figura 37 - Comportamento do travão quando não é alimentado (Retirado de: [47])

Ao ser aplicada uma tensão de $24 \text{ VCC} \pm 10\%$ nos terminais da bobina será gerado um campo magnético que vai negar o dos ímanes permanentes, levando à repulsa do disco contra o cubo. Esta situação é visível na Figura 38. Desta forma, o contacto metal-metal por fricção é eliminado, dando lugar a um pequeno espaço de ar que permitirá a rotação do veio do motor [46].

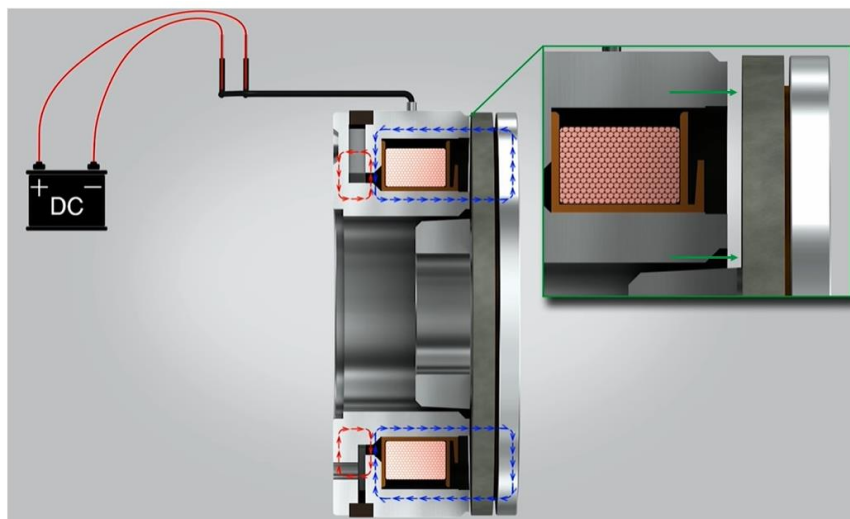


Figura 38 - Comportamento do travão quando é alimentado com 24 V CC (Retirado de: [47])

3.3.4 Codificador incremental

Os motores dos eixos X, Y e Z encontram-se equipados com um codificador incremental, cujas especificações técnicas principais estão indicadas na Tabela 4. Por sua vez, o codificador do eixo B não possui informação detalhada acerca das suas características, o que pode dever-se a uma possível descontinuação. No entanto, pode-se afirmar que possui o mesmo sinal de saída, resolução e tensão de alimentação do modelo anterior.

Tabela 4 - Especificações técnicas do codificador ROD 426 (Adaptado de: [48])

Sinal de saída	RS 422 (TTL)
Resolução elétrica	1 500 ppr
Tensão de alimentação	5 V CC +/- 10 %
Consumo de corrente sem carga	≤ 120 mA
Limite de frequência	≤ 300 kHz
Velocidade mecânica do eixo	≤ 16 000 rpm

Este tipo de equipamento tem como principal objetivo efetuar o controlo da posição e do movimento nos eixos do motor, gerando informação digital. Apresenta como sinais de saída três canais de ondas quadradas, sinais RS422 (TTL), estando dois deles desfasados 90°, canais A e B, e um terceiro, canal Z, que se comporta como ponto de referência.

3.3.5 Sensores de fim de curso

Estes sensores presentes na máquina são do tipo indutivo, normalmente abertos, que geram um sinal de corrente contínua. O seu funcionamento consiste na ativação do sensor e corte da corrente sempre que um metal é detetado a uma distância de 1.50 mm, voltando ao seu estado funcional assim que o problema é corrigido [3]. Tal como é possível observar na Figura 39, existem quatro sensores distribuídos por cada um dos eixos de deslocamento da máquina, que permitem controlar a posição da máquina-ferramenta.

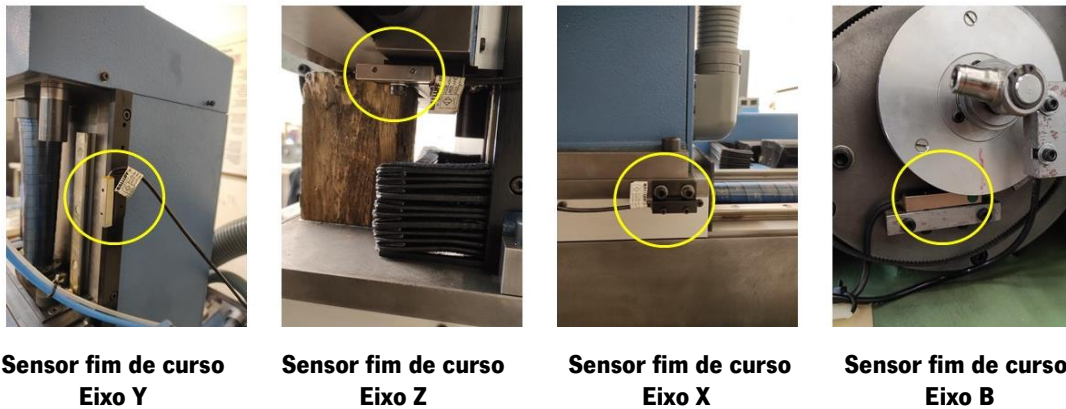


Figura 39 - Sensores fim de curso presentes nos eixos de deslocamento

Existem outros sensores do mesmo modelo e tipo presentes na máquina, cuja aplicação serve essencialmente para informar o controlador sobre a realização de cada processo e respetivo estado. Os diferentes dispositivos e respetiva localização podem ser visualizados na Figura 40.

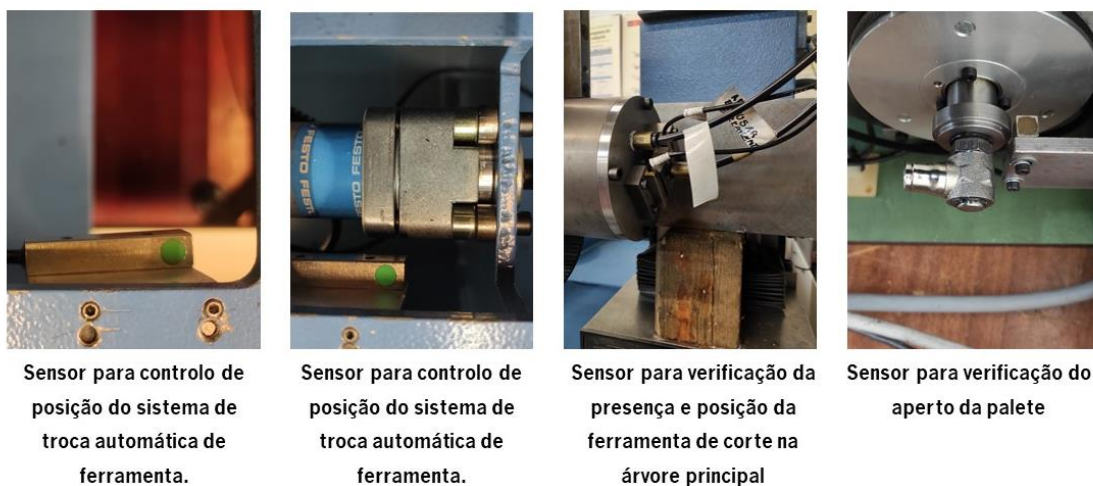


Figura 40 - Localização dos sensores que desempenham funções secundárias

O movimento do resguardo também é controlado por sensores presentes numa das vigas ao longo das quais este irá subir e descer, como se pode ver na Figura 41.

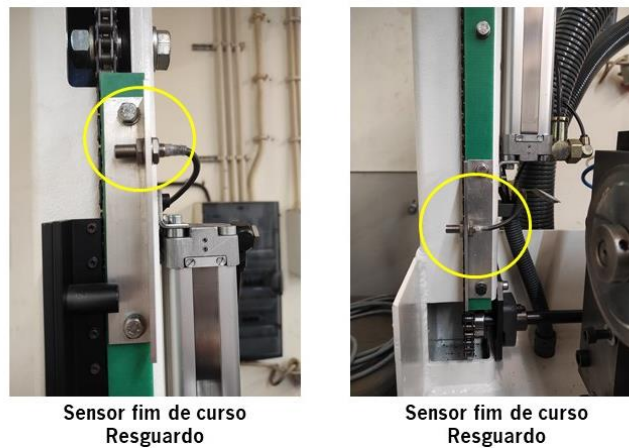


Figura 41 - Sensores presentes na máquina para deteção do movimento do resguardo

Recorrendo ao quadro elétrico da máquina é possível identificar um conjunto de LED numerados de 800 a 830, cuja ativação revela a atuação dos diferentes componentes presentes na máquina. Através de uma identificação prévia e recorrendo a bibliografia já existente, é possível isolar o grupo correspondente aos sensores indutivos, neste caso compreendidos entre os LED 801 e 812, sendo que os restantes dizem respeito aos sensores presentes nos robôs de troca automática de paletes. Na Tabela 5 encontra-se a correspondência entre os sensores e o sistema de controlo da máquina.

Tabela 5 - Correspondência entre o número do sinal no quadro elétrico e o respetivo sensor

Sinal	Sensor
801	Resguardo aberto
802	Resguardo fechado
803	Ferramenta de corte fixada
804	Árvore principal sem ferramenta de corte
805	Palete porta peças fixada à mesa
806	Sensor de pressão do sistema pneumático (min. 5 bar)
807	Ponto de referência do eixo X
808	Ponto de referência do eixo Y
809	Ponto de referência do eixo Z
810	Ponto de referência do eixo B
811	Mesa de troca automática de ferramenta recuada
812	Mesa de troca automática de ferramenta avançada

3.4 Sistema pneumático

O sistema pneumático da máquina garante grande parte das suas funções auxiliares, como a libertação da paleta da peça ou da ferramenta de corte, para além do acionamento do resguardo, deslocamento da mesa de troca de ferramenta ou lubrificação da superfície de corte. Para o desempenho destas funções, este é composto por cilindros pneumáticos de simples efeito, atuados por válvulas solenoides 5/2 com retorno por mola, e por cilindros pneumáticos de duplo efeito com e sem haste, por sua vez atuados por válvulas solenoide duplas 5/2. O cilindro sem haste é utilizado no acionamento do resguardo, o que permite uma maior acomodação do conjunto. As válvulas permitem, também, um acionamento manual, através do acionamento de um botão vermelho, independente da atuação elétrica. A pressão do ar comprimido que circula pela mangueira principal de alimentação deverá ser de 6 bar.

Na Figura 42 apresenta-se uma constituição geral do sistema, destacando-se os símbolos pneumáticos de cada componente, ligações entre eles e a que terminais os solenoides ou sensores irão ligar no barramento.

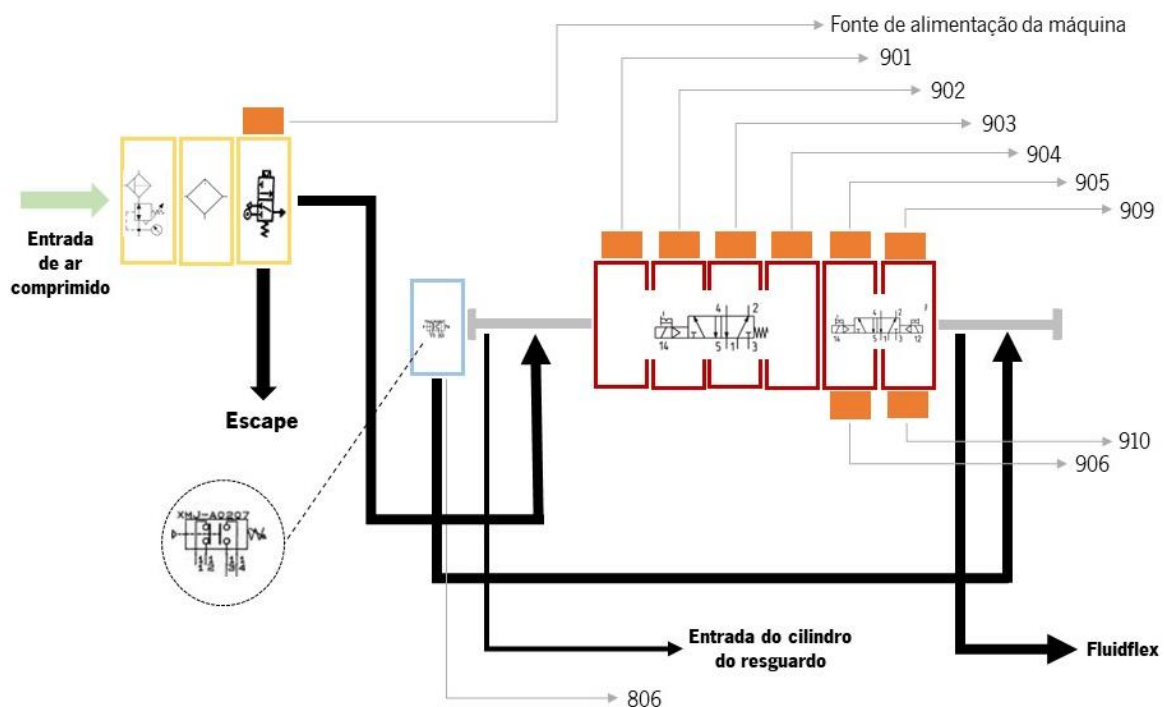


Figura 42 - Esquema do sistema pneumático da máquina

No seguimento do esquema apresentado, na Tabela 6 faz-se a correspondência entre cada terminal do solenoide, que vai ligar ao barramento elétrico, e a função que a válvula desempenha.

Tabela 6 - Correspondência entre o terminal do barramento e o solenoide da válvula

Terminal	Solenoide
901	Libertação da ferramenta
902	Expulsão do ar da árvore (fixação da ferramenta)
903	Bloqueio da mesa giratória B
904	Libertação da mesa giratória para entrada/saída de palete
905	Avanço da paleta de ferramentas
906	Recuo da paleta de ferramentas
907	Reserva
908	Reserva
909	Subida da cortina
910	Descida da cortina

Em termos funcionais, o ar comprimido proveniente da rede passa, primeiramente, por uma unidade FRL, composta por um filtro com uma válvula reguladora de pressão e um lubrificador. Na Figura 42 é possível visualizar esta unidade destacada a amarelo.

Inicialmente o ar passa pelo filtro, onde as impurezas e gotículas de água são removidas por centrifugação e armazenadas num depósito, para serem posteriormente escoadas. De seguida, o ar filtrado passa pela válvula reguladora de pressão, onde é ajustada a pressão desejada para a aplicação (0.5-10 bar), sem esquecer que esta deve ser inferior à da rede. Por último, o ar é lubrificado com vista a assegurar uma vida útil longa dos componentes por onde passará. Ligada a esta unidade tem-se uma válvula solenoide 3/2, com retorno por mola, cujo principal propósito é permitir a passagem do ar tratado para o circuito de válvulas da máquina, quando energizada ou ativada mecanicamente. Para além disto, permite o corte imediato de fornecimento de ar comprimido em caso de emergência. Sempre que deixa de ser alimentada, o sistema é despressurizado para o escape.

Um outro componente de proteção que assegura a viabilidade deste sistema é o pressóstato, apresentado na Figura 43. Este dispositivo encontra-se ligado ao cabo de alimentação comum, depois do bloco de válvulas.




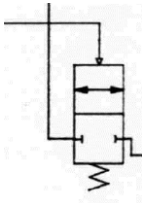
Figura 43 - Interruptor de pressão da *Telemecanique*, modelo XMJ-A0207

A sua função principal consiste no controlo da pressão com a deteção de pressões baixas, tendo sido definido pelo fabricante como ponto de atuação 5 bar. Ao atingir este valor o interruptor muda de estado, ou seja, passa a estar fechado e o contacto elétrico é ativado. O sistema é, então, informado do acontecimento para que possa cortar a alimentação de ar comprimido, de modo a evitar que os equipamentos fiquem sujeitos a subpressão. O equipamento pode operar entre os valores de pressão de 2 bar e 20 bar. No Apêndice 1 encontra-se uma explicação mais detalhada sobre o princípio de funcionamento deste tipo de equipamento e principais propriedades.

A Tabela 7 reúne os componentes deste sistema, mencionando o modelo de cada um, bem como os respetivos limiares de pressão.

Tabela 7 - Componentes do sistema pneumático

Componente	Qtd	Função	Modelo
Filtro e regulador de pressão	1	Remoção de impurezas e gotículas de água, e regulação da pressão de alimentação	Telemecanique, PZD-E13 (F-R-V15) Pressão máxima: 15 bar Pressão de serviço: 0.5 – 10 bar
Lubrificador	1	Lubrificação do ar filtrado	Telemecanique, PZD-L13 (L-V15) Pressão máxima: 15 bar Pressão de serviço: 0.5 – 10 bar
Válvula solenoide piloto	1	Permite a passagem, ou não, do ar para o circuito pneumático (Y1)	Telemecanique, PZD-S13 (S-V15) Pressão máxima: 15 bar

Componente	Qty	Função	Modelo
Válvula direcional 5/2 monoestável	4	Fazem parte do bloco <i>Manifold</i> , sendo a válvula: Y2 – Abertura das pinças da árvore Y3 – Recuo das pinças da árvore Y4 – Bloqueio da mesa rotativa Y5 – Libertação da paleta (fixa na mesa rotativa)	Camozzi, 358.015.02 (Sol. – U73) Pressão de operação: 2.5 – 10 bar Solenoide: 24 V
Válvula direcional 5/2 biestável	2	Fazem parte do bloco <i>Manifold</i> , sendo a válvula: Y6 – Avanço e recuo da paleta de ferramentas Y7 – Avanço e recuo da cortina de proteção	Camozzi, 358.011.02 (Sol. – U73) Pressão de operação: 1.5 – 10 bar Solenoide: 24 V
Válvulas reguladoras de fluxo unidirecional	4	Empregues nas válvulas biestáveis, de modo a regular a velocidade dos cilindros pneumáticos de duplo efeito. São compostas por uma válvula de fluxo variável e uma de retenção, sendo o fluxo do ar regulável apenas na direção da saída do ar	
Válvula de bloqueio	1	Pilotada pneumaticamente, controla o movimento do cilindro, travando-o de imediato em caso de queda de pressão na pilotagem da válvula. Encontra-se montada na entrada do cilindro do resguardo	
Interruptor de pressão	1	Assegura a proteção do sistema contra subpressões	Telemecanique, XMJ-A0207 Pressão máxima: 25 bar Pressão de serviço: 2 – 20 bar
Cilindro pneumático duplo efeito	2	Responsáveis pelos movimentos de avanço e recuo da paleta de ferramentas (1) e do resguardo (2)	(1) Festo, DN-32-300-PPV-4977 Pressão máxima: 12 bar (2) Origa, P210-25 Pressão máxima: 8 bar
Sistema de distribuição pressurizado	1	Assegura a lubrificação da superfície de corte	Bijur, FluidFlex (Tipo: D154) Pressão máxima: 8.5 bar

Uma vez apresentada a constituição geral da máquina, passa-se agora para o desenvolvimento do trabalho em si, com uma intervenção prática e dinâmica no equipamento. Com isto, procura-se proceder à resolução de problemas que bloqueiam ou poderão pôr em causa o correto funcionamento da fresadora, aquando da implementação de um novo sistema de controlo. Além disso, procura-se construir uma base de apoio em termos de informação sobre todos os procedimentos realizados.

4. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

A fase inicial de cada trabalho implica um estudo detalhado e uma procura exigente por informação sobre o funcionamento dos diferentes sistemas, planos de manutenção, especificações técnicas, procedimentos de teste, montagem e desmontagem de componentes. Só a partir desta documentação é que se é capaz de intervir diretamente na máquina com vista a pôr em prática o estudo da sua requalificação.

A intervenção mais recente que a máquina sofreu incidiu em grande parte no sistema mecânico, com limpeza, lubrificação e avaliação do estado de toda a sua estrutura e componentes, uma vez que esta se encontrava em más condições de conservação. Além disso, resolveram-se problemas ao nível dos componentes de lubrificação do sistema pneumático.

Utilizando esta informação como ponto de partida para o desenvolvimento do trabalho desta dissertação, este capítulo irá incidir no estudo do sistema de acionamento e pneumático, bem como questões de afinação e montagem/produção de componentes em falta. Desta forma, contribui-se para o conhecimento do estado real da fresadora, bem como das suas principais necessidades em termos de atualização destes sistemas. Só depois da criação de uma base de informação sustentada é que fará sentido avançar para a introdução de um novo sistema de controlo.

O trabalho apresentado ao longo deste capítulo permitiu desenvolver procedimentos para cada teste, processo de montagem ou afinação, contribuindo para trabalhos futuros que se venham a realizar na máquina.

4.1 Testes de bancada dos sistemas da máquina (sem carga)

Os componentes foram testados sem carga, através de atuação externa por um ou mais equipamentos. Esta secção encontra-se direcionada para uma apresentação dos procedimentos utilizados e resultados obtidos no estudo dos componentes dos sistemas de acionamento e pneumático.

4.1.1 Equipamento necessário

A testagem dos componentes elétricos foi realizada com recurso a material existente nas Oficinas de Formação e Apoio, aproveitando-se esta oportunidade para criar procedimentos que sirvam de apoio pedagógico à utilização deste tipo de equipamentos ou semelhantes.

Assim, utilizou-se o multímetro da Figura 44, que permite medir e avaliar grandezas elétricas.

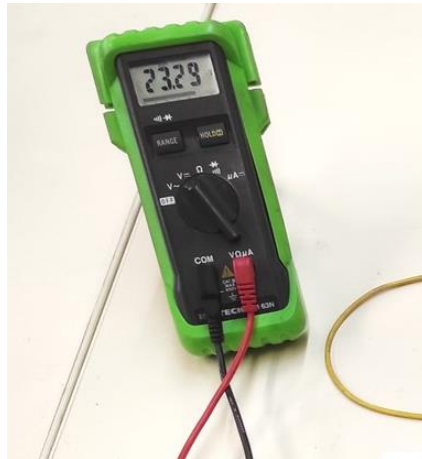


Figura 44 - Multímetro utilizado nos testes realizados

Para alimentar os circuitos a medir recorreu-se a uma fonte de alimentação regulável de corrente contínua, da marca TTI, modelo EL303R, com capacidade até 30 V e 3 A. Esta pode ser observada na Figura 45.



Figura 45 - Fonte de alimentação regulável de 30 V

Para o teste dos motores, tendo em conta a sua natureza, é indispensável a utilização de um variador de frequência para testar o seu funcionamento e o dos seus subsistemas. Este equipamento é capaz de controlar a velocidade de rotação de um motor, aceleração e binário, através da modulação da energia elétrica que lhe é fornecida. O inversor utilizado, visível na Figura 46, é da marca OMRON, modelo

3G3MX2 – A4055. No Apêndice 2 encontra-se uma contextualização teórica do equipamento por forma a entender melhor o seu princípio de funcionamento.



Figura 46 - Variador eletrônico de velocidade da marca OMRON

A medição dos sinais dos sensores dos motores e dos codificadores incrementais a eles associados foi realizada com o auxílio de um osciloscópio da marca Philips – PM3350A, com dois canais de entrada. Como se trata de um equipamento antigo, a ligação entre este e um computador para obtenção dos gráficos de sinal não é compatível. Assim os resultados serão registados diretamente do monitor do osciloscópio. Na Figura 47 é possível observar o aspeto do equipamento. Tal como no caso anterior, dada a complexidade do aparelho, no Apêndice 3 procede-se a uma descrição detalhada dos seus comandos para facilitar a sua utilização.



Figura 47 - Osciloscópio da marca Philips utilizado

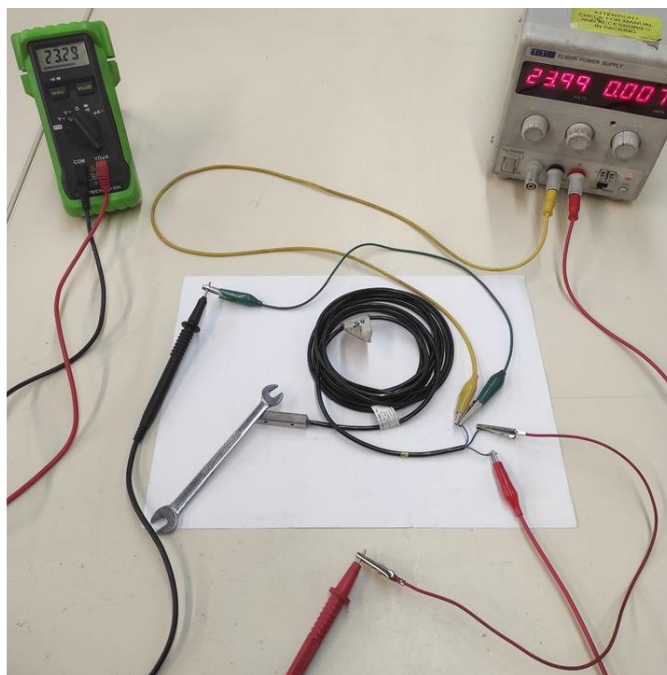
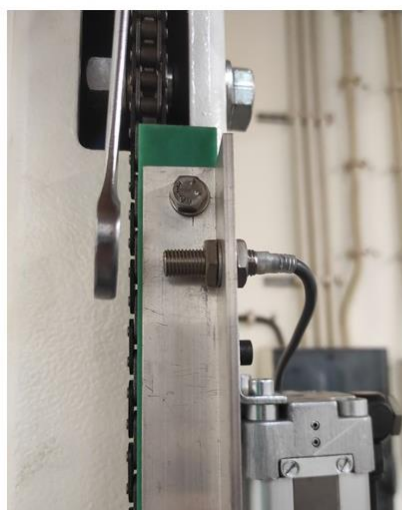
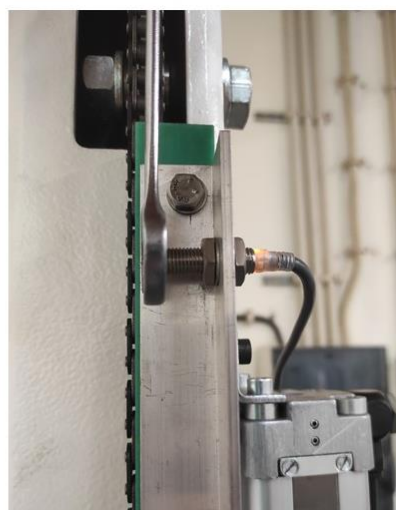


Figura 49 – Ativação do sensor e respectivos valores registados no multímetro e na fonte de alimentação

Os sensores presentes no resguardo funcionam e são testados da mesma forma, diferenciando-se destes últimos na morfologia e na resposta de ativação. Ao detetar um metal, o sensor possui um LED que é ativado, informando que a posição onde está situado foi atingida. Esta passagem pode ser visualizada na Figura 50, para o caso do sensor que deteta o resguardo aberto, sendo demonstrada a mudança de sinal.



