

Montagem e Teste de um CNC Modular

Diogo José dos Reis Gonçalves

Dissertação de Mestrado

Orientador: Prof. Manuel Romano dos Santos Pinto Barbosa

Coorientador: Prof. Paulo Augusto Ferreira de Abreu



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Especialização de Automação

Setembro de 2015

Resumo

O uso do comando numérico computadorizado na automatização de máquinas ferramenta é indispensável no fabrico de componentes complexos de forma flexível, produtiva e consistentemente com apertados níveis de toleranciamento dimensional. Para melhor preparar os alunos para as suas vidas profissionais, a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto procura que os mesmos possam interagir com este tipo de sistemas durante a sua formação académica. Neste contexto surge esta dissertação cujo objetivo principal se baseia na reabilitação de um sistema CNC industrial existente, de forma a possibilitar a sua utilização em atividades letivas.

Inicia-se este trabalho com a realização de uma breve introdução ao comando numérico computadorizado, com foco sobre a génese e estrutura deste tipo de sistemas, sendo em seguida apresentadas algumas ofertas existentes no mercado.

É depois apresentado o equipamento de comando numérico disponível, incluindo-se neste a unidade central do CNC, drivers, fonte de alimentação e servomotores. É ainda apresentado o trabalho realizado na análise e caracterização dos componentes deste sistema, no levantamento e reimplementação dos circuitos elétricos, bem como na configuração e programação do CNC de forma a averiguar o estado funcional dos componentes.

É posteriormente apresentada a mesa de posicionamento de dois eixos de movimento existente e o trabalho realizado na caracterização dos seus componentes, modelação em *software* CAD e por fim, o projeto e implementação de uma solução para o acoplamento e fixação dos servomotores existentes à mesa.

Por fim apresenta-se toda a preparação feita em termos de configuração e programação que permite utilizar o equipamento de comando numérico no acionamento da mesa. O funcionamento do sistema finalizado é demonstrado através da execução de programas de comando numérico que ilustram diferentes funções específicas deste sistema.

Como conclusão deste trabalho são apresentadas algumas perspetivas de futuros desenvolvimentos do sistema CNC e mesa de posicionamento.

Assembly and Test of a Modular CNC System

Abstract

The use of computerized numerical control in the automation of machine tools is indispensable in the manufacturing of components in a flexible and productive way, while still making it possible to obtain consistently tight dimensional tolerances. In order to better prepare its students for their future professional lives, the Faculty of Engineering of the University of Porto seeks to expose them to these kind of technologies during their academic training. The main objective of this dissertation is to rehabilitate an existing numerical control system, in order to allow its use in teaching activities.

This dissertation begins with a small introduction to computerized numerical control, focusing over the genesis and structure of these kind of systems, followed by a brief overview of commercially available CNC controls.

The existent numerical control equipment is then presented, including the central control unit, modular servo drivers, power supply as well as three brushless AC servomotors. Afterwards the characterization of the individual components and their role in the system is shown, followed by the study and implementation of the electrical circuitry and finally the PLC programming and configuration of machine parameters.

Thereafter the existing two axis ball screw driven positioning table is presented. The entire mechanical system was modeled in CAD software as to facilitate the task of projecting and implementing the coupling and support housing of the servomotors to the positioning table.

The final PLC program and configuration of the system are then presented, in order to obtain a fully functional numerically controlled positioning table. Some numerical control functions are tested to illustrate the use of the system.

On a closing note, further developments of the current system are proposed.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao meu orientador e co-orientador, o Professor Manuel Romano Barbosa e o Professor Paulo Abreu respetivamente, não só pela contínua dedicação e acompanhamento, mas também pelo *feedback* construtivo recebido em relação ao trabalho realizado, tendo este contribuído para um desenvolvimento de conhecimentos a nível pessoal.

Ao Sr. Joaquim Silva e Sr. António Ramalho, os meus agradecimentos por todo o seu apoio e conhecimentos transmitidos que permitiram que este trabalho fosse desenvolvido de forma célere e eficaz, bem como por todos os momentos de boa disposição e companheirismo.

Gostaria de reconhecer também o contributo para este trabalho de todos os meus amigos e colegas, tanto pelo apoio e disponibilidade, como por possibilitarem que este tenha decorrido de forma agradável, principalmente o Miguel Campos, Fábio Borges, Vasco Branco, João Antunes e Daniel Rosendo. Agradeço também aos restantes pois são demasiados para nomear.

Por fim gostaria de agradecer o apoio e carinho incondicionais da minha família ao longo de toda a minha vida académica e profissional. Sem eles todo este percurso, incluindo este trabalho, não teria sido possível.

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Introdução ao CNC	1
1.2	Exemplos de sistemas atuais de comando numérico	3
1.3	Objetivos da dissertação	7
1.4	Estrutura do relatório	7
2	Equipamento de comando numérico	9
2.1	Instalação existente	10
2.1.1	O sistema Fagor 8055M	10
2.1.2	O sistema Fagor DDS	13
2.1.3	Instalação elétrica	19
2.2	Requalificação do sistema	20
2.2.1	Circuitos elétricos da bancada didática	20
2.2.2	Configuração do CNC	21
2.2.3	Programação do PLC	24
2.3	Diagnóstico do sistema	26
3	Equipamento mecânico	29
3.1	Caracterização da mesa XY	30
3.1.1	Estrutura da mesa de posicionamento	30
3.1.2	Sistema de acionamento dos eixos de movimento	32
3.1.3	Sistema de guiamento e suporte dos eixos de movimento	36
3.2	Projeto da solução de acoplamento e fixação dos servomotores	38
3.2.1	Verificação do dimensionamento da cadeia de transmissão	38
3.2.2	Projeto do acoplamento entre veios	41
3.2.3	Projeto mecânico do suporte e fixação do motor	44
3.3	Síntese de características dos equipamentos	49
4	Configuração e teste do sistema completo	51
4.1	Integração do CNC na mesa de posicionamento	52
4.1.1	Cálculo de parâmetros do sistema	52
4.1.2	Modelação simplificada de um eixo de acionamento	57
4.1.3	Implementação de fins de curso	64
4.1.4	Configuração do comando numérico	66
4.1.5	Programação final do PLC	69
4.2	Teste de funções de programação do CNC	70
4.2.1	Interpolação linear	70
4.2.2	Interpolação circular	71
4.2.3	Raio de concordância e chanfro automáticos	72

4.2.4	Compensação automática do raio da ferramenta	73
4.2.5	Look-ahead	75
5	Conclusões e propostas de trabalhos futuros	77
	Referências	79
A	Esquemas elétricos	81
A.1	Circuito de comando recomendado pela Fagor	81
A.2	Circuito de potência implementado na bancada didática	82
A.3	Circuito de comando implementado na bancada didática	83
A.4	Ligações entre módulos da bancada didática	84
A.5	Ligações do volante eletrônico	85
A.6	Explicação da lógica implementada nos circuitos	86
A.7	Listagem de componentes	87
B	Programas do PLC	89
B.1	Programa para verificar o funcionamento básico do sistema	89
B.2	Excerto de programa que interpreta os sinais do volante manual	90
B.3	Excerto de programa utilizado nos teste de travagem	91
B.4	Programa final implementado	92
C	Programas de comando numérico	95
C.1	Interpolações lineares com variação da velocidade	96
C.2	Interpolações circulares	98
C.3	Raios e chanfros automáticos	100
C.4	Compensação de raio da ferramenta	102
C.5	Exemplo de utilização do look-ahead	104
D	Características de componentes da mesa de posicionamento de dois eixos	107
D.1	Características do veio do fuso de esferas INA KGS	108
D.2	Características da porca de esferas INA KGF	109
D.3	Características do acoplamento de fole R+W BKL	110
D.4	Dimensões das faces de montagem do servomotor FXM31 e do apoio do fuso de esferas	111
E	Desenhos técnicos	113
E.1	Desenho de definição do veio de extensão	114
E.2	Desenho de definição da luneta de fixação e suporte dos servomotores FXM31	116

Lista de Figuras

1.1	Classificações de um Open-CNC	3
1.2	Interface do CNC Fagor 8055M	4
1.3	Interface do CNC Fagor 8065M	4
1.4	Interface do CNC FANUC 0i	5
1.5	Interface do CNC FANUC 31i	5
1.6	Interface do CNC Siemens Sinumerik 840D	6
1.7	Interface dos CNC Heidenhain TNC 320 e TNC 640	7
2.1	Sistema de comando numérico e servomotores	9
2.2	Módulos da unidade central	11
2.3	Chassis e fonte de alimentação da unidade central com e sem módulos	11
2.4	Monitor e teclado do CNC	12
2.5	Volante eletrónico HBA	12
2.6	<i>Driver</i> modular Fagor AXD 1.08	13
2.7	Diagrama de blocos de um eixo de acionamento do sistema com o <i>driver</i> em controlo de velocidade	15
2.8	Condicionamento da referência de velocidade	16
2.9	Fonte de alimentação modular Fagor PS-25B4	16
2.10	Servomotor Fagor FXM31	18
2.11	Curva de binário de um servomotor FXM31.40A	19
2.12	Fotografia da instalação elétrica existente no início da dissertação	19
2.13	Interior da bancada didática após requalificação	20
2.14	Tabela dos parâmetros gerais do CNC	21
2.15	Interfaces da aplicação WinDNC que permitem o acesso às tabelas de parâmetros	22
2.16	Interface da aplicação WinDDSSetup que permite configurar o <i>driver</i> para um dado servomotor	24
2.17	Estrutura de um programa de PLC do CNC Fagor 8055M	24
2.18	Resultado da execução do programa de comando numérico	27
3.1	Mesa de posicionamento de dois eixos	29
3.2	Resultado final da modelação da mesa de posicionamento em <i>SolidWorks</i>	30
3.3	Base da mesa de posicionamento	31
3.4	Carruagem da mesa de posicionamento	31
3.5	Superfície de trabalho da mesa de posicionamento	32
3.6	Contacto em dois ou quatro pontos por esfera num fuso e porca de esferas	32
3.7	Montagem do fuso de esferas modelado em <i>SolidWorks</i>	33
3.8	Rosca de fuso de esferas INA KGS	33
3.9	Localização dos dois rolamentos nos apoios da montagem do fuso de esferas	34
3.10	Porca INA KGF-N montada num dos fusos da mesa XY	35
3.11	Localização da porca de esferas na montagem do fuso	35

3.12 Rolamento linear INA KBO inserido no suporte KGBO	36
3.13 Guia linear com perfil INA TSWW	37
3.14 Posição das guias e rolamentos lineares na mesa XY	37
3.15 Condições de acoplamento entre pontas de veio	38
3.16 Dimensões de uma chaveta paralela (forma A) e escatéis segundo DIN 6885-1	39
3.17 Acoplamentos flexíveis para acionamento de eixos	41
3.18 Eixo R+W ZAE	43
3.19 Acoplamentos de fole R+W BKL 15	43
3.20 Acoplamento BKL com extensão de veio montada	44
3.21 Modelo CAD da luneta	45
3.22 Malha da luneta utilizada na simulação estática em <i>SolidWorks</i>	45
3.23 Distância do centro de massa do motor à face da luneta	46
3.24 Distribuição de tensões na luneta em AW7075-T651	47
3.25 Lunetas finalizadas	48
3.26 Luneta em corte e cadeia de transmissão	48
4.1 Mesa de posicionamento com servomotores e fins de curso	51
4.2 Tempo de aceleração em função do binário de aceleração	56
4.3 Perfil de velocidade implementado	56
4.4 Diagrama de blocos de um eixo de acionamento do sistema com o <i>driver</i> em controlo de velocidade	58
4.5 Diagrama de blocos ilustrativo do funcionamento do sistema nas condições especificadas	58
4.6 Resposta em velocidade do sistema real a uma solicitação em degrau de 1000 rpm	59
4.7 Comparação entre a resposta real e a resposta de um sistema de segunda ordem de simplificação	60
4.8 Modelo simplificado de um eixo de acionamento	61
4.9 Modelação do controlo de posição efetuado na Unidade Central do CNC	61
4.10 Resposta simulada em velocidade ao perfil trapezoidal com ganho <i>feed-forward</i> a 0 %	62
4.11 Resposta simulada em velocidade ao perfil trapezoidal com ganho <i>feed-forward</i> a 60 %	62
4.12 Resposta simulada em velocidade ao perfil trapezoidal com ganho <i>feed-forward</i> a 80 %	63
4.13 Resposta simulada em velocidade ao perfil trapezoidal com ganho <i>feed-forward</i> a 100 %	63
4.14 Sensor de proximidade indutivo <i>OsiSense XS</i>	64
4.15 Ligações entre os contactos normalmente abertos dos sensores indutivos	64
4.16 Referencial implementado na mesa XY	67
4.17 Montagem utilizada no registo da execução de programas de comando numérico	70
4.18 Resultado da execução do exemplo da interpolação linear	71
4.19 Resultado da execução do exemplo da interpolação circular	72
4.20 Resultado da execução do exemplo dos raios e chanfros automáticos	73
4.21 Efeito do uso das funções de compensação do raio da ferramenta G41 e G42	73
4.22 Resultado da execução do programa de comando numérico	74

Lista de Tabelas

2.1	Características do <i>driver</i> AXD 1.08	14
2.2	Características da fonte de alimentação PS-25B4	17
2.3	Características do servomotor FXM31.40A.E1.000	18
3.1	Valores do coeficiente de velocidade crítica em função do tipo de apoio	34
3.2	Características do rolamento linear INA KBO30	37
3.3	Dados e resultados da verificação ao corte da chaveta DIN 6885 3x3x28	39
3.4	Dados e resultados da verificação ao esmagamento da chaveta DIN 6885 3x3x28	40
3.5	Dados e resultados da verificação à tensão normal equivalente máxima no fuso	41
3.6	Principais características do acoplamento de fole R+W BKL15	43
3.7	Parâmetros utilizados na criação da malha da luneta	46
3.8	Comparação entre possíveis materiais para o fabrico da luneta	47
3.9	Caraterísticas globais da mesa de posicionamento	49
3.10	Caraterísticas do fuso e porca de esferas	49
3.11	Caraterísticas das guias e rolamentos lineares	49
4.1	Momentos de inércia da cadeia de transmissão e resultados do procedimento de cálculo	53
4.2	Características calculadas do sistema	60
4.3	Distâncias percorridas pelo eixo na travagem	65

Abreviaturas

CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CCW	Counter Clock-Wise (Sentido contrário aos ponteiros do relógio)
CN	Comando Numérico
CNC	Computerized Numerical Control (Comando Numérico Computorizado)
CW	Clock-Wise (Sentido dos ponteiros do relógio)
DDS	Digital Drive System
DNC	Distributed Numerical Control
DXF	Data eXchange Format
FOCAS	FANUC Open CNC API Specifications
HMI (MMI)	Human-Machine Interface (Man-Machine Interface)
NC	Numerical Control
NCK	Numerical Control Kernel
OEM	Original Equipment Manufacturer
PC	Personal Computer
PLC	Programmable Logic Controller
RAM	Ramdom Acess Memory
SERCOS	Serial Real-time COmmunication System
UC	Unidade Central (do comando numérico)

Capítulo 1

Introdução

Este capítulo é dedicado a uma breve introdução ao comando numérico computadorizado no contexto da dissertação, com ênfase na origem, estrutura e oferta atual destes sistemas. São em seguida apresentados os objetivos desta dissertação e a estrutura na qual os conteúdos se encontram organizados.

1.1 Introdução ao CNC

O comando numérico (CN ou NC, do inglês *Numerical Control*) é o sistema que permite a uma máquina ferramenta produzir peças com geometrias variadas de forma rápida e precisa [1].

O seu desenvolvimento foi impulsionado por uma empresa norte-americana, a *Parsons Company*. Em 1947 esta empresa desenvolveu um novo método de fabrico de componentes estruturais das pás do rotor de um helicóptero (nervuras), que envolvia o acionamento manual de dois eixos de posicionamento de uma fresadora no plano XY por dois operadores, utilizando uma lista de coordenadas de posicionamento [2]. Reconhecendo a utilidade de tal processo, a força aérea dos EUA financia em 1949 o desenvolvimento de uma fresadora com acionamentos automáticos pela mesma empresa, que por sua vez subcontrata o desenvolvimento dos acionamentos automáticos ao laboratório de servomecanismos do MIT. Em 1952, é concluída uma fresadora de três eixos automática em que as coordenadas de posicionamento dos eixos se encontravam armazenadas numa fita perfurada. É considerada a primeira máquina ferramenta de comando numérico. Desde então, o comando numérico foi combinado com tecnologias de computação, dando origem ao comando numérico computadorizado (abreviado CNC, do inglês *Computerized Numerical Control*) [1, 2].

Nos anos 60, o aparecimento de componentes eletrónicos baseados em semi-condutores permitiu a redução de escala dos sistemas CNC, visto que até então o controlador da máquina ocupava um maior volume que a máquina ferramenta em si [1]. Com o desenvolvimento do micro-controlador nos anos 70 e de componentes de PC nos anos 80, os sistemas CNC evoluem da lógica cablada para a lógica programada [1]. Desde então o CNC tornou-se uma tecnologia madura e competitiva, pelo que a sua utilização se expandiu para além das aplicações iniciais.