Sensor 801 desativado



Sensor 801 ativado

Figura 50 - Processo de ativação do sensor 801 - resguardo aberto

Estes equipamentos encontram-se todos funcionais, variando o sinal corretamente aquando deteção metálica. Salienta-se que os testes foram realizados com os sensores montados, pois retirá-los iria provocar muitos constrangimentos numa nova alocação.

Em caso de dúvida, no Apêndice 4 é possível encontrar uma descrição mais detalhada do procedimento utilizado.

Os sensores, quando devidamente montados e ligados ao barramento da máquina, foram novamente testados com o intuito de se verificar a atuação dos LED destacados a amarelo na Figura 51. Assim, alimentou-se com 24 V os dois fios elétricos azuis situados na parte inferior da figura, responsáveis por alimentar todos as entradas e saídas ligadas, desde os sensores indutivos à atuação das válvulas solenoides que se falará mais à frente.

No caso dos sensores ligados entre as entradas 800 e 830, destacado a vermelho na figura abaixo, a primeira fila de ligações corresponde ao sinal dos dispositivos, a segunda linha a 0 V e a terceira a 24 V. Verificou-se a conformidade entre o respetivo sensor atuado e o LED que lhe está associado, sendo este processo de testagem mais fácil em termos práticos.

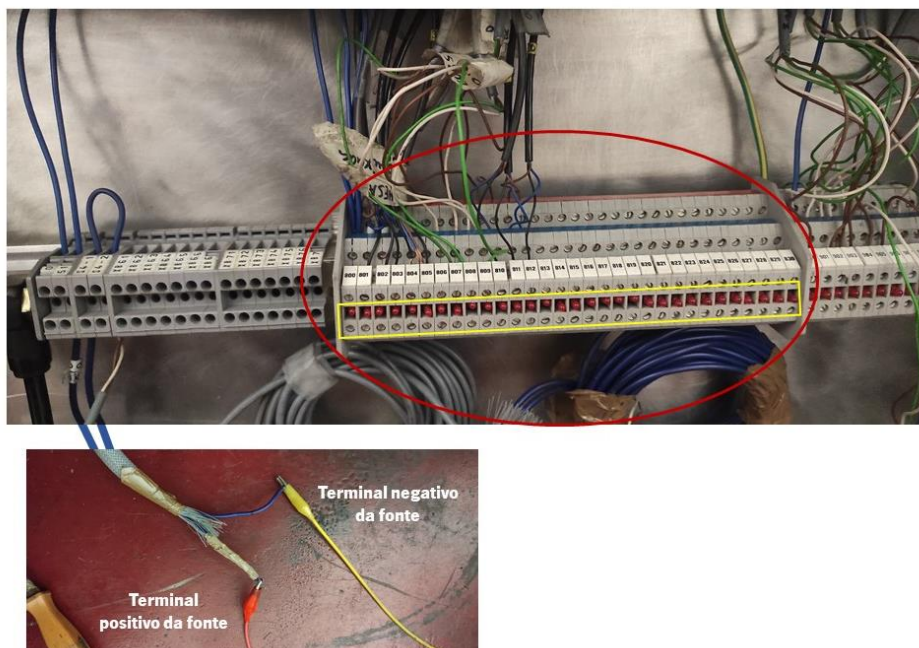


Figura 51 - Barramento elétrico da fresadora e respetivos fios elétricos de alimentação e que alimenta

4.1.3 Servomotores

Os servomotores são compostos por dois conectores responsáveis por transmitir os seus sinais. Um deles corresponde à unidade de potência, ou seja, a alimentação do motor e onde se encontra os terminais do travão de imobilização, utilizados no caso do motor do eixo Y. Ao seu lado encontra-se a unidade de sinal, composta pelo tacogerador, o sensor Hall e o termistor. Os conectores e respetiva cor do fio que vai ligar a cada pino são apresentados na Figura 9. Mais à frente explicar-se-á qual o valor de cada pino.



Figura 52 - Correspondência entre os pinos das unidades do servomotor do eixo Y e os fios da ficha

Os procedimentos seguidos para atuar os motores sem carga consistiu, em primeiro lugar e no caso do motor do eixo Y, em desativar o travão de imobilização. De seguida, realizou-se o processo de determinação do número de polos em cada equipamento, uma vez que esta informação não é fornecida pelo fabricante e influencia diretamente a correta programação do inversor. Reunida todas as condições necessárias para acionar os servomotores, ou seja, conhecido o tipo de motor, número de polos e corrente nominal, procede-se à definição das variáveis no variador. De seguida, descreve-se os processos mencionados anteriormente.

i. Desativação do servomotor do eixo Y

Como o servomotor do eixo Y possui um travão de imobilização é necessário desativar esta unidade, para que seja possível realizar o seu acionamento e determinação do número de polos. Como os sensores do motor utilizam tensões menores de ativação, recorreu-se a uma fonte de alimentação extra de 24 V, não regulável, visível na Figura 53. Deste modo, evita-se interferências entres os testes que se irão realizar neste motor.

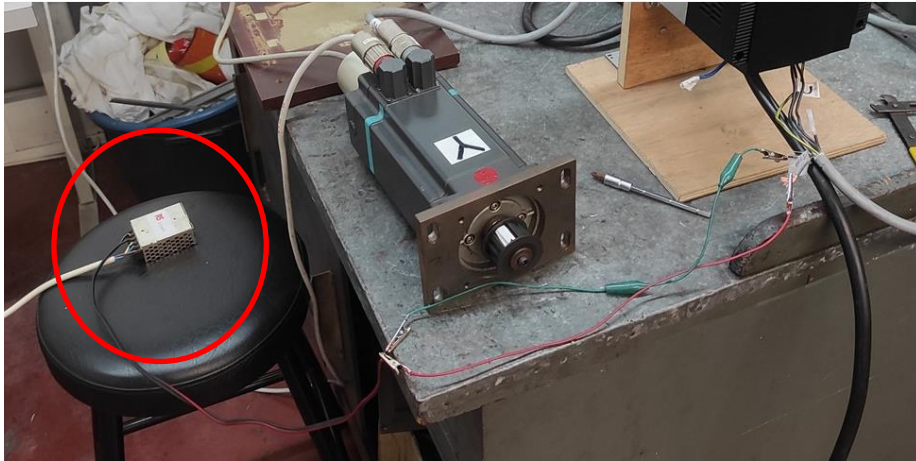


Figura 53 - Desativação do travão do motor Y com recurso a uma fonte de alimentação de 24 V

Do ponto de vista experimental, liga-se o terminal positivo ao pino BR2 (+) e o terminal negativo ao pino BR (-), através da ficha que tem correspondência com a unidade de potência do motor, visível na Figura 52. No caso da utilização de uma fonte de tensão variável, após se efetuar as ligações, estabelece-se uma corrente de 0.4 A e ativa-se o modo corrente contínua. Depois varia-se a tensão até o valor de $24\text{ V} \pm 10\%$, ou até ao ponto em que se ouve uma espécie de clique e o veio passa a poder girar livremente.

ii. Determinação do número de polos dos servomotores

Para este processo, seguiu-se o procedimento apresentado em [43], que consiste em aplicar corrente contínua nas fases do motor: fase U ligada ao terminal positivo da fonte e fases V e W ao terminal negativo. Esta corrente deve ser definida entre os 10 % e os 20 % da corrente máxima do motor, pelo que se definiu 0.88 A para os servomotores dos eixos e 2 A para o servomotor da árvore (para uma tensão de 2.16 V em ambos). Depois de estabelecidas as ligações, assume-se a posição estável inicial como ponto de partida e roda-se o veio por forma a determinar as restantes posições de equilíbrio que este possui. No final de uma volta completa obtém-se o número de pares de polos do motor.

Constatou-se que, dentro do intervalo de percentagem de definição da corrente, quanto maior o seu valor mais difícil é girar o motor. Realizou-se este teste para cada um dos motores e pode-se concluir que todos possuem 3 pares de polos, isto é, 6 polos.

iii. Acionamento dos servomotores através do inversor

Conhecidas as principais variáveis dos servomotores, procedeu-se à ligação das suas fases U, V e W, ao variador de frequência nos terminais definidos para tal, como se pode ver na Figura 54. Como a ficha e o conector da unidade de potência é igual para todos os equipamentos, efetuou-se apenas uma vez este processo, bastando apenas fazer a ligação entre a ficha e conector do servomotor seguinte.



Figura 54 - Ligações a efetuar entre o servomotor e o variador

Uma vez conectado à corrente, o inversor pode ser programado, reiterando-se que este processo deve seguir uma ordem específica, caso contrário pode pôr em causa o teste do motor. Assim, na Tabela 8 enumera-se, por ordem, cada variável definida, deixando para o Apêndice 2 uma descrição mais detalhada de cada seleção, bem como informações importantes a ter em conta.

Tabela 8 - Parâmetros de programação do inversor para o teste dos servomotores

Código	Nome	Descrição
b171	Seleção do modo do inversor	03 – Motor de ímãs permanentes
b084	Modo de inicialização	03 – Eliminação do histórico e inicialização de todos os parâmetros
b094	Definição dos dados alvos de inicialização	02 – Apenas parâmetros registados em Uxxx
b085	Seleção inicial de dados	01 – EU
b180	Ativação da inicialização	01 – Ativar inicialização

Código	Nome	Descrição
Aguardar d001		
A001	Fonte de frequência	02 – Operador digital
A002	Fonte do comando RUN	02 – Operador digital
A003	Frequência base	50 Hz
A004	Frequência máxima	150 Hz
b012	Nível de regulação térmica eletrónica	4.4 A (eixos); 10 A (árvore)
b171	Seleção do modo do inversor	03 – Motor de ímanes permanentes
H104	Seleção do número de polos (motor de ímanes permanentes)	14 (6 polos)
F004	Seleção do sentido de rotação	00 – Sentido dos ponteiros do relógio

Antes de se premir o botão RUN verificou-se se os LED PWR, RUN estão ligados, e o LED PRG desligado. Reunidas as condições, deu-se ordem para os servomotores girarem, com vista a analisar o seu comportamento à medida que se variava a frequência de alimentação.

Procurou-se analisar o comportamento do motor quando sujeito a frequências elevadas ou demasiado baixas, próximas da sua “velocidade zero”. Os servomotores dos eixos, dado serem do mesmo modelo, apresentaram comportamento semelhante. Quando sujeitos a velocidades elevadas rodaram sem bloqueios, até próximo da sua velocidade nominal (para F001 = 160 Hz). Estes resultados foram baseados nos testes realizados por [43] e repetidos para os restantes motores com sucesso. Como não se espera que os motores pratiquem velocidades tão elevadas quando a máquina se encontra em funcionamento, importa focar a atenção no comportamento destes equipamentos para velocidades baixas.

O inversor apresenta um comportamento característico neste tipo de condições, pelo que explicar-se-á primeiro a sua resposta comum antes de se apresentar os resultados obtidos. Ao diminuir-se a frequência de alimentação no inversor, o motor irá abrandar até ao valor mais baixo possível de velocidade, aquele que não coloca em risco ambos os equipamentos, acabando por parar. Para motores mais potentes, é possível acompanhar a sua paragem até uma frequência de 0.5 Hz. No caso de outros motores, para valores de frequência de alimentação entre 1 Hz e 3 Hz, estes começam a ceder e o variador acaba por desligar as suas saídas mais cedo do que o esperado, emitindo o erro E05.3 (sobrecarga).

No seguimento desta informação, ao testar-se os motores dos eixos da fresadora para uma velocidade mínima, acabou por surgir o erro de excesso de corrente do motor, dado serem atingidos valores de corrente entre 5 A e 6 A. A corrente definida no inversor é mais baixa do que a corrente nominal do próprio motor, daí não aguentar este tipo de solicitações. Por forma a estudar este tipo de comportamento, procurou-se determinar a velocidade síncrona do motor (N_s) para cada valor de frequência que conduz à sua paragem. Para tal, recorreu-se à Equação (1), onde f é frequência de alimentação em Hz e o P número de polos do motor [43].

$$N_s = \frac{120f}{P} \quad (1)$$

Concluiu-se que o inversor emitiu um erro para uma velocidade do motor compreendida entre 20 rpm e 60 rpm. Por exemplo, no caso do eixo X, 20 rpm do motor correspondem a 8 rpm da polia movida (relação de transmissão: $i = 2.5$, calculada mais à frente). A rotação da polia conduz a um deslocamento no fuso de 40 mm, uma vez que este tem um passo de 5 mm [45]. Como se testou para condições limite e tendo em conta as próprias limitações do variador de frequência, parte-se do princípio de que em condições normais de funcionamento da máquina, estes consigam praticar velocidades que permitam o menor deslocamento possível, sem comprometer a integridade dos seus componentes e assegurando as cotas desejadas. Na seleção das placas de controlo, deve-se ter em conta de como irá variar a velocidade, de modo a escolher-se uma placa com potência suficiente.

No caso do motor da árvore foi possível observar a sua desaceleração à medida que se diminuiu a frequência de alimentação (F001), acabando por parar nos 0.5 Hz sem dar erro, tal como previsto. Um novo arranque foi feito a partir deste valor, funcionando o motor corretamente. Já para velocidades elevadas, esperava-se que este as executasse sem problemas, o que não foi o caso. Para $F001 \geq 16$ Hz, o inversor emitiu o erro E03.4, que significa excesso de corrente no motor. Inicialmente, pensou-se que o número de polos estivesse errado, procedendo-se a uma nova verificação, mas tal não se verificou. Outro problema verificado foi a dificuldade de sincronização para a definição inicial de $F001 = 6$ Hz, isto é, o motor encravava demasiadas vezes até conseguir obter uma rotação limpa. Entre as causas possíveis podem estar a montagem errada da polia ou algum componente externo solto, mas não se encontrou nenhuma anomalia. Supõe-se, então, que o problema seja interno e possa estar relacionado com algum desalinhamento, com atrito ou lubrificação. Este até pode estar associado ao facto de o motor não aguentar frequências elevadas, daí ser importante analisar este caso num trabalho futuro.

Ainda sobre o teste dos motores, reforça-se a consulta do Apêndice 2, onde se chama atenção a alguns problemas que podem acontecer aquando da programação e que bloqueiam o inversor.

4.1.4 Dispositivos de medição

Avaliado o acionamento motores, aproveitou-se a instalação e programação do inversor, para testar o funcionamento dos dispositivos de medição presentes nos equipamentos rotativos. Colocou-se, então, o motor a girar com uma velocidade baixa ($F_{001} = 8 \text{ Hz}$) e leu-se os sinais a medir com o auxílio do osciloscópio e da fonte de alimentação regulável. Nesta secção irá apresentar-se as ligações efetuadas para cada teste e os resultados obtidos. Os valores utilizados para as principais variáveis dos equipamentos de medição são apresentados na Tabela 9. No Apêndice 3 encontra-se o modelo do osciloscópio utilizado, bem como os passos a seguir na realização de uma medição

Tabela 9 - Valores utilizados nos testes dos sensores: (a) fonte de alimentação; (b) osciloscópio

(a)			(b)		
	Fonte de alimentação [modo CC]		Osciloscópio		
	Tensão [V]	Corrente [A]	Canal A	Canal B	TB
Codificador X	2.70 - 3.20	0.200 - 0.220	2 V	0.2 V	50 ms
Codificador Y	4.30 - 5.00	0.150 - 0.170	0.2 V	0.2 V	50 ms
Codificador Z	-----		-----		
Codificador B	3.10-3.35	0.170 - 0.195	2 V	50 mV	50 ms
Sensor Hall	5	0.018	5 V	0.5 V	50 ms
Tacogerador	5	0.018	1 V	0.1 V	50 ms

No que diz respeito à unidade de sinal dos motores, numa fase inicial dos testes não se obteve qualquer tipo de resultado coerente na leitura dos sinais. Tal facto suscitou algumas dúvidas acerca da coerência dos dados presentes na ficha técnica desta unidade, principalmente no que diz respeito à correspondência de cores entre os fios e os pinos do conector. Posto isto, foi necessário verificar a continuidade entre cada pino e os diferentes fios eléctricos existentes, obtendo-se uma nova relação entre eles. Esta atribuição já se encontra correta na Figura 52 e é a partir dela que se realizou os testes aos sensores.

i. Tacogerador

Começando pelo tacogerador, o circuito de teste utilizado encontra-se representado na Figura 55. Este consiste na ligação de cada uma das fases às pontas de prova, e as referências da ponta de prova ao fio comum. Para este teste foi necessário utilizar condensadores de $22\ \mu\text{F}$ entre o sinal de cada fase e o terminal negativo da fonte, de forma a obter-se um sinal sem ruído. Basicamente, ao ligar-se estes componentes faz-se com que os elementos de corrente alternada que alteram o sinal sejam dirigidos para a Terra, ficando o sinal limpo.

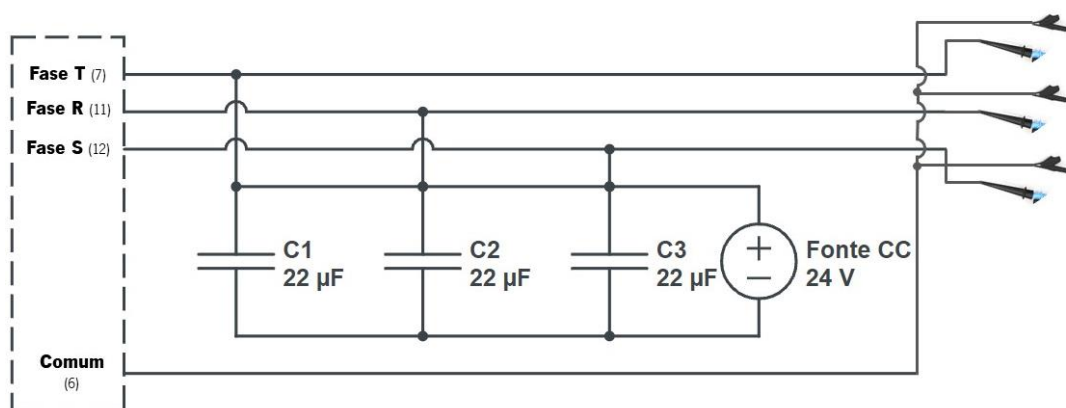


Figura 55 - Circuito elétrico do teste do tacogerador

Os resultados obtidos foram de encontro ao esperado, obtendo-se uma onda aproximadamente quadrada e desfasada 120° das restantes, relação visível em cada divisão do osciloscópio. Como exemplo, na Figura 56 pode-se observar os sinais obtidos na medição entre as fases T e R do tacogerador do motor do eixo B.

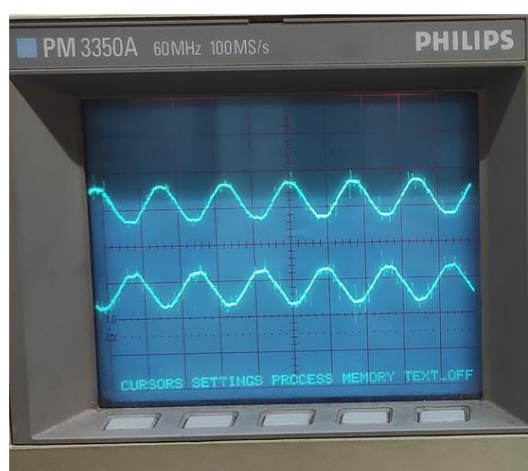


Figura 56 - Sinais obtidos entre as fases T e R do tacogerador do motor B

ii. Sensor Hall

O circuito de teste utilizado para o sensor Hall é mostrado na Figura 57. Neste caso foi necessário adicionar uma resistência de 10 k Ω entre o terminal de 5 V e o sinal a ler, de modo a garantir que o valor do sinal mantém no nível alto (entre 2-5 V) até a detecção do campo magnético, situação em que passa a nível baixo (entre 0-1 V).

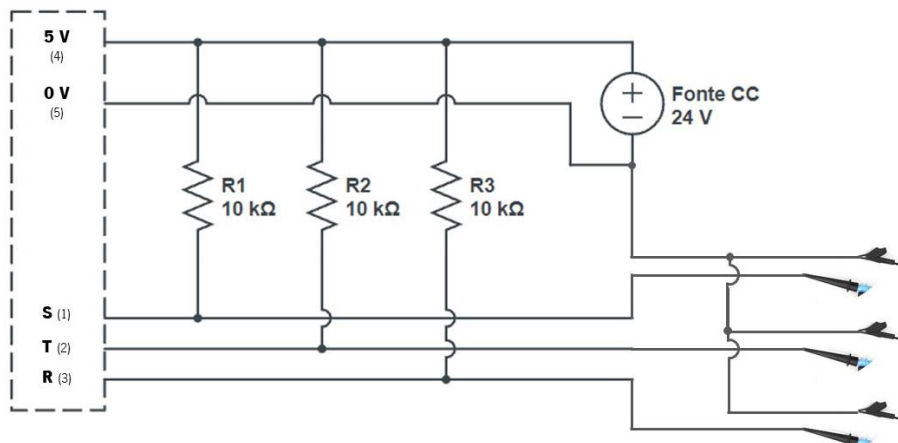


Figura 57 - Circuito elétrico do teste do sensor Hall

Todos os sensores hall mostraram resultados positivos, apresentando ondas quadradas desfasadas 120° em cada par testado. Isto pode ser confirmado pela Figura 58, onde se mede as fases S e R do sensor Hall do motor da árvore.



Figura 58 - Sinais obtidos entre as fases S e R do sensor Hall do motor da árvore

iii. Termistor

Para se testar o sensor de temperatura recorre-se ao multímetro, ligando-se os seus terminais aos pinos 9 e 10 da unidade de sinal. Em condições normais de temperatura e com o motor frio, a resistência deste sensor deve ser inferior a 250 Ω , o que se verificou para todos os motores da fresadora.

iv. Codificador incremental

No caso dos codificadores, também existiu problemas na obtenção de sinal numa primeira fase, devido ao facto de a ficha técnica estar errada ou nem existir, como é o caso do codificador do eixo B. Assim, foi necessário abrir o equipamento para se ter acesso à ficha onde estão ligados os fios e verificar a lógica do circuito, em alguns casos através de um multímetro, para medir a continuidade. Na Figura 59 é possível visualizar o interior do codificador do motor do eixo X, alcançado depois de se ter desapertados os parafusos que permitem empurrar para fora a carcaça do equipamento.

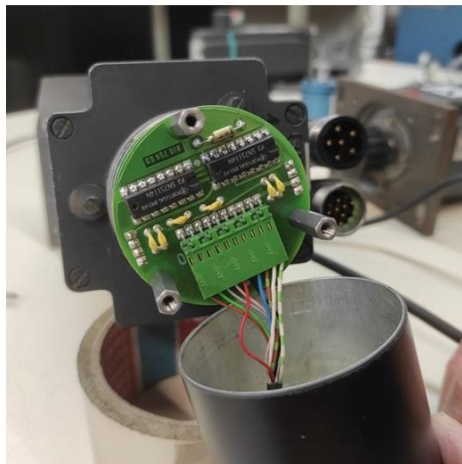


Figura 59 - Interior do codificador do motor do eixo X

Na Tabela 10 apresenta-se a nova legenda de cores para cada fio elétrico dos codificadores.

Tabela 10 - Correspondência entre o pino e o fio elétrico dos codificadores

		Correspondência pino/fio elétrico									
		Fonte de alimentação				Sinais incrementais					
		5 V	Sensor 5 V	0 V	Sensor 0 V	A +	A -	B +	B -	Z +	Z -
Eixos	X e Z	Castanho/Verde	Azul	Branco/Verde	Branco	Castanho	Verde	Cinza	Rosa	Vermelho	Preto
	Y	Castanho/Verde	Castanho	Branco/Verde	Branco	Verde	Amarelo	Roxo	Vermelho	Cinza	Rosa
	B	Vermelho	-----	Azul	-----	Castanho	Roxo	Verde	Branco	Amarelo	Preto

●-----● ●-----●

Nota: A linha do sensor está ligada no codificador com a linha de alimentação correspondente

Para efeitos de teste, as ligações efetuadas ao osciloscópio e à fonte de alimentação que melhores resultados proporcionaram foram as seguintes:

- ligar os fios de 5 V e 0 V do codificador aos terminais positivo e negativo da fonte, respetivamente;
- ligar o fio do sinal (canal A/B/Z) a medir a uma das pontas de prova do osciloscópio, e a referência desta ao terminal negativo da fonte;
- repetir o último procedimento para outro dos sinais do codificador, caso se pretenda comparar as leituras (ativar o aparecimento dos dois canais no osciloscópio).

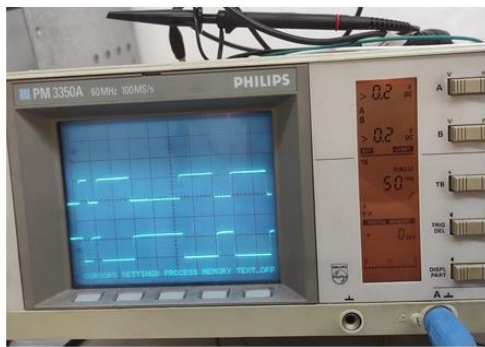
Constatou-se em alguns ensaios que ao ativar-se o modo CC da fonte, programada com uma tensão de 5 V e uma corrente de 0.150 A (de acordo com a ficha técnica), a tensão baixava para valores fora do intervalo do nível alto do codificador. Para se conseguir obter uma variação do sinal no osciloscópio, como previsto, foi necessário variar a corrente para valores ligeiramente maiores, sempre com o cuidado de não danificar os equipamentos.