Apesar de ao longo do tempo em termos de implementação (*hardware* e *software*) o sistema de CN ter estado sujeito a diferentes evoluções, do ponto de vista funcional é geralmente possível identificar três constituintes principais: o *Numerical Control Kernel*, *Programmable Logic Controller* e a *Human-Machine Interface* (ou *Man-Machine Interface*) [1].

O NCK consiste no controlador propriamente dito do sistema e como tal é responsável pelo controlo dos eixos principais de movimento (e corte) da máquina ferramenta. A partir da interpretação do programa de comando numérico cria uma trajetória através da interpolação entre pontos do mesmo e efetua o controlo de posição dos eixos tomando essa trajetória como referência.

O PLC controla o comportamento da máquina excetuando o controlo dos eixos de movimento. Entre as funcionalidades do sistema CNC habitualmente controladas pelo PLC, podem encontrar-se a troca de ferramenta ou peça de trabalho, o funcionamento dos equipamentos de segurança, o tratamento dos sinais de volantes eletrónicos, entre outros.

A HMI é o meio que permite a interação entre o utilizador e o sistema. Permite configurar o CNC, editar programas de comando numérico, monitorizar o estado do CNC, bem como realizar testes de diagnóstico e funções de manutenção.

Atualmente é comum os fabricantes de CNCs disponibilizam comercialmente sistemas baseados em soluções modulares, tanto a nível de *hardware* como *software*, permitindo ao fabricante da máquina ferramenta (ou até mesmo ao utilizador final) adaptar o CN de forma flexível para uma tarefa especializada, atualizar ou até mesmo expandir um sistema existente.

Para além do sistema CNC em si, estes fabricantes também comercializam todos os equipamentos necessários para aplicar o CN a uma máquina ferramenta como *drivers*, *encoders* e servomotores, seja no projeto de uma nova máquina ou na atualização de uma máquina ferramenta existente, processo normalmente designado de *retrofitting*.

Visto que os sistemas CNC atuais consistem essencialmente em computadores industriais, existe uma tendência de aproximação deste tipo de sistemas ao PC, enquanto sistema completamente modular e aberto. Este tipo de evolução possibilita benefícios tais como uma maior facilidade no desenvolvimento de funções de comando numérico e interfaces ou na integração com outros sistemas no contexto da automação industrial.

Procuram-se então estabelecer classificações ao nível da estrutura de um sistema de CN aberto, ou *Open-CNC*. Uma destas classificações é sugerida em [1], baseando-se no nível de abertura em termos da HMI e do NCK como ilustrado na Figura 1.1.

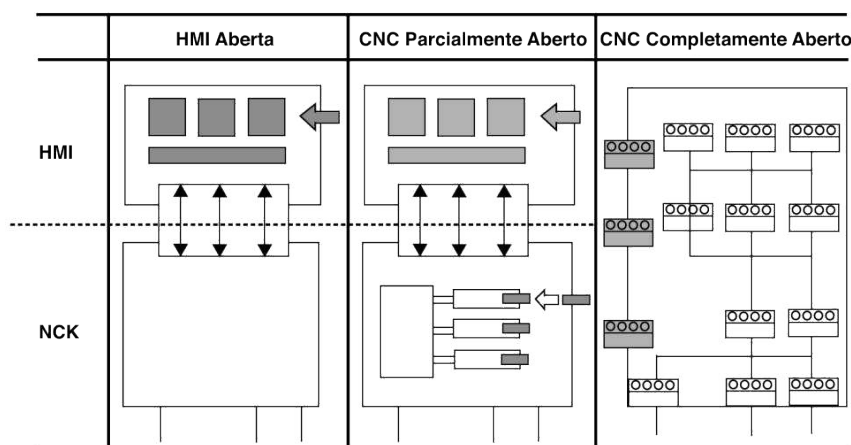


Figura 1.1 – Classificações de um *Open-CNC*, adaptado de [1]

Um sistema que dispõe de uma HMI aberta permite ao fabricante da máquina ferramenta com CN ou ao utilizador final realizar alterações ao nível dos ecrãs e funções existentes de forma a adaptar a HMI para uma aplicação específica. No entanto, este tipo de sistemas não possui uma abertura ao nível do NCK, o que significa que não é possível adicionar novas funcionalidades de comando numérico, tais como interpolações, ciclos fixos, compensações, etc [1].

Um sistema do segundo tipo destaca-se do anterior por possuir uma organização modular ao nível das funções do NCK, e como tal permite a adição de novas funções de comando numérico [1]. Este tipo de funções encontram-se normalmente associadas às opções do sistema CNC comercializadas pelo fabricante do próprio.

O tipo final representa uma abertura completa do sistema, no sentido em que todas as funções da HMI e NCK são modulares a nível de *software* e a interface de comunicação entre as mesmas é normalizada [1].

1.2 Exemplos de sistemas atuais de comando numérico

A título de exemplo são apresentados alguns sistemas CNC comercializados por quatro principais fabricantes, nomeadamente a Fagor, FANUC, Siemens e Heidenhain.

Dentro da oferta de sistemas CNC disponibilizados pela Fagor, é possível encontrar o modelo 8055M (Figura 1.2). Este baseia-se num CNC otimizado para a fresagem que permite controlar até quatro eixos de movimento e dois de corte, consistindo um destes modelos no foco de estudo desta dissertação. Opcionalmente este CNC é também capaz de efetuar o controlo de até sete eixos de movimento e a interpolação entre os mesmos [3].



Figura 1.2 – Interface do CNC Fagor 8055M (modelo MCO)

Apesar de continuar a ser comercializado e continuamente suportado pelo fabricante, este sistema encontra-se algo desatualizado em termos de componentes e funcionalidades em relação a novas soluções de sistemas CNC. Uma dessas novas soluções é o modelo Fagor 8065M (Figura 1.3). Este sistema cumpre o mesmo papel do modelo 8055M, ou seja o comando numérico de uma fresadora com três eixos ou opcionalmente cinco, mas é no entanto uma versão tecnologicamente mais avançada em termos de *hardware* (a título de exemplo a capacidade de processamento, memória, interface tátil, comunicação com outros sistemas) e *software* (funções de comando numérico, funcionalidades de auto diagnóstico, linguagens IEC 61131-3¹ na programação do PLC, entre outras) [4]. Recorrendo à classificação apresentada ambos estes sistemas se poderiam considerar parcialmente aberto ao nível da HMI, visto existir uma aplicação específica para o desenvolvimento de novas interfaces para estes CNCs, mas fechado ao nível do NCK.



Figura 1.3 – Interface do CNC Fagor 8065M

Entre os fabricantes de sistemas CNC previamente referidos, destaca-se a FANUC como líder mundial reclamando 65% de quota do mercado [5]. Entre os modelos comercializados por este fabricante encontra-se o modelo 0i (Figura 1.4). Este é descrito pela FANUC como o CNC mais vendido a nível mundial com um total de unidades vendidas a rondar as setecentas mil [6]. Pertence à gama base deste fabricante, existindo versões especializadas para tornos e fresadoras. Dispõe da possibilidade de

¹Programação por diagramas de blocos, *ladder*, texto estruturado, lista de instruções ou diagramas SFC (semelhantes ao grafcet).

comandar até 11 eixos de movimento, 4 eixos de corte e 2 dois percursos de maquinagem independentes dependendo do modelo [6].



Figura 1.4 – Interface do CNC FANUC 0i (modelo 0i-TD)

É no entanto um equipamento modesto em termos de funcionalidades dentro da gama de CNCs da FANUC.

Acima do FANUC 0i, encontram-se os modelos 30i, 31i e 32i (Figura 1.5). Estes são aplicáveis a todo o tipo de máquinas ferramenta, sendo a sua personalização realizada através da escolha das opções relevantes para o processo em questão. Pode dispor de até 40 eixos de movimento, 8 eixos de corte e 10 percursos de maquinagem em simultâneo. São também mais ricos em termos de funcionalidades em relação ao modelo 0i, sendo por exemplo possível encontrar nestes sistemas funções de maquinagem com 5 eixos, interpolações variadas (exponencial, involuta, *splines*), simulação da execução de programas de CN com visualização tridimensional de remoção de material e integração com células robóticas FANUC. Estes modelos dispõem também de uma funcionalidade designada “*Open CNC*”, permitindo utilizar o protocolo FOCAS¹ próprio da FANUC, para monitorizar o CNC a partir de um PC. Esta funcionalidade não se encontra no entanto relacionada com a especificação de um CNC aberto previamente referida, consistindo apenas numa biblioteca de funções para aplicações *Windows* que permitem aceder a variáveis só de leitura do CN [7].



Figura 1.5 – Interface do CNC FANUC 31i (31i-P modelo B)

¹ FANUC *Open CNC API Specifications*.

Entre os principais fabricantes dos sistemas CNC no mercado, encontra-se a Siemens. Esta empresa dispõe atualmente de 3 classes de comandos numéricos na sua gama Sinumerik: uma classe base para fresadoras ou tornos simples, uma classe intermédia especializada na mesma classe de máquinas, sendo no entanto de baixa modularidade e destinada à produção de máquinas ferramenta *standard* com CN e uma classe aberta com o máximo de flexibilidade indicada para todo o tipo de máquinas feitas à medida [8]. A classe base é comparável ao modelo 0i da FANUC apresentado previamente e a classe intermédia aos modelos 30i, 31i e 32i do mesmo fabricante.

Destaca-se no entanto na oferta de comandos numéricos da Siemens o modelo Sinumerik 840D (Figura 1.6). O modelo base deste CNC permite controlar 8 eixos, sendo no entanto expansível até 93. Este é apresentado como um CNC aberto ao nível da HMI e do NCK, em que é possível ao OEM criar novas interfaces para a HMI escritas em linguagens de programação normalmente utilizadas na programação de aplicações normais do sistema operativo *Windows* (linguagens do *framework* .NET como C++, C#, *Visual Basic*). É também possível criar novas funções de comando numérico e executar as mesmas num emulador deste CNC disponível para PC, de forma a verificar o seu correto funcionamento antes de as aplicar no sistema de CN [9].



Figura 1.6 – Interface do CNC Siemens Sinumerik 840D (modelo OP 015)

Outro exemplo de fabricante deste tipo de sistemas é a Heidenhain. Os modelos deste fabricante (Figura 1.7) enquanto que não possuem o mesmo nível de abertura que o CNC aberto da Siemens, destacam-se por serem sistemas que dão ênfase à programação conversacional² e à facilidade de uso através do seu sistema operativo em tempo real comum a todos os modelos dispondo mesmo de uma segunda linguagem de programação de CN de sintaxe mais legível em relação ao código G. Possibilitam também a importação direta de ficheiros DXF³ provenientes de uma aplicação CAD de forma a criar contornos num programa de CN (algo que o modelo 840D da Siemens também permite). Outra vantagem que se destaca em relação aos outros fabricantes é que apesar de serem sistemas relativamente fechados, já incluem por defeito uma grande quantidade de funcionalidades, na sua maioria opcionais, nos outros comandos numéricos [10].

²Método de programação CN em que o utilizador em vez de escrever o programa diretamente utilizando uma dada linguagem de programação, segue um conjunto de interfaces relevantes ao processo.

³Formato de ficheiro CAD bidimensional criado pela Autodesk (AutoCAD).



Figura 1.7 – Interface dos CNC Heidenhain TNC 320 e TNC 640 respetivamente

1.3 Objetivos da dissertação

O principal objetivo desta dissertação é a implementação do sistema de comando numérico modular Fagor 8055M no acionamento de uma mesa de posicionamento com dois eixos lineares (X e Y) e posterior validação do funcionamento do sistema através da execução de programas de comando numérico.

Esta utilização do comando numérico Fagor implica a requalificação e validação das ligações de potência e comando do sistema, a configuração de tabelas de parâmetros responsáveis pelo funcionamento do comando numérico e a programação das rotinas auxiliares e de segurança executadas no autómato programável incluído no módulo central do comando numérico.

No que diz respeito à compatibilização entre os servomotores disponíveis e a mesa de posicionamento, é necessário verificar o dimensionamento da cadeia de transmissão e projetar uma solução de acoplamento e fixação dos servomotores à mesa.

1.4 Estrutura do relatório

A presente dissertação encontra-se dividida em cinco partes, incluindo este capítulo introdutório.

No capítulo 2 é apresentado o equipamento de comando numérico Fagor existente no Laboratório de Robótica Industrial do Departamento de Engenharia Mecânica da FEUP e a requalificação realizada ao mesmo. Nesta inclui-se a atualização dos circuitos elétricos, a configuração e a programação necessárias para obter um estado suficientemente funcional para realizar diagnósticos ao equipamento.

O capítulo 3 é dedicado à apresentação da mesa de posicionamento com dois eixos de movimento e à caracterização dos seus componentes. É também apresentado o projeto de uma solução de acoplamento e fixação dos servomotores existentes a essa mesa.

No capítulo 4 é apresentada a integração do comando numérico na mesa de posicionamento e testes ao funcionamento do sistema. Inclui-se a configuração e programação necessárias para esta mesa em particular, a limitação dos cursos da mesa, o ajuste de ganhos dos controladores com apoio num modelo do sistema simplificado em *Simulink* e finalmente testes de execução de programas de comando numérico.

O capítulo 5 corresponde à compilação de conclusões retiradas do trabalho realizado, bem como algumas propostas de futuros melhoramentos do sistema existente.

Capítulo 2

Equipamento de comando numérico

Neste capítulo é apresentado o equipamento de comando numérico disponível no Laboratório de Robótica do Departamento de Engenharia Mecânica da FEUP. Este baseia-se num sistema modular da Fagor, modelo 8055M e encontra-se inserido numa bancada didática transparente visível na Figura 2.1 juntamente com os três servomotores a ela associados. A bancada didática incorpora os módulos do sistema, um monitor e teclado do CNC, e ainda todos os componentes elétricos e eletromecânicos de suporte à alimentação elétrica e comando do sistema. Este sistema encontrava-se parcialmente montado, pelo que foi necessário proceder ao levantamento das ligações existentes e verificar a funcionalidade de cada um dos módulos.

Este capítulo reporta ainda o trabalho realizado na análise e caracterização dos componentes utilizados, no levantamento e alterações do circuito elétrico, bem como na configuração e programação do CNC necessárias nesta fase do trabalho.



Figura 2.1 – Sistema de comando numérico e servomotores

2.1 Instalação existente

Foi realizado um estudo dos recursos existentes na bancada didática que, para efeitos de organização é apresentado em três secções. A primeira diz respeito ao sistema de comando numérico Fagor 8055M, a segunda ao sistema de acionamento Fagor DDS e a terceira refere-se aos equipamentos elétricos e eletromecânicos que compõem os circuitos da bancada didática.

2.1.1 O sistema Fagor 8055M

O Fagor 8055M é um dos sistemas CNC de estrutura modular comercializados pela Fagor vocacionado para a fresagem. Este sistema engloba o controlador CNC propriamente dito (unidade central) e a interface do utilizador (monitor e teclado). O modelo existente terá sido adquirido há um intervalo de tempo superior a dez anos, não tendo sido completamente configurado nem utilizado no comando dos servomotores existentes.

2.1.1.1 Unidade central

A unidade central (UC) pode ser considerada o “cérebro” do sistema. Implementa as funções de CNC, nomeadamente a capacidade de interpretar programas de peça e gerar referências de velocidade que permitem controlar os eixos de movimento. Implementa também um *soft* PLC, que permite controlar as funções auxiliares necessárias ao processo, tais como a refrigeração, troca de ferramenta, equipamentos de segurança, etc.

A UC dispõe de uma construção modular, permitindo ao fabricante de um centro de maquinagem, escolher os módulos que melhor se adaptam às suas necessidades. No sistema atual, a UC é composta por três destes módulos, visíveis na Figura 2.2. São eles:

Módulo do CPU (CPU 8055/AB-M)

Dispõe de um processador a 25 MHz e dois leitores de cartões de memória proprietários.

Este tipo de cartão contém o seu número de identificação único e as chaves do *software* adquirido para o sistema. O resto do seu espaço de armazenamento é utilizado para guardar parâmetros da máquina, programas do PLC, programas de comando numérico em código G (RS-274) e ecrãs personalizados. Dispõe de 1 MB de memória RAM e 4 MB de memória não-volátil *flash* (MEM.KEY CARD 55/BC).

Neste módulo encontram-se também conectores para o *display* e teclado da máquina, o conector SERCOS¹ necessário para a realização da comunicação entre módulos e dois conectores de comunicação em série, um RS-232C e um RS-422 que permitem funcionalidades de DNC ao ligar a um PC.

¹*Serial Real-time Communication System*. Protocolo de comunicação série sobre cabo de fibra ótica específico para controlo de eixos (IEC 61491).

Módulo dos eixos (AXES 8055)

Este módulo serve de interface para os sinais de controlo dos eixos, do *spindle* e do volante electrónico. Para tal dispõe de oito conectores para receber o *feedback* dos eixos e para enviar as referências para controlo dos servomotores aos *drivers* respetivos. Quando a comunicação entre módulos é feita pela rede SERCOS, estes oito conectores não são utilizados. Dispõe também de dois conectores para entradas e saídas do PLC. No total existem disponíveis 40 entradas e 24 saídas.

Módulo do disco rígido e ligação à rede (HD 8055-E)

Este módulo alberga um disco rígido com 2.1 GB de capacidade de memória. Pode ser utilizado para armazenar programas de comando numérico, ecrãs personalizados, *backups* de tabelas e parâmetros, etc.

Dispõe também de uma ligação *Ethernet* que permite aceder ao disco como uma diretoria na rede, e daí adicionar, editar, apagar e copiar ficheiros entre um PC e o CNC.

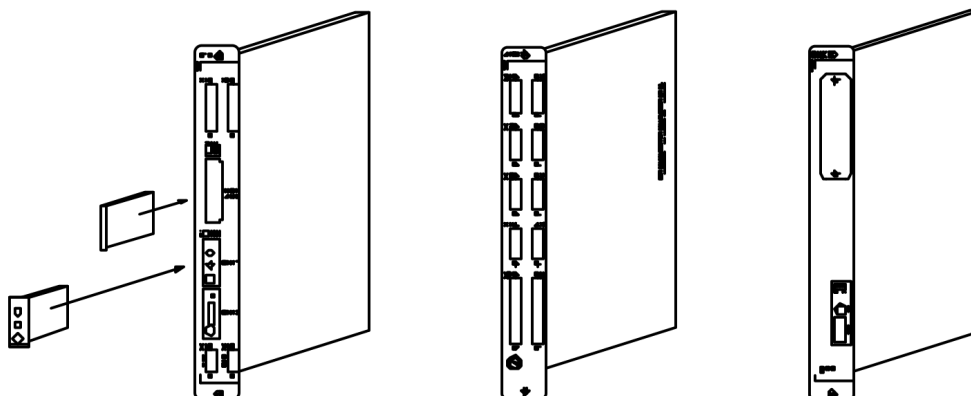


Figura 2.2 – Módulos da unidade central: CPU, eixos e disco rígido respetivamente

Chassis e fonte de alimentação da unidade central (PSB3-8055)

Para alojar e alimentar estes módulos, está disponível um chassis com organização em prateleiras verticais e fonte de alimentação incluída. Possui uma alimentação monofásica (230 Vac, 50 Hz) e encontra-se visível na Figura 2.3.

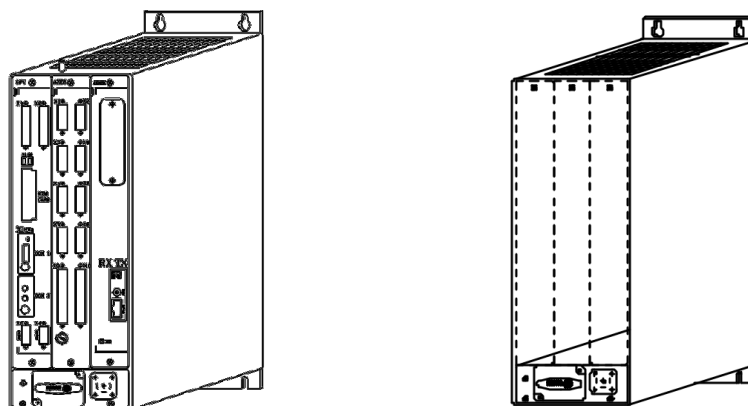


Figura 2.3 – Chassis e fonte de alimentação da unidade central com e sem módulos

2.1.1.2 Interface do comando numérico

A interface permite a interação do utilizador com o CNC. É composta por um LCD de 11" VGA a cores (NMON-55-11-LCD) e um teclado (OP-55MCO/TCO) visíveis na Figura 2.4.



Figura 2.4 – Monitor e teclado do CNC

Este teclado para além de dispor de botões alfanuméricos, dispõe de botões associados a tarefas específicas do CNC, tais como a pesquisa do zero de referência da máquina, a execução de programas de comando numérico bloco a bloco e o *jogging* manual dos eixos. Na parte inferior do teclado é possível distinguir dois seletores. O seletor esquerdo especifica o tipo de *jogging* (incremental ou contínuo) e o direito aplica um fator multiplicativo à velocidade de avanço programada (de 0 a 120%), o que permite ao utilizador variar dinamicamente a velocidade de avanço especificada no programa de comando numérico. À direita deste último seletor encontram-se os botões que iniciam ou suspendem a execução de um programa de comando numérico.

2.1.1.3 Volante eletrónico

Entre os equipamentos do sistema CNC, encontra-se também um volante eletrónico (HBA-072915) (Figura 2.5). Este oferece uma alternativa ao teclado do CNC na realização do *jogging* manual. O volante baseia-se num *encoder* incremental de relutância variável, dois seletores, três botões que controlam o *jogging* contínuo, dois “botões de homem morto” e uma botoneira de emergência.



Figura 2.5 – Volante eletrónico HBA

À semelhança do *jogging* manual no teclado, o *jogging* através deste equipamento dispõe de dois modos: contínuo e incremental.

No modo incremental é utilizado o *encoder* do volante, correspondendo cada incremento de rotação a uma movimentação de 1, 10 ou 100 μm (seletor direito) de um eixo específico (seletor esquerdo).

No modo contínuo são utilizados os botões “+” e “-” para movimentar o eixo selecionado na sua direção positiva e negativa respetivamente. O botão posicionado entre estes dois especifica que o movimento será realizado à velocidade de avanço rápido (G00). Para ser possível realizar o movimento contínuo, o seletor da resolução do incremento necessita estar na posição inicial (sem valor).

Para ser possível utilizar estas funcionalidades, pelo menos um dos “botões de homem morto” laterais necessita de ser continuamente premido.

2.1.2 O sistema Fagor DDS

O Fagor *Digital Drive System* baseia-se num sistema modular projetado para controlar servomotores síncronos (*AC Brushless*) aplicados no acionamento de eixos de movimento e motores assíncronos normalmente usados na árvore da máquina ferramenta (*spindle*). Na bancada didática, os *drivers*, servomotores e fonte de alimentação são equipamentos incluídos neste sistema.

2.1.2.1 Drivers dos eixos

Um *driver* permite a ligação do servomotor ao comando numérico. Este amplifica e converte o sinal de referência proveniente da UC num sinal de potência que envia para os servomotores.

Na bancada didática existem três *drivers* Fagor DDS, modelo AXD 1.08 (Figura 2.6) cujas características se encontram na Tabela 2.1.



Figura 2.6 – Driver modular Fagor AXD 1.08

Tabela 2.1 – Características do *driver* AXD 1.08

Parâmetro		Valor
Tensão admitida no barramento de potência	[Vdc]	542-800
Corrente nominal	[A]	4
Corrente de pico máxima (durante 0.5s a cada 10s)	[A]	8
Largura de banda da corrente	[Hz]	800
Tensão de alimentação para circuitos de comando próprios	[Vdc]	24
Consumo	[A]	0.9
Massa	[kg]	6
Dimensões (largura × altura × profundidade)	[mm]	75×348×255

Este modelo situa-se na posição inferior da gama AXD, no sentido em que a corrente que este é capaz de debitar é inferior a todos os outros modelos. Para efeitos comparativos, o *driver* que se encontra no topo da gama (AXD 3.150), é capaz de debitar 62 A (150 A de pico). O *driver* selecionado para controlar um servomotor deve possuir uma corrente nominal superior à corrente que o motor consome para gerar o binário nominal e deve limitar a corrente de pico desse mesmo servomotor à sua zona de funcionamento intermitente (entre o binário de pico e o nominal) [11].

O *driver* dispõe das seguintes ligações:

- **X1:** Conector do barramento utilizado na comunicação entre módulos do DDS. Este permite a um qualquer *driver* comunicar com a fonte de alimentação e desativar o barramento de potência caso seja detetado um erro.
- **X2:** Ligações do *driver* ao circuito de comando e à fonte de alimentação modular, como descrito nos Anexos A.3 e A.4.
- **X4:** Conector do *feedback* dos motores.
- **X5:** Conector de comunicação série RS-232. Permite configurar e aceder às funcionalidades do *driver* através de um computador.
- Dois conectores associados à comunicação SERCOS (IN e OUT).
- Ligação de dois terminais ao barramento de potência comum a todos os módulos. Encontra-se coberta por uma tampa protetora, visto que as tensões neste barramento podem atingir os 800 Vdc. O *driver* converte esta tensão DC na tensão AC trifásica que alimenta o servomotor.
- Conector das fases do motor na face superior do *driver*.

Na face frontal também se encontra um seletor cuja posição especifica o endereço SERCOS do respetivo *driver* e um *display* de sete segmentos que permite conhecer o estado atual do mesmo.

As versões dos *drivers* existentes na bancada apenas permitem o funcionamento em controlo de velocidade, mas versões mais recentes do mesmo modelo permitem operar em controlo de posição. Em controlo de velocidade, a UC processa a posição pretendida, a velocidade de avanço programada e o *feedback* do motor e para essas condições gera uma referência de velocidade. Esta é comunicada ao *driver* através da rede SERCOS. O *driver* compara esta referência com o *feedback* do servomotor e gera um ação de controlo em corrente. Este controlo de velocidade é feito por um controlador proporcional

e integral (PI) cujos ganhos podem ser configurados pelo utilizador do sistema. A ação de controlo em corrente é posteriormente comparada à corrente real. É utilizado um segundo controlador PI para efetuar o controlo da corrente que circula nos enrolamentos dos servomotores. Os ganhos deste podem também ser ajustados, mas já se encontram calibrados pela Fagor. Este funcionamento encontra-se representado na Figura 2.7 através de um diagrama de blocos simplificado.

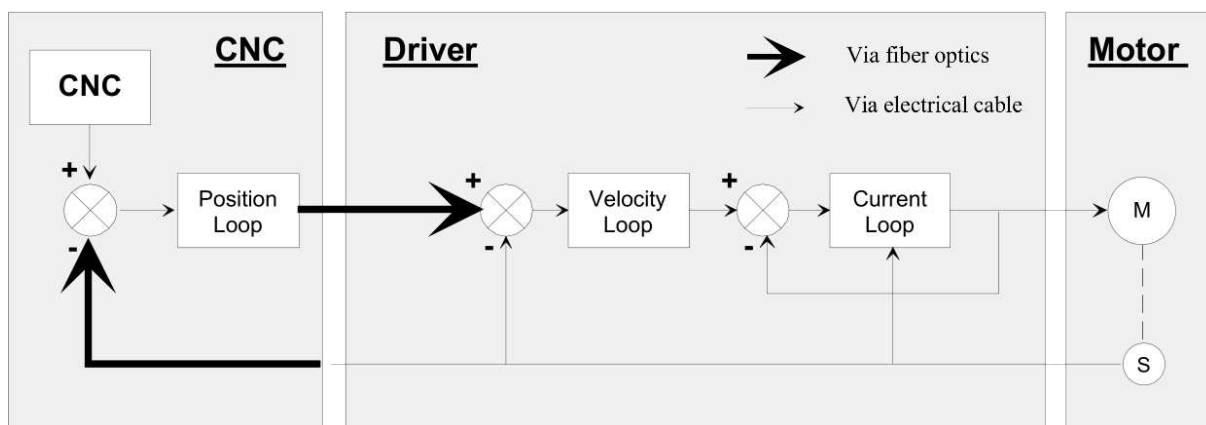


Figura 2.7 – Diagrama de blocos de um eixo de acionamento do sistema com o *driver* em controlo de velocidade, adaptado de [11]

A alimentação aos servomotores está dependente da ativação da função *Driver Enable*. Esta função é ativada por dois sinais, um deles vindo do PLC (DRENAn, ilustrado no Anexo B.1) e o outro de uma ligação ao circuito de comando realizada no conector X2 denominada “*Drive Enable*” (Anexo A.4). Existem dois destes sinais para cada par *driver* e servomotor. Uma transição descendente de um destes dois sinais provoca o corte da alimentação ao servomotor respetivo e a consequente imobilização do eixo devido às forças de atrito, caso este se encontre em movimento.

À semelhança da função *Driver Enable*, a função *Speed Enable* é ativada a partir de vários sinais, mas neste caso três. A ausência de um destes provoca que os *drivers* imponham uma velocidade de rotação nula aos servomotores. Também à semelhança da função *Driver Enable*, um dos componentes do *Speed Enable* é ativado pelo PLC (SPENAn, ilustrado no Anexo B.1) e o outro a partir do circuito de comando numa ligação feita no conector X2 denominada “*Speed Enable*” (Anexo A.4). O terceiro sinal, *System Speed Enable*, encontra-se implementado nos circuitos internos da fonte de alimentação modular (Anexo A.4). Este tem uma natureza geral, pelo que na sua ausência todos os *drivers* impõem uma referência de velocidade nula (0 rpm).

No funcionamento normal do CNC todos estes sinais necessitam de se encontrar ativados.

Este *driver* dispõe da opção de condicionar a referência de velocidade antes desta ser comparada ao valor do *feedback* (Figura 2.8). Este tipo de condicionamento permite obter uma movimentação mais suave do eixo no arranque e na travagem. Traduz-se na possibilidade de aplicação de um perfil de velocidade com três regiões diferenciadas entre si pela aceleração máxima ou um perfil dependente do limite da variação da aceleração (*jerk*). A referência de velocidade resultante é posteriormente limitada por um parâmetro interno do *driver*. É possível também aplicar uma rampa de velocidade na travagem de emergência pela especificação da aceleração absoluta máxima.

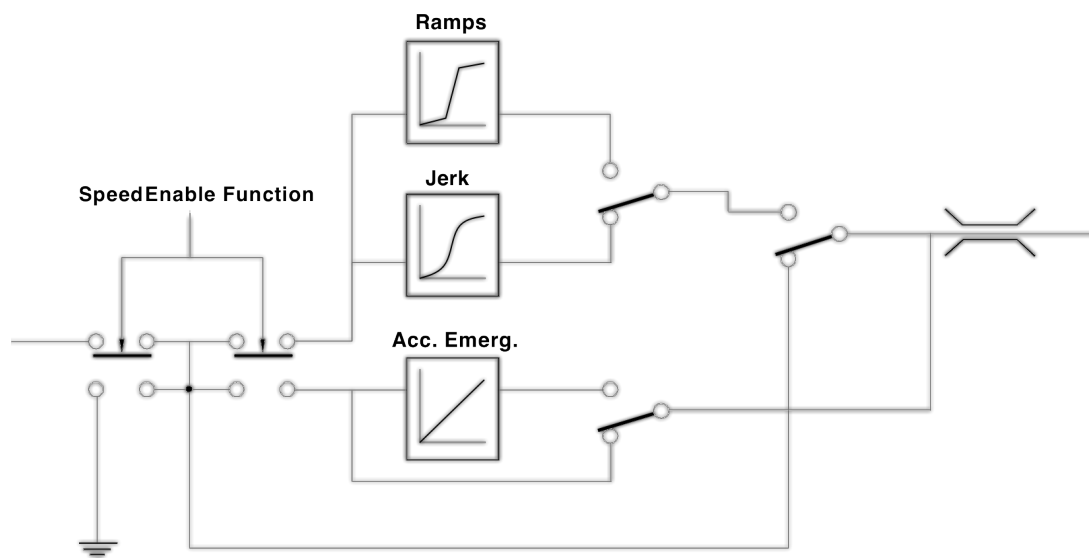


Figura 2.8 – Condicionamento da referência de velocidade

2.1.2.2 Fonte de alimentação

A fonte de alimentação fornece energia elétrica aos *drivers* através do barramento de potência e ao circuito de comando. Encontra-se representada na Figura 2.9 e algumas das suas características na Tabela 2.2.



Figura 2.9 – Fonte de alimentação modular Fagor PS-25B4

Tabela 2.2 – Características da fonte de alimentação PS-25B4

Parâmetro		Valor
Tensão eficaz de alimentação trifásica	[Vac]	400 -15% a 460 +10%
Consumo máximo	[A _{rms}]	38
Tensão de saída no barramento de potência	[Vdc]	567.5-650
Corrente nominal	[A]	45
Corrente de pico (1 s)	[A]	135
Potência nominal	[kW]	25
Potência de pico (1 s)	[kW]	75
Massa	[kg]	6
Dimensões (largura × altura × profundidade)	[mm]	77×348×255

A fonte dispõe das seguintes ligações:

- **X1:** Conector do barramento utilizado na comunicação entre módulos do DDS. Permite desativar o barramento de potência caso seja detetado um erro num qualquer módulo.
- **X2:** Ligações da fonte ao circuito de comando como descrito no Anexo A.4.
- **X3:** Conector da alimentação própria da fonte (fases L1 e L2).
- **X4, X5, X6:** Conectores que fornecem tensão a 24 Vdc ao circuito de comando e aos módulos.
- Ligação ao barramento de potência comum a todos os módulos coberta por uma tampa protetora.
- Conector da alimentação trifásica na face superior do *driver* (fases L1, L2 e L3).

Encontram-se também na face frontal deste módulo LEDs indicativos do estado da fonte e um botão que efetua o *reset* de todos os módulos do sistema DDS.

2.1.2.3 Servomotores

Os servomotores controlados pela bancada didática são motores trifásicos síncronos de 1.1 kW, com rotor de íman permanente (*AC Brushless*) e referência FXM [11]. Esta família de motores comercializados pela Fagor inclui servomotores com potências entre os 0.3 e os 21 kW. Este tipo de motor é normalmente aplicado no acionamento de eixos de movimento, pelo facto do seu binário ser aproximadamente constante para toda a gama de velocidades, e dessa forma pode responder rapidamente e com suavidade a variações da velocidade de corte em função da trajetória de referência.