Por outro lado, nos casos em que se visualizava interferências na leitura optou-se pela utilização de um condensador entre o sinal principal e o seu diferencial, com a mesma capacitância dos anteriores (22 μ F), obtendo-se melhorias significativas na resposta. Verificou-se, também, que a leitura individual de cada canal apresentava um sinal mais limpo do que quando se ativava os dois, principalmente quando se ligava as referências das pontas de prova aos canais diferenciais. As interferências encontradas podem estar associadas:

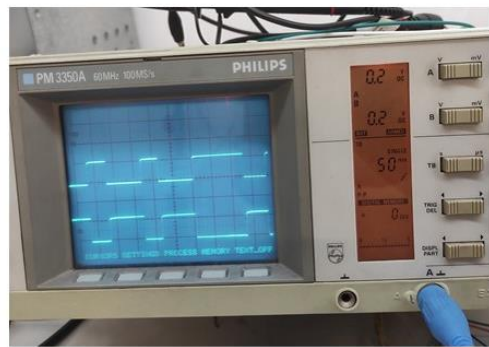
- ao tamanho dos cabos;
- ao facto de alguns terminais dos codificadores já terem fichas, para serem posteriormente ligados às placas de controlo;
- à sobreposição das ligações no circuito de teste, uma vez que, ao testar individualmente cada canal e o seu diferencial, obtinha-se um sinal limpo.

Tendo em conta os resultados obtidos e as condições em que foram realizados os testes, concluiu-se que, à exceção do codificador do motor do eixo Z, os restantes funcionam corretamente e estão aptos para controlar o movimento dos servomotores. Na

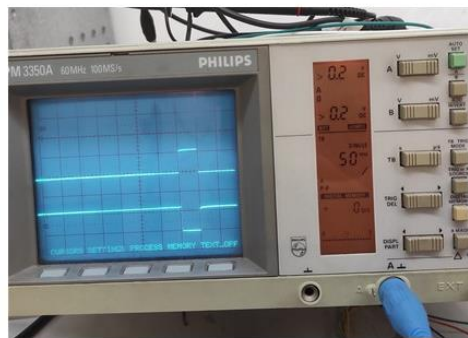
Figura 60 pode-se observar a relação entre cada canal e o seu diferencial, comprovando a relação de inversão existente entre eles.



(a)



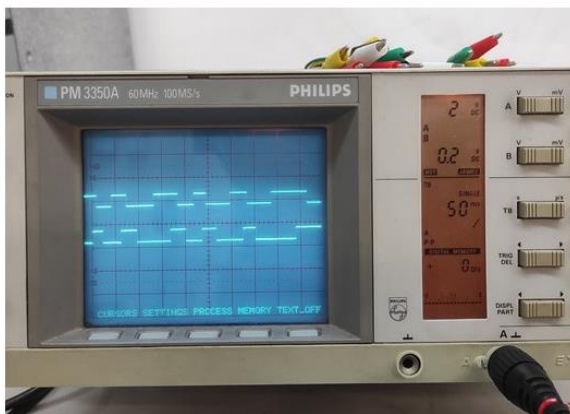
(b)



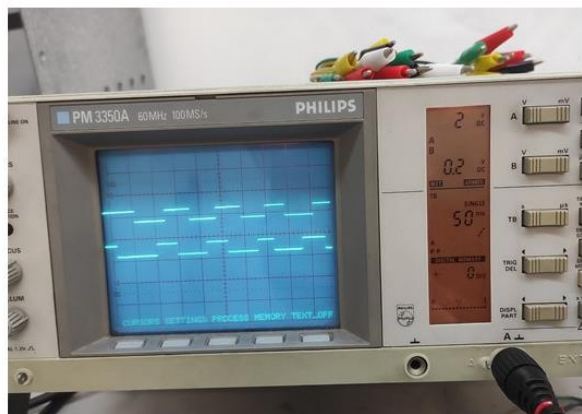
(c)

Figura 60 - Leitura dos canais do codificador do eixo Y: (a) A+ e A-; (b) B+ e B-; (c) Z+ e Z-

Em termos das relações entre canais diferentes, na Figura 61 mostra-se a leitura obtida para o codificador do motor X. Na Figura 61(a) o motor está a girar no sentido horário, com o canal A a surgir primeiro que o canal B, e na Figura 61(b) acontece o contrário, indicando que o motor está a girar no sentido anti-horário.



(a)



(b)

Figura 61 - Leitura dos sinais do codificador do motor X: (a) canais A+ e B+; (b) canais B+ e A+

Na Figura 62 apresenta-se a leitura dos canais A e Z do codificador do motor Y, onde surge o ponto em que o canal Z+ emite sinal durante 90°, o que significa que o codificador realizou mais uma revolução.

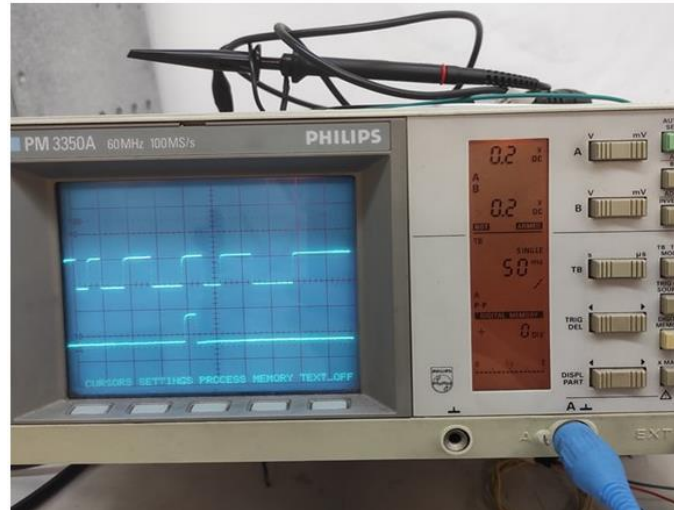


Figura 62 - Leitura dos canais A+ e Z+ do codificador do motor Y

4.1.5 Codificador do motor do eixo Z

Como solução para o equipamento em falha, contactou-se alguns dos principais fornecedores europeus, com base nas especificações do codificador original. Os resumos das propostas recebidas estão presentes no Apêndice 5, para posterior seleção e encomenda em caso de concordância.

Dado que todos os codificadores da máquina têm uma resolução de 1 500 ppr, procurou-se um novo equipamento com esta resolução. Mas isto não significa que não se possa usar um codificador com menor resolução, este até acaba por ser mais barato, no entanto, é necessário ter em conta que terá menor capacidade de leitura

Ainda sobre este assunto, numa tentativa de utilizar um codificador existente nas oficinas com uma resolução de 400 ppr, efetuou-se um estudo acerca da resolução mínima que os codificadores dos eixos de translação devem de ter.

Segundo [52], a resolução mínima que um codificador deve de ter, é dada pela seguinte equação (2):

$$ppr = \frac{\text{passo fuso}}{\text{resolução linear}} \quad (2)$$

A resolução linear do movimento do eixo Z pode ser determinada a partir do passo do fuso e da relação de transmissão da cadeia cinemática deste eixo. Esta última é dada pela equação (3):

$$i = \frac{Z_2}{Z_1} \quad (3)$$

Onde i é a relação de transmissão, Z_1 é o número de dentes da polia motora e Z_2 número de dentes da polia movida [53]. Os dados das duas últimas variáveis são 12 e 30, respetivamente. Logo, $i = 2.5$, ou seja, por cada volta da polia maior, a polia menor e, conseqüentemente, o motor e codificador dão 2.5 voltas.

Sabendo que o passo do fuso é 5 mm [45] e tendo em conta a relação de transmissão calculada, concluiu-se que quando a polia do motor dá uma volta, o avanço do fuso será 2 mm. Com base na equação (2) e assumindo o último valor obtido como o passo, chega-se à conclusão de que para a resolução de 1 500 ppr utilizada, tem-se uma resolução linear de 0.001 mm.

Voltando a aplicar a equação (2), desta vez para um passo de 2 mm provocado por 1 volta da polia do motor, e para uma resolução linear de 0.001 mm, a resolução mínima que o codificador deve de ter é de 2 000 ppr ou mais. No entanto, este valor pode variar de acordo com o tipo de codificação aplicada neste modelo de codificadores com saída em quadratura, podendo ser utilizados três tipos: X1, X2 ou X4. A codificação X1 apenas conta os flancos ascendentes do canal A. A segunda conta os flancos ascendentes e descendentes do canal A, o que irá duplicar a resolução do codificador. Por sua vez, a última faz o mesmo que a codificação X2, mas para os dois canais, aumentando 4x a resolução do codificador. Assim, conforme o tipo de codificação que o codificador utiliza, a resolução mínima necessária obtida deve ser dividida pelos fatores 1, 2 ou 4, respetivamente [52].

Por esta lógica, para a resolução de 2 000 ppr obtida anteriormente, se for utilizada uma codificação X4, a resolução que o codificador realmente precisa será de apenas 500 ppr. A possibilidade de escolha da codificação a utilizar pode contribuir para um processo de substituição mais económico, daí ser algo a ter em conta. No caso prático em questão, não se conhece o tipo de codificação dos dispositivos, pelo que se supõe que este assunto esteja relacionado com a programação do controlo da máquina.

4.1.6 Sistema pneumático

Para a realização do teste deste sistema, começou-se por alimentá-lo através da rede pneumática, ligando a mangueira (1) à torneira da rede que se encontra atrás da fresadora, ao lado do antigo controlo da máquina.

Depois disto, é necessário ajustar a pressão fornecida através do regulador presente na unidade de tratamento de ar comprimido, visível na Figura 63. Uma vez que o máximo da escala do seu manómetro (2) é de 12 bar, a pressão a regular deve ficar entre 6 a 7.2 bar (50 a 60 % da pressão máxima), de modo a preservar o seu mecanismo [54]. Além disso, a pressão de trabalho nominal em sistemas pneumáticos comuns costuma variar entre 6 bar e 8 bar, devendo esta ser constante de modo a garantir a velocidade dos cilindros e que as forças dos elementos pneumáticas sejam suficientes [55]. Isto vai de encontro aos esquemas elétricos da fresadora que solicita uma pressão de 6 bar para o funcionamento do sistema. Assim, puxou-se o manipululo (3) do regulador para cima de modo a ficar destravado, o que permitiu rodá-lo para uma pressão maior ou menor até ser atingida a pressão de trabalho.

Reunidas as condições necessárias, ativou-se a passagem de ar para o sistema pneumático da máquina, numa fase inicial de testes, através do acionamento manual da válvula de controlo (4).



Figura 63 - Unidade de tratamento de ar da fresadora

O acionamento manual de cada válvula, através da rotação com uma chave de fendas dos botões destacados a vermelho na Figura 64, permitiu identificar qual a sua função e confirmar se a desempenhava corretamente.

Quanto às válvulas biestáveis, foi necessário ajustar a válvula reguladora de fluxo através de uma chave de fendas, de modo a obter uma velocidade de avanço e recuo mais controlada dos cilindros. Os pontos a regular encontram-se destacados a amarelo na Figura 64



Figura 64 - Bloco de electroválvulas do sistema pneumático da fresadora

De modo geral, as válvulas funcionam corretamente e cumprem o proposto, não tendo sido encontradas fugas de ar. No entanto, foram encontrados alguns problemas ao nível da mesa B, mais concretamente quando se dava ordem à quarta válvula do bloco. Esta válvula encontra-se ligada ao veio oco do sistema pneumático de elevação da mesa de trabalho, tal como se pode ver na Figura 65(c). Em certos acionamentos a pressão do ar não era suficiente para vencer a força das molas existentes no conjunto de retração da mesa, visíveis na Figura 65(a), e empurrá-la para cima.

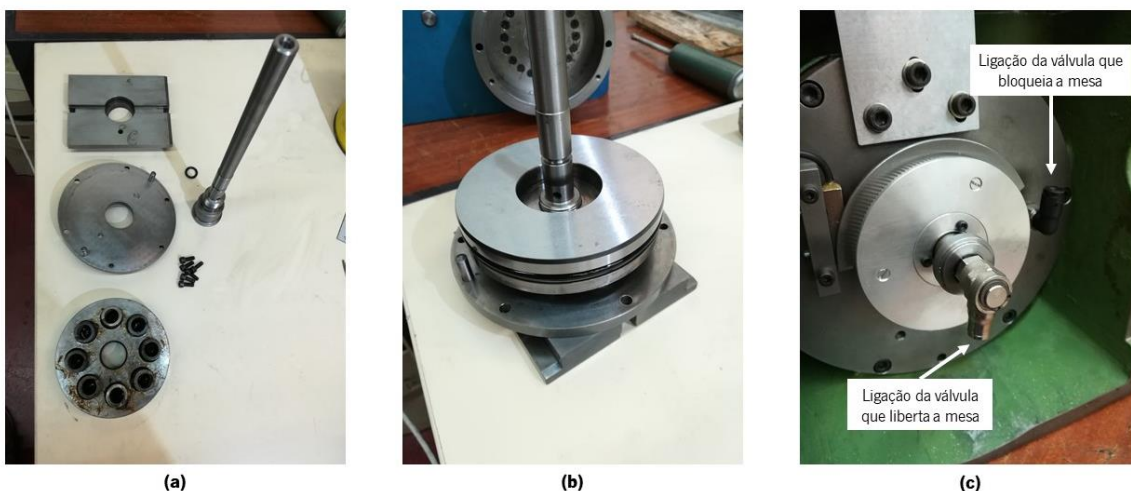


Figura 65 - Eixo B - (a) mesa, conjunto de retração e veio oco do sistema pneumático; (b) montagem dos componentes anteriores; (c) entradas do sistema pneumático. Retirado de: [45]

Ao testar a elevação da mesa com a alimentação de ar comprimido diretamente na conexão rápida que existe no veio, a mesa realizou o movimento esperado sem problemas, como se pode observar na Figura 66. A vermelho está destacado o pino de bloqueio, que tem um homólogo do lado oposto, sendo ambos responsáveis por permitir a passagem da paleta quando o sistema de retração da mesa é alimentado corretamente.

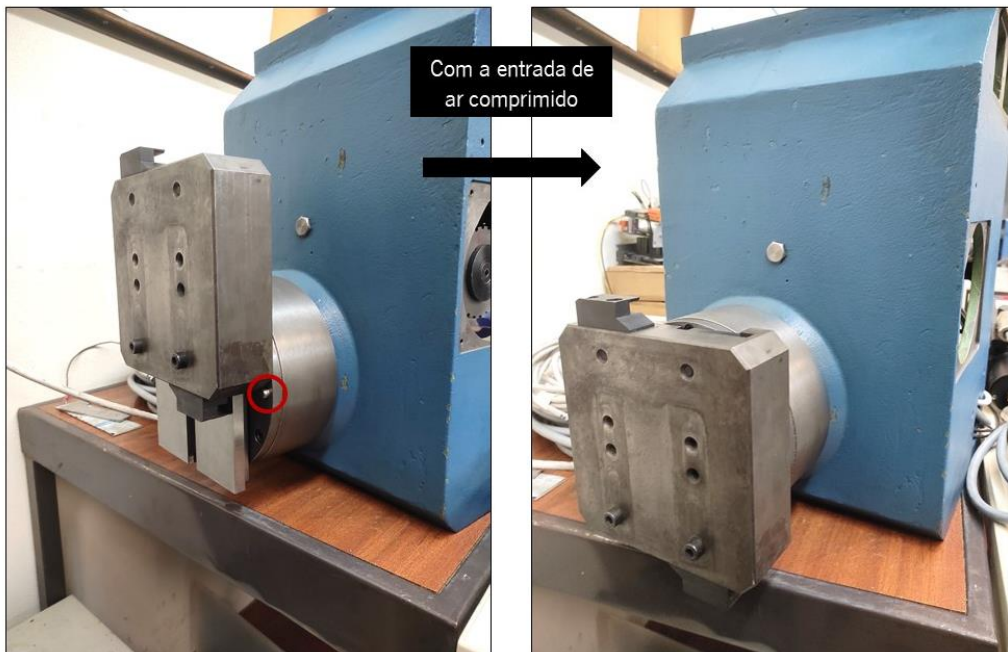


Figura 66 - Colocação da paleta na mesa B

Tendo em conta o comportamento deste sistema nas diferentes condições de alimentação, assumiu-se que o problema pode estar associado a quedas de pressão da própria rede de ar comprimido da universidade, comuns em certas alturas do dia. Para certas aplicações, pode ser necessário utilizar uma fonte de ar comprimido extra que seja mais estável no fornecimento.

Em relação ao pressóstato, este ainda se encontra funcional, mas de certa forma ultrapassado, ou seja, ele é capaz de detetar a queda de pressão e enviar o sinal de corte (fio castanho – 24 V, fio branco – sinal), mas demora mais tempo a realizar esse processo do que o suposto. Para resolver este problema, definiu-se como limiar mínimo 6 bar, pressão de trabalho, ao invés da pressão definida nos esquemas elétricos de 5 bar. Desta forma, previne-se más condições de funcionamento e salvaguarda-se os equipamentos que compõem este sistema, uma vez que, antes de atingir 5 bar, o pressóstato já tem emitido o sinal ao controlo. Neste ponto, destaca-se o facto de a definição do limiar mínimo de pressão ser um processo complicado ao nível da exatidão, pois consiste na regulação da altura de uma

fita vermelha presente no mostrador do equipamento. Existem equipamentos mais sofisticados atualmente, pelo que, tendo em conta estas duas vulnerabilidades, deveria ser uma troca a ponderar.

Ainda neste sistema, testou-se o funcionamento dos solenoides quer da válvula de controlo da passagem do ar, quer das válvulas que compõem o bloco. Estes correspondem aos componentes do modelo U73 visíveis na Figura 64 e possuem três fios elétricos:

- o fio branco corresponde a 0 V;
- o fio verde corresponde à Terra;
- o fio castanho recebe o sinal de 24 V (tensão máxima do solenoide é 30 V).

Em termos práticos, programou-se a fonte de alimentação regulável para uma tensão de 24 V e corrente reduzida, ligando-se o fio castanho ao terminal positivo e os outros dois fios ao terminal negativo. Assim, obteve-se a ativação do solenoide, ouvindo-se uma espécie de clique.

Para ligar ao barramento elétrico, os terminais associados ao sistema pneumático apresentam uma configuração diferente dos anteriores. Na primeira linha mantêm-se os 24 V, já na segunda e terceira tem-se a linha de 0 V e a Terra, respetivamente. Na Figura 67 pode-se ver a disposição dos fios elétricos nesta secção do barramento e os LED que serão ativados sempre que um dos solenoides é atuado através do PLC.

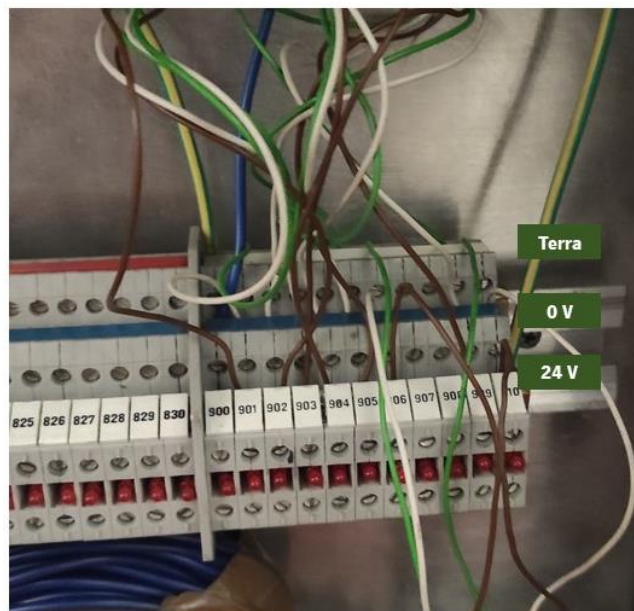


Figura 67 – Secção do barramento elétrico direcionada para o sistema pneumático

4.2 Montagem e afinação da árvore

Numa primeira fase, existiu a necessidade de desmontar o bloco do pistão da árvore para que fosse possível corrigir a posição da correia e preparar a montagem do motor da árvore. Este processo deu início a um conjunto de procedimentos de desmontagem deste bloco, que são apresentados no Apêndice 6.

Ao realizar esta ação, foram encontrados outros problemas na árvore, tais como:

- o cone e respetivos componentes associados não possuíam movimento de rotação, devido ao aperto máximo dos pinos;
- instabilidade do sistema aquando da introdução de ar comprimido, movendo-se mais na parte inferior do pistão;
- encravamento da extremidade roscada do pistão, na saída do ar comprimido, possivelmente devido à falta de lubrificação;
- curso insuficiente para abertura das garras e acoplamento da ferramenta.

Alguns dos problemas poderiam ficar resolvidos com a lubrificação total do sistema, polimento dos pinos e sucessivas tentativas de aperto/desaperto por forma a atingir a posição de equilíbrio. No entanto, foi necessária uma intervenção mais profunda que permitisse obter alguns dados sobre a configuração interna da árvore.

Posto isto, uma vez que o acesso a este bloco para desmontagem na própria fresadora é muito difícil e pouco seguro, foi necessário desacoplar a árvore da máquina e proceder à respetiva análise e afinação do sistema numa bancada de trabalho. Deste processo, fez parte o rearranjo da configuração das molas de disco, que são responsáveis pelo curso do fuso quando a árvore é alimentada com ar comprimido. Ou seja, quando a válvula responsável por expulsar a ferramenta é atuada, as molas dispostas no fuso numa configuração série-paralelo são comprimidas, provocando a abertura das pinças. Deixando de alimentar o sistema com ar comprimido, as molas recuam exercendo uma força capaz de fechar as garras e fixar a peça. A força que este conjunto exerce deve ser calibrada de modo a não ser nem demasiado baixa, provocando o escorregamento do componente que segura, nem demasiado alta, dado o risco de deformação [56].

Assim, depois da contagem das molas e feitas as medições necessárias, testou-se vários tipos de empilhamento por um processo de tentativa erro. Este consistiu em variar o número de molas em

paralelo e em série, até se obter a combinação com curso suficiente para a entrada do porta-ferramentas e respetiva fixação, sem colocar em causa a rotação da árvore. Além disso, também tinha de se ter em conta a fixação do cilindro e do batente, que era impossibilitada pelo comprimento elevado do conjunto de molas.

Uma vez que não se conhece o modelo das molas presentes no fuso da árvore, com base nas medições realizadas, recorreu-se ao catálogo da SPIROL para se obter uma analogia de especificações técnicas, presentes na Tabela 11. Deste modo, assumem-se estes valores para calcular o curso teórico das molas sem e com carga.

Tabela 11 - Especificações técnicas do modelo de molas série C, da marca SPIROL [57]

Ø_{ext}	28 mm	Material padrão t < 1,25 mm, logo corresponde a aço de alto carbono (tratamento térmico: HV425-510)
Ø_{int}	14.20 mm	
t	0,80 mm	
h_o	1,80 mm	
l_o	1,00 mm	Acabamento
h_o/t	1,25	Revestido de fosfato, lubrificado

O cálculo do comprimento do conjunto de molas sem uma carga aplicada é dado pela seguinte equação (4) :

$$L_0 = i \cdot (h_0 + nt) \text{ [mm]} \quad (4)$$

Onde [58]:

- h_o – altura do cone livre do disco (mm);
- i – número de conjuntos com montagem unidirecional numa montagem combinada;
- n – número de molas num bloco com a mesma direção;
- t – espessura do material da mola (mm).

Por sua vez, o comprimento do conjunto das molas quando aplicada uma força é dado pela equação (5), em que z é curso total realizado pelo conjunto [58]:

$$L = L_0 - z \text{ [mm]} \quad (5)$$

Das medições realizadas em relação ao deslocamento do roscado da ponta do fuso totalmente recuado e avançado, para um conjunto total de 159 molas, concluiu-se que o seu curso é de 9 mm. Este valor corresponde ao deslocamento total (z). A partir dele conseguiu-se determinar o deslocamento de cada bloco paralelo (s), com recurso à equação (6). Assim, é conhecida a deflexão de cada mola em relação à altura livre do cone do disco [58].

$$z = \dot{i} * S_{série} \quad (6)$$

Com base no valor de z e na Tabela 11, obteve-se o resultado das Equações (4) e (5) para as diferentes configurações experimentadas, apresentando-se no Apêndice 7 uma tabela resumo.

A combinação que ficou definida está representada na Figura 68, à qual corresponde um comprimento do conjunto sem carga de 157.20 mm. Na presença de carga, o comprimento será de 148.2 mm, para uma deflexão de cada bloco da série de 0.30 mm, ou seja, 30 %. De ressaltar que este valor de deflexão despreza a deflexão que resulta da montagem do fuso na árvore, dado ser residual.

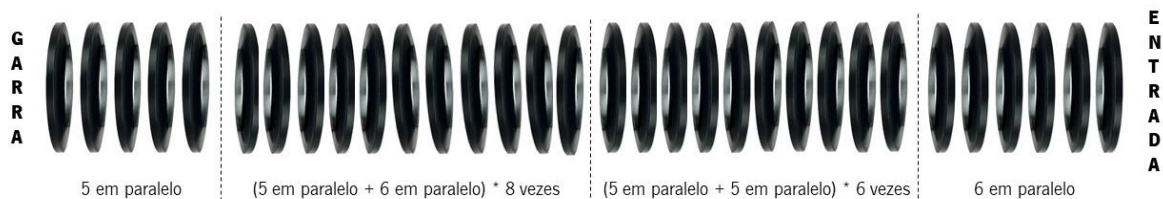


Figura 68 - Configuração final definida

O processo realizado anteriormente ficou pautado pelas sucessivas montagens e desmontagens do cilindro e do batente na extremidade do fuso, números (1) e (2) da Figura 69b. Dado que à medida que se aperta o fuso é necessário bloquear o batente para que este não rode, houve a necessidade de adaptar uma chapa à configuração dos furos deste componente, de modo a facilitar o processo de afinação. Esta encontra-se representada na Figura 69(a) e foi feita com recurso à perfuradora existente nas oficinas. Na Figura 69(b) destaca-se os pontos de encaixe da chapa na árvore, através de pinos. De ressaltar que o manuseio da chapa carece de algum cuidado pois pode possuir arestas cortantes. No Apêndice 6 encontra-se um documento de apoio à montagem desta secção da árvore.