No sistema de comando numérico do laboratório de robótica do DEMec, existem especificamente dois servomotores FXM31.40A.E1.000 (Figura 2.10) e um servomotor FXM31.40A.E1.010, diferindo este último pelo facto de possuir um travão eletromecânico. A existência deste travão é justificada na utilização do servomotor num eventual eixo de movimento vertical, de forma a imobilizar esse eixo quando a máquina se encontra desligada.

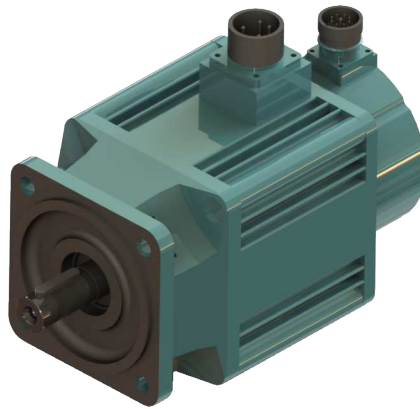


Figura 2.10 – Servomotor Fagor FXM31

O *feedback* nestes servomotores é obtido através de um *encoder* incremental sinusoidal com 1024 períodos por volta. Outras características destes servomotores são apresentadas na Tabela 2.3, enquanto que a sua curva característica de binário em função da velocidade de rotação se encontra na Figura 2.11.

Tabela 2.3 – Características do servomotor FXM31.40A.E1.000

Característica		Valor
Binário de bloqueio	[Nm]	2.6
Binário de pico	[Nm]	13.0
Velocidade nominal	[rpm]	4000
Potência	[kW]	1.09
Constante de binário	[Nm/A]	1.35
Corrente em bloqueio	[A]	1.92
Corrente de pico	[A]	9.60
Momento de inércia do rotor ¹	[kg.cm ²]	3.50
Massa ²	[kg]	5.5

O binário de pico do conjunto servomotor e *driver* encontra-se limitado pela corrente de pico do *driver* (8 A). Tendo em conta a constante de binário do servomotor, verifica-se nestas condições que o seu binário de pico é de 10.8 Nm.

¹O momento de inércia do rotor do servomotor com travão (FXM31.40A.E1.010), é de 4.50 kg.cm².

²A massa do servomotor com travão (FXM31.40A.E1.010), é de 6.1 kg.

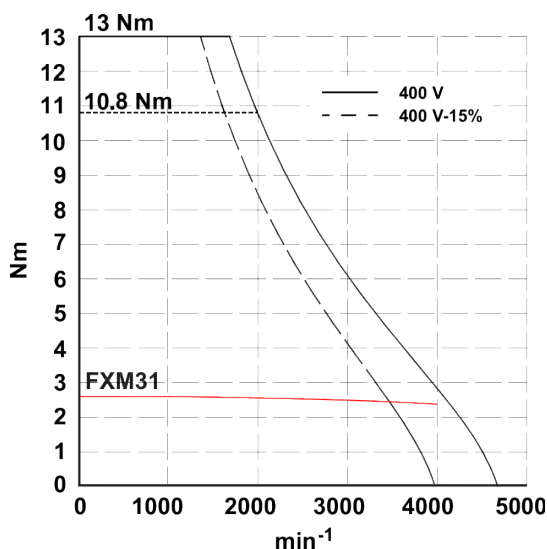


Figura 2.11 – Curva de binário de um servomotor FXM31.40A

Visto que a mesa que irá ser apresentada posteriormente no capítulo 3, apenas dispõe de dois eixos de movimento e nenhum deles vertical, não existe a possibilidade de incluir o servomotor com travão na mesa, e como tal apenas é testado o seu correto funcionamento.

2.1.3 Instalação elétrica

À data de início da dissertação, já se encontrava feita uma instalação elétrica na bancada didática (Figura 2.12), mas verificou-se que esta não se encontrava totalmente funcional.

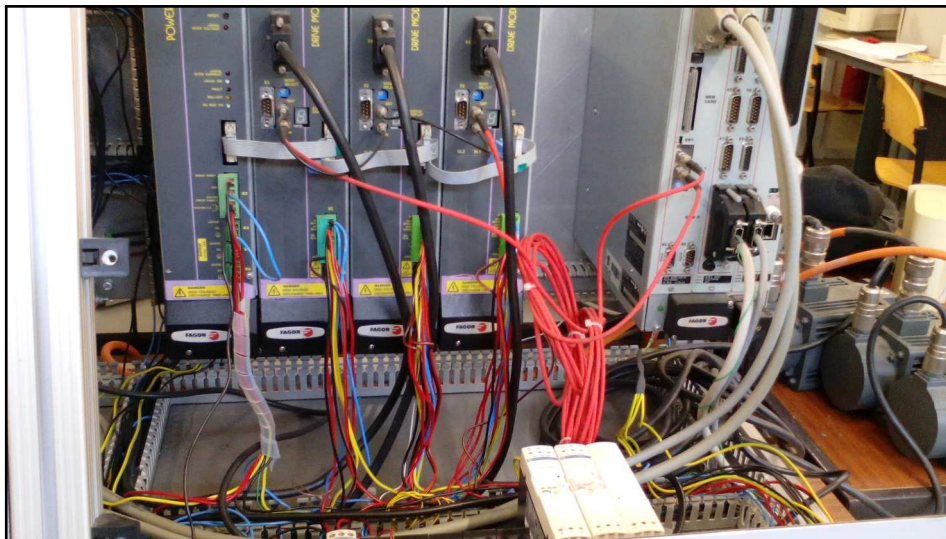


Figura 2.12 – Fotografia da instalação elétrica existente no início da dissertação

Foram assim catalogados os componentes elétricos e eletromecânicos existentes e estudado o seu modo de funcionamento de forma a reavaliar a sua função no circuito e a sua implementação. Após este estudo procedeu-se à requalificação da instalação elétrica.

2.2 Requalificação do sistema

2.2.1 Circuitos elétricos da bancada didática

Tomando como referência os circuitos originais, as recomendações da Fagor (Anexo A.1) e objetivos gerais de melhoria, foram elaborados novos circuitos a implementar na bancada. Foi utilizada a aplicação *SEE Electrical*¹ na elaboração deste circuitos. No Anexo A.2 é apresentado o circuito de potência, no Anexo A.3 o circuito de comando e no Anexo A.4 as ligações entre os módulos da bancada. Ao realizar a implementação preferiu-se refazer completamente o circuito de comando em vez de adaptar as ligações existentes, o que demoraria mais tempo e resultaria numa implementação final certamente inferior na qualidade dos circuitos.

O circuito implementado foi verificado e testado, tendo funcionado como esperado. Na Figura 2.13 é apresentado o interior da bancada didática após essa implementação. Posteriormente foram aparafusados painéis em acrílico transparente à estrutura, permitindo assegurar um isolamento físico do sistema em relação ao meio exterior e mantendo visíveis todos os seus componentes, o que é de interesse dado o intuito didático da bancada.

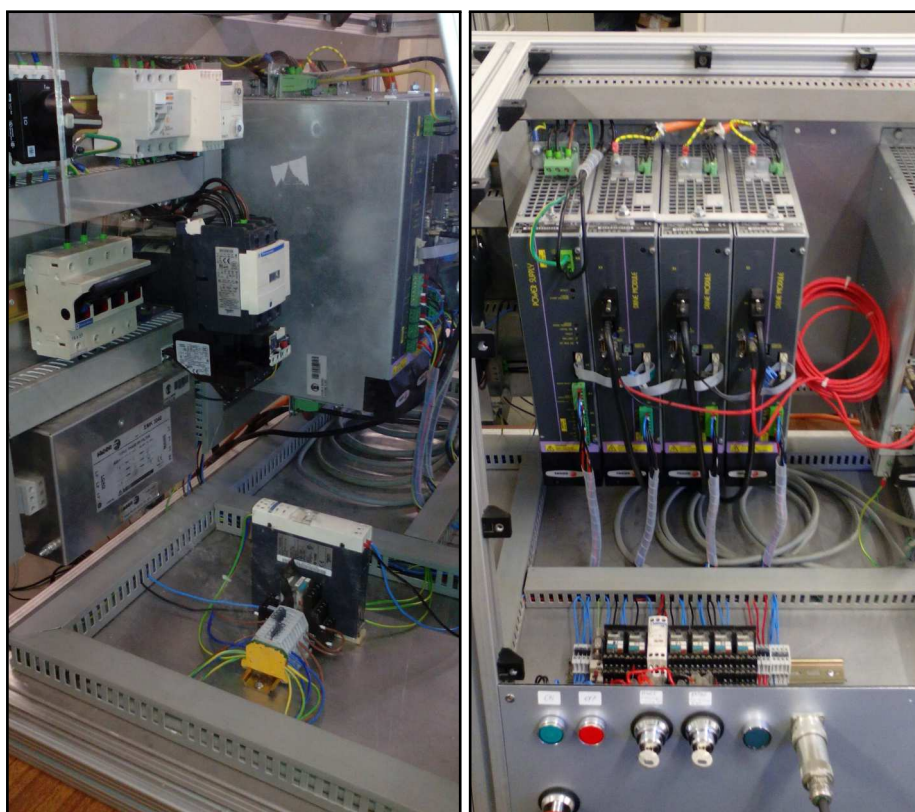


Figura 2.13 – Interior da bancada didática após requalificação

Após a finalização da montagem, procedeu-se à configuração dos parâmetros do comando numérico, que governam variados aspetos do seu funcionamento, e à programação do *soft* PLC incluído no mesmo.

¹Software CAD especializado em circuitos elétricos.

2.2.2 Configuração do CNC

Analogamente à instalação elétrica, também a configuração do sistema necessitava de ser revista e reavaliada. Essa informação é armazenada em tabelas de parâmetros. Estes regem o comportamento dos módulos do comando numérico em aspetos fundamentais como as características da máquina ferramenta (por exemplo cursos, velocidades de avanço, desmultiplicações, etc), método de obtenção do *feedback* (encoders absolutos, incrementais de onda quadrada ou sinusoidal, encoders lineares, etc), o protocolo que os módulos usam para comunicar entre si, opções disponíveis na interface do utilizador, entre outros.

Este sistema CNC em particular disponibiliza os seguintes grupos de parâmetros para configuração, sendo apresentados alguns exemplos:

- **Parâmetros gerais da máquina** (p. ex. tipo de eixos, número de ferramentas, unidades, etc);
- **Parâmetros dos eixos** (p. ex. passo, limites, ganhos do *loop* de posição, rampas, etc);
- **Parâmetros do *spindle*** (p. ex. ganhos, rampas de velocidade, numero de velocidade, etc);
- **Parâmetros dos *drivers*** (p. ex. dados fundamentais do motor, ganhos do *loop* de velocidade, etc);
- **Parâmetros de comunicação série RS-232-C e RS-422;**
- **Parâmetros de comunicação *Ethernet*;**
- **Parâmetros do PLC** (p. ex. *watchdog*, parâmetros de uso livre para leitura pelo PLC, etc).

Estes parâmetros podem ser alterados através da interface própria do CNC (Figura 2.14), por leitura de um ficheiro do cartão de memória (um *backup* por exemplo) ou remotamente através de comunicação série com um computador utilizando a aplicação de *software* disponibilizada pela Fagor, o WinDNC. Na Figura 2.15 é mostrada a interface dessa aplicação que permite o acesso às tabelas do CNC e a edição das mesmas.

GENERAL PARAMETERS		P..... N....	DNC 1 2	18:40:26
PARAMETER	VALUE	NAME		
P000	01	// AXIS1		
P001	02	// AXIS2		
P002	03	// AXIS3		
P003	00	// AXIS4		
P004	00	// AXIS5		
P005	00	// AXIS6		
P006	00	// AXIS7		
P007	00	// AXIS8		
P008	0	// INCHES		
P009	0	IMOVE		
P010	0	ICORNER		
P011	0	IPLANE		
P012	0	ILCOMP		
P013	0	ISYSTEM		
P014	0	IFEED		
P015	0	/ THEODPLY		
P016	000	// GRAPHICS		
P017	YES	/ RAPIDOV		
P018	120	MAXFOV		
P019	00000	/ CIRINLM		
				CAP INS MM
EDIT	MODIFY	FIND	INITIALIZE	LOAD
SAVE	MM/INCH			

Figura 2.14 – Tabela dos parâmetros gerais do CNC

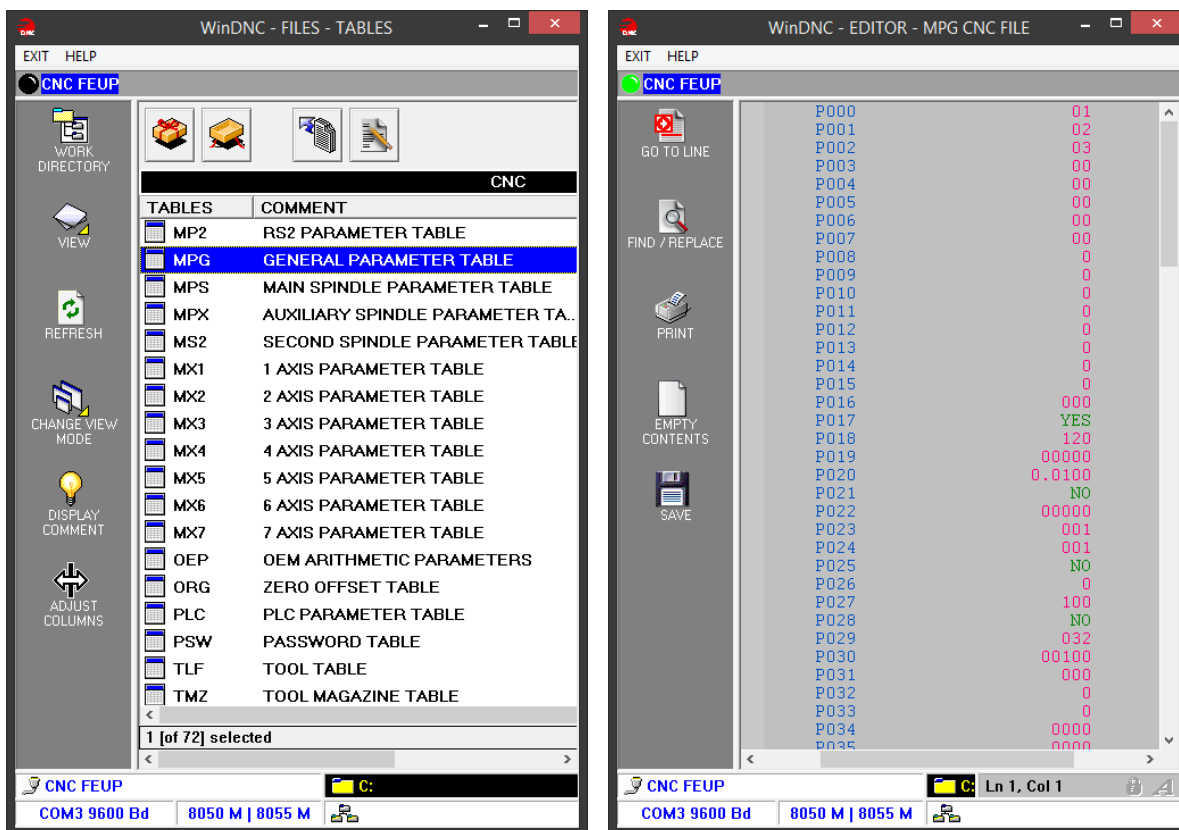


Figura 2.15 – Interfaces da aplicação WinDNC que permitem o acesso às tabelas de parâmetros

Procedeu-se à configuração dos parâmetros de máquina com o objetivo de ter o sistema num estado funcional que permita testar as suas funcionalidades, sem se pretender obter uma configuração final para o CNC.

Dado que estas tabelas têm uma natureza extensa, apenas são mencionados os parâmetros que foram alterados, permanecendo os restantes com o seu valor por defeito. A tabela de parâmetros gerais da máquina inclui cerca de 146 parâmetros individuais [3], mas nesta fase apenas os seguintes necessitaram de alteração em relação aos valores definidos por defeito:

AXIS1..3 (P0..2)

Estes parâmetros habilitam as tabelas respetivas de cada um dos eixos, *spindles* ou volantes eletrónicos. A P0 foi atribuído o valor 1, que corresponde ao valor do eixo X, 2 a P1 (eixo Y) e 3 a P2 (eixo Z).

HANDWIN (P111)

É possível configurar o sistema para apenas um volante eletrónico geral, ou até três volantes associados a eixos. Este parâmetro especifica o grupo de entradas do PLC às quais irão estar ligados os sinais do *encoder* incremental presente num desses volantes. Admite um conjunto de valores limitado: [0, 17, 33, 49, ..., 225, 241]. Neste caso o parâmetro foi configurado com o valor 17, o que significa que as entradas do PLC I18 e I19 ficam configuradas para receberem os sinais A e B do *encoder* do volante eletrónico.

HANDWHE1 (P112)

Especifica o tipo de volante e o eixo a que este está associado caso exista. Toma o valor 11 no caso de um volante geral, como é o caso.