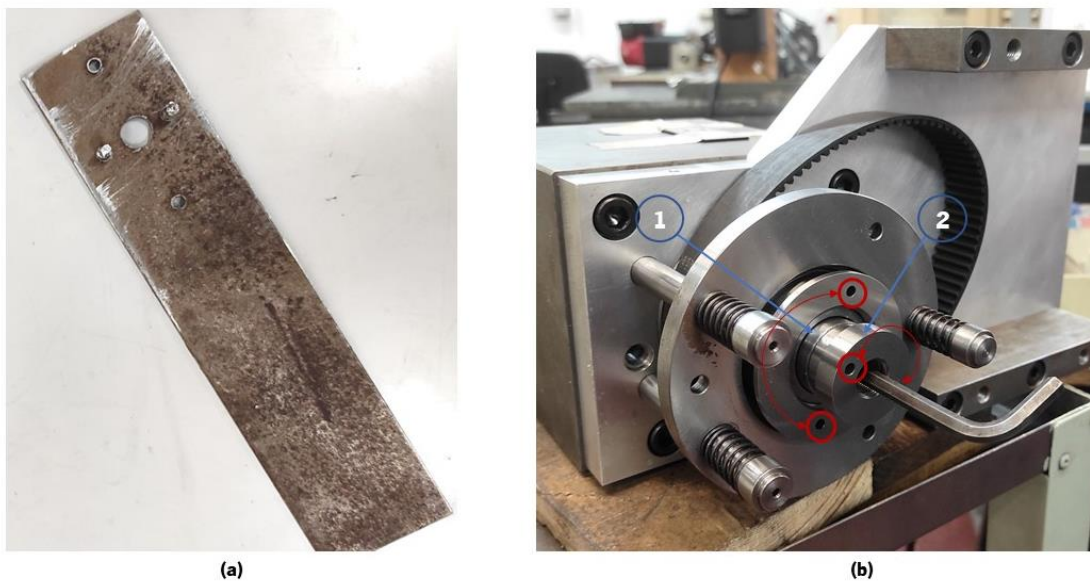


Figura 69 - Montagem da árvore: (a) ferramenta criada para bloqueio da rotação do batente; (b) esquema de localização dos pontos para fixação da ferramenta

Findo o processo de montagem das molas, voltou a montar-se o cilindro do pistão e a proceder ao ajuste da posição dos pinos, devido ao facto de a árvore baloiçar muito quando acionada pneumáticamente. Este passo foi realizado por tentativa erro, uma vez que não existe informação sobre a posição exata destes. Os fatores a ter em conta para a realização deste procedimento são:

- liberdade de rotação da árvore;
- curso suficiente para fixação da ferramenta;
- oscilação do bloco que contém o pistão pneumático.

Com base nisto, realizaram-se sucessivos ajustes até atingir a posição que melhor combina os três pontos mencionados anteriormente, garantindo o correto funcionamento da árvore.

Por último, foi necessário ajustar a posição dos sensores indutivos presentes na árvore. O pressuposto é que estes detetem três posições, como se pode ver na Tabela 12.

Tabela 12 - Valor lógico dos sensores 803 e 804 para as três posições da árvore

	Sensor 803	Sensor 804
Com ferramenta de corte	1	0
Fuso avançado, pinças abertas	0	0
Sem ferramenta de corte	1	1

O movimento do bloco (1) da Figura 70(a) irá ser detetado pelos sensores nas diferentes posições. Este está roscado na extremidade do pistão da árvore e a afinação da sua posição irá influenciar a fixação da ferramenta, pelo que não deve estar demasiado apertado. A posição ideal desta peça irá influenciar a montagem dos sensores na árvore. O sensor (2) da Figura 70(a) deteta a fixação da ferramenta de corte e o dispositivo (3) deteta, juntamente com o primeiro, a ausência de ferramenta. Esta lógica deve-se à localização das superfícies de ativação dos sensores, visíveis na Figura 70(b).

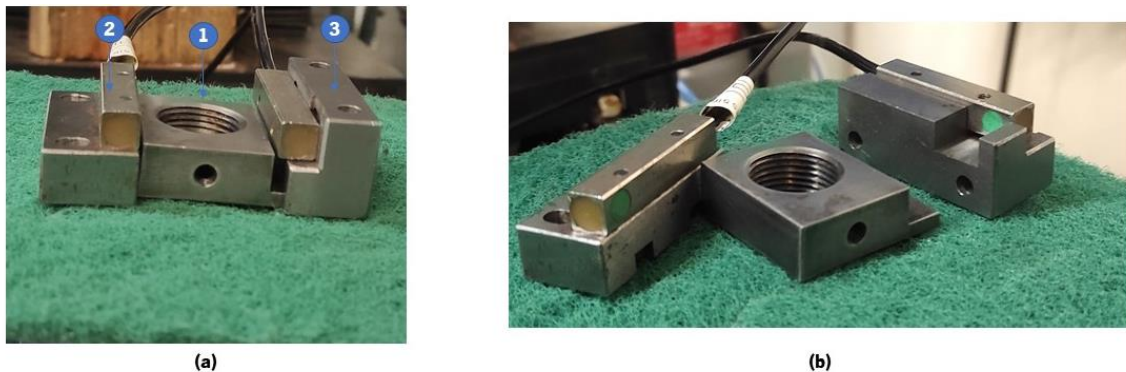


Figura 70 - Sistema de deteção de ferramenta na árvore: (a) relação entre as posições dos sensores e do bloco central; (b) superfícies de deteção dos sensores

Após a montagem e fixação da árvore na fresadora, só se conseguiu obter duas posições, que dizem respeito à primeira e última da Tabela 12. Associou-se este problema ao facto de as molas terem demasiado curso, que faz com que a extremidade do fuso empurre totalmente o pistão para trás em ambas as situações. Não se conseguiu concluir se são as molas do fuso que provocam tal situação, ou são as molas de disco presentes no pistão, ou até mesmo a posição dos pinos da árvore. Apenas é necessário se verificar uma diferença de centésimas de milímetro entre as duas posições para resolver o problema. Infelizmente, as tentativas de intervenção realizadas não chegaram a um resultado satisfatório.

4.3 Montagem da mesa B

Como se testou e confirmou o funcionamento do motor e do codificador do eixo B, foi possível montar o bloco deste eixo na máquina. O resultado desta montagem pode ser observado na Figura 71. O motor está fixo à chapa (1) que, por sua vez, fica fixa à carcaça do eixo B por meio de 4 parafusos e anilhas. Já o codificador está fixo numa flange (2), ficando o codificador seguro pela fixação desta à tampa do sistema da mesa (3). Em [45] tem-se os procedimentos a seguir neste processo e na restante montagem do eixo B.

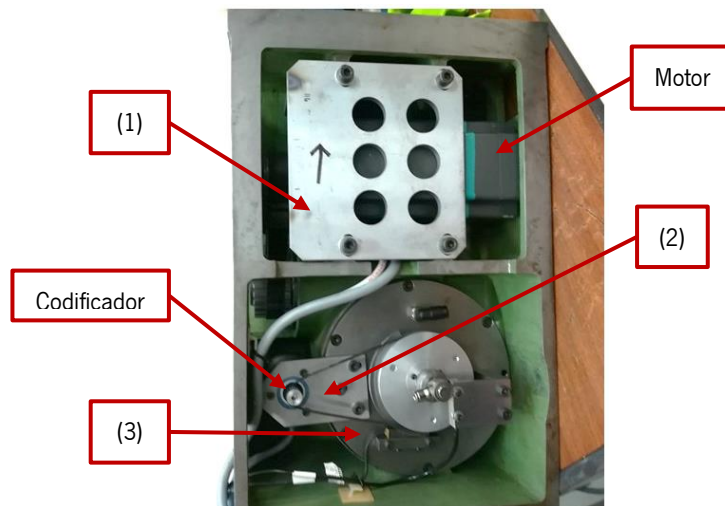
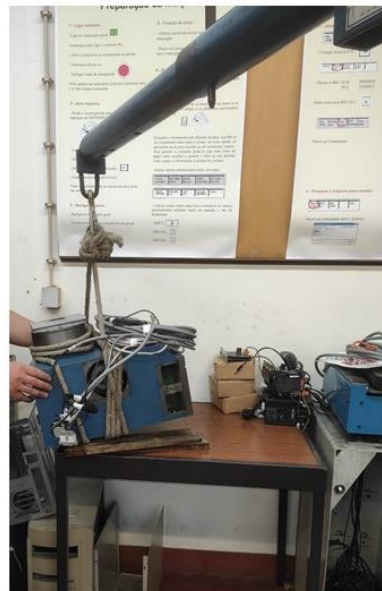


Figura 71 - Interior da estrutura do eixo B, com o motor e codificador devidamente montados

De seguida foi necessário recorrer à grua presente nas oficinas para o transporte deste sistema para a fresadora, dado o seu elevado peso. Utilizou-se cintas em torno da estrutura da mesa B, com o auxílio de cunhas de madeira para a elevar, na disposição que permite obter o melhor equilíbrio e assegurar a estabilidade na deslocação. Na Figura 72(a) apresenta-se o equipamento de transporte utilizado e na Figura 72(b) é possível observar a mesa suspensa pela grua. Tendo em conta as características da grua e do espaço de trabalho, trata-se de um processo complexo que exige, no mínimo, a colaboração de duas pessoas.



(a)



(b)

Figura 72 - Processo de montagem da mesa B na fresadora: (a) grua utilizada para o transporte; (b) mesa suspensa pela grua, com recurso a cintas

Depois de se alcançar a posição que este sistema ocupa na fresadora, numa primeira fase colocou-se os acoplamentos roscados, presentes no lado esquerdo da Figura 73, nas devidas posições que as setas indicam. De seguida, alinhou-se o movimento de descida, a ser realizado lentamente até se chegar ao ponto de encaixe, destacado na Figura 73 a verde. Ainda com a grua a suportar a mesa, coloca-se os quatro parafusos iguais ao que está presente no lado direito da imagem, pelo lado interno da estrutura. Isto é, pelas saliências que existem nas suas laterais, uma delas destacada a cinzento na figura. Com o auxílio de uma chave própria, apertou-se estes elementos, ficando, assim, a estrutura da mesa B fixa na fresadora. Deste processo, destaca-se a dificuldade no acesso aos diferentes pontos de aperto, causado pelo próprio desenho da estrutura e, também, pelos componentes que esta tem à sua volta.

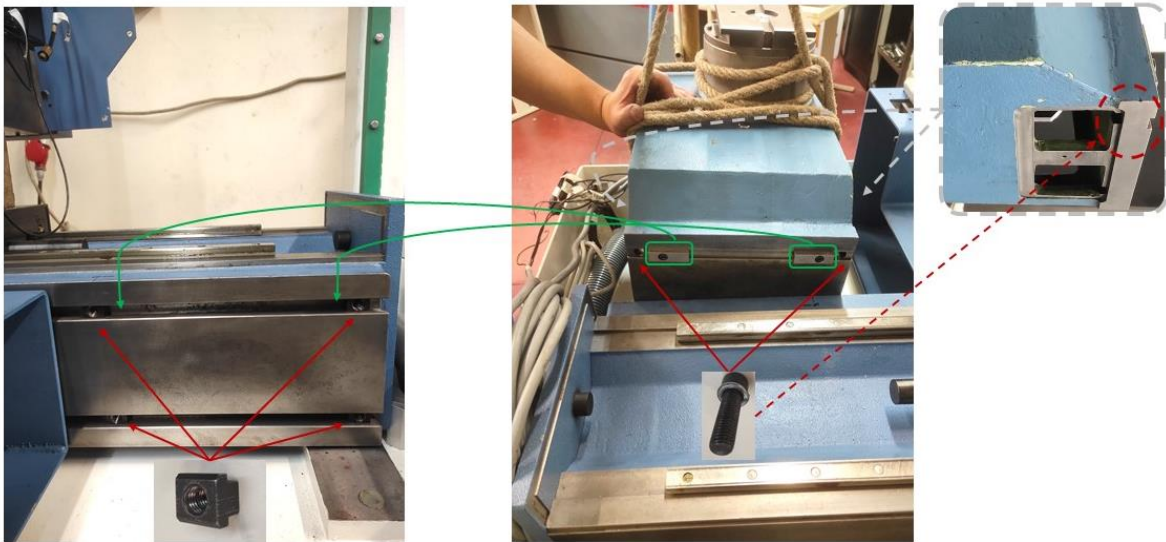


Figura 73 - Esquema ilustrativo do processo de montagem da mesa B na fresadora

4.4 Reestruturação da mesa de troca automática de ferramentas

Aquando arrumações executadas nas oficinas foi encontrada uma peça que correspondia exatamente ao componente em falta na mesa de troca automática de ferramentas. Antes de se proceder à sua alocação foi necessária limpá-la, uma vez que se encontrava em más condições. Na Figura 74 pode-se observar este componente, sobre o qual é montado o dispositivo que carrega a paleta e que realiza o seu curso ao longo da ranhura existente.

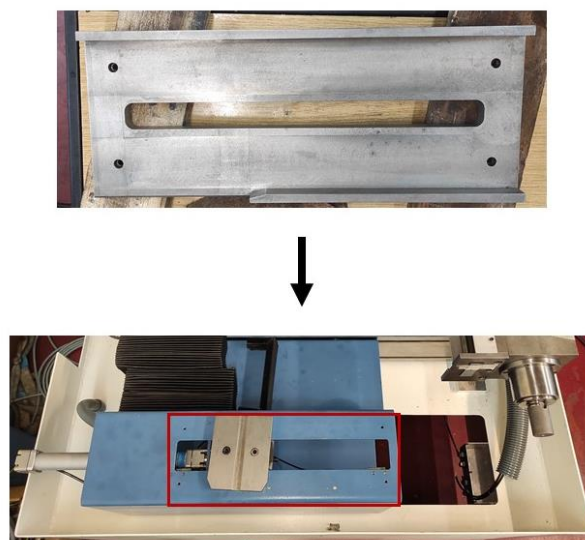


Figura 74 - Em cima tem-se a peça encontrada já limpa e em baixo, destacado a vermelho, a posição que esta ocupa na fresadora

De seguida procedeu-se à montagem do conjunto que é acionado pelo sistema pneumático e executa o movimento de avanço e recuo. Com base na ilustração da Figura 75, o componente principal (1) possui dois furos (2) onde são colocados os parafusos (3). Estes últimos irão passar pelos dois furos (4) da placa em L presa ao pistão do cilindro pneumático deste sistema. A fixação destes componentes dá-se através de uma anilha (5) e uma porca (6) que passam pela parte inferior da placa e prendem o porta-paletes. O acesso a esta secção é mais complicado, principalmente com o conjunto do eixo B montado. A utilização de uma chave de bocas, ou algo semelhante, que seja capaz de suportar a anilha no parafuso para posterior montagem da porca, pode auxiliar no processo.

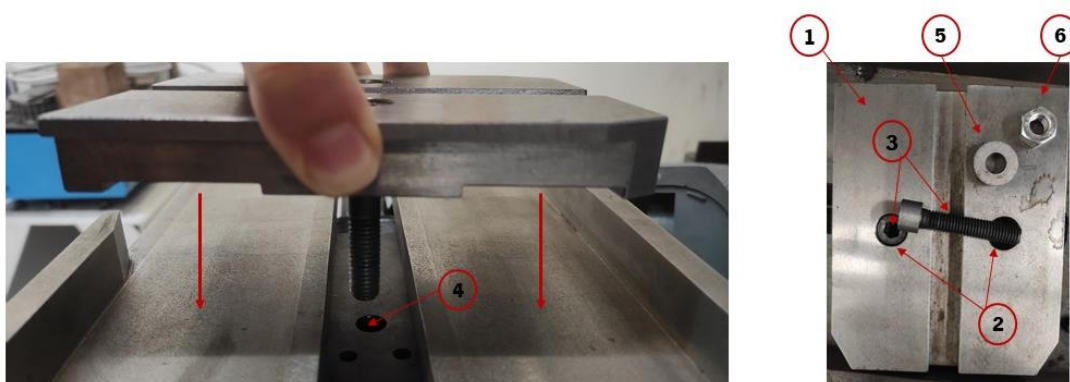


Figura 75 - Montagem do conjunto da mesa de troca automática de ferramentas que é atuado pelo sistema pneumático

Ao proceder-se à montagem, verificou-se que o aperto máximo das porcas bloqueava o movimento do conjunto, estando o componente (1) completamente encostado à mesa, como se pode observar na Figura 76.

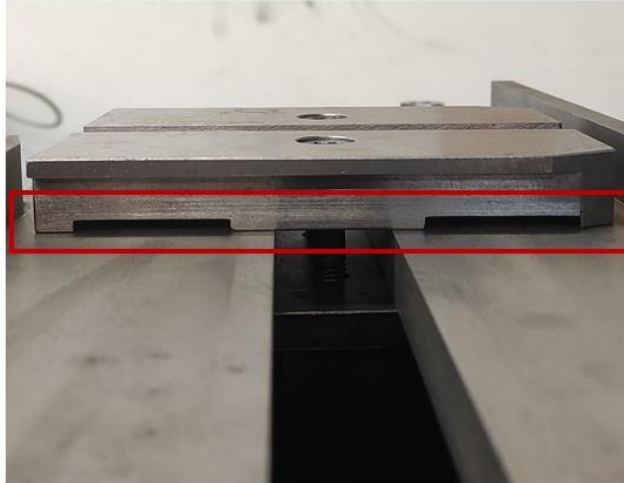


Figura 76 - Resultado da montagem do porta-paletes na mesa de ferramentas

Para solucionar este problema foi necessário produzir dois espaçadores, que se irão situar entre o porta-paletes e a placa presa no pistão do cilindro. O processo de fabrico destes componentes envolveu a utilização do torno convencional e do serrote mecânico das oficinas.

O objetivo passou por criar uma folga mínima que permitisse o movimento do conjunto quando acionado, mas que ao mesmo tempo não o alteasse demasiado, de modo a não ultrapassar a altura das barreiras da base da mesa. O material dos espaçadores é um aço de cementação, marca G15 especial, fornecido pela Ramado Aços às oficinas [59]. As peças produzidas encontram-se presentes na Figura 77, sendo que deverão ser colocadas entre o (1) e o (4) da Figura 75. O desenho técnico do componente encontra-se no Apêndice 8.



Figura 77 - Espaçadores desenvolvidos para o conjunto preso ao pistão do cilindro pneumático

4.5 Teste dos motores na máquina

Do sucesso obtido nos testes de bancada sem carga dos servomotores da fresadora, pode passar-se para o teste do controlo destes na própria máquina. Como foi um passo que não foi possível realizar na prática, achou-se por bem deixar o registo dos procedimentos idealizados. Este processo deve ser realizado, em primeiro lugar, para um eixo em que não haja risco de deslizamentos e danificação dos sistemas, como é o caso do eixo X.

Os procedimentos a adotar seriam os seguintes:

- com base no trabalho do Luís Mota [42], estabelecer as devidas ligações entre o motor e sensores à placa definida com o devido algoritmo de controlo;
- colocar o motor a girar através do variador de frequência, seguindo os mesmos passos do teste sem carga;
- sem colocar a correia, rodar o eixo até ao sensor fim-de-curso;
- verificar se o motor para assim que a posição limite é atingida, ou seja, ao ser ativado o sensor indutivo.

Com as precauções mencionadas, assegura-se a segurança do sistema, evitando movimentos ou choques indesejáveis. Confirmado o mecanismo de segurança de paragem, pode-se colocar a correia para testar o motor para avanços incrementais, desde a posição de referência definida pelo sensor. Deve-se procurar avaliar a capacidade dos servomotores em executar os movimentos solicitados, fazendo mover o carro do eixo ao longo do fuso. Sugere-se começar com uma ordem de avanço de 200 mm, por exemplo, e depois executar ordens de 100 mm em 100 mm, ao longo do curso do eixo, definido pelo comprimento do fuso.

Confirmando-se este método para o eixo X, pode-se testar os restantes. No entanto, é necessário ter cuidado, principalmente com o motor do eixo Y, dado o movimento vertical que comanda. É sabido que este dispõe de um travão de imobilização, pelo que deve ser testada a sua fiabilidade mais do que uma vez, sem a correia montada. Desta forma, é possível assegurar que este dispositivo não irá ser um motivo para ocorrência de deslizamentos no eixo aquando da travagem/paragem.

4.6 Discussão de resultados

Da vertente prática desenvolvida resultaram conclusões deveras promissoras para o avançar da atualização do sistema de controlo e da própria fresadora. Começou-se por testar os sensores de proximidade, que revelaram estar todos em bom estado de funcionamento.

Com recurso a um variador eletrónico de velocidade testou-se todos os motores da máquina. Este foi especialmente desenvolvido para lidar com motores de indução, mas também possui a opção de acionar motores síncronos de ímanes permanentes. No entanto, ao seleccionar-se este tipo, algumas funcionalidades ficam bloqueadas, como por exemplo, não permite obter curvas tensão/frequência características do comportamento do motor. É o operador que tem de fazer variar os valores da frequência se quer analisar a variação da velocidade e, conseqüente, comportamento do motor. Este fator não impediu que os testes fossem realizados e que se pudesse comprovar o correto funcionamento dos equipamentos. Apenas o motor da árvore revelou algumas falhas, que se acredita serem devidas a questões de lubrificação. No entanto, não foram reunidos os meios necessários para se proceder à abertura do motor e comprovar esta afirmação, pelo que deverá ser tida em conta quando se voltar a testar o motor na máquina.

Passando para os sistemas de medição, estes têm de ser testados com os motores a girar, pelo que se manteve a instalação com o inversor, definido para baixas velocidades. No geral, não foram encontrados problemas irreversíveis. Questões de interferências no sinal foram resolvidas com a adição de condensadores ou resistências ao circuito de teste. As placas de controlo a utilizar para estes sensores podem estar equipadas com filtros de ruído, e se não for o caso estes podem ser adicionados. O único componente a apresentar sinais de avaria foi o codificador do eixo Z, pelo que já se realizou um estudo da resolução mínima necessária, bem como do mercado, contactando-se diferentes fornecedores em busca da melhor opção.

O sistema pneumático também levantou algumas questões devido à confusão entre os circuitos elétricos existentes e os componentes físicos da máquina. Os resultados destes testes foram os mais inconstantes ao nível da atuação das válvulas, no sentido em que tanto funcionavam corretamente, como não desempenhavam a sua função. Acredita-se que tal se possa dever à pressão baixa de acionamento. O equipamento requer uma pressão de trabalho de 6 bar e por vezes esta não era atingida. Investigou-se possíveis fugas ou componentes avariados, mas não se chegou a uma conclusão concreta. O bloco de válvulas foi substituído recentemente, estando em bom estado, os restantes dispositivos é que já se revelam de facto desgastados. Num meio de utilização pedagógico, o sistema tal como está é viável para

a demonstração dos princípios de funcionamento e trabalhos leves. Caso o objetivo seja utilizar a máquina para fins de produção, a unidade de tratamento de ar, o sensor de pressão e os tubos de ar deverão ser substituídos. Para além de estarem obsoletos, não contribuem para o correto funcionamento da máquina, nem asseguram a lubrificação total dos componentes.

Do ponto de vista mecânico, as montagens e afinações realizadas revelaram o ponto fraco da máquina, isto é, o desenho dos seus sistemas não foi pensado no sentido de agilizar as operações de manutenção necessárias. Por outras palavras, não é uma máquina de fácil acesso, nem possui um design modular. Para se aceder a um dado subsistema é necessário desmontar completamente o sistema a que pertence. Não existem blocos funcionais, nem manuais de montagem e afinação da máquina, o que dificulta as intervenções a serem realizadas. Por exemplo, os trabalhos de afinação foram efetuados por tentativa erro, sendo um processo moroso e muito suscetível a erros. Neste caso, só implicou o atraso no trabalho realizado, mas num meio industrial seria impensável uma linha de produção ficar parada para que a equipa pudesse realizar este tipo de operação. Tal poderia revelar-se um prejuízo para a entidade empresarial.

Concluindo em relação aos resultados obtidos, o sistema da árvore foi aquele em que existiu mais dificuldade e que não ficou totalmente resolvido. Será necessário ajustar a posição dos sensores, ou por nova tentativa de afinação da posição do fuso e do pistão, ou pela alteração da posição dos sensores, mais concretamente daquele que deteta a presença de ferramenta. Por exemplo, este passar a estar localizado na zona onde o porta-ferramentas é inserido, resguardado da região onde se dá a remoção da apara, para não o danificar. Neste caso, talvez fosse necessário adquirir um componente com maior área de deteção.

Ainda nesta secção, desenvolveu-se dois espaçadores que permitem o curso do cilindro da mesa de ferramentas, sem encravamentos.

5. CONCLUSÃO

O conhecimento completo e a existência de informação de suporte das máquinas industriais e, até mesmo, de qualquer tipo de equipamento, são fatores de valor acrescentado para os seus utilizadores. Num ambiente industrial mais ainda, uma vez que contribui para a otimização dos recursos e para a diminuição dos custos com os encargos que a máquina implica. Esta ligação revela-se a fórmula de sucesso de muitas empresas, sendo a diferença entre depender de terceiros para retomar a linha de produção ou ser capaz de resolver os problemas internamente.

Apesar disto, nem sempre é fácil deter estes conhecimentos, quer seja por falta de formação do pessoal, quer seja devido à ausência de documentação de apoio. Tais fatores dificultam a manutenção dos equipamentos, o reconhecimento de avarias, a simples noção do princípio de funcionamento de um dado sistema da máquina. Na falta desta documentação de suporte é necessário proceder à sua criação, passando por um estudo detalhado do sistema em si e por tentativas de comparação de subsistemas obsoletos com aquilo que existe na atualidade.

Muito do trabalho desenvolvido nesta dissertação foi com o intuito de colmatar esta falha e criar condições que tornem capazes a intervenção tanto nesta fresadora, como noutras máquinas presentes nas oficinas. Para a sua concretização foi necessário, numa primeira fase, estudar ao pormenor este tipo de máquinas e os componentes que as caracterizam, bem como perceber os tipos de ações que devem ser postas em prática durante a sua vida útil e após esta, de modo a preservar a sua integridade. Através de uma manutenção cuidada, planeada, e da introdução da política dos 6R é possível estender a vida de uma máquina, oferecendo-lhe novas condições de trabalho. Além disso, estudou-se a alternativa à compra de uma nova máquina, no caso de avarias ou deterioração da existente, percebendo-se que a requalificação será sempre uma melhor opção quando os custos associados o justificarem. Este processo permite restabelecer o funcionamento do equipamento e, até mesmo, elevar a qualidade da sua performance.

Com base nos trabalhos a que se teve acesso e no estudo realizado, definiu-se as principais áreas onde se devia intervir e que permitiram avançar no estudo de requalificação da fresadora *SwissPerfo*. Assim, as intervenções foram realizadas principalmente ao nível do sistema elétrico e pneumático da máquina, com vista à reunião da informação necessária para a implementação de um novo sistema de controlo. Além disso, foram realizados trabalhos de afinação e montagem de subsistemas, que permitiram criar registos fotográficos e tutoriais dos procedimentos efetuados. Das

intervenções realizadas, concluiu-se acerca da necessidade de substituição de componentes e de cuidados a ter na utilização futura da máquina. Desta forma, foi possível criar um ponto de partida sólido para trabalhos futuros que se venham a realizar no equipamento, a partir daquilo que foi desenvolvido nesta dissertação e nas anteriores.

As principais dificuldades encontradas prenderam-se sobretudo com a falta de informação, o que exigiu uma pesquisa exaustiva por cada componente, sistema e função a desempenhar. Mesmo existindo resultados anteriores, não havia maneira de comprovar diretamente a sua veracidade, sendo necessário estudar e desenvolver guias de teste. Assim, além de se criar uma base de apoio para os trabalhos realizados, procurou-se facilitar o percurso daqueles que intervirem na máquina. O tempo despendido neste tipo de pesquisa não se revelou inútil, no entanto, colocou em causa avanços mais promissores ao nível do controlo da máquina, um dos objetivos iniciais.

Em suma, o caminho para o desenvolvimento de fábricas inteligentes, com base nos princípios da Indústria 4.0, passam, em primeiro lugar, por uma requalificação tradicional e inteligente das máquinas, com o menor investimento possível e o melhoramento das características de produção. Logo, é necessário ter em conta a idade da máquina e o nível de modernização de que esta precisa. O processo de requalificação, ao invés da substituição das máquinas existentes, pode ser uma passagem mais rápida das fábricas atuais para as inteligentes do futuro, de um ensinamento convencional para um ensino capaz de acompanhar a evolução tecnológica.

5.1 Trabalhos futuros

Conhecidas as necessidades de alimentação e os tipos de sinais dos componentes do sistema de acionamento e pneumático, pode-se avançar com segurança para a atualização do sistema de controlo. A programação das placas eletrónicas pode ser feita com base na dissertação do Luís Mota. Reunidas as condições necessárias, pode-se proceder ao teste dos motores na própria máquina, de modo a testar o controlo desenvolvido e o comportamento dos motores com carga.

Decorrente da intervenção realizada no bloco da árvore, sugere-se o seu redesenho ou a otimização da sua constituição, no sentido de contribuir para uma montagem/desmontagem mais fácil. Como se trata de um bloco de difícil acesso, uma avaria ou necessidade de substituição nesta secção revela-se uma tarefa morosa e suscetível a erros quer durante, ou após a finalização das operações. Não havendo dados concretos sobre a posição exata que cada componente deve ocupar, a afinação deste

sistema será sempre posta em causa e, conseqüentemente, o seu correto funcionamento. Ainda nesta vertente, um processo de montagem mal realizado prejudica o conjunto de deteção da ferramenta de corte, pelo que se considera vantajosa a alteração do arranjo dos sensores indutivos.

Os vários procedimentos de montagem realizados fizeram transparecer uma necessidade básica da máquina-ferramenta. Esta consiste na criação de uma “caixa de ferramentas” que esteja disponível sempre que uma intervenção de manutenção precisa de ser realizada. Assim, elimina-se a procura pela ferramenta certa, existindo a informação de qual é o tipo e número da ferramenta necessária para determinado subsistema/componente. De forma a complementar a informação existente, sugere-se, também, a catalogação dos pontos de lubrificação da máquina, dado ser uma tarefa importante que poderá evitar o desgaste rápido dos componentes.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] F. Pruvot, *Conception et Calcul des Machine-Outils: Volume 1 - Généralités, Morphologie, Plan général*, Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes, 1993.
- [2] H. Youssef e H. El Hofy, *Traditional Machining Technology, Second Edition ed.*, Boca Raton, FL: CRC Press, 2020.
- [3] R. L. Stoeterau, “Introdução ao Projeto de Máquinas-Ferramentas Modernas,” Santa Catarina, 2004.
- [4] Governancas, “A Indústria 4.0 e suas Governanças,” n.d.. [Online]. Available: <https://www.governancas.com.br/2018/09/30/a-industria-4-0-e-suas-governancas/>.
- [5] ACCEPT, “As várias fases da revolução industrial,” 24 maio 2019. [Online]. Available: <https://www.accept.pt/as-varias-fases-da-revolucao-industrial/>.
- [6] Autodoc, “Indústria 4.0: tudo o que você precisa de saber,” 18 julho 2019. [Online]. Available: <https://site.autodoc.com.br/conteudos/industria-4-0-tudo-o-que-voce-precisa-saber/>.
- [7] TecnoMetal, “Inovação nas Empresas de Metalurgia e Metalomecânica,” *TecnoMetal*, n° 242, pp. 4-8, 2019.
- [8] UMATI, “The umati vision,” n.d.. [Online]. Available: <https://umati.org/about/>.
- [9] J. Kiesner e J. Nickel, “Digitalização, automatização, fabrico aditivo e mobilidade elétrica: o futuro da produção,” 07 02 2020. [Online]. Available: <https://www.intermetal.pt/Artigos/265274-Digitalizacao-automatizacao-fabrico-aditivo-e-mobilidade-eletrica-o-futuro-da-producao.html>.
- [10] S. Kline, “World Machine Tool Report Shows Manufacturing Shift to North America,” 04 06 2020. [Online]. Available: <https://www.mmsonline.com/articles/world-machine-tool-report-shows-manufacturing-shift-to-north-america>.
- [11] S. Kline, “Pandemic Continues Machine Tool Industry Downturn, but U.S. Now a Top 4 Producer,” 23 04 2021. [Online]. Available: <https://www.mmsonline.com/articles/pandemic-continues-machine-tool-industry-downturn-but-us-now-a-top-3-producer>.

- [12] Pipe Masters, “Análise do Sector Metalúrgico e Metalomecânico em Portugal,” 2020. [Online]. Available: <http://pipemasters.pt/blog/industria/analise-do-sector-metalurgico-e-metalomecanico-em-portugal/>.
- [13] L. Oliveira, “Metalurgia e Metalomecânica - Uma força motriz da economia portuguesa,” *Portugalglobal*, n° 134, pp. 32-36, 2020.
- [14] Mordor Intelligence, “Machine Tools Market - Growth, Trends, Covid-19 Impact, and Forecasts (2021-2026),” India, 2020.
- [15] R. X. Gao e P. Wang, “Through life analysis for machine tools: from design to remanufacture,” *The 5th International Conference on Through-life Engineering Services*, pp. 2-7, 27 09 2016.
- [16] P. Wang, Y. Liu, S. K. Ong e A. Y. C. Nee, “Modular Design of Machine Tools to Facilitate Design of Disassembly and Remanufacturing,” *21st CIRP Conference on Life Cycle Engineering*, pp. 443-448, 2014.
- [17] T. J. Arieiro, “Manutenção e reparação de máquinas-ferramentas de comando numérico,” Universidade do Minho, Guimarães, 2013.
- [18] N. Malebo, “Retrofitting of machine tools - study of a CNC milling machine,” Universidade do Minho, Guimarães, 2019.
- [19] R. F. Magalhães, “Estudo e Análise de Procedimentos de Manutenção Industrial,” Universidade do Minho, Guimarães, 2012.
- [20] S.-H. Suh, S.-K. Kang, D.-H. Chung e I. Stroud, *Theory and Design of CNC Systems*, London: Springer, 2008.
- [21] bitfab, “Mega Guia fresadoras – O que são, tipos e características,” n.d.. [Online]. Available: <https://bitfab.io/pt-pt/blog/fresadoras/>.
- [22] M. M. Ibraheemi, “Modelling and Practical Set-up to Investigate the Performance of Permanent Magnet Synchronous Motor through Rotor Position Estimation at Zero and Low Speeds,” Wales, United Kingdom, September, 2018.

- [23] A. Francisco, “Motores de Indução Trifásicos,” n.d.. [Online]. Available: http://www.estgv.ipv.pt/PaginasPessoais/lpestanda/maquinas%20el%C3%A9ctricas%202/aulas%20te%C3%B3ricas/Motores_inducao_tri.pdf.
- [24] M. F. Alves, “ABC das Máquinas Elétricas,” Porto, 2003.
- [25] B. I. Oladapo, V. A. Balogun, S. Oyegoke, A. O. M. Adeoye, C. O. Ijagbemi, S. O. Afolabi, I. A. Daniyan, S. O. Akinola, A. P. Simeon e I. D. Uchegbu, “Experimental analytical design of CNC machine tool SCFC based on electro-pneumatic system simulation,” *Engineering Science and Technology, an International Journal*, pp. 1958-1965, 2016.
- [26] W. Zhang, F. Zhang, J. Zhang, J. Zhang e J. Zhang, “Application of PLC in Pneumatic Measurement Control System,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018.
- [27] B. T. Capela, “Sistema de monitorização e controlo para atuador pneumático,” Porto, setembro de 2018.
- [28] Eltra, “Technical Basics - Encoders,” 2021. [Online].
- [29] Anaheim Automation, “Encoder Guide,” n.d. [Online]. Available: <https://www.anaheimautomation.com/manuals/forms/encoder-guide.php>.
- [30] K. M. Ranaweera, “Development and Experimental Testing of a Speed Controlled PMSM Drive Using PSIM Visual Programming Environment,” Oviedo, August 2019.
- [31] Posital, “Incremental Encoder Interface,” n.d.. [Online]. Available: <https://www.posital.com/en/products/communication-interface/incremental/incremental-encoders.php>.
- [32] Eletronics Hub, “Position Sensors | Types, LVDT, Rotary Encoder,” 21 abril 2019. [Online]. Available: <https://www.electronicshub.org/position-sensors/>.
- [33] Parker Hannifin Corporation, “Chapter 5 - Hall Effect Sensors,” em *OEM770T, OEM770SD - Servo Drive User Guide*, Cleveland, 2000, pp. 107-118.
- [34] EE Power, “Thermistor,” n.d.. [Online]. Available: <https://eepower.com/resistor-guide/resistor-types/thermistor/>.

- [35] Wikipédia, “Termistor,” n.d.. [Online]. Available: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Term%C3%ADstor>.
- [36] S. Soloman, *Sensors and Control Systems in Manufacturing*, United States: McGraw-Hill, 2010.
- [37] G. E. Thyer, *Computer Numerical Control of Machine Tools*, Oxford: Newnes, 1991.
- [38] ESSEL engenharia, “Aula 16 - Guias,” n.d.. [Online]. Available: <https://essel.com.br/cursos/material/01/elementos.htm>.
- [39] M. F. Mayer, “Projeto de router CNC de 4 eixos para corte de materiais para prototipagem,” Florianópolis, 2020.
- [40] NSK, *Produtos de Precisão - Fusos de esferas; Guias Lineares; Sistemas Mecatrônicos*, Brasil, 2006.
- [41] S. S. H. Al-Maeeni, C. Kuhnhen, B. Engel e M. Schiller, “Smart retrofitting of machine tools in the context of industry 4.0,” *13th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, CIRP ICME '19*, pp. 369-374, 2020.
- [42] L. C. Mota, “Requalificação de Máquinas Ferramenta de Controlo Numérico Computarizado,” Universidade do Minho, Guimarães, 2018.
- [43] C. Borges, G. Pereira e P. Caldas, “Cadeia Cinemática do Eixo B da Fresadora CNC SwissPerfo “Type CU 200H”,” Guimarães, 2020.
- [44] Siemens, *SIMODRIVE: AC Servomotors, 1FT5*, 2003.
- [45] A. F. R. d. Sousa, “Estudo de Requalificação de Máquinas Ferramenta CNC,” Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade do Minho, Guimarães, 2021.
- [46] D. Collins, “What are electromagnetic power-off brakes and where are they used?,” 24 julho 2021. [Online]. Available: <https://www.motioncontroltips.com/what-are-electromagnetic-power-off-brakes-and-where-are-they-used/>.
- [47] J. Bullick, “Permanent Magnet Brakes – How they Work,” 28 abril 2015. [Online]. Available: <https://www.kebamerica.com/blog/permanent-magnet-brakes-how-it-works/>.
- [48] Heidenhain, *Rotary Encoders*, Germany, 2005.

- [49] H. Mattede, “O que é sinal PNP e NPN?,” [Online]. Available: <https://www.mundodaeletrica.com.br/o-que-e-sinal-pnp-e-npn/>.
- [50] Balluff, “BES017Y - BES 516-300-S166-PU-05,” 01 04 2021. [Online]. Available: <https://publications.balluff.com/pdfengine/pdf?type=pdb&id=159101&con=en&ws=approval>.
- [51] Balluff, “Inductive standard sensors with preferred types - BES00N6,” 21 01 2019. [Online]. Available: <https://publications.balluff.com/pdfengine/pdf?type=pdb&id=247283&con=en&ws=approval>.
- [52] D. Collins, “How to calculate encoder resolution,” 3 janeiro 2018. [Online]. Available: <https://www.linearmotiontips.com/how-to-calculate-encoder-resolution/>.
- [53] P. Flores e J. Gomes, Cinemática e Dinâmica de Engrenagens, 1ª ed., Porto: Publindústria, 2015.
- [54] B. Pneumática, “Regulador de Pressão: O que é e qual a sua função?,” [Online]. Available: <https://belton.com.br/blog/regulador-de-pressao-o-que-e-e-qual-a-sua-funcao/>.
- [55] S. A. Pavani, “Comandos Pneumáticos e Hidráulicos,” Santa Maria - RS, 2011.
- [56] V. G. Alkmin, “Estudo do funcionamento da mola belleville sob carregamento estático e automatização do projeto via microsoft excel/linguagem vba,” Guaratinguetá – SP, 2018.
- [57] SPIROL, “Disc Springs,” 2013. [Online]. Available: https://www.spirol.com/company/products/catalogs.php?_ga=2.2204784.1521235077.1637063759-1682224326.1637063759.
- [58] AUTODESK, “Cálculo da mola prato básica,” 20 abril 2021. [Online]. Available: <https://knowledge.autodesk.com/pt-br/support/inventor/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2018/PTB/Inventor-Help/files/GUID-D6B842F6-D0A4-425F-B7E8-1DD5FEFA415B-htm.html>.
- [59] R. Aços, “G15 Special,” [Online]. Available: https://www.ramada.pt/pt/produtos/acos/aa-os-de-cementaa-ao/g15-special_copia.html.
- [60] Telemecanique, “XML... Equivalent model references for previous range XM2JM, XMJ and XMG pressure and vacuum switches,” 01 09 2000. [Online]. Available: <https://download.schneider->

electric.com/files?p_enDocType=Instruction+sheet&p_File_Name=163417701A55.pdf&p_Doc_Ref=163417701A55.

- [61] Telemecanique, “XMJ-A0207 - Pressure Switch - Telemecanique,” [Online]. Available: <http://www.combustioncontrols.pk/datasheets/telemecanique/xmj-pressure-switches.pdf>.
- [62] OMRON, “MX2 User's Manual,” 2013. [Online]. Available: https://assets.omron.eu/downloads/manual/en/v5/i570_mx2_users_manual_en.pdf.
- [63] OMRON, “3G3MX2-A4055-E Datasheet,” [Online]. Available: https://assets.omron.eu/downloads/datasheet/en/v9/i113e_mx2-series_variable_frequency_drives_datasheet_en.pdf.
- [64] F. Ferreira, “Ensaio Combinado de Motores e Variadores Eletrônicos de Velocidade,” Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Universidade de Coimbra, 2014.
- [65] P. Evans, “Variable Frequency Drives Explained - VFD Basics IGBT inverter,” [Online]. Available: <https://theengineeringmindset.com/variable-frequency-drives-explained/>.
- [66] C. Hartman, “What is a Variable Frequency Drive?,” [Online]. Available: <https://vfds.com/blog/what-is-a-vfd/>.
- [67] PHILIPS, “Digital Storage Oscilloscopes PM3350A/52A/55/57/65A/67A/75/77 - Operation Guide,” 1990. [Online]. Available: <https://manualsbrain.com/en/manuals/1163097/>.
- [68] M. F. Alves, “ABC do Osciloscópio,” Departamento de Engenharia Eletrotécnica, Instituto Politécnico do Porto, 1998.
- [69] P. McDonald, “Testing NPN and PNP Proximity Sensors,” [Online]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=DiBMdplApmA&t=628s&ab_channel=PeepawMcDonald. [Acedido em 11 04 2021].
- [70] R. L. Norton, Projeto de Máquinas: uma abordagem integrada, Porto Alegre: Bookman, 2013.
- [71] J. C. Martins, “Introdução ao design do produto modular: considerações funcionais, estéticas e de produção,” Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2002.

- [72] Wikipedia, "Milling (machining)," n.d.. [Online]. Available:
[https://en.wikipedia.org/wiki/Milling_\(machining\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Milling_(machining)).
- [73] TecMecanico, "Fresadoras," 2011. [Online]. Available:
<https://tecmecanico.blogspot.com/2011/10/fresadoras.html>.

APÊNDICE 1 – INTERRUPTOR DE PRESSÃO

O modelo do sensor de pressão da marca Telemecanique presente na máquina já se encontra descontinuado. No entanto, existe um modelo equivalente na gama XML de comutadores de pressão e vácuo, substituindo as famílias anteriores como a XM2-JM, XMJ e XMG do mesmo tipo. O modelo equivalente do XMJ-A0207 é o XML-A020A2S11, estando ambos representados na Figura 78 [60].



XMJ - A0207



XML-A020A2S11

Figura 78 – Sensor de pressão presente na máquina e respetivo equivalente existente atualmente no mercado

Na Figura 79 é possível observar as vistas frontal e lateral em corte do dispositivo mais antigo e presente na fresadora, assim como, conhecer os constituintes envolvidos no correto funcionamento do sistema.

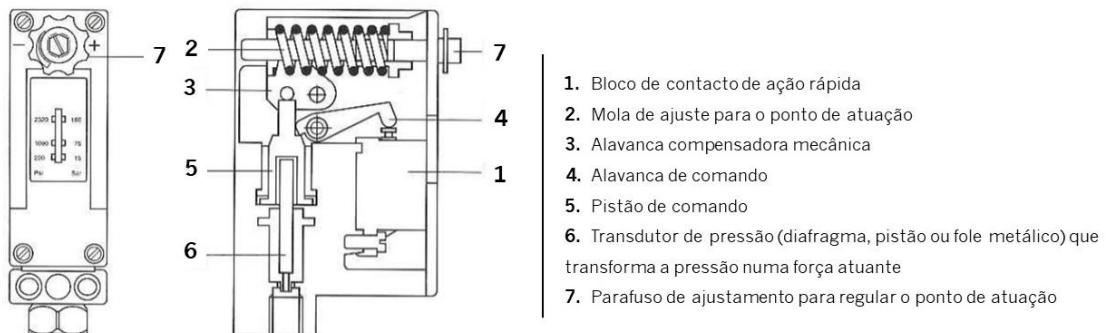


Figura 79 – Vistas frontal e lateral em corte do interruptor de pressão da Telemecanique (Adaptado de: [61])

O equipamento opera entre os valores de pressão de 2 bar e 20 bar, tendo, por exemplo, pressão máxima admissível por ciclo de 25 bar, como se pode observar na Figura 80.

Diaphragm type pressure switches (with setting scale)

Operating range		Natural differntl. (1)		Max. permissible pressure		Reference	Weight
low	high	at low setting	at high setting	per cycle	occasional surge		
bar	bar	bar	bar	bar	bar		kg
Hydraulic oils, air, fresh water, sea water : 0 °C to + 70 °C (2)							
0.4	3.5	0.28	0.54	5	20	XMJ-A0037	0.505
1	12	0.4	1.5	18	30	XMJ-A0127	0.505
2	20	1	3.1	25	40	XMJ-A0207	0.505
Hot or corrosive fluids : 0 °C to + 160 °C (2)							
0.4	3.5	0.28	0.54	5	20	XMJ-A00375	0.505
1	12	0.4	1.5	18	30	XMJ-A01275	0.505
2	20	1	3.1	25	40	XMJ-A02075	0.505

Figura 80 - Dados técnicos do interruptor de pressão XMJ-A0207 [61]

PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO

- Ponto de atuação

À medida que a pressão do fluido dentro do sistema aumenta, uma força é transmitida através do transdutor 6, que o empurra contra a mola 2. Quando esta força é suficientemente forte para superar a pressão da mola (definida pela compressão da mola através do parafuso de ajuste 7), a alavanca 4 é girada pelo pistão de operação 5, atuando o contacto elétrico 1 [61].

O interruptor é, então, acionado (contacto 1 aberto) à medida que a pressão aumenta no ponto de atuação, que corresponde a um valor de pressão mais alto ou mais baixo. Este depende da compressão da mola 2, a ser ajustada pelo parafuso 7 conforme o que se pretende [61].

- Ponto de reinicialização

Diminuindo a pressão do fluido o suficiente para que a mola 2 empurre para trás o transdutor 6, a alavanca 4 recua, repondo, assim, o contacto elétrico 1 do interruptor. A pressão de reinicialização será sempre inferior à pressão de acionamento e a diferença entre elas é o diferencial natural do interruptor [61].

REGULAÇÃO

Para regular o ponto de atuação, deve-se ajustar o interruptor. Esta regulação depende do tipo de interruptor existente, ou seja [61]:

- **Interruptor sem escala de regulação:** rodar o parafuso de regulação 7 na direção requerida, indicada pelas marcações + e - na parte frontal do interruptor. Para uma regulação mais precisa recomenda-se a utilização de um manómetro;

- **Interruptor com escala de regulação:** rodar o parafuso de regulação 7 na direção pretendida, indicada pelas marcações + e – na parte frontal do interruptor, até que a escala presente no dispositivo atinja o valor da pressão de acionamento requerida.

CURVA DE OPERAÇÃO

De seguida, na Figura 81, apresenta-se a curva de operação para um interruptor de pressão do tipo XMJ-A020 ou equivalentes, como é o caso do XMJ-A0207, por forma a dar conhecer que tipo de informações se podem retirar da sua análise.

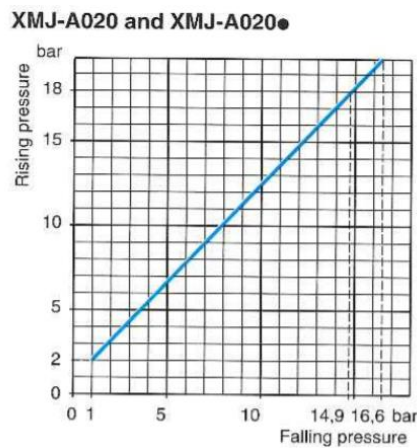


Figura 81 - Curva de operação do interruptor de pressão XMJ-A0207 (Retirado de: [61])

Por exemplo, a partir da leitura da curva de funcionamento típica do pressóstato XMJ-A020 pode-se retirar a seguinte informação [61]:

- Ajuste do ponto de atuação (no eixo “*rising pressure*”) para um valor de 18 bar;
- Alteração do estado de contacto (no eixo “*falling pressure*”) irá ocorrer para uma pressão de 14.9 bar (diferencial: 3.1 bar).

ESQUEMA

Na Figura 82 apresenta-se o esquema com as respetivas ligações dos terminais do dispositivo.

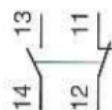


Figura 82 – Esquema de ligações dos terminais do interruptor de pressão (Retirado de: [61])

APÊNDICE 2 – VARIADOR ELETRÔNICO DE VELOCIDADE

De forma a testar o funcionamento dos motores da fresadora, bem como efetuar o seu controlo, recorreu-se ao variador eletrónico de velocidade presente nas oficinas do Departamento de Engenharia Mecânica. Este modelo, 3G3MX2 – A4055 – E, é da marca OMRON, e a sua classe trifásica é 400 V. Na Tabela 13 é possível observar o aspeto do equipamento e as suas principais características [62].

Neste tópico será apresentado de forma generalizada o conceito de um variador e todos os pontos a ter em conta para efetuar o teste de um motor de ímanes permanente. Além disso, dar-se-á a conhecer instruções de utilização e programação do equipamento, aspetos importantes a ter em conta e principais erros. Dada a prevalência dos motores de indução nas oficinas da universidade, e uma vez que a sua programação é muito semelhante, serão destacados os pontos diferentes, fazendo com que este documento seja aplicável aos dois tipos. Em caso de dúvida e para obter informação mais detalhada recomenda-se o manual de utilização deste equipamento, disponível em [62].

Tabela 13 - Variador eletrónico de velocidade utilizado e principais características (Retirado de: [63])



Potência CT²	5.5 Kw
Potência VT³	7.5 Kw
Tensão de Entrada	380 V – 480 V
Frequência de Entrada	50 Hz/60 Hz
Tensão de Saída	0 V – 480 V
Frequência de Saída Máxima	400 Hz
Corrente de Saída Nominal CT	14.8 A
Corrente de Saída Nominal VT	17.5 A
Eficiência em Carga Nominal	96 %

ENQUADRAMENTO TEÓRICO

Resumidamente, um variador eletrónico de velocidade, também conhecido por variador de frequência ou inversor, tem a capacidade de modelar a energia elétrica que lhe é fornecida. Para este efeito, a corrente ao entrar no variador irá sofrer um conjunto de transformações graças à presença de um conversor CA/CC (retificador), de um filtro e de um inversor. À saída obtém-se um sinal modelado, com frequência e/ou tensão variável [62] [64].