Visto ser agora possível aceder às tabelas de parâmetros dos eixos, procedeu-se à sua configuração. De um total de 70 parâmetros por tabela de eixo, apenas os dois parâmetros seguintes que dizem respeito à comunicação SERCOS necessitaram de ser alterados:

SERCOSID (P56)

Este parâmetro especifica o endereço do módulo na rede em anel correspondente ao eixo da tabela de parâmetros em edição. Este valor tem que ser obrigatoriamente igual ao valor especificado no seletor “NODE SELECT”, localizado na face frontal do *driver* em questão. Para o caso do eixo X este parâmetro toma o valor 1, para o eixo Y o valor 2 e finalmente o valor 3 para o eixo Z.

SERCOSLE (P63)

Este parâmetro especifica de que forma é enviado o *feedback* do *encoder* dos servomotores para o CNC. Existe a possibilidade de o *feedback* ser transmitido por um conector que liga diretamente à unidade central ou de este ser feito por intermédio de comunicação SERCOS entre o *driver* e a UC. O caso do CNC existente corresponde à segunda opção e como tal, este parâmetro toma o valor 1 em todas as tabelas dos eixos.

Os *drivers* definem três níveis de acesso às suas tabelas de parâmetros: básico, OEM e Fagor. O nível básico não requer palavra-passe, mas apenas permite alterar os ganhos proporcional e integral do *loop* de velocidade. O nível OEM permite configurar a maioria dos parâmetros do *driver*, com algumas exceções, como as características fundamentais dos servomotores. O acesso total apenas é possível com o nível Fagor, permitindo o acesso a configurações normalmente definidos pelo fabricante, como os parâmetros do controlador de corrente e as características especificadas dos servomotores.

De forma a obter o nível de funcionalidade pretendido, é necessário configurar o *driver* para o servomotor que irá ser comandado. Para tal pode ser utilizada a aplicação WinDDSetup disponibilizada pela Fagor. Esta permite comunicar diretamente com o *driver* por RS-232 de forma a configurar os parâmetros. Dispõe de um gerador interno de referências, um osciloscópio virtual que permite monitorizar as variáveis do *driver* e outras funcionalidades para manutenção do equipamento.

Embebidas na aplicação encontram-se as características da gama de servomotores da Fagor. Nesta apenas é necessário selecionar o servomotor “FXM31.40A.E1.000” para que todos os parâmetros respetivos sejam carregados para a memória RAM do *driver* de forma automática. Após copiar os parâmetros da RAM para a memória não volátil (*flash*) do *driver* e *soft reset* do mesmo, essas configurações são assumidas.

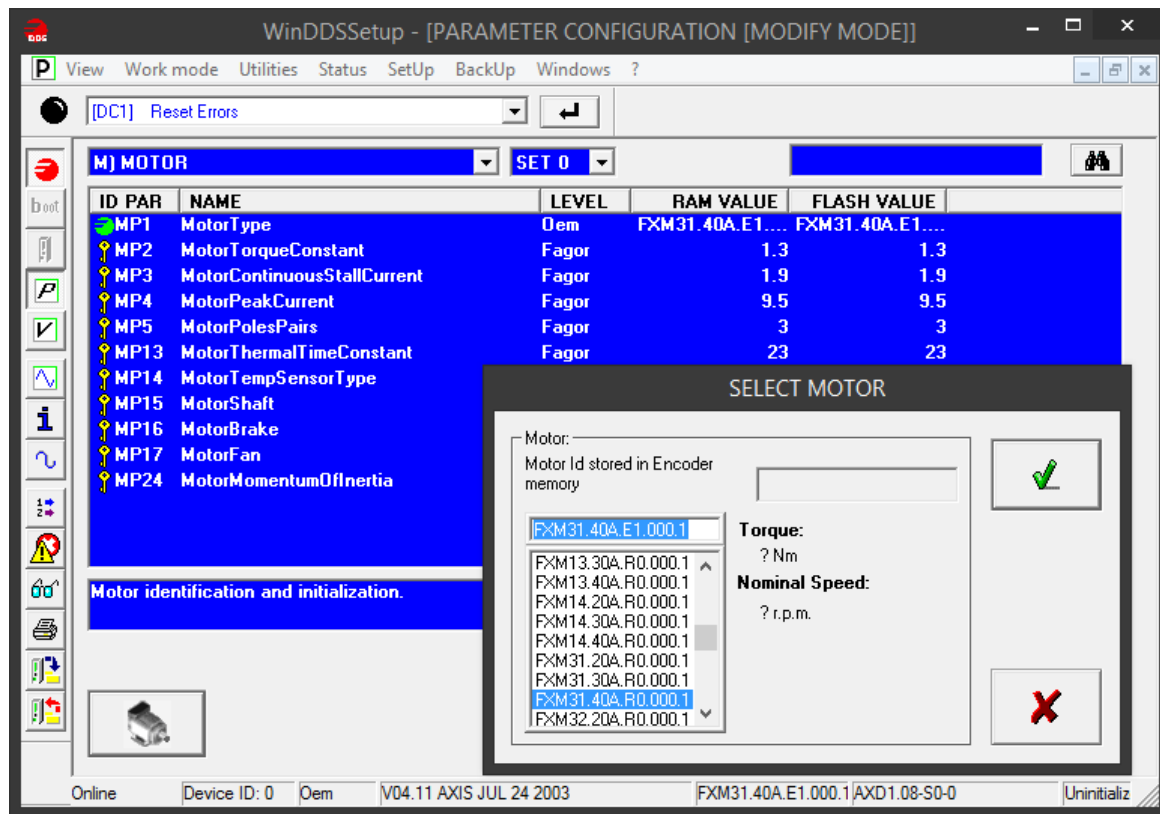


Figura 2.16 – Interface da aplicação WinDDSSetup que permite configurar o *driver* para um dado servomotor

2.2.3 Programação do PLC

A programação do PLC é realizada através de uma linguagem própria da Fagor. O programa pode ser elaborado através da interface do próprio CNC, ou num computador pessoal usando um editor de texto à escolha do programador e posteriormente enviado para o CNC através da aplicação WinDNC. Após a escrita do programa, este é compilado e armazenado de forma a passar a ser executado no arranque do CNC. O programa encontra-se estruturado em dois blocos: um bloco de execução inicial e um bloco de execução cíclica. Esta estrutura encontra-se esquematizada na Figura 2.17.

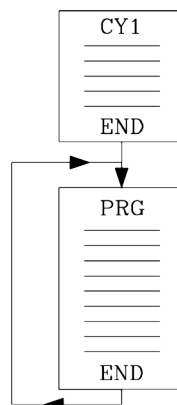


Figura 2.17 – Estrutura de um programa de PLC do CNC Fagor 8055M

O PLC dispõe de recursos que podem ser utilizados num programa. São eles:

Entradas e saídas – São elementos que permitem ao PLC comunicar com o mundo exterior. Tomam valores digitais, sendo as entradas (*inputs*) representadas pela letra I e as saídas (*outputs*) pela letra O. São suportadas até 512 entradas e 512 saídas, mas no sistema atual apenas existem 40 entradas e 24 saídas.

Memórias – São elementos que permitem ao PLC armazenar valores booleanos. São elementos não voláteis, pelo que o seu valor é mantido entre cortes de energia do sistema. Representam-se pela letra M (*Mark*). Existem 2000 destes elementos que podem ser utilizados pelo programador para armazenar informação. Para além destes existem também memórias só de leitura que dão a conhecer o estado do sistema.

Registos – São fundamentalmente iguais às memórias, mas permitem armazenar valores inteiros de 32 bits. De forma semelhante, o seu valor é mantido na ausência de alimentação do sistema. Para além dos registos que se encontram relacionados com o funcionamento do sistema, existem 500 que podem ser utilizados pelo programador para armazenar dados variados. Representam-se pela letra R (*Register*).

Temporizadores – Alteram uma memória a ele associado após a passagem de um tempo especificado. É possível consultar o valor atual, reiniciar ou interromper temporariamente a contagem. Dispõem de quatro modos de funcionamento: mono-estável, atraso na ativação (TON), atraso na desativação (TOF) e limitador de sinal.

Contadores – São elementos que permitem contar um dado número de eventos. Podem ser adicionados ou retirados valores à contagem. Esta pode também ser interrompida temporariamente, consultada ou definida com um valor arbitrário. Representam-se pela letra C (*Counter*).

Para efeitos de diagnóstico é pretendido um nível básico de funcionamento do comando numérico, pelo que apenas são criadas as condições para permitir o funcionamento dos servomotores e do volante eletrónico. O programa do Anexo B.1 habilita o *jogging* manual e a execução de programas de comando numérico e corresponde ao programa utilizado no diagnóstico do sistema.

Foi adicionado a este primeiro programa o código do Anexo B.2. Este gere o funcionamento do volante eletrónico, de forma a permitir uma maior agilidade ao realizar o *jogging* manual.

2.3 Diagnóstico do sistema

Estando o sistema montado e configurado, procedeu-se ao *jogging* manual e individual de cada servomotor, de forma a verificar que todos os elementos necessários ao acionamento do mesmo se encontravam funcionais. Para isso foi carregado no PLC o programa presente no Anexo B.1 e apenas habilitados os segmentos de código respetivos ao motor a movimentar.

Desta forma foi detetado um erro num *driver* de um dos servomotores, tendo os outros dois funcionado corretamente. Verificou-se que imediatamente após passar a existir tensão no barramento de potência comum a todos os *drivers* e à fonte de alimentação, este *driver* em particular emitia um erro (Erro 214) e de imediato o barramento de potência voltava a deixar de ter tensão. Verificou-se através do manual do *driver* [11], que este erro corresponde a um curto circuito não sendo especificada a origem deste. Após uma verificação exaustiva dos circuitos implementados, não foi detetada qualquer ligação incorreta, pelo que se contactou a Fagor para proceder à reparação do equipamento. Foi confirmado o defeito do equipamento e o mesmo foi substituído.

No período de tempo em que apenas dois *drivers* se encontravam disponíveis, o CNC foi novamente reconfigurado de forma a ser possível trabalhar com apenas dois eixos.

Após a validação do *jogging* manual, procedeu-se ao teste de um programa de comando numérico de forma a verificar que o sistema é capaz de o executar corretamente. Para isso foi elaborado o programa simples em linguagem de código G apresentado de seguida, que permite verificar o funcionamento do movimento linear rápido (G00) ou a uma velocidade programada (G01) e a interpolação circular (G02 e G03).

```

N10 G17 G71 G90      ;Seleção do plano XY (G17), dimensões em mm (G71)
                      ;e coordenadas absolutas (G90)
N20 G00 X0 Y0        ;Movimento rápido para a origem da máquina
N30 X125 Y125        ;Movimento rápido para o ponto de início
N30 G01 X375 F1000    ;Movimento em X a 1000 mm/min
N40 Y375             ;Movimento em Y a 1000 mm/min
N50 X125             ;Movimento em X a 1000 mm/min
N60 Y125             ;Movimento em Y a 1000 mm/min
N70 G03 X125 Y125 I125 J125 ;Interpolação circular no sentido anti-horário
                      ;em que I, J, K especifica um vector que somado
                      ;ao ponto atual retorna o centro do círculo
N80 G00 X0 Y0        ;Movimento rápido para a origem da máquina
N90 M30              ;Fim do programa

```

O programa foi inicialmente simulado no CNC e em seguida executado com os motores em vazio, pelo que apenas foi possível visualizar o caminho seguido na interface do comando numérico. Este encontra-se de acordo com a Figura 2.18.

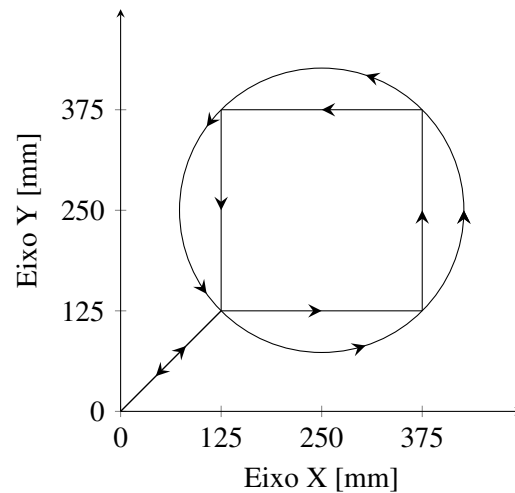


Figura 2.18 – Resultado da execução do programa de comando numérico

Posteriormente foi recebido o *driver* de substituição. Este foi montado e novamente testado, tendo sido verificado o seu correto funcionamento na execução do *jogging* manual e de programas de comando numérico.

Capítulo 3

Equipamento mecânico

Neste capítulo é apresentada a mesa XY existente no Laboratório de Robótica do Departamento de Engenharia Mecânica da FEUP visível na Figura 3.1. Consiste numa mesa de posicionamento de dois eixos lineares que utilizam fusos de esferas. Dispõe de um curso de trabalho de 511 mm por eixo e uma massa estimada de 558 kg. A sua superfície de trabalho dispõe de uma área de 600 por 600 mm.

O trabalho realizado inclui a caracterização dos componentes da mesa, a sua modelação em *software* CAD e o projeto de uma solução para o acoplamento e fixação dos servomotores de acionamento à mesa.



Figura 3.1 – Mesa de posicionamento de dois eixos

3.1 Caracterização da mesa XY

Foi necessário caracterizar e verificar as condições nominais de funcionamento da mesa e a sua compatibilidade com os servomotores existentes. Dado que esta se encontrava por utilizar há vários anos, este estudo foi também realizado com o intuito de verificar se esta necessitava de algum tipo de requalificação.

A mesa foi modelada em software de CAD (*SolidWorks*), encontrando-se o resultado desta modelação visível na Figura 3.2. Foram obtidas as dimensões de cada componente através das fichas técnicas disponibilizadas pelo fabricante respetivo. Para os componentes em que essas não estavam disponíveis, foi necessário proceder à identificação das suas dimensões por medição experimental.

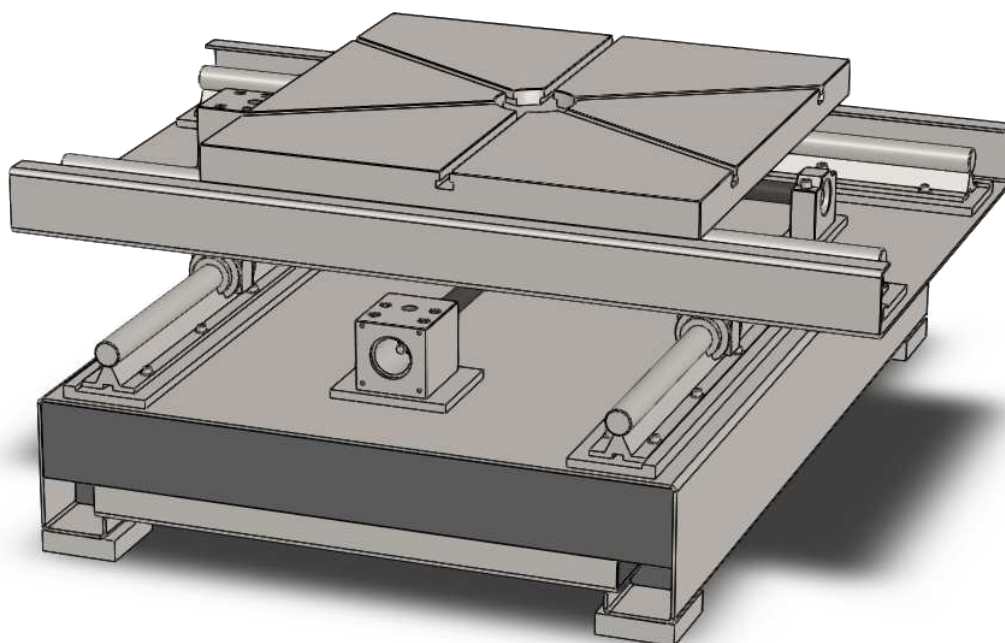


Figura 3.2 – Resultado final da modelação da mesa de posicionamento em *SolidWorks*

3.1.1 Estrutura da mesa de posicionamento

É possível dividir a mesa de posicionamento em 3 conjuntos principais:

- O conjunto inferior (ou base da mesa): contém a montagem do fuso inferior e das guias de movimento da carruagem (considerado o eixo Y);
- O conjunto superior (ou carruagem): contém a montagem do fuso superior e as guias de movimentação da mesa de trabalho. Encontra-se solidária com a porca de esferas do fuso inferior (considerado o eixo X);
- A mesa de trabalho: elemento final da mesa que se movimenta no plano XY e sobre o qual se fixa a peça a trabalhar.

3.1 Caracterização da mesa XY

Relativamente à base da mesa (Figura 3.3), esta tem uma construção em chapa de aço quinada com 4 mm de espessura. O espaço interior desta construção em chapa foi preenchido com betão polimérico, um material compósito comum em bases de máquinas ferramenta devido às suas propriedades para absorção de vibrações. Assumindo que a densidade deste material toma um valor de 2260 kg/m^3 [12] e que a densidade do aço dos componentes da base da mesa é 7850 kg/m^3 [13], através das ferramentas de cálculo disponíveis no *SolidWorks*, estima-se que a base possua uma massa de aproximadamente 336 kg. Este eixo de movimento é definido como o eixo Y.