² CT – *Constant Torque* – Binário constante

³ VT – *Variable Torque* – Binário Variável

Para o caso de se ter na entrada CA trifásica, cada uma das três fases provenientes da fonte irá ligar-se a um dos três pares de diodos presentes no retificador. Estes tipos de componentes permitem que a corrente apenas flua numa direção, do ânodo para o cátodo, impedindo que esta se desloque novamente para trás. Assim, a corrente alternada será convertida em corrente contínua. A eletricidade irá fluir pelas diferentes fases, que se encontram desfasadas 120° , de forma cíclica. Isto é, os diodos apenas irão permitir que esta entre pela fase que se encontra no pico positivo da sua onda até à carga, que neste caso será o motor, bloqueando as restantes. Ao passar a carga, a corrente precisa de voltar para a fonte e fá-lo-á pela fase que se encontra na polaridade negativa do seu ciclo de onda sinusoidal. Por exemplo, na Figura 83 é possível observar o caso em que a corrente flui na fase 1 através do diodo 1, pico positivo, e depois volta para a fase 2 através do diodo 6. Este ciclo irá repetir-se constantemente para as diferentes fases e diodos, garantindo assim a alimentação correta do sistema [64].

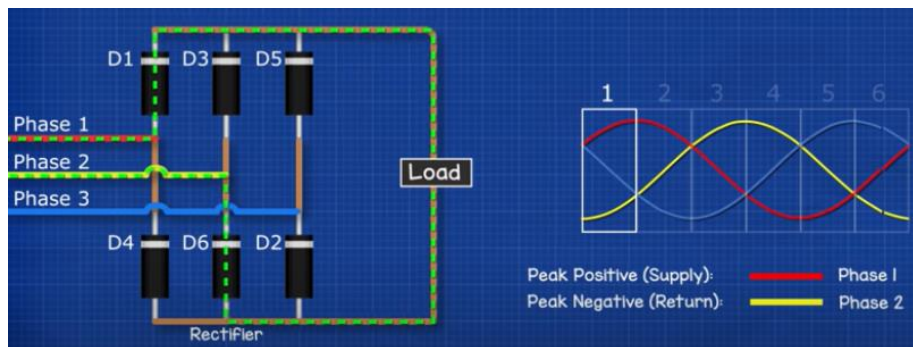


Figura 83 - Esquema ilustrativo do funcionamento do retificador (Retirado de: [64])

De seguida, esta flui para o barramento de corrente contínua, que consiste basicamente num filtro, composto por condensadores. O seu principal propósito será eliminar as oscilações da corrente proveniente do estágio anterior. Para tal, este irá funcionar como uma espécie de armazenamento que irá absorver eletrões do fluxo quando há excesso, ou fornecer quando houver escassez dos mesmos, originando, desta forma, uma tensão constante e suave [64]. Passando para o último posto, a corrente contínua gerada dará lugar a corrente alternada de frequência variável, capaz de ser controlada com precisão, através da existência do inversor. Como é possível observar na Figura 84, o inversor possui três interruptores de dupla passagem que, no caso dos equipamentos OMRON, se trata de IGBTs⁴.

⁴ IGBTs – *Insulated Gate Bipolar Transistors* - Transístores Bipolares de Porta Isolada

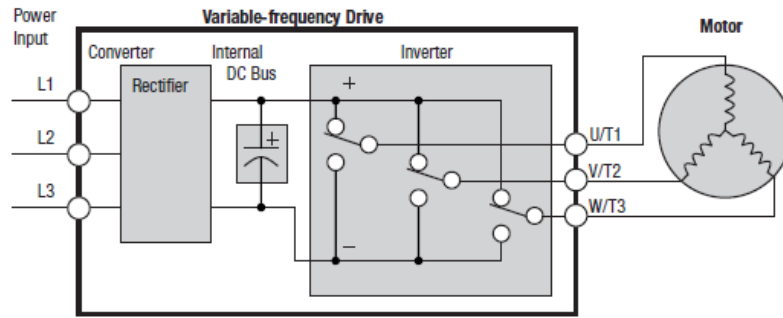


Figura 84 – Componentes e esquema de ligações de um variador da marca OMRON (Retirado de: [62])

Através de um algoritmo de comutação, o microprocessador existente no equipamento irá ligar e desligar os IGBTs a uma velocidade suficientemente alta, que permita criar a saída desejada das formas da onda [62]. Isto é, a saída do variador é uma onda quadrada, dado que não produzem uma onda sinusoidal, no entanto, caso se pretenda variar a frequência é necessário ter em conta o rácio V/Hz, uma vez que a força magnética dentro do motor está diretamente relacionada com a sua frequência e tensão. Para tal, com vista a reduzir a tensão para um valor diferente do limite originado no barramento CC, como se pode ver na Figura 85, recorre-se à técnica PWM⁵ com o auxílio de um controlador.



Figura 85 - Diferentes sinais obtidos ao longo da passagem da corrente no variador (Retirado de: [65])

Desta forma, a velocidade do motor irá ser controlada ao fazer abrir e fechar os transistores várias vezes por ciclo, a velocidades elevadas, variando em largura cada pulso. Para controlar a tensão de saída é necessário controlar quanto tempo os interruptores permanecem fechados, ao passo que, no caso da frequência, deve-se controlar a ocorrência de cada pulso. Cada ciclo será dividido em múltiplos segmentos, sendo que a alternância entre o estado aberto e fechado dos transistores irá determinar a quantidade de fluxo fornecido em cada segmento. Tal vai resultar numa corrente média por cada parcela, que vai aumentando e diminuindo ao longo do ciclo, resultando numa onda, teoricamente, sinusoidal, tal como se pode observar na Figura 86 [66].

⁵ PWM – *Pulse With Modulation* – Modulação de Largura de Pulso

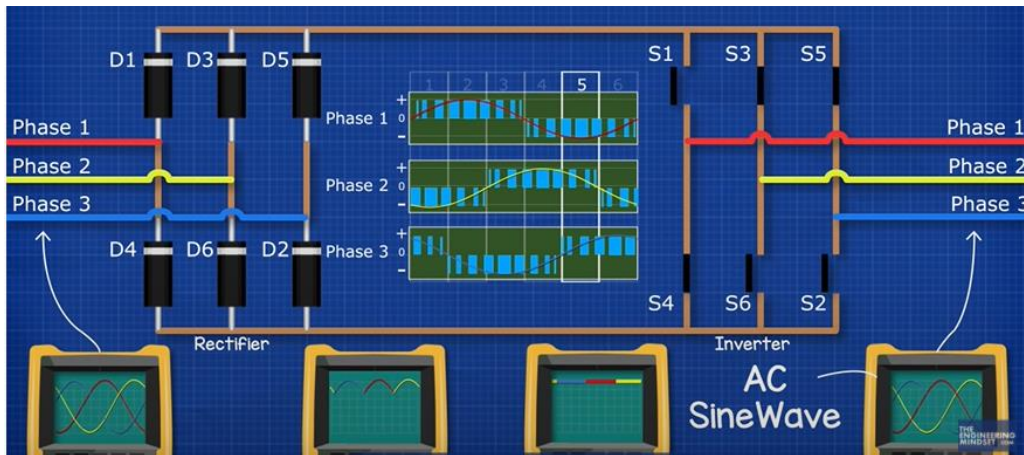


Figura 86 – Onda resultante em cada fase à saída do variador (Retirado de: [64])

A introdução destes equipamentos no controlo da velocidade do motor apresenta como aspetos positivos [66]:

- melhor controlo do sistema;
- menor desgaste mecânico do motor;
- maior vida útil;
- economia da energia;
- aumento da produtividade.

PAINEL FRONTAL DO VARIADOR

O operador poderá controlar o inversor através do seu painel frontal, composto por um visor que reflete os vários parâmetros da performance do equipamento. Este possui diferentes LED que transmitem quer as unidades de trabalho (Hz ou A), quer os estados possíveis, como a fonte de energia ativa (PWR), o modo programação/monitorização (PRG), o modo de funcionamento (RUN) ou ocorrência de um erro (ALM).

Para proceder à definição dos parâmetros e controlo das operações, recorre-se ao teclado presente, correspondendo cada botão a:

- RUN – permite, após devidamente programado, colocar o motor a rodar, ativando o LED RUN;
- STOP/RESET – para além de parar a rotação do motor quando desejado, permite reverter para o modo programação sempre que ocorra um erro, ao apagá-lo;

- ↑ e ↓ - as setas são utilizadas para navegar ao longo dos vários códigos, bem como pelos valores que se pretende definir dentro de cada um deles. Para valores mais distantes pressiona-se continuamente a respetiva seta, de modo a ser mais rápido, e para programar manualmente cada dígito pressiona-se os dois ao mesmo tempo;
- Botão azul – é utilizado sempre que se pretende mudar o grupo de funções e para voltar atrás quando se pretende cancelar a alteração do valor de uma dada função. No modo programação dígito a dígito, permite mover o cursor para a esquerda;
- Botão amarelo – funciona como um “ok”, ou seja, depois de procurar o código da função pretendida, pressiona-se o botão e é possível alterar o valor do parâmetro. Depois, pressiona-se novamente para confirmar o valor selecionado e voltar ao à lista de funções. Quando em modo manual de programação, move o cursor para o dígito da direita.



Figura 87 - Painel frontal do variador

CONSIDERAÇÕES

Por norma, os inversores da OMRON são compatíveis com motores de indução trifásicos CA, permitindo obter diferentes respostas por parte do motor conforme o algoritmo V/Hz selecionado na função A044. Na Figura 88 é possível observar as possibilidades existentes para este parâmetro. Por exemplo, ao selecionar a opção 03, o programador irá definir arbitrariamente nas funções b100 a b113 os sete pontos que irão compor a curva característica V/Hz.

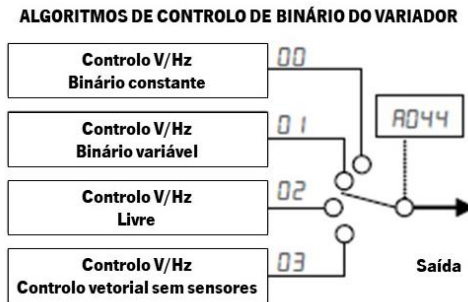


Figura 88 - Opções para seleção da função A044 (Adaptado de: [62])

No caso de motores de ímanes permanentes, como é o caso dos equipamentos existentes na fresadora SwissPerfo, o variador também é viável. No entanto, ao selecionar esta categoria, é automaticamente eliminada a hipótese de selecionar a função A044, ou seja, o motor é testado sem algoritmo de controlo de binário. Assim, apenas é possível variar a frequência enquanto o motor está em funcionamento através do parâmetro F001, tendo em conta os valores base (A003) e máximo (A004) definidos para esta grandeza. As possibilidades da variável b171 são apresentadas na Tabela 14.

Tabela 14 - Opções possíveis da função b171 [62]

Código da função	Nome	Descrição
b171	Seleção do modo do inversor	00 – Sem função
		01 – Motor de indução padrão
		02 – Motor de indução de alta frequência
		03 – Motor de ímanes permanentes

Ao ser selecionado o modo 03, há muitas funções e parâmetros de deixarão de estar disponíveis, principalmente no grupo “H”. Além disso, existem algumas limitações do variador associadas a esta família de motores, como por exemplo: não é adequado a aplicações de binário reduzido, não constante, e não permite o controlo simultâneo de dois ou mais motores.

De salientar que, fora as funções que precisam de ser alteradas de modo a serem compatíveis com o motor e teste a realizar, todas as outras funções estão com a definição de fábrica. Esta corresponde a um teste simples e sem aditivos, que irá permitir colocar o motor a rodar e variar certos valores, daí não ser necessário estar a verificar aquelas que não precisam de alteração. Para testes mais detalhados e específicos, por exemplo testes com travão, do termistor, com curva de controlo, testar mais do que um motor ou experimentar controlo remoto. aconselha-se a consulta do manual da OMRON para proceder corretamente [62].

PROCEDIMENTO DE TESTE DOS MOTORES

Antes de se explicar qual o procedimento de teste básico a realizar, apresenta-se na Tabela 15 os grupos de funções existentes na programação do variador.

Tabela 15 - Grupos de funções do inversor da OMRON [62]

Grupo d	Funções de monitorização
Grupo F	Principais parâmetros do perfil
Grupo A	Funções padrão
Grupo b	Funções de afinação fina, de inicialização e memória
Grupo C	Funções relacionadas com os terminais inteligentes
Grupo H	Funções relacionadas com as características do motor
Grupo P	Outros parâmetros como opções em caso de erro, definições do codificador, binário, comando de posicionamento, programação da transmissão e funções relacionadas com a comunicação
Grupo U	Parâmetros selecionados pelo utilizador
Grupo E	Códigos de erro

De seguida, apresenta-se o procedimento de teste para o caso dos motores síncronos de ímanes permanentes presentes na fresadora SwissPerfo [62] :

- 1.** Após garantir que o variador não está a ser alimentado, retirar a tampa para estabelecer as ligações do motor ao variador de frequência e de seguida recoloca-la de modo a assegurar a segurança do operador. As respetivas ligações podem ser observadas na Figura 89. Caso exista a necessidade de aceder a este compartimento e o LED PWR esteja ativo, deve-se desligar o equipamento da fonte de energia e aguardar cerca de 10 minutos. De salvaguardar, que não se deve avançar para o ponto 2 sem antes garantir que as devidas tampas que cobrem os terminais e a peça divisória dos cabos estão devidamente colocadas;
- 2.** Ligar o variador numa ficha adequada com 5 pinos e ligar a energia no quadro elétrico. No caso das oficinas do Departamento de Engenharia Mecânica, estes dispositivos encontram-se atrás da fresadora SwissPerfo. Na Figura 89 é mostrada a sua disposição e qual o interruptor responsável pelo fornecimento de energia;

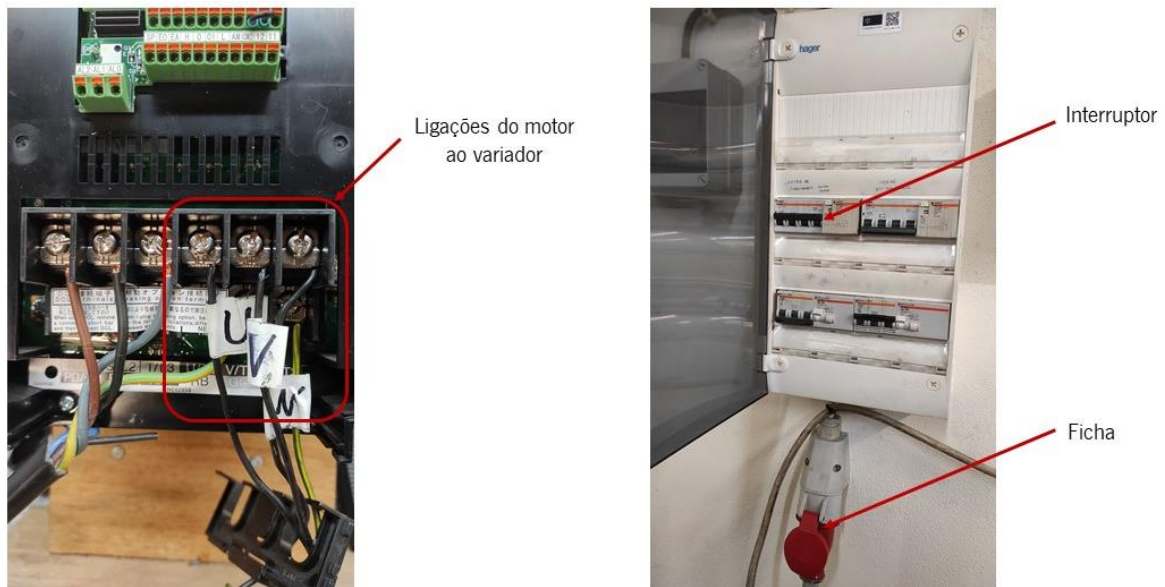


Figura 89 – Representação das ligações a realizar no ponto 1, à esquerda; Localização da ficha e do interruptor de energia essenciais à alimentação do variador de frequência, à direita

3. Tendo em conta o tipo de motor a testar, definir em primeiro lugar o parâmetro **b171 = 03**. Assim garante-se que, após o método de inicialização, o inversor se encontra no modo pretendido, restringindo as possibilidades de programação às funções permitidas para a categoria de motores selecionada;
4. Realizar o processo de inicialização sempre que o inversor é ligado ou se o modo de operação for alterado: b084 = 03, b094 = 02, b085 = 01, b180 = 01. O significado de cada função é apresentado na Tabela 16;

Tabela 16 - Parâmetros de inicialização do variador de frequência [62]

Função B		
Código	Nome	Descrição
b084	Modo de inicialização (parâmetros ou histórico de funcionamento)	Seleção dos dados de inicialização: 00 – Inicialização desativada 01 – Eliminação do histórico 02 – Inicialização de todos os parâmetros 03 – Eliminação do histórico e inicialização de todos os parâmetros 04 – Eliminação do histórico, inicialização de todos os parâmetros e do programa EzSQ

Função B		
Código	Nome	Descrição
b094	Definição dos dados alvos de inicialização	Selecionar os parâmetros a inicializar: 00 – Todos os parâmetros 01 – Todos os parâmetros exceto os terminais de entrada/saída e comunicação 02 – Apenas parâmetros registados em Uxxx 03 – Todos os parâmetros exceto os registados em Uxxx e em b037
b085	Seleção inicial de dados	Seleção dos dados iniciais para a inicialização: 00 – JPN/UN 01 – EU
b180	Ativação da inicialização	Realizar a inicialização com os parâmetros introduzidos em b084, b085 e b094: 00 – Inicialização desativada 01 – Ativar inicialização

5. Aguardar a indicação d001;

6. Estabelecer os parâmetros para controlar o motor nas respetivas funções: A001 = 02, A002 = 02, A003 = 50 Hz, A004 = 150 Hz, H104 = 14, b012 = 4.4 A, b171 = 03 (Tabela 14). Na Tabela 17 é possível perceber o significado da opção escolhida dentro de cada função, discriminando-se as restantes possibilidades, dado não serem relevantes para o caso em questão;

Tabela 17 - Parâmetros de programação do motor [62]

Código	Nome	Descrição
A001	Fonte de frequência	02 – Operador digital Permite ao operador controlar a frequência de rotação do motor e, consequentemente, a sua velocidade, no próprio teclado do monitor, através do parâmetro F001.

Código	Nome	Descrição
A002	Fonte do comando RUN	<p>02 – Operador digital</p> <p>Permite ao operador premir o botão RUN, fazendo com que o variador acelere o motor até à velocidade inicialmente definida, por defeito. Uma vez selecionada esta função, o LED imediatamente acima do comando RUN liga, o que significa que o botão deixa de estar bloqueado, no entanto, só deve ser premido quando a configuração dos parâmetros estiver totalmente concluída.</p>
A003	Frequência base	<p>Configura a frequência base do motor em Hz, podendo variar entre 30 Hz e a frequência máxima definida em A004. Para este parâmetro é necessário ter em atenção as especificações do motor, por norma, desenvolvidos para operar a uma frequência de corrente alternada específica. Por defeito, esta função varia entre dois valores, não devendo passar estes limites sem aprovação do fabricante: US = 60 Hz, EU = 50 Hz.</p>
A004	Frequência máxima	<p>Os valores desta função podem variar entre 30 Hz e 400 Hz. Pode ser variado conforme o que se pretende em termos de teste, uma vez que influencia o valor máximo que se poderá definir na função F001. Assim, definiu-se arbitrariamente A004 = 150 Hz, permitindo testar o motor com velocidade elevada.</p>
b012	Nível de regulação térmica eletrónica	<p>O inversor possui proteção térmica de sobrecarga, de modo a proteger-se a si mesmo e ao motor de sobreaquecimento. Este parâmetro é ajustável de 20% a 100% da corrente do inversor, ou seja, de 2.96 A até 14.8 A. O inversor vai usar a corrente nominal do motor para atribuir um valor correto a este código. Para tal, ao selecionar-se b012 irá surgir o código b160, onde estará o valor da corrente nominal máxima do variador. Depois navega-se até b140, onde se define a corrente nominal do motor. Uma vez definidos estes valores, volta-se a b012, estando configurada esta proteção do equipamento.</p>

Código	Nome	Descrição
H104	Seleção do número de polos (motor de ímanes permanentes)	<p>Consoante o número de polos do motor, atribui-se o valor correspondente na lista desta função:</p> <ul style="list-style-type: none"> 2 (0) / 4 (1) / 6 (2) / 8 (3) / 10 (4) / 12 (5) / 14 (6) / 16 (7) / 18 (8) / 20 (9) / 22 (10) / 24 (11) / 26 (12) / 28 (13) / 30 (14) / 32 (15) / 34 (16) / 36 (17) / 38 (18) / 40 (19) / 42 (20) / 44 (21) / 46 (22) / 48 (34) polos. <p>Na presença de um tipo de motor diferente, o código da função a utilizar também muda, sendo ele o H004, que tem como valores disponíveis:</p> <ul style="list-style-type: none"> 0 (2) / 1 (4) / 2 (6) / 3 (8) / 4 (10) polos.
F004	Seleção do sentido de rotação	<p>Caso se pretenda inverter o sentido de rotação, para o sentido contrário aos ponteiros do relógio, pode-se alterar o valor desta função antes de se colocar o motor a girar:</p> <p>00 – sentido dos ponteiros do relógio; 01 – sentido inverso.</p>

- 7.** O inversor está pronto a colocar o motor a rodar, mas antes é necessário confirmar as seguintes variáveis: LED PWR e LED do botão RUN ligados, LED PRG desligado, ou seja, motor sem carga;
- 8.** Uma vez reunidas as condições, premir o botão RUN. O LED ficará ativo e o motor deverá começar a rodar;
- 9.** Para parar o motor, premir o botão STOP/RESET.

Terminada a definição dos parâmetros e estando o motor a rodar, o variador deixa de estar no modo programação e passa para o modo de monitorização. O LED PRG fica desativo, bloqueando a alteração da maioria dos dados.

De modo a testar a potência do motor, irá controlar-se a sua velocidade em tempo real, através da variação da frequência de saída do inversor na função F001. Por definição de fábrica, este valor arranca em 6 Hz, valor ideal para arranque sem erros. A partir daqui varia-se este valor conforme o comportamento do motor que se pretenda observar, ou seja, desde velocidade zero ou mínima possível,

até velocidades elevadas de rotação. À medida que se altera estes valores, também é possível monitorizar dados relevantes para estudar o comportamento do motor, como por exemplo:

- d001 – monitoriza a frequência de alimentação para o motor;
- d002 – monitoriza a corrente de alimentação para o motor;
- d013 – monitoriza a tensão de alimentação para o motor.

Da alteração dos valores da frequência de alimentação podem advir erros que levam à paragem do motor, sendo os mais comuns: E05.3 e E05.4, associados à proteção contra a sobrecarga do motor; E38, que diz respeito à sobrecarga do variador. No caso de ocorrência de outro erro desconhecido do tipo Exx deve recorrer-se ao manual [62], no ponto 6-2-2, para saber que qual o tipo e que procedimentos deverão ser adotados. Os procedimentos para resolver a ocorrência deste tipo de problema são: saber qual o tipo de erro, premir o botão amarelo (disponível após 10 segundos da ocorrência) e, caso se pretenda realizar um novo teste, antes de se pressionar a tecla RUN, deve-se alterar para os valores de origem todos os valores modificados ao longo da última intervenção.

O inversor possui, também, um sistema de bloqueio que impede a alteração, acidental ou propositada, dos dados presentes na sua memória, sendo composto por vários níveis de proteção. Uma vez que foram encontrados problemas com este tópico, urge deixar explícito qual o procedimento de resolução caso se queria programar o inversor e existam funções bloqueadas, mesmo estando o LED do botão RUN ativo.

Neste caso, a primeira coisa a fazer é verificar qual o valor da função b031, descrita na Tabela 18. Se este for de 00, 01, 02 ou 03, quer dizer que se irá encontrar sempre dificuldades na alteração dos dados das funções. Para resolver o problema deve-se alterar o valor para 10, desbloqueando assim o aparelho. Após este passo, realizasse de novo o processo de inicialização e b031 estará no modo 01, que é compatível com a alteração dos diferentes códigos. Este valor só pode ser alterado no modo programação.

Tabela 18 - Descrição do comando b031 [62]

Código	Nome	Descrição
b031	Seleção do modo de bloqueio da memória	<p>De modo a prevenir a alteração dos dados, existem cinco opções de bloqueio:</p> <p>00 – Bloqueado (apenas permite a alteração do valor de b031; modo com duas entradas inteligentes – ON ou OFF);</p> <p>01 – Apenas frequência (dados que não b031, F001 e os parâmetros associados grupo de multivelocidades, não podem ser alterados; modo com duas entradas inteligentes – ON ou OFF);</p> <p>02 – Bloqueado (apenas permite a alteração do valor de b031);</p> <p>03 – Apenas frequência (dados que não b031, F001 e os parâmetros associados grupo de multivelocidades, não podem ser alterados)</p> <p>10 – Modo de mudança em RUN ativo (permite a alteração de todos os parâmetros e quando em modo operação, só dos dados modificáveis).</p>

Todo este procedimento garante que o motor gire e permite controlar a sua velocidade. Este equipamento também permite inserir e controlar outros sinais como o travão, o termistor, o codificador, entre outros. Para tal, aconselha-se a leitura atenta do manual do equipamento, de modo a não colocar em causa a vida dos aparelhos. Neste documento também se encontra possíveis falhas que possam ocorrer e quais as ações corretivas que devem ser postas em prática (secção 6-1-4 de [62]).

APÊNDICE 3 – OSCILOSCÓPIO

O osciloscópio é um instrumento de medição que permite visualizar graficamente como é que um sinal elétrico varia no tempo. Possui um ecrã em formato de grelha (8*10 divisões), com dois eixos principais: o eixo vertical representa a amplitude do sinal (tensão) e o eixo horizontal representa o tempo. Para além de permitir determinar o valor destas variáveis, este tipo de gráfico é utilizado para determinar a frequência de um sinal periódico, detetar a interferência de ruído num sinal e, ainda, comparar dois sinais existentes no circuito de um dado componente.

As oficinas do Departamento de Engenharia Mecânica possuem um osciloscópio da marca Philips, modelo PM3350A (1990), com dois canais de entrada. Apesar de existirem modelos mais modernos, surge a necessidade de tirar o máximo proveito do material à disposição, assim como, criar guias que permitam uma utilização facilitada do aparelho. Neste documento proceder-se-á, então, à descrição do painel frontal do instrumento e dos passos a seguir na configuração dos comandos. Para esclarecimentos mais específicos recomenda-se a utilização do manual do osciloscópio disponível em [67].

OSCILOSCÓPIO PHILIPS – PM3350A

O painel do osciloscópio encontra-se dividido em sete áreas, de acordo com a tipologia e a função que desempenham, tal como se pode observar na Figura 90.



Figura 90 - Distribuição do painel frontal do modelo PM3350A da Philips

A partir dos itens numerados na figura anterior, na Tabela 19 procede-se à descrição da função de cada um deles, destacando que se procurou fazer uma seleção dos comandos mais utilizados nos testes realizados.

Tabela 19 - Descrição dos comandos do osciloscópio [67]

	Nº	Designação	Função/Descrição
Controlos do ecrã	1	Interruptor de alimentação	Ligar o osciloscópio.
	2	Intensidade	Ajuste do brilho do traço.
	3	Rotação do traço	Alinhamento do traço com o eixo horizontal.
	4	Focagem	Permite focar o traço produzido (< exatidão na medição).
	5	Intensidade luminosa	Ajuste da luminosidade do ecrã.
Controlo do eixo vertical	7	Posição no eixo vertical	Ajuste da posição da onda de cada canal no eixo Y.
	8	Amplificação vertical (ajuste contínuo)	Deve estar na posição CAL – calibrado.
	9	Amplificação vertical [Analógico: 0.5 s/div — 50 ns/div] [Digital: 2 mV/div — 10 V/div]	Definição do valor, em tensão, a que corresponde cada divisão da grelha (Volts/divisão). Por exemplo, se definir 0.5V/div e se tiver um sinal sinusoidal que ocupa, pico a pico, 4 divisões, quer dizer que o sinal tem uma tensão de 2 V (pico a pico). Deve procurar-se que a forma de onda ocupe a maior área possível no ecrã, de modo a obter-se uma medição da tensão mais exata. [U _{pico-a-pico} = n° divisões * V/div]
	10	Acoplamento de entrada	Definição do método de ligação entre o circuito sob teste e o osciloscópio: DC - o sinal é apresentado sem ser alterado; AC - o sinal é apresentado sem a componente contínua do sinal, apresentando apenas a componente variável no tempo (ao passar de DC para AC o sinal centra-se no eixo horizontal); GND - o sinal de entrada deixa de estar ligado ao sistema vertical, ligando-se à massa do osciloscópio, o que permite localizar a linha horizontal de referência na posição vertical, a partir da qual se realizarão todas as medições.
	11		

	Nº	Designação	Função/Descrição	
	12	Seleção dos modos de apresentação do sinal	Estes comandos são utilizados para definir o modo de apresentação dos sinais no ecrã, existindo as seguintes opções: A B - permite alternar entre só mostrar o canal A, o canal B ou mostrar os dois; ALT CHOP - no caso dos osciloscópios analógicos, a visualização simultânea dos dois canais pode ser feita de modo ALT - alternado (os sinais são desenhados alternadamente, sendo ideal para sinais de média/alta frequência) ou CHOP - fatiado (os sinais são desenhados aos bocadinhos, comutando entre os dois canais rapidamente; preferido para a análise de sinais lentos); ADD INVERT - o primeiro resulta na soma algébrica dos dois sinais, o segundo na inversão do sinal de entrada e a combinação dos dois permite subtrair dois sinais, ao adicionar um sinal com o inverso do segundo.	
	13			
	14			
	15	Ajuste automáticos dos parâmetros principais	Ajuste da atenuação do sinal, a base de tempo e a fonte do sistema de sincronismo.	
	Controlo do eixo horizontal	16	Posição no eixo horizontal	Ajuste da posição das ondas no eixo horizontal (útil para a medição do período).
		17	Zoom horizontal	Permite visualizar uma parte do sinal com maior pormenor.
18		Posicionamento do Zoom	Permite seleccionar a parte de interesse a visualizar com zoom.	
19		Ajuste da base de tempo - ajuste contínuo	Deve estar na posição CAL – calibrado.	
20		Ajuste da Base de Tempo [50 s/div — 0.5 µs/div]	Ajuste da velocidade de varrimento, correspondendo o valor ao tempo que vale cada divisão horizontal (segundos por divisão). Para sinais de maior frequência deve-se definir valores pequenos de s/div e vice-versa. Para uma medição de tempo mais exata, ajustar este comando de modo a obter uma grande cobertura do ecrã. $[T = n^{\circ} \text{ divisões} * \text{s/div}]$	
21		Fonte de disparo	Seleção do sinal que atua como fonte para o disparo da Base de Tempo, que pode ser: um sinal interno (A, B ou ambos alternadamente, no caso de possuírem frequências diferentes, estabilizando a imagem no ecrã), um sinal externo (EXT), ligado à entrada do painel correspondente ao nome, ou um sinal da rede de alimentação (LINE). O comum é utilizar um sinal interno como sinal de entrada.	

Nº	Designação	Função/Descrição
22	Acoplamento de disparo	Permite a filtragem do sinal que vai ser comparado com o nível de disparo definido, de modo a evitar problemas de sincronismo. As opções mais usadas são: P-P - pico a pico, que define automaticamente o alcance do comando TRIG LEVEL, determinado pelo valor de pico a pico do sinal (despreza a componente contínua); DC - não tem em conta os valores dos picos do sinal, dando liberdade no ajuste do nível; HF - filtragem de altas frequências; LF - filtragem de baixas frequências.
23	Modo de disparo	Os modos principais são o AUTO - automático e o TRIG - manual. O primeiro é o mais utilizado e, basicamente, garante que há sempre varrimento do sinal, mesmo que não tenha sido atingido o ponto de disparo. No segundo, o sinal só é desenhado se houver sincronismo, isto é, se o sinal que se comporta como fonte de disparo atingir o ponto definido como tal. Existe, ainda, o modo SINGLE , que realiza um varrimento único e é útil quando se pretende analisar ou capturar o sinal.
24	Nível de disparo	Ajuste da amplitude do ponto de disparo, de modo a definir em que nível de tensão do sinal de entrada se dá o disparo.
25	Declive de disparo	Definição do declive de disparo: declive positivo ou declive negativo (se ocorre na subida ou na descida do sinal de entrada).
26	Tempo de espera do disparo	Definição do período de tempo no qual o osciloscópio não pode disparar, assegurando assim que o sinal é disparado no instante correto.
27	Posicionamento do disparo	Presente no modo digital, faz variar a posição horizontal do disparo, o que permite analisar as características do sinal antes de este acontecer, no momento (0 divisões) ou depois de acontecer o instante do disparo

O utilizador consegue saber qual as funções ativas, bem como acompanhar as seleções que realiza em cada comando a partir do LCD, destacado na Figura 90 com o número 28. De destacar, que quando algum dos seus segmentos se encontra em estado intermitente deve-se procurar saber a causa, que pode ir desde uma seleção incorreta de um botão/tecla ou a chegada ao limite da gama de opções de um dos controlos selecionados.

Este osciloscópio permite dois modos [68]:

- modo analógico – ideal para situações em que se pretende visualizar sinais com variações muito rápidas em tempo-real;
- modo digital – primeiro trata e armazena a informação e só depois apresenta as formas de onda, normalmente com dois níveis de tensão (níveis lógicos 0 e 1).

O último modo foi o predileto, uma vez que permite obter melhores resultados tendo em conta o tipo de sinal a medir. O osciloscópio inicia no modo analógico, bastando pressionar a tecla DIGITAL MEMORY (item nº 29 da Figura 90) presente no painel, para que este assuma um comportamento digital. Existem funções que deixam de estar disponíveis, tais como: ADD, ALT/CHOP, X DEFL, COMP TRIG, X VAR. Em [67] é possível perceber mais detalhadamente o princípio de funcionamento destes equipamentos, quer sejam analógicos ou digitais, desde a obtenção do sinal até à sua amostragem no ecrã.

Outra característica importante destes equipamentos é o sistema de sincronismo ou sistema de disparo (*trigger*). Esta funcionalidade permite uma visualização estabilizada do sinal no ecrã, através da garantia de que os sinais de entrada são sempre desenhados nos mesmos pontos da grelha. Isto é ideal para a análise de sinais periódicos ou transitórios. Basicamente, o circuito responsável por esta funcionalidade atua como um comparador, ou seja, uma vez definido o nível e inclinação da tensão do ponto onde se começa a desenhar a forma de onda, compara-o com o sinal de entrada. Quando este verifica as condições definidas, o osciloscópio gera o disparo [68].

Para se ligar o circuito a testar ao osciloscópio é necessário utilizar pontas de prova. As pontas disponíveis destacam-se por atenuarem o sinal de entrada, através de um circuito de atenuação presente na ponta principal. Para além deste, tal como se pode observar na Figura 91, estes dispositivos possuem um conector, uma ponta de sinal em forma de gancho, onde se liga o fio a medir, e uma garra (terminal de massa ligado à massa do osciloscópio).



Figura 91 - Ponta de prova

Um passo importante a realizar antes de cada medição é verificar se as pontas de prova se encontram calibradas, garantindo a viabilidade dos sinais. O procedimento é o seguinte [67]:

- Ligar a ponta de prova a um dos canais;
- Ligar o terminal da ponta de prova ao sinal de referência em forma de onda quadrada, existente no terminal CAL 1.2 V (item nº6 da Figura 90). Não é necessário ligar a massa à Terra, pois essa ligação já está feita internamente;
- Analisar o sinal no ecrã e proceder à regulação da capacidade do condensador variável, ajustando o parafuso com cabeça cilíndrica fenda simples destacado na Figura 91. O circuito de atenuação encontra-se corretamente compensado quando os cantos da onda quadrada formam ângulos retos.

Por último, os osciloscópios permitem realizar diversas medidas, quer a partir da visualização do ecrã quer de forma automática, no entanto, é sempre importante que o utilizador seja capaz de perceber os resultados obtidos. O ecrã é a maior fonte de informação nesta vertente, as divisões da grelha e respetivas subdivisões permitem fazer medições exatas das formas de onda obtidas. através do deslocamento horizontal e vertical destas. Existem, também, marcações ao longo do eixo vertical com 0%, 10%, 90% e 100%, que auxiliam na medição do tempo de subida. No caso dos osciloscópios digitais, estes apresentam informações no ecrã como o canal apresentado, a amplificação vertical, a velocidade de varrimento e a fonte de disparo. Além disso, o modo digital disponibiliza um menu de funções para o cálculo das diferentes variáveis que, no caso do equipamento da Philips, pode ser acedido através das teclas presentes por baixo do ecrã [68].

PROCEDIMENTO DE TESTE

Apresentado o osciloscópio e respetivo painel, demonstra-se o procedimento comum seguido nos testes realizados aos dispositivos de medição dos motores da fresadora SwissPerfo. O que irá variar de teste para teste é o ajuste necessário em certas variáveis. O algoritmo é o seguinte [68]:

Ajuste dos comandos do ecrã

1. POWER LINE ON – ativo
2. INTENS – meio da escala
3. FOCUS – meio da escala
4. ILLUM – meio da escala

Ajuste dos comandos do sistema horizontal

1. DIGITAL MEMORY – ativo
2. VAR – CAL
3. TB – começar com 50 ms/div e ajustar, se necessário
4. X POS – meio da escala

Ajuste dos comandos do sistema vertical

1. A|B – definir os parâmetros primeiro para um dos canais (A ou B) e depois selecionar a opção que mostra os dois, ajustando o segundo a partir do primeiro
 - Instruções a aplicar para cada canal:
2. GND – ativo
3. Y POS – posicionar no meio do ecrã no caso de se querer visualizar apenas um canal, ou numa das metades da grelha, caso se utilizem os dois canais
4. AC|DC – DC
5. VAR – CAL
6. V—mV – meio da escala e ajustar a partir desse valor, conforme a necessidade em cada canal

Ajuste dos comandos do sistema de sincronismo

1. TB TRIG MODE – AUTO
2. TRIG OR X SOURCE – no caso de se visualizar apenas um canal, seleciona-se o próprio (A ou B); no caso de se analisar dois sinais com a mesma frequência, optar por um deles, mas se tiverem frequências diferentes utilizar a opção de ambos (A B)
3. TRIG COUPL – P-P
4. TRIG LEVEL – meio da escala
5. $\int \uparrow - \int$
6. HOLD OFF – MIN
7. TRIG DEL – meio da escala

Nota

Existe a opção de selecionar a tecla AUTO SET, que ajusta automaticamente os parâmetros mais relevantes para a configuração mais conveniente, ficando os restantes ajustes a cargo do operador. Contudo, nas experiências realizadas, existiu necessidade de realizar este procedimento manualmente.

Qualquer que seja o tipo do osciloscópio, para efetuar uma medição é necessário ajustar, pelo menos, os três comandos principais: o comando que regula a amplificação do sinal (V/div), o comando que ajusta a velocidade de varrimento (s/div) e os comandos que definem o nível e a inclinação do disparo da base de tempo. Os restantes iniciam na definição de fábrica e podem ser alterados em caso de necessidade.

APÊNDICE 4 – TESTE DOS SENSORES FIM DE CURSO

MATERIAL

Para efetuar o teste dos sensores será necessário o seguinte material:

- Fonte de alimentação regulável;
- Multímetro;
- Pontas de prova;
- Cabos crocodilo;
- Peça metálica.

PROCEDIMENTO [69]

O procedimento a adotar no teste deste tipo de sensores é o seguinte:

1. Regular a fonte de alimentação para uma tensão de 24 V, uma vez que a tensão de operação dos sensores se situa entre 10 V e 30 V, e para uma corrente de 0.3 A, um pouco acima dos 0.2 A de operação do equipamento;
2. Retirar os fios do sensor a testar do barramento, onde estavam acoplados, e energizar externamente;
3. Ligar o cabo crocodilo do polo positivo da fonte ao fio castanho do sensor e o cabo do polo negativo ao fio azul;
4. Ligar a ponta de prova preta ao terminal “COM” (Terra/Negativo) do multímetro e a ponta de prova vermelha ao terminal “V Ω μ A”;
5. Ligar uma das pontas do cabo crocodilo à ponta de prova preta e a outra ponta ao fio azul do sensor. Repetir o procedimento com outro cabo crocodilo, desta vez para a ponta de prova vermelha, ligando a ponta que sobra do cabo ao fio preto;
6. Ligar a fonte de alimentação no modo CC;
7. Ligar o multímetro na posição de tensão contínua;
8. Aproximar uma peça metálica da superfície de ativação e observar a variação do sinal no multímetro.

Na Figura 92 observa-se um exemplo da configuração das ligações para o caso do sensor que deteta a fixação da ferramenta de corte. Para os restantes, o procedimento de teste segue a mesma lógica, diferenciando-se apenas na cor dos fios no caso dos sensores 807, 808 e 809, em que o fio azul passa a ser branco e o fio verde toma o lugar do preto.

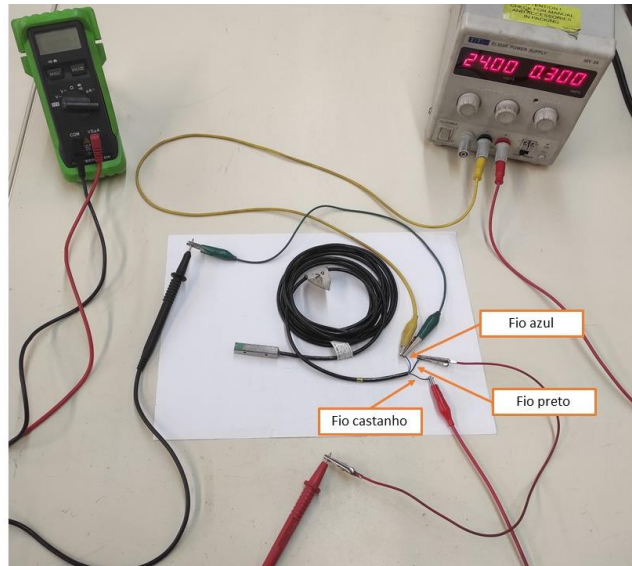


Figura 92 - Configuração das ligações necessárias para o teste do sensor

Ao não detetar nenhum metal na sua proximidade, o sinal que se obtém é de aproximadamente 0 V, dado que este é do tipo PNP normalmente aberto, ou seja, quando não estiver atuado a corrente não flui. Esta situação encontra-se presente na Figura 93, onde é possível visualizar os valores registados quer no multímetro, quer na fonte de alimentação, quando nenhum metal é detetado na proximidade da zona de ativação. Também é possível perceber a que corresponde cada botão da fonte de alimentação e qual a posição correta no multímetro para realizar o teste do sensor com sucesso.

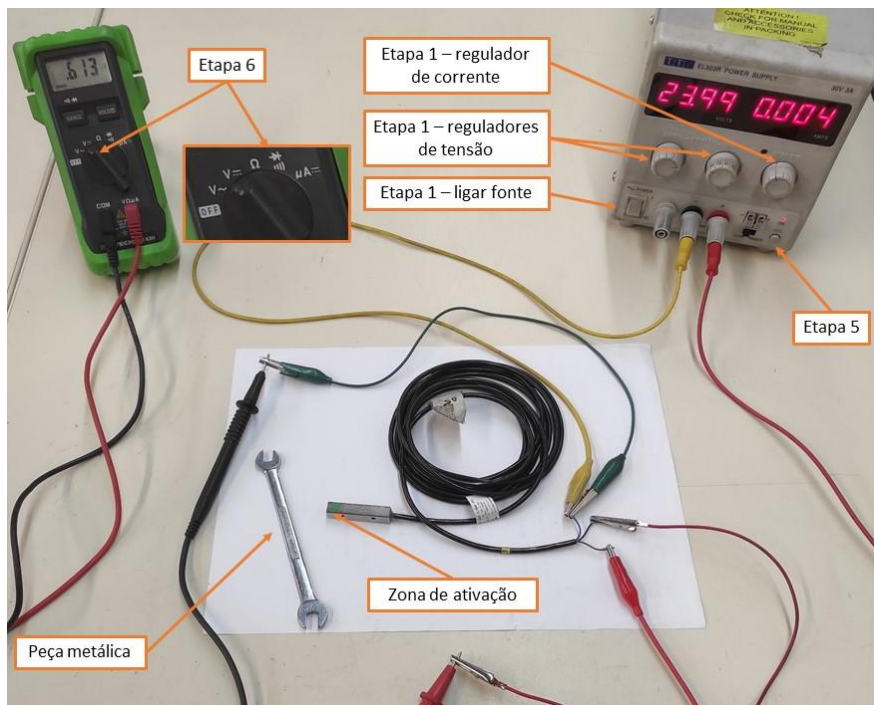


Figura 93 – Valores registados aquando da não deteção de metal e destaque para algumas etapas do procedimento de teste


Ao aproximarmos uma peça metálica do círculo verde presente no sensor, obtém-se o sinal de tensão de aproximadamente 24 V, tensão de alimentação. Sempre que esta situação se verifica significa que o sensor funciona corretamente, não havendo necessidade de substituição.

APÊNDICE 5 – ESTUDO DE MERCADO DE NOVOS CODIFICADORES

Uma vez que o codificador do eixo Z não transmite qualquer tipo de sinal, concluiu-se que este está avariado. Como tal, procedeu-se a uma pesquisa de mercado baseado nas especificações do componente em falha, quer mecânicas, quer elétricas, enumeradas na Tabela 20, de modo a facilitar a montagem e conexão de um novo codificador.

Tabela 20 - Codificador do eixo Z e respetivas especificações técnicas

ROD 426	
Marca	Heidenhain
Modelo	ROD 426.016
Tipo de sinal	Incremental
Sinal de saída	TTL (RS 422)
Resolução	1 500 ppr
Tensão de alimentação	5 VDC +/- 10%
Eixo	Saliente, D = 6 mm
Tipo de fixação	Flange de sincronização
Diâmetro externo	58 mm
Tipo de conexão	cabo, axial



Esta pesquisa centrou-se apenas no mercado europeu, contactando-se as principais empresas fornecedores deste tipo de produtos para a obtenção de um orçamento. O resumo dos modelos solicitados e propostas associadas estão presentes na Tabela 21.

Tabela 21 - Propostas de compra de um novo codificador para o eixo Z

Marca	Heidenhain	Hohner	Fagor	Hengstler	Ibérica de Automatismos
Modelo	ROD 426.016	Serie 58	Encoder S	RI58-T	E58 Series
Tipo de sinal	Incremental	Incremental	Incremental	Incremental	Incremental
Sinal de saída	TTL (RS 422)	TTL (RS 422)	TTL diferencial	RS 422	Line driver (RS 422)
Resolução	1 500 ppr	1 500 ppr	1 500 ppr	1250 ppr	1500 ppr
Tensão de alimentação	5 VDC +/- 10%	5 VDC +/- 5%	5 VDC +/- 5%	5 VDC	5 VDC +/- 5%
Eixo	Saliente, D = 6 mm	Saliente, D = 6 mm	Saliente, D = 6 mm	Saliente, D = 6 mm	Saliente, D = 6 mm
Tipo de fixação	Flange de sincronização	Flange de sincronização	Flange de sincronização	Flange de sincronização	Flange de sincronização
Diâmetro externo	58 mm	58 mm	58 mm	58 mm	58 mm
Tipo de conexão	cabo/conector, axial/radial	cabo/conector, axial/radial	cabo/conector, axial/radial	conector 12 pólos, axial	cabo, axial
Preço	630 €	328,08 €	355,78 €	545 €	160 € (usado)
Prazo de entrega	2 a 3 dias	1 semana	4 semanas	8 a 10 semanas	4 a 5 semanas

APÊNDICE 6 – PROCEDIMENTOS DE DESMONTAGEM DA ÁRVORE

A árvore da fresadora SwissPerfo CU200H é composta por diferentes componentes interdependentes, que contribuem para a sua estabilidade e correto funcionamento. Uma eventual falha neste sistema, como por exemplo a necessidade de troca da correia, conduz a um conjunto de procedimentos de desmontagem complexos e exigentes. Tal se deve a inúmeros aspetos, como a localização da correia, a dificuldade de acesso a alguns dos compartimentos, a necessidade de diferentes ferramentas, o peso do conjunto, possíveis interferências com a afinação já realizada e a necessidade de desmontar um número considerável de componentes para atingir a posição desejada. Como tal, a primeira conclusão que se retira é o facto de este conjunto, apresentado na Figura 94, não ser prático, nem possuir facilidade de acesso.

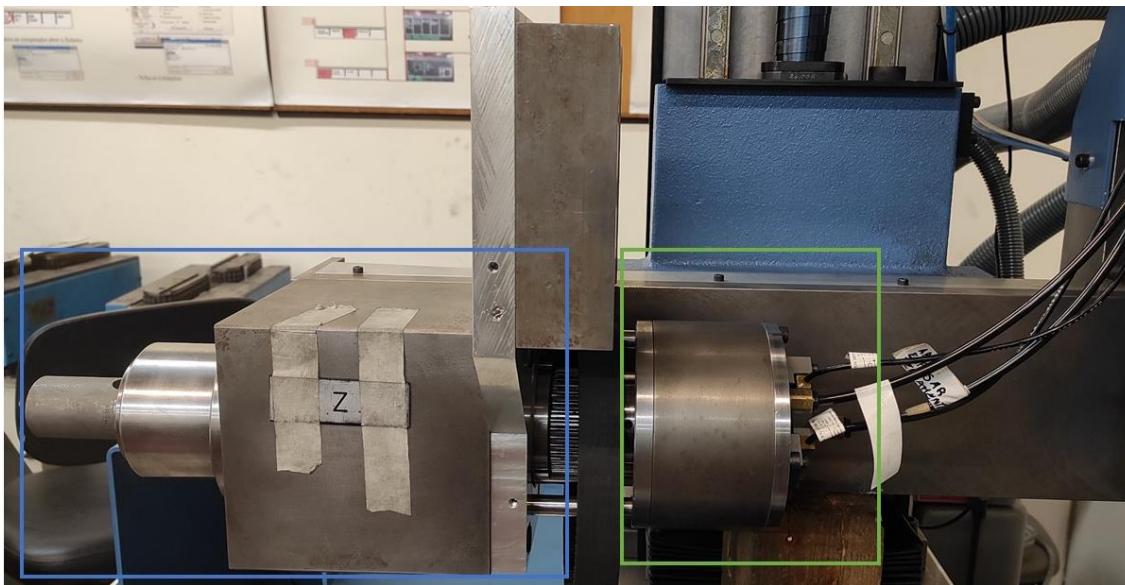


Figura 94 - Árvore e sistema pneumático da fresadora SwissPerfo CU200H

Apresenta-se passo a passo os procedimentos de desmontagem para alcançar a correia sem desmontar a árvore da fresadora, bloco destacado a verde na Figura 94. Uma vez desmontada a árvore da fresadora, procede-se à explicação dos passos a seguir para aceder ao fuso, que se encontra no interior do bloco azul da figura acima.

Inicialmente, desmonta-se os sensores indutivos que detetam a presença ou ausência de ferramenta de corte, bem como os tubos de alimentação e expulsão de ar comprimido de fixação rápida. Deve-se ter o cuidado de salvaguardar todos os parafusos e roscas por forma a não serem perdidos. Para além destes, ainda se retira o bloco roscado presente na extremidade do pistão, por onde o ar sai. Este passo pode ser visualizado na Figura 95.