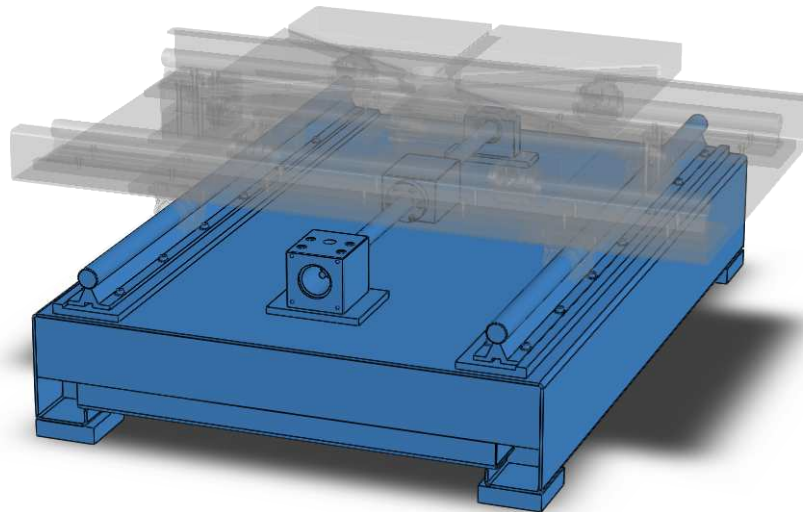


Figura 3.3 – Base da mesa de posicionamento (a azul)

À semelhança da base da mesa, a carruagem (Figura 3.4) tem também uma construção em chapa de 4 mm de aço quinada e uma massa aproximada de 97 kg. Esta é suportada pelas guias lineares da base e movimentada pela porca de esferas inferior. Este eixo de movimento é definido como o eixo X.

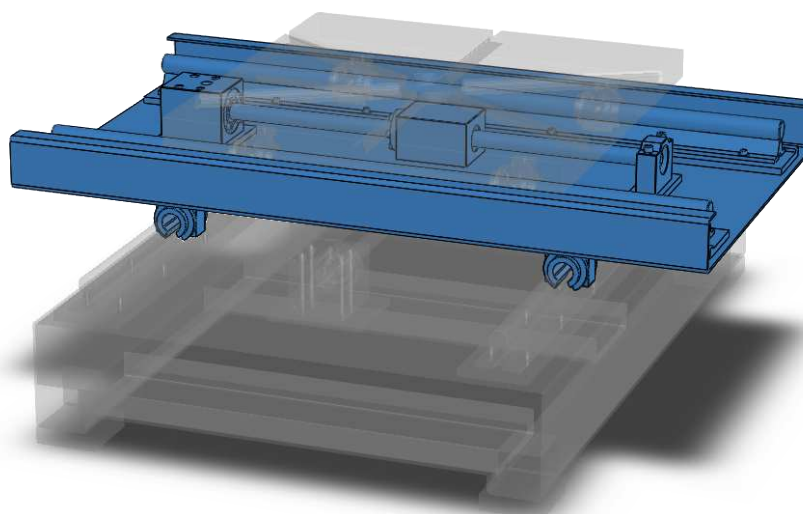


Figura 3.4 – Carruagem da mesa de posicionamento (a azul)

A mesa de trabalho (Figura 3.5) é feita a partir de um bloco de dimensões $600 \times 600 \times 45$ mm em aço e possui rasgos maquinados para porcas com secção em T, ISO 299/DIN 508 tamanho M10, que permitem posicionar e fixar a peça a trabalhar. Incluem-se também nesta montagem os rolamentos lineares e os seus suportes de alojamento. O peso estimado para este equipamento é de 124 kg.

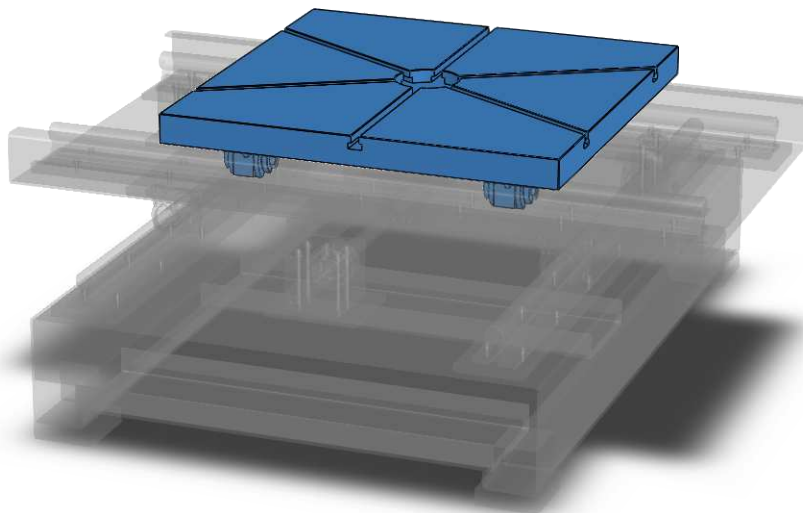


Figura 3.5 – Superfície de trabalho da mesa de posicionamento (a azul)

3.1.2 Sistema de acionamento dos eixos de movimento

Um sistema de fuso e porca de esferas consiste num atuador mecânico capaz de converter movimento angular em movimento linear. Baseia-se num veio no qual se encontra maquinado um caminho que permite a circulação de esferas e numa porca que possibilita a recirculação das mesmas.

Devido à ocorrência de contacto entre componentes mecânicos em apenas dois pontos de cada esfera (ou quatro pontos quando as esferas são sobredimensionadas para tal) (Figura 3.6), as forças de atrito geradas são reduzidas e como tal os rendimentos obtidos neste tipo de acionamento rondam os 90 a 95%.

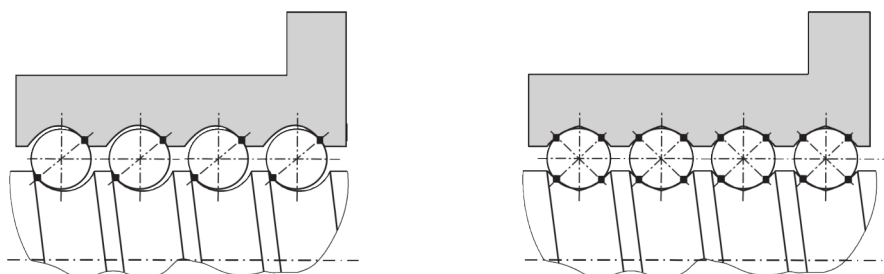


Figura 3.6 – Contacto em dois ou quatro pontos por esfera num fuso e porca de esferas

A mesa XY existente utiliza este tipo de acionamento, um para cada eixo de movimento, na configuração apresentada na Figura 3.7.

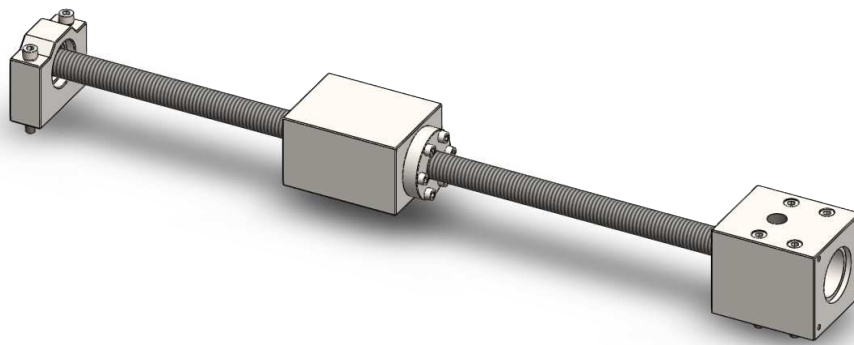


Figura 3.7 – Montagem do fuso de esferas modelado em *SolidWorks*

Na ausência de qualquer informação inicial relativa a referências do sistema de acionamento mecânico, realizou-se uma desmontagem dos apoios de um dos fusos com o intuito de identificar essas referências e os detalhes de cada componente do conjunto. A partir das medições efetuadas e tendo sido obtida a informação que o fuso é de marca INA, foi procurado um fuso com as características o mais semelhantes possível a partir da gama desse fabricante. Foi encontrado o fuso de esferas de referência KGS 2505, com um diâmetro nominal de 25 mm, passo de 5 mm e rosca direita de entrada única (Figura 3.8), o que corresponde na íntegra ao fuso existente. O comprimento roscado dos fusos existentes é de 655 mm, mas quando inseridos na montagem obtém-se um curso útil de 511 mm.



Figura 3.8 – Rosca de fuso de esferas INA KGS

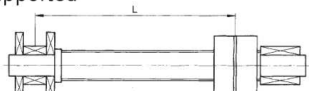
Esta gama de fusos admite velocidade máximas até 4500 rpm [14], no entanto as dimensões do fuso podem condicionar este valor pois influenciam a velocidade ressonante (ou crítica) do mesmo. Define-se essa velocidade crítica como a velocidade angular à qual a deflexão do veio é máxima, ou seja, quando a velocidade do veio corresponde à frequência natural de vibração do sistema. O fabricante define essa velocidade como [14]:

$$n_{crit} = \frac{k_n \cdot d_2}{L^2} \cdot 10^7 \quad (3.1)$$

Sendo que:

- n_{crit} [rpm]: velocidade angular crítica do veio do fuso de esferas;
- k_n : coeficiente de velocidade crítica dependente do tipo dos apoios do fuso (Tabela 3.1);
- d_2 [mm]: diâmetro da raiz da rosca do veio do fuso (Anexo D.1);
- L [mm]: distância máxima entre o centro do apoio fixo e o centro da porca de esferas.

Tabela 3.1 – Valores do coeficiente de velocidade crítica em função do tipo de apoio [14]

Of Support Bearing Arrangement	Critical Speed Factor k_n
Fixed-Free 	3.5
Fixed-Supported 	15.3
Fixed-Fixed 	22.3

Para o presente caso, atendendo ao apoio fixo-suportado (Figura 3.9) ($k_n = 15.3$) e dimensões do fuso ($d_2 = 21.9$ mm, $L = 560$ mm), a velocidade crítica é de 10 685 rpm. O fabricante recomenda que a velocidade atingida em funcionamento não exceda 80% deste valor. No entanto, este valor é ainda assim superior a 4500 rpm, pelo que a condição da velocidade crítica não se verifica e como tal, 4500 rpm será a velocidade angular máxima a que o fuso pode ser operado.

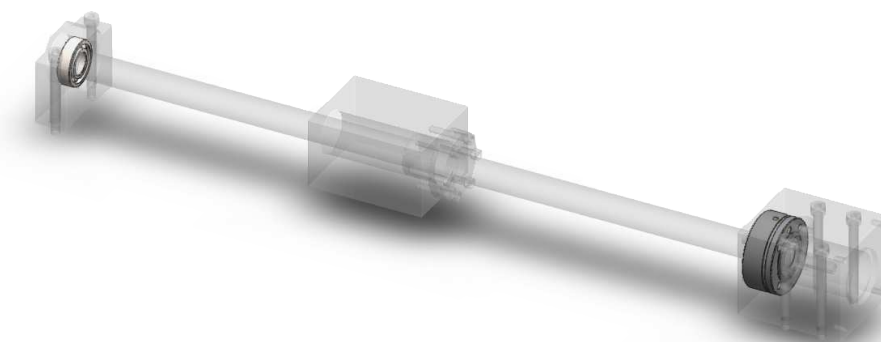


Figura 3.9 – Localização dos dois rolamentos nos apoios da montagem do fuso de esferas

A velocidade que então se consegue atingir no acionamento dos eixos da mesa será considerada correspondente à velocidade nominal dos servomotores (4000 rpm). Tendo em conta o passo do fuso, este valor corresponde a uma velocidade linear (*feed*) de 20 000 mm/min, ou 0.33 m/s.

À semelhança do veio do fuso, a identificação do modelo da porca de esferas foi conseguida pela comparação entre as dimensões da gama do fabricante e as obtidas por medição experimental. Foi identificada a porca de esferas INA KGF-N 2505 RH EE. Consiste numa porca com vedantes nas extremidades, compatível com o fuso KGS (Figura 3.10). As características e dimensões desta porca (Anexo D.2), encontram-se de acordo com as das porcas de esferas da mesa de posicionamento.



Figura 3.10 – Porca INA KGF-N montada num dos fusos da mesa XY

Localiza-se a porca de esferas na montagem do fuso de acordo com a Figura 3.11.

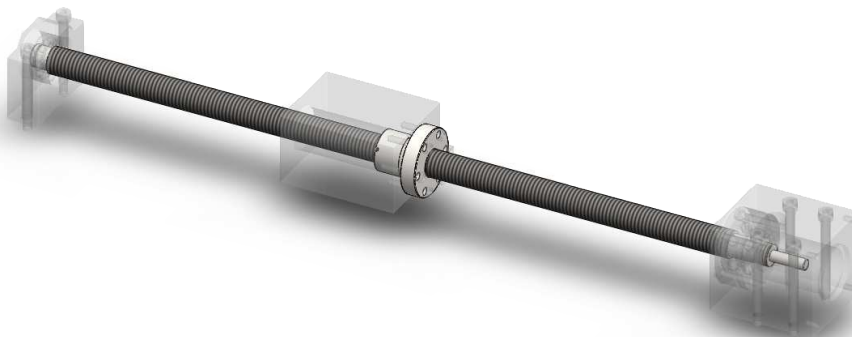


Figura 3.11 – Localização da porca de esferas na montagem do fuso

No dimensionamento de uma porca de esferas, dois dos parâmetros a ter em consideração dizem respeito à capacidade da porca suportar cargas axiais, quer em situações estáticas quer em dinâmicas.

Define-se a carga nominal estática de base C_o [15], como a carga axial correspondente a uma deformação permanente de uma esfera e da rosca em cerca de 0.1 milésimas do diâmetro da esfera, no ponto de contacto de maior tensão. Define-se também a carga dinâmica nominal de base C [15], como a carga axial que um fuso de esferas consegue teoricamente tolerar durante um milhão de rotações sem demonstrar sinais de fadiga.

Para a porca de esferas utilizada (KGF-N 2505), os valores fornecidos pelo fabricante são de 22.5 kN para a carga estática e 12.3 kN para a carga dinâmica.

O binário necessário para criar uma força no acionamento é dado pela equação 3.2 [16].

$$T = \frac{F \cdot p}{2000 \cdot \pi \cdot \eta} \quad (3.2)$$

Sendo que:

- T [Nm]: binário aplicado no veio;
- F [N]: força de avanço resultante do binário aplicado no veio;
- p [mm]: passo da rosca do fuso de esferas;
- η : rendimento do acionamento.

Conhecendo o passo do fuso de esferas ($p = 5$ mm), considerando um rendimento comum para este tipo de acionamento (90 %) e aplicando a equação 3.2, obtém-se que para exceder a carga nominal dinâmica seria necessário um binário de 10.88 Nm e de 19.89 Nm para a carga nominal estática. Visto que o binário de pico de um servomotor FXM31.40A com driver AXD 1.08 é de apenas 10.8 Nm, como verificado na secção 2.1.2.3 (p. 17), a utilização destes servomotores pode considerar-se compatível com esta porca de esferas. O facto do binário de pico se aproximar do binário que seria necessário para atingir a carga nominal dinâmica, tem um efeito mínimo no tempo de vida do acionamento, visto que à carga nominal dinâmica este seria cerca de um milhão de rotações [15] e que o binário de pico apenas é atingido esporadicamente.

3.1.3 Sistema de guiamento e suporte dos eixos de movimento

Enquanto que o acionamento da mesa é feito pelos fusos e porcas de esferas, o guiamento dos eixos e suporte de cargas, externas e peso próprio, é conseguido por guias de secção circular e rolamentos lineares.

Os rolamentos e respetivos suportes (Figura 3.12) foram identificados através da referência gravada na sua superfície (INA KBO30-PP e INA KGBO30-PP respetivamente). Os guiamentos (Figura 3.13) foram identificados pelas respetivas dimensões e pela compatibilidade com os rolamentos indicada no catálogo do fabricante (INA TSWW30) [17].

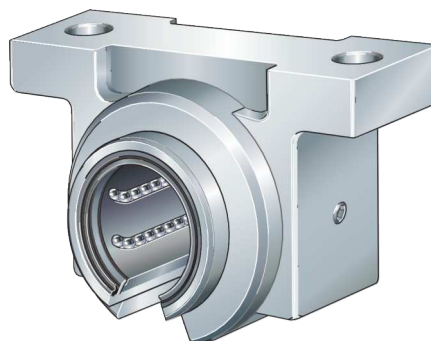


Figura 3.12 – Rolamento linear INA KBO inserido no suporte KGBO

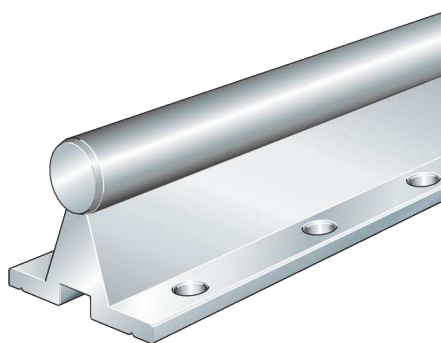


Figura 3.13 – Guia linear com perfil INA TSWW

As principais características do rolamento linear encontram-se na Tabela 3.2 [17].

Tabela 3.2 – Características do rolamento linear INA KBO30

Característica		Valor
C - Carga nominal dinâmica ¹	[kN]	3.7
C_0 - Carga nominal estática ²	[kN]	3.0
v_{max} - Velocidade máxima	[m/s]	5
a_{max} - Aceleração máxima	[m/s ²]	50
μ - Coeficiente de atrito de rolamento ³		0.001 – 0.0025

A localização destes componentes na mesa de posicionamento encontra-se representada na Figura 3.14.