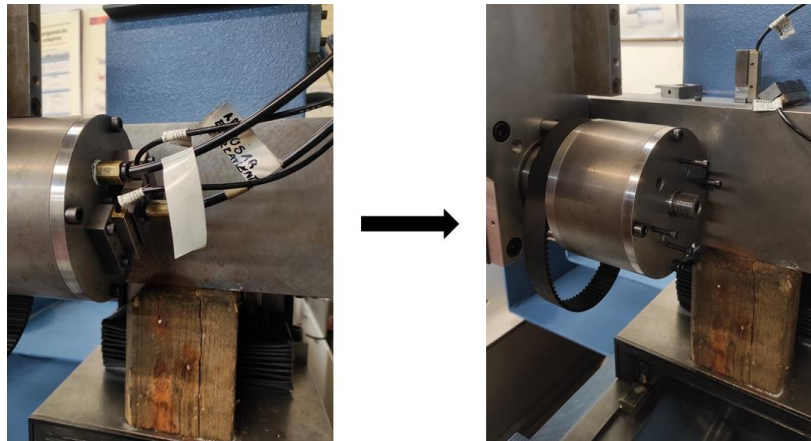


Figura 95 - Extração dos componentes presentes na extremidade do sistema

Uma vez extraídos estes componentes, passa-se para o bloco do pistão cilíndrico. Dada a existência de uma mola helicoidal de compressão no pistão, é necessário ter em atenção o desenroscar dos parafusos exteriores. Este processo deve ser realizado de forma proporcional pelos quatro, de modo a evitar que algum salte ou que o operador seja colocado em perigo. Retirando a tampa, alcança-se o conjunto do pistão, que tem no interior duas anilhas em bronze para impedir o contacto aço/aço. Além disso, o ar comprimido possui um lubrificante que ao entrar garante a lubrificação desta zona. Estas anilhas, juntamente com um parafuso, prendem quatro molas de disco, cuja altura pode ser ajustada. Este processo irá influenciar a abertura das garras para acoplamento da ferramenta, ou seja, se as anilhas ficarem muito salientes ou demasiado apertadas, o curso do pistão será influenciado e a pressão de ar comprimido pode não ser suficiente para o acoplamento. Os diferentes componentes mencionados podem ser observados na Figura 96.

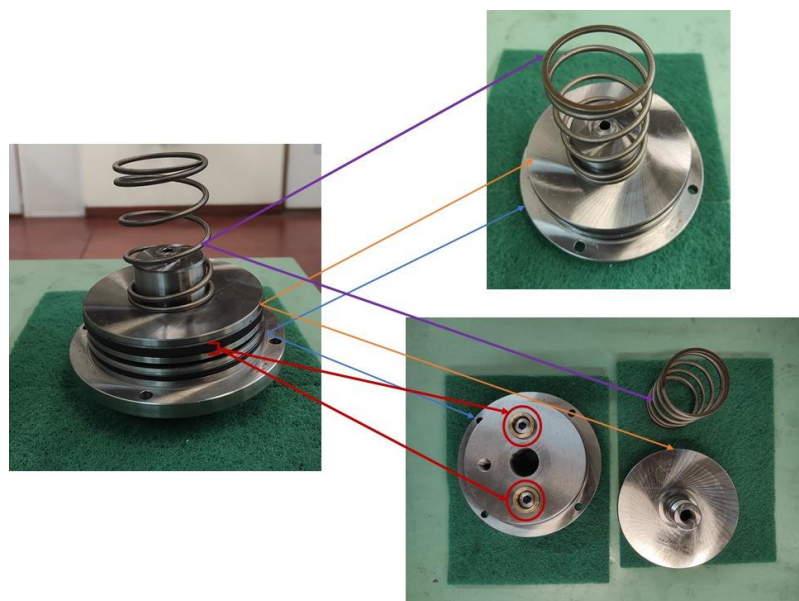


Figura 96 - Representação do conjunto do pistão cilíndrico e mola, e sequência de montagem

Passando para a segunda fase de desmontagem, representada na Figura 97, é atingida a secção de difícil acesso. O primeiro passo consiste em desenroscar os quatro parafusos aí presentes, responsáveis por ligar o bloco do pistão ao bloco do fuso. Deve-se ter cautela com as molas de compressão presentes em cada uma das extremidades dos pinos visíveis na figura. A ferramenta ideal para realizar esta tarefa será um roquete, dado o difícil acesso a alguns dos componentes.

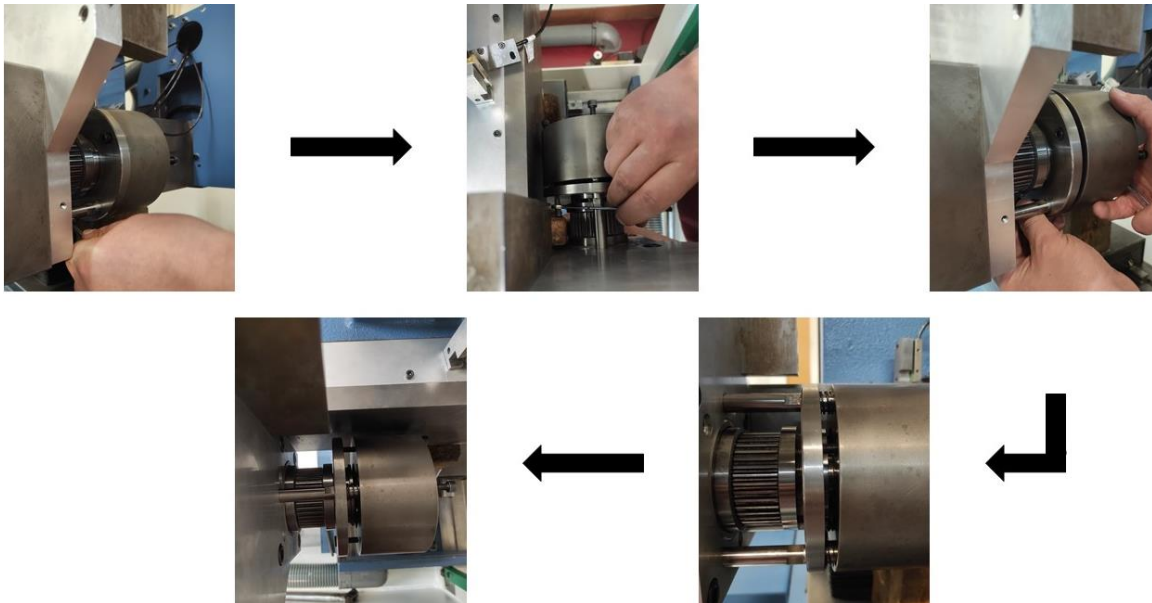


Figura 97 - Processo de desmontagem do bloco central, tendo em conta as molas presentes

No final deste processo, retira-se este componente cilíndrico, bem como o anel de centragem para a mola, presente no seu interior. Esta passagem pode ser visualizada na Figura 98.

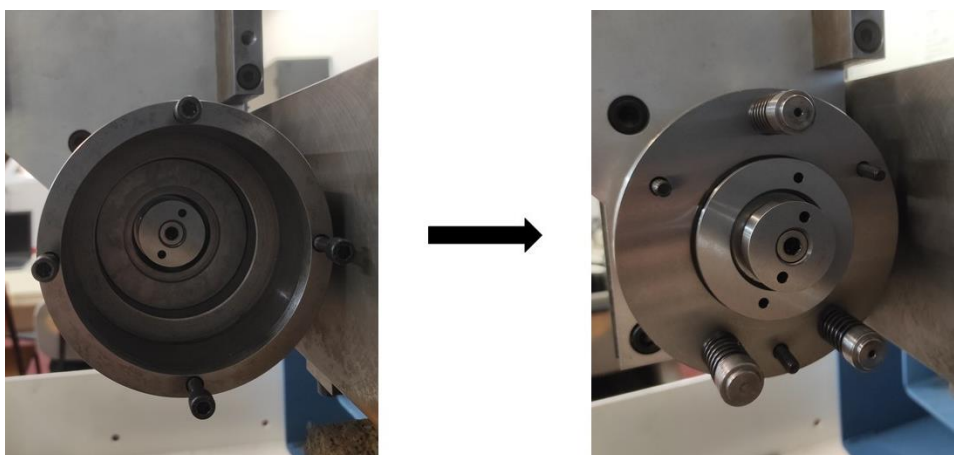


Figura 98 - Extração do bloco central do sistema pneumático

Sobram os três pinos que suportam a flange a ser fixada ao bloco anterior. Para estes, recorre-se a uma chave de bocas. Desenrosca-se cada um deles, numa fase inicial, de forma proporcional para facilitar o processo e, uma vez suficientemente soltos, é possível finalizar a tarefa com as próprias mãos. O passo descrito encontra-se representado na Figura 99.

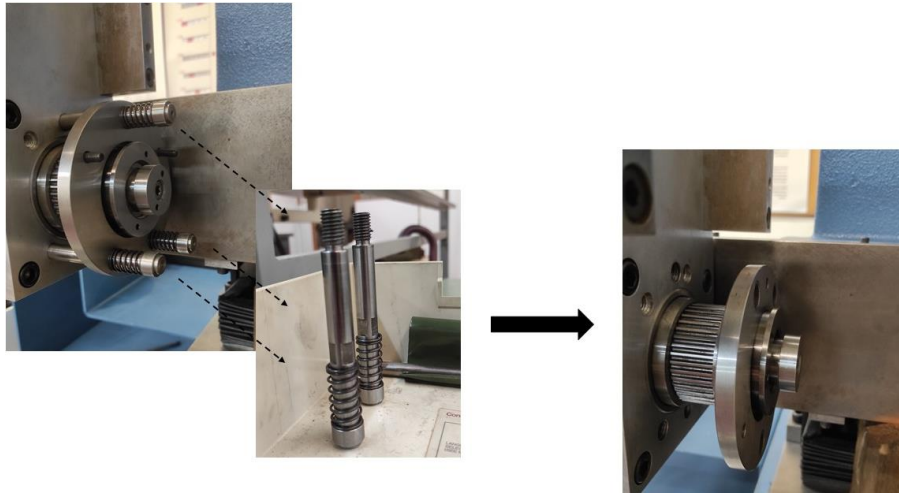


Figura 99 - Desmontagem dos pinos do sistema principal

Terminada a desmontagem do conjunto, é possível alcançar a correia. Esta deve de estar do lado interno dos dois pinos inferiores e do lado externo do pino superior, tal como é possível observar na Figura 100. É de salientar que existe mais do que uma possibilidade de configuração dos pinos, ou seja, podem estar na forma 1-2 ou na forma 2-1. Ambas as alternativas podem ser observadas na Figura 100, sendo que no caso da segunda opção utilizou-se duas vistas e o destacamento vermelho por forma a ser mais perceptível. No estado em que a máquina foi encontrada, os pinos apresentavam a configuração 1-2, que aparenta ser a mais correta. A segunda disposição aparenta ter sido uma primeira tentativa errada, pois ao ter os dois pinos em cima iria interferir com o correto funcionamento da correia.

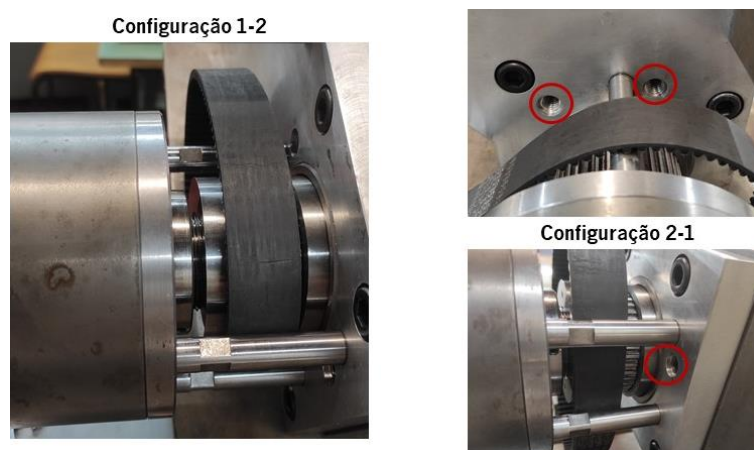


Figura 100 - Configurações possíveis para a disposição dos pinos

A desmontagem do sistema total da árvore é um procedimento que pode representar um eventual risco para o operador durante a sua manobra, bem como para o próprio equipamento, dado o seu peso. Posto isto, este processo só deve de ser realizado em caso de necessidade de acesso aos seus componentes internos. No caso do trabalho desenvolvido, foi necessário alcançar o fuso para calibração da posição das molas de disco. Para tal, é necessário adotar alguns cuidados, como a utilização de blocos de madeira, ou algo semelhante, para servir de suporte ao conjunto à medida que este vai ficando livre. Para o transporte pode-se utilizar um carrinho de transporte ou bancada livre, onde este possa ser colocado e sujeito a trabalhos. As faces de encaixe estão destacadas na Figura 101, sendo que na Figura 101a é possível observar a sua localização na própria fresadora e na Figura 101b, por sua vez, na árvore.

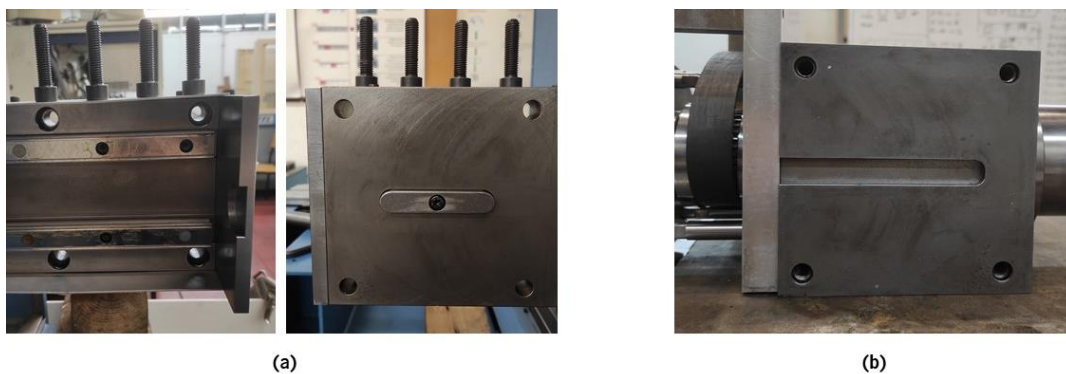


Figura 101 - Zona de encaixe da árvore na fresadora em (a) e no conjunto em (b)

Uma vez na mesa de trabalhos, desaperta-se o batente (1) pelo desenroscar do fuso. Para este processo é necessária uma ferramenta que bloqueie a rotação dos componentes. Assim, solta-se o batente e o cilindro que fixam as molas de disco. Através de uma espécie de haste e inclinando a mesa, retiram-se as molas do fuso. Para soltar o fuso é necessário dar uma pancada na zona das pinças, utilizando uma haste de maior espessura entre estas e o martelo, que servirá de proteção. Na Figura 102 apresenta-se o fuso da árvore, cujas pinças irão fixar o porta-ferramentas.



Figura 102 - Fuso da árvore da fresadora SwissPerfo

A montagem destes componentes segue a mesma lógica. Com as molas devidamente alocadas no fuso, volta-se a colocar os componentes que as prendem. Um sinal de que a configuração está errada é o facto de não se conseguir prender o batente. Ou seja, com ele bloqueado e à medida que se roda o fuso, as molas comprimem até ao ponto em que as pinças entram numa zona de maior diâmetro, alcançando a sua posição. Com isto as molas recuam, bem como os elementos de bloqueio, pelo que é necessário continuar a rodar o fuso até que a sua extremidade esteja ligeiramente tangente à do batente. Este processo pode ser visualizado na Figura 103, onde (1) é o cilindro e (2) é o batente do fuso.



Figura 103 - Fixação do cilindro e batente no fuso

Ao desprender o parafuso que fixa o batente da flange que está em contacto com as molas dos pinos, destacado na Figura 104(a), é também possível ajustar a posição deste conjunto, encurtando ou aumentando a distância deste da polia movida. Esta distância, (a) da Figura 104(b), influencia a fixação do bloco cilíndrico do pistão, (b) da Figura 104(b). Se for demasiado pequena não é possível proceder à sua montagem, ou seja, ao empurrar a flange, comprimindo as molas, não se tem curso suficiente para fixar os parafusos ao bloco cilíndrico.

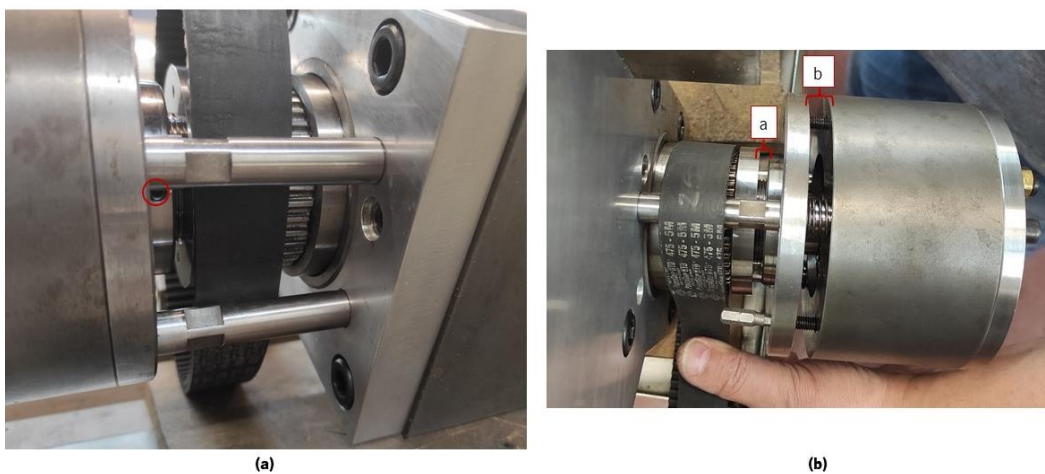


Figura 104 - Ajuste da posição da tampa que suporta os pinos: (a) posição do parafuso que bloqueia o movimento do batente desta secção; (b) distâncias a e b que são influenciadas pelo ajuste do batente

Estando este conjunto devidamente montado, procede-se à montagem do bloco móvel e montagem da árvore na fresadora. Nesta fase, afina-se primeiro a posição do bloco que assinala as posições da árvore, seguida da montagem dos sensores indutivos e as mangueiras de ar comprimido.

APÊNDICE 7 – CONFIGURAÇÃO DAS MOLAS DE DISCO

As molas de disco, também conhecidas por molas *Belleville*, caracterizam-se por ter uma forma cônica e serem utilizadas para suportar forças axiais. Na Figura 105 vê-se a legenda das variáveis que caracterizam a secção transversal de uma mola de disco [56].

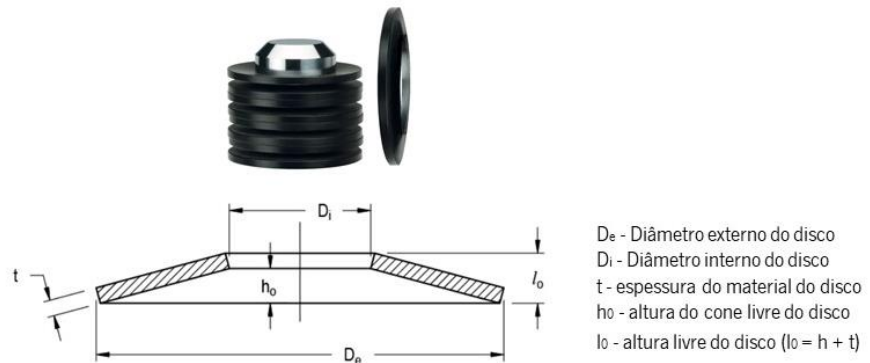


Figura 105 – Secção transversal de uma mola de disco (Adaptado de: [57])

Podem assumir diferentes formas de empilhamento que irá influenciar a força e deslocamento exercidos pelo conjunto, quando aplicada uma força axial. As molas podem ser colocadas todas em série ou em paralelo, ou uma combinação destas duas configurações. Na Figura 106 apresenta-se os diferentes tipos de empilhamento.

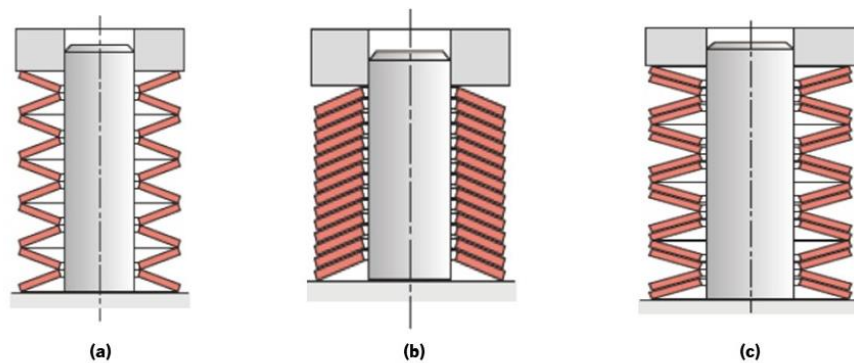


Figura 106 - Configurações das molas de disco: (a) em série; (b) em paralelo; (c) em série e paralelo (Retirado de: [70])

Na primeira configuração, a força aplicada será sempre a mesma e o deslocamento será igual à soma do deslocamento de cada mola. No caso do segundo tipo, verifica-se o contrário, ou seja, o deslocamento total do conjunto corresponde ao deslocamento de uma mola e a força resultante corresponde ao somatório da força exercida por cada mola. O último modo de empilhamento é a combinação dos dois anteriores, ou seja, a deflexão resultante é igual à multiplicação do número de molas em série pela deflexão de uma mola. No caso da força resultante, esta será igual à força de uma mola multiplicada pelo número de molas em paralelo [56].

Os tipos (a) e (c) da Figura 106 resultam numa maior instabilidade no contato entre as molas, ao passo que a configuração em paralelo leva a existência de mais calor e atrito na área de contato entre as molas [56].

Este tipo de componente encontra grande aplicação no sistema de pinças para máquinas de comando numérico, que é responsável pela fixação da peça/ferramenta, conforme o tipo de máquina em questão, durante toda a operação de maquinagem [57]. Tendo em conta isto, é importa definir a configuração do conjunto de molas, uma vez que esta irá influenciar a força de aperto, bem como o deslocamento das pinças. Este processo foi realizado no trabalho desenvolvido por tentativa erro, até ser encontrada a disposição ideal.

Na Tabela 22 apresenta-se as várias configurações experimentadas, incluindo os comprimentos experimentais (L) e os comprimentos teóricos sem e com carga (Lo). As combinações referentes ao último teste foram as que melhores resultados proporcionaram.

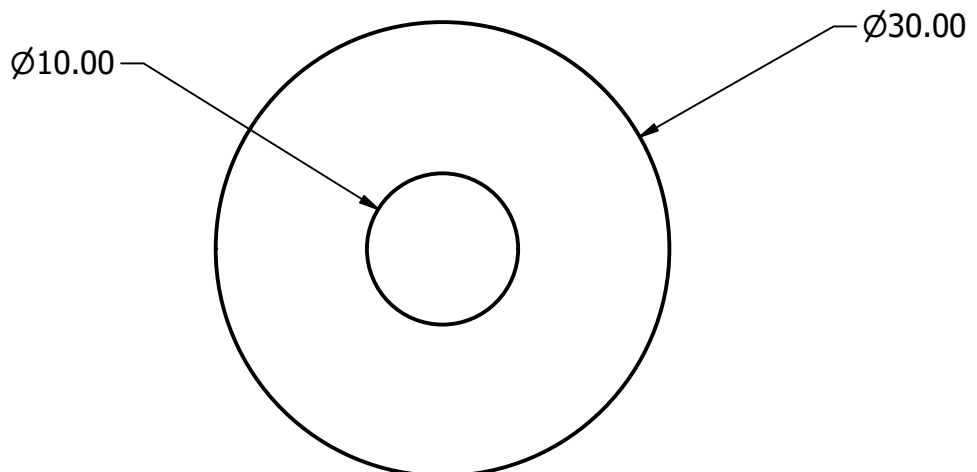
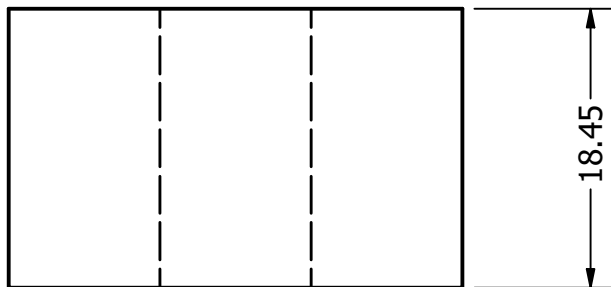
Tabela 22 - Configurações testadas para as molas de disco

Testes	Combinações						Ssérie [mm]	z [mm]	Lo [mm]	L [mm]	Lexp [mm]
	i1	n1	i2	n2	i3	n3					
1	19	4	16	5	1	3	0,25	9,00	163,20	154,20	166
2	1	7	25	6	0	0	0,35	9,00	151,60	142,60	157
3	1	8	24	6	1	7	0,35	9,00	153,20	144,20	159
4	2	3	37	4	1	5	0,23	9,00	167,20	158,20	172
5	7	5	31	4	0	0	0,24	9,00	165,20	156,20	170
6	26	4	11	5	0	0	0,24	9,00	164,20	155,20	168
7	21	4	15	5	0	0	0,25	9,00	163,20	154,20	167
8	19	5	16	4	0	0	0,26	9,00	162,20	153,20	165
9	11	4	23	5	0	0	0,26	9,00	161,20	152,20	164
10	31	5	1	4	0	0	0,28	9,00	159,20	150,20	163
11	15	5	14	6	0	0	0,31	9,00	156,20	147,20	160
12	21	5	9	6	0	0	0,30	9,00	157,20	148,2	163

Onde:

- i – número de séries com n molas;
- n – número de molas em paralelo;
- $s_{série}$ – deflexão sofrida por uma mola, tendo em conta o deslocamento z medido;
- z – deslocamento do conjunto de molas na fresadora, quando aplicada a força de ar comprimido;
- L_0 – comprimento do conjunto sem carga aplicada;
- L – comprimento das molas quando aplicada a força que provoca z ;
- L_{exp} – comprimento do conjunto de molas medido experimentalmente.

APÊNDICE 8 – DESENHO TÉCNICO DO ESPAÇADOR



Desenha.			Universidade Do Minho Departamento de Engenharia Mecânica								
Copiado											
Verific.											
Visto											
Escalas	2:1		Espaçador do suporte de porta-peças								
Toleran.											
			<table border="1" style="width: 100%; height: 20px;"> <tr> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> </table>								
			Sustitui o des. nº Substituído por:								