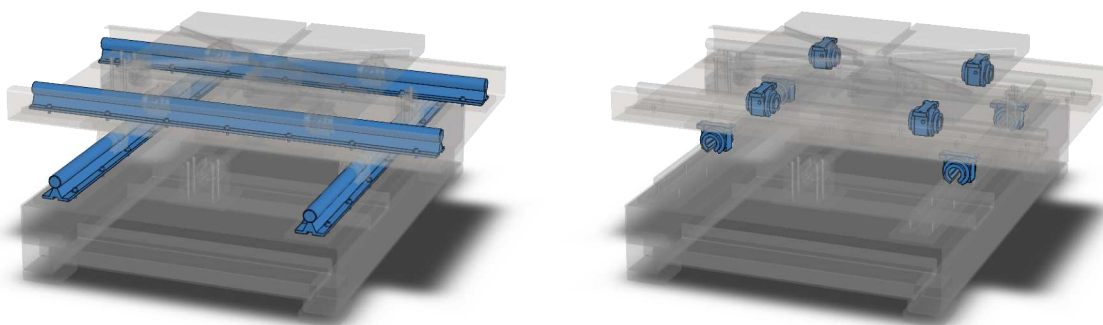


Figura 3.14 – Posição das guias e rolamentos lineares na mesa XY (a azul)

É recomendado pelo fabricante que a massa máxima suportada por um rolamento linear seja duas vezes inferior à carga nominal estática [17]. Assumindo que a carga se encontra homogeneamente distribuída pelos quatro rolamentos do eixo inferior, obtém-se então que a massa máxima suportada por esse conjunto de rolamentos é de 612 kg. Subtraindo o peso da carruagem (98 kg) e da mesa de trabalho (124 kg), obtém-se que a massa máxima que se pode colocar na mesa de trabalho é de 390 kg ⁴.

¹Carga à qual a distância percorrida no tempo de vida é de 100 km [17].

²Carga à qual se dá a deformação permanente de uma esfera do rolamento igual a 1×10^{-4} vezes o seu diâmetro [17].

³Tabelado na referência [17].

⁴Posteriormente foi montado o servomotor e elementos de acoplamento e fixação, pelo que este valor é reduzido a 383 kg.

Quanto às características dinâmicas impostas na Tabela 3.14, a velocidade máxima admissível (5 m/s) é superior à possível no acionamento da mesa (0.33 m/s) e verifica-se que para atingir uma aceleração linear de 50 m/s^2 , seria necessário um binário no servomotor de 27.0 Nm (utilizando a segunda lei de Newton e a equação 3.2). No entanto a massa utilizada neste cálculo não tem em conta a componente inercial da cadeia de transmissão, o que significa que o binário necessário para atingir esta aceleração seria superior ao aqui calculado.

3.2 Projeto da solução de acoplamento e fixação dos servomotores

Para permitir operar a mesa de posicionamento, foi concebida e implementada uma solução de acoplamento e fixação dos servomotores à mesa. Esta solução necessita compatibilizar as diferentes dimensões dos veios e flanges, bem como garantir uma distância mínima entre os servomotores e a mesa, devido às restrições de espaço quando os eixos se encontram no limite dos seus cursos respetivos. É possível evidenciar estas condições na Figura 3.15.

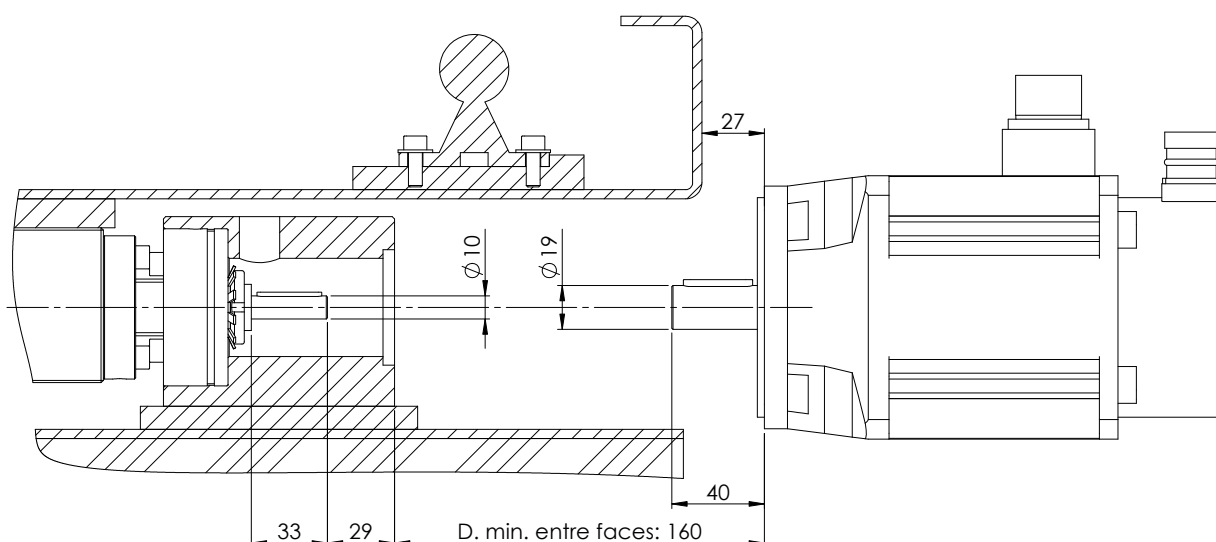


Figura 3.15 – Condições de acoplamento entre pontas de veio

Após considerar algumas alternativas, optou-se por uma solução baseada numa união de veio flexível, mas torsionalmente rígida, e numa fixação do motor através de luneta.

3.2.1 Verificação do dimensionamento da cadeia de transmissão

Atendendo a que o acoplamento do servomotor ao fuso de esferas também inclui uma ligação por chaveta e escatel, foi necessário verificar a capacidade de transmissão de binário dessa ligação. Esta verificação foi realizada não só ao corte e esmagamento da chaveta montada na ponta de veio do fuso de esferas, mas também à tensão equivalente máxima na secção crítica desse veio. As dimensões dessa chaveta e respetivo escatel, são normalizadas (DIN 6885, $3 \times 3 \times 28$, aço CK45) e estão representadas na Figura 3.16.

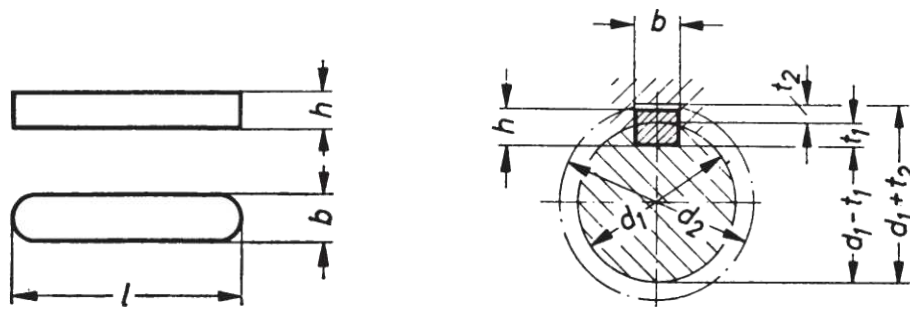


Figura 3.16 – Dimensões de uma chaveta paralela (forma A) e ecastéis segundo DIN 6885-1

O cálculo da tensão de corte τ numa chaveta, quando o veio está sujeito a um momento torsor M_t , é dado pela equação 3.3 segundo [18].

$$\tau = \frac{2 \cdot M_t}{d_1 \cdot b \cdot l} \quad (3.3)$$

É também conhecido através do critério de Von Mises, em que numa situação de corte puro a tensão normal equivalente, σ_{VM} , relaciona-se com a tensão de corte τ pela equação 3.4.

$$\sigma_{VM} = \sqrt{3} \cdot \tau \quad (3.4)$$

O coeficiente de segurança da presente solução ao corte é dado pela equação 3.5.

$$n_{corte} = \frac{\sigma_{ced}}{\sigma_{VM}} \quad (3.5)$$

Segundo este procedimento de cálculo obtêm-se os resultados listados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Dados e resultados da verificação ao corte da chaveta DIN 6885 3x3x28

Dados		Valor
M_t - Momento torsor (de pico)	[Nm]	10.8
d_1 - Diâmetro do veio	[mm]	10
b - Largura da chaveta	[mm]	3
l - Comprimento da chaveta	[mm]	28
σ_{ced} - Tensão de cedência do aço CK45 ¹	[MPa]	323.73
Resultados		Valor
τ - Tensão de corte média na chaveta	[MPa]	25.71
σ_{VM} - Tensão normal equivalente	[MPa]	44.54
n_{corte} - Coeficiente de segurança		7.27

Conclui-se com base no coeficiente de segurança, que a chaveta se encontra corretamente dimensionada ao esforço cortante, para esta aplicação.

¹Tensão de cedência retirada de [19].

O cálculo da tensão normal à compressão σ na chaveta quando ao veio é aplicado um momento torsor M_t , é dado pela equação 3.6 [18]. A tensão σ é calculada com base na área que se encontra em contacto com o escatel do cubo, visto esta ser menor do que a área em contacto com o escatel do veio.

$$\sigma = \frac{2 \cdot M_t}{d \cdot (h - t_1) \cdot l} \quad (3.6)$$

O coeficiente de segurança da presente solução ao esmagamento é dado pela equação 3.7.

$$n_{\text{esmagamento}} = \frac{\sigma_{ced}}{\sigma} \quad (3.7)$$

Os resultados destes cálculos encontram-se na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Dados e resultados da verificação ao esmagamento da chaveta DIN 6885 3x3x28

Dados	Valor
h - Altura da chaveta [mm]	3
t_1 - Profundidade do escatel do veio [mm]	1.8
Resultados	Valor
σ - Tensão normal à compressão [MPa]	64.29
$n_{\text{esmagamento}}$ - Coeficiente de segurança	5.04

Conclui-se com base no coeficiente de segurança, que a chaveta se encontra corretamente dimensionada ao esforço normal, para esta aplicação.

A secção crítica está localizada no escatel da ponta de veio do fuso, pois aí se encontra a secção de menor diâmetro (10 mm) e uma concentração de tensões devido a esse mesmo escatel. O esforço cortante nominal nesse veio é dado pela equação 3.8.

$$\tau_{nom} = \frac{16 \cdot M_t}{\pi \cdot d^3} \quad (3.8)$$

Devido ao escatel do veio, a tensão nominal é multiplicada por um fator de concentração de tensões K_t (equação 3.9).

$$\tau_{max} = K_t \cdot \tau_{nom} \quad (3.9)$$

Segundo [20], é proposta uma expressão geral para o factor de concentração de tensões num escatel de chaveta DIN 6885 tipo A (equação 3.10).

$$K_t = \left(1.4786 \frac{t_1}{d} + 0.6326\right) \times \left(\frac{r}{d}\right)^{[0.869(t_1/d)^2 - 0.4392(t_1/d) - 0.2369]}, \quad d \in [6, 38] \text{ mm} \quad (3.10)$$

Visto se tratar de uma situação de corte puro também é usada a equação 3.4 para calcular a tensão normal equivalente. O coeficiente de segurança será a razão entre a tensão de cedência do material do fuso (aço DIN Cf 53 [14]) e a tensão normal equivalente máxima. Os dados deste problema e os resultados obtidos encontram-se na tabela 3.5

Tabela 3.5 – Dados e resultados da verificação à tensão normal equivalente máxima no fuso

Dados	Valor
M_t - Momento torsor (de pico) [Nm]	10.8
d - Diâmetro do veio [mm]	10
t_1 - Profundidade do escatel do veio [mm]	1.8
r - Raio de concordância da face plana do escatel do veio [mm]	0.08
σ_{ced} - Tensão de cedência do aço Cf53 ¹ [MPa]	340
Resultados	Valor
K_t - Fator de concentração de tensões no escatel do veio	2.59
τ_{nom} - Tensão de corte nominal [MPa]	55.00
τ_{max} - Tensão de corte máxima [MPa]	142.25
σ_{VMnom} - Tensão normal equivalente nominal [MPa]	95.27
σ_{VMmax} - Tensão normal equivalente máxima [MPa]	246.39
n - Coeficiente de segurança	1.38

O coeficiente de segurança calculado, enquanto que relativamente inferior ao desejável (entre 1.5 a 2), permite afirmar que nesta aplicação não é atingida a tensão de cedência, pelo que o material do escatel do fuso não deformará plasticamente. O coeficiente de segurança é inversamente proporcional ao momento torsor aplicado, e como tal caso seja pretendido, é possível aumentar o coeficiente de segurança ao limitar no *driver* o binário máximo do servomotor.

3.2.2 Projeto do acoplamento entre veios

A solução de acoplamento a escolher tem que garantir a transmissão de binário sem folga (*backlash*), possuir uma elevada rigidez torsional e ser capaz de absorver desalinhamentos inerentes à construção e montagem dos componentes. Para isso foi considerada uma solução com base num acoplamento flexível. De entre os diversos tipos de acoplamentos flexíveis, o estudo foi focado sobre quatro tipos especializados para o acionamento de eixos de movimento (Figura 3.17), dispondo todos de folga nula (*backlash*).

**Figura 3.17** – Acoplamentos flexíveis para acionamento de eixos (elastómero, ranhura helicoidal, disco e fole respetivamente)²

¹Tensão de cedência retirada de [21]. Válido para varões de aço $16 \leq d \leq 100$ mm laminados a quente.

²Fonte: *ruland.com*, acedido em maio de 2015.

Acoplamento de elastômero (mandíbula ou aranha) – Consiste num acoplamento no qual em cada ponta de veio é montada uma peça metálica (normalmente por intermédio de uma abraçadeira ou chaveta fixa por perno roscado) denominada de cubo. Cada cubo dispõe de dentes e entre esses é montado um inserto, habitualmente de poliuretano, comum aos dois cubos que permite a transmissão de potência. Este tipo de acoplamento é comum em situações de funcionamento contínuo, como bombas ou ventiladores, devido às suas propriedades de absorção de vibrações, mas existem versões especializadas para eixos de acionamento que garantem *backlash* nulo.

Acoplamento de rasgo helicoidal – Consiste num acoplamento maquinado a partir de um único bloco de material. No corpo deste encontram-se um ou mais rasgos helicoidais que permitem ao acoplamento deformar angular, lateral e axialmente de forma a acomodar desalinhamentos entre os dois veios a acoplar entre si.

Acoplamento de disco – Este tipo de acoplamento é de construção semelhante ao acoplamento de elastômero, com exceção na forma em que a transmissão de potência é realizada de um cubo para o outro. Neste caso, em vez de existirem dentes em cada cubo e um inserto de plástico entre esses dentes, existem um ou mais discos metálicos aparafusados aos cubos. Possuem uma rigidez à torção superior aos dois tipos de acoplamento anteriores e mantêm a capacidade de acomodar desalinhamentos, podendo essa ser expandida através da montagem de mais discos em série.

Acoplamento de fole – Consiste num acoplamento de uma peça única, dependendo do método de fixação do cubo ao veio, em que a ligação entre cubos é realizada através de um fole metálico. Este deforma-se permitindo acomodar desalinhamentos axiais, laterais e angulares. Devido à natureza de construção do fole, este tipo de acoplamento possui também um baixo momento de inércia em relação aos outros tipos.

À partida todos estes diferentes tipos de acoplamentos flexíveis são capazes de satisfazer as necessidades de acoplamento flexível do servomotor FXM31 ao veio do fuso de esferas em termos de binário nominal e velocidade angular máxima, mas devido a uma superior rigidez à torção e inferior momento de inércia, foi decidido adotar um solução baseada em acoplamentos de fole.

Visto que há a necessidade de cumprir uma distância mínima entre veios, foi inicialmente considerado um tipo de acoplamento de fole que já inclui uma extensão feita à medida (Figura 3.18), mas devido a restrições de espaço dentro do apoio do fuso de esferas e falta de acesso para apertar os parafusos do acoplamento, essa opção acabou por se revelar inviável.



Figura 3.18 – Eixo R+W ZAE¹

Como alternativa, optou-se por uma união de veios através de um acoplamento simples de fole e por uma extensão através de uma peça concebida especificamente para esse efeito. O acoplamento escolhido é o modelo BKL15 (Figura 3.19) da marca R+W, um fabricante alemão especializado em acoplamentos. Dispõe de cubos em alumínio com fole em aço inoxidável. A sua fixação ao veio é conseguida por aperto de uma abraçadeira e consequente fricção com a face cilíndrica do veio. Algumas características deste acoplamento encontram-se listadas na Tabela 3.6 e a sua totalidade no Anexo D.3.



Figura 3.19 – Acoplamentos de fole R+W BKL 15

Tabela 3.6 – Principais características do acoplamento de fole R+W BKL15

Característica		Valor
Binário nominal	[Nm]	15
Massa	[kg]	0.16
Momento de inércia	[kg.cm²]	0.65
Rigidez à torção	[Nm/rad]	23000
Máximo desalinhamento axial	± [mm]	1
Máximo desalinhamento lateral	± [mm]	0.2
Máximo desalinhamento angular	± [°]	1

¹Fonte: *rw-couplings.com*, acedido em maio de 2015.

O veio para realizar a interface entre acoplamento e ponta de veio do fuso de esferas, foi projetado com ligação por atrito com ajuste ligeiramente preso (H7/j6) e ligação ao fuso de esferas por chaveta (DIN 6885 3x3x28), dado que o escatel para essa chaveta já existe na ponta de veio do fuso. Esta peça encontra-se representada juntamente com o acoplamento flexível na Figura 3.20 e o seu desenho de definição no Anexo E.1.

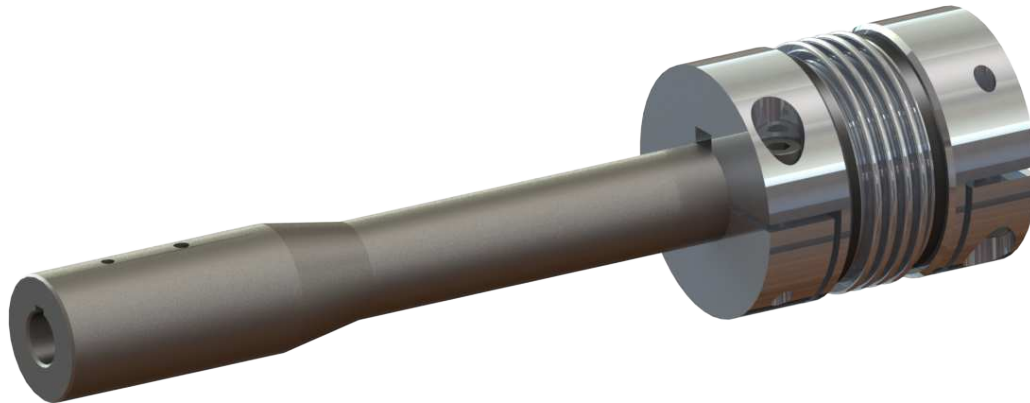


Figura 3.20 – Acoplamento BKL com extensão de veio montada

3.2.3 Projeto mecânico do suporte e fixação do motor

Tendo sido projetada uma solução capaz de transmitir a potência do motor para o fuso de esferas, restava um meio para fixar o motor e ao mesmo tempo alojar o acoplamento e o veio de extensão. Dado que tanto o apoio motriz do fuso como o motor dispõem de flanges, a solução necessita de ser compatível com essas flanges de forma a permitir uma correta montagem. Para acomodar o veio, a solução necessita também de uma ligação oca entre as flanges. Um meio de montagem com estas características é normalmente designado de luneta.

A flange do motor (Anexo D.4) segue a norma IEC 60072-1:1991 e designa-se por flange FF 115. Esta referência denota uma flange com furos de fixação lisos e passantes e uma circunferência com 115 mm de diâmetro coincidente com o centro de cada um dos furos de montagem [22]. A face do apoio do fuso de esferas (Anexo D.4) pelo contrário, não se encontra de acordo com esta norma nem foi possível averiguar qual a norma seguida na sua construção. Este facto levou a que fosse procurada uma solução a ser fabricada em detrimento de uma solução *standard* disponível comercialmente.

A luneta foi projetada para ser maquinada a partir de um bloco de material, por ser uma opção mais expedita e permitir obter uma peça mais robusta e com tolerâncias mais rigorosas do que uma alternativa de construção soldada. O projeto da luneta foi feito de acordo com as seguintes especificações:

- Comprimento suficiente para garantir a inexistência de risco de colisão quando a mesa se encontra no seu curso máximo ($L = 160$ mm) de acordo com a Figura 3.15.
- Flanges de montagem compatíveis com os equipamentos existentes.
- Diâmetro interior capaz de acomodar a solução de acoplamento.
- Possibilidade de acesso aos parafusos de fixação do acoplamento.

Após algumas iterações no processo de desenho da peça, obteve-se o modelo CAD apresentado na Figura 3.21.

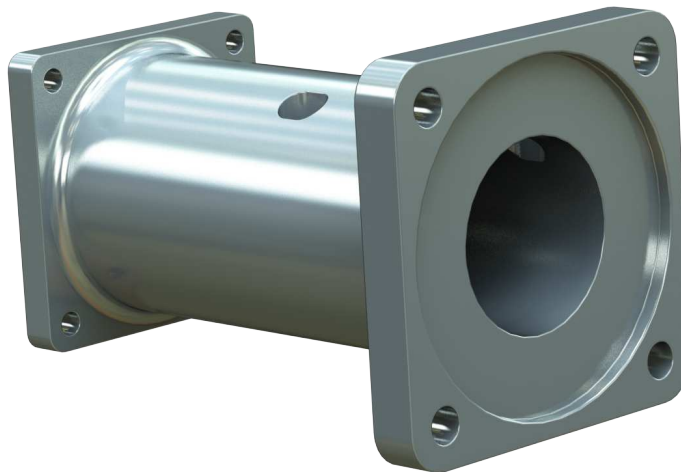


Figura 3.21 – Modelo CAD da luneta

Tendo sido modelada uma peça que cumpria todas as especificações de desenho estabelecidas, restava escolher o material do qual esta peça seria feita. Para isso, foi realizada uma verificação das tensões e flechas máximas, através de uma simulação estática em *SolidWorks*, utilizando o método dos elementos finitos. Nesta simulação é utilizada uma malha triangular adaptativa baseada em curvaturas. Esta permite obter uma maior resolução de valores nos locais da peça mais críticos, como raios de concordância ou rasgos, através da variação da dimensão dos elementos triangulares.

A malha utilizada na simulação encontra-se visível na Figura 3.22 e os parâmetros utilizados na sua criação na tabela 3.7.

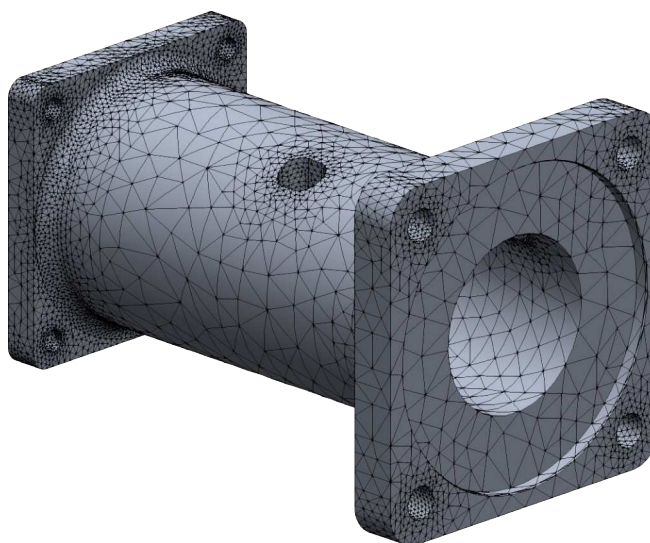


Figura 3.22 – Malha da luneta utilizada na simulação estática em *SolidWorks*

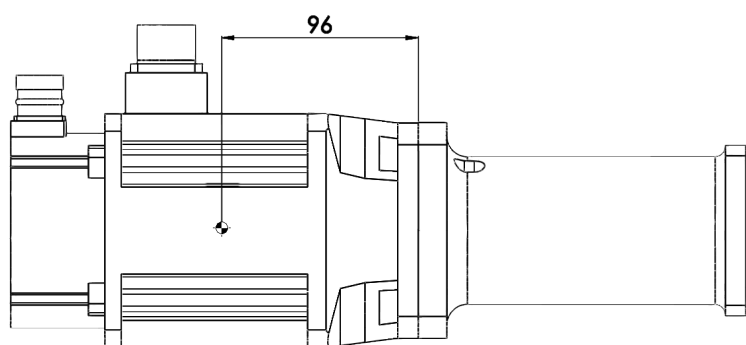
Tabela 3.7 – Parâmetros utilizados na criação da malha da luneta

Parâmetro	Valor
Dimensão máxima de um elemento [mm]	15
Dimensão mínima de um elemento [mm]	0.5
Número mínimo de elementos numa circunferência	20
Fator de crescimento dos elementos	1.5

Tendo sido definida a malha da peça sobre a qual efetuar a simulação, foram definidas as cargas e o modo de fixação da peça. Visto ser necessário definir um material para executar a simulação, esta torna-se num processo iterativo, sendo necessário alterar o material utilizado. Foram considerados o aço ao carbono Ck45 [13], e as ligas de alumínio AW5083-H111 e AW7075-T651 [23].

Foi considerada uma carga de 5.5 kg, correspondente ao peso de um servomotor FXM31, aplicada no centro de massa aproximado do mesmo, como visível na Figura 3.23. Para efeitos de simulação foi utilizada uma carga equivalente a essa, aplicada na face da luneta. Essa corresponde a uma massa de 5.5 kg e a um binário de 5.2 Nm. Foi também considerado o peso próprio da luneta.

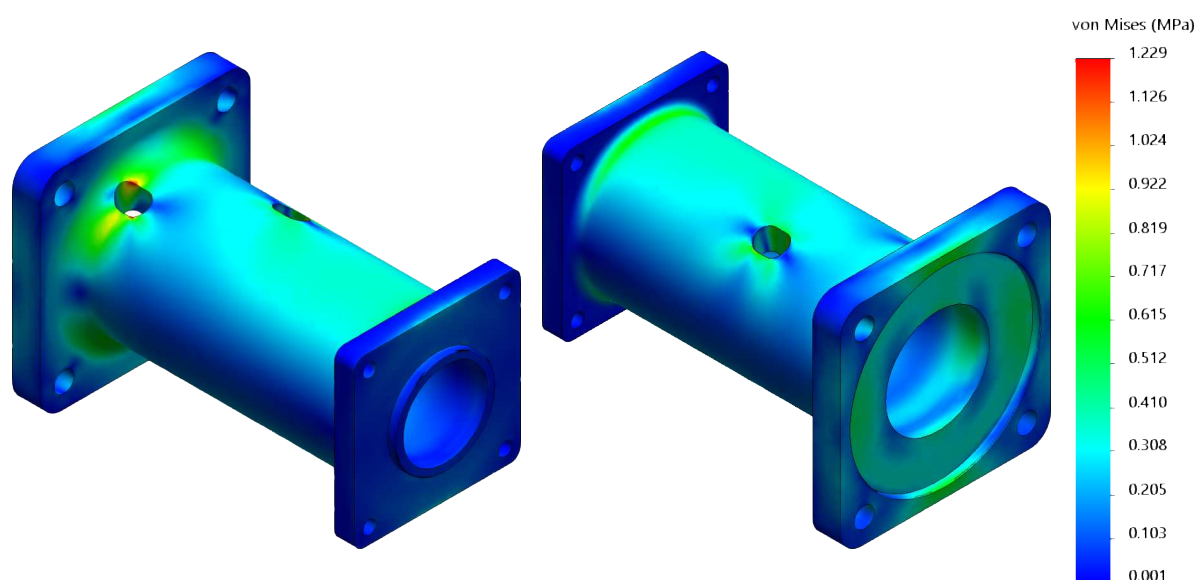
No que diz respeito à fixação, a face da luneta em contacto com o apoio do fuso de esferas foi definida como geometria fixa no espaço.

**Figura 3.23** – Distância do centro de massa do motor à face da luneta

Os dados de cada material e os resultados obtidos na simulação encontram-se representados na Tabela 3.8 e a distribuição de tensões na peça para o alumínio AW7075-T651 na Figura 3.24. É possível observar que a tensão equivalente máxima atingida está localizada no rasgo mais próximo da flange do motor devido à concentração de tensões que aí ocorre. Esta toma um valor de 1.25 MPa, um valor desprezável quando comparado à tensão de cedência do próprio material.

Tabela 3.8 – Comparação entre possíveis materiais para o fabrico da luneta

Material		DIN Ck45 (1.1191) ¹	AW5083-H111 ²	AW7075-T651 ²
Tensão de cedência	[MPa]	≥ 324	153	455
Tensão de rotura	[MPa]	≥ 579	293	525
Módulo de elasticidade	[GPa]	220	71	72
Densidade	[kg/m ³]	7850	2730	2830
Preço	[€/kg]	1.80	3.80	6.00
Preço aproximado ³	[€]	75.71	55.58	90.98
Resultados da simulação		DIN Ck45 (1.1191)	AW5083-H111	AW7075-T651
Tensão equivalente máxima	[MPa]	1.28	1.25	1.25
Flecha total máxima	[μm]	1.1	3.1	3.1


Figura 3.24 – Distribuição de tensões na luneta em AW7075-T651

Sabendo que a tensão de cedência do material a escolher não seria o fator limitador, este foi escolhido com base no seu custo e maquinabilidade. Optou-se pela liga de alumínio AW7075-T651. Esta escolha é justificada pelo facto de uma peça em aço Ck45 ser aproximadamente três vezes mais pesada e também ao associar o custo de corte do varão de aço (cerca de 20 €) ao custo dos blocos, o preço final é semelhante. Relativamente ao alumínio AW5083-H111, dispõe de uma densidade semelhante ao AW7075-T651, mas apresenta uma maquinabilidade inferior.

¹Dados da tensão de cedência e rotura retirados de [19], módulo de elasticidade e densidade retirados de [13].

²Dados retirados de [23].

³Preço para blocos de dimensões 110×110×180 mm com IVA incluído.

Os blocos de material foram posteriormente maquinados nas oficinas da FEUP de acordo com o desenho do Anexo E.2, obtendo-se as peças finalizadas que se encontram na Figura 3.25.



Figura 3.25 – Lunetas finalizadas

Ficam assim reunidas todas as condições para integrar os servomotores FXM31 nos eixos de acionamento da mesa de posicionamento XY. A solução final é representada na Figura 3.26.

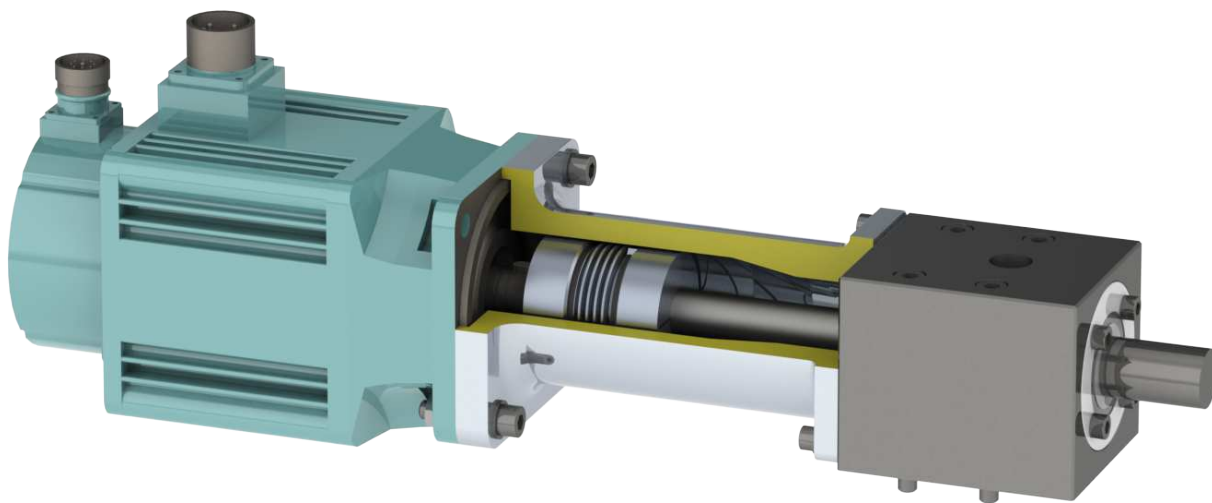


Figura 3.26 – Luneta em corte e cadeia de transmissão

3.3 Síntese de características dos equipamentos

Nesta secção são apresentadas algumas tabelas que sintetizam as características dos equipamentos apresentados nas secções anteriores. Na Tabela 3.9 são apresentadas as características globais da mesa de posicionamento de dois eixos, na Tabela 3.10 as características do fuso e porca de esferas, e finalmente as características das guias e rolamentos lineares na Tabela 3.11.

Tabela 3.9 – Características globais da mesa de posicionamento

Característica	Valor
Área da superfície de trabalho [mm]	600 × 600
Velocidade máxima linear (para $n = 4500$ rpm) [m/s]	0.375
Atravancamento da mesa [m]	1.34 × 1.34 × 0.43
Massa da base (sem/com motor, luneta e acoplamento) [kg]	336 / 344
Massa da carruagem (sem/com motor, luneta e acoplamento) [kg]	98 / 105
Massa da mesa de trabalho [kg]	124
Massa total (sem/com motores, lunetas e acoplamentos) [kg]	557 / 573
Massa máxima que pode ser colocada na mesa [kg]	383

Tabela 3.10 – Características do fuso e porca de esferas

Característica	Valor
Passo [mm]	5
Diâmetro nominal (d_0) [mm]	25
Diâmetro máximo (d_1) [mm]	24.5
Diâmetro mínimo (d_2) [mm]	21.9
Curso útil [mm]	511
Velocidade de rotação máxima [rpm]	4500
Carga nominal dinâmica [kN]	12.3
Carga nominal estática [kN]	22.5

Tabela 3.11 – Características das guias e rolamentos lineares

Característica	Valor
Velocidade máxima [m/s]	5
Aceleração máxima [m/s ²]	50
Carga nominal dinâmica por rolamento [kN]	3.7
Carga nominal estática por rolamento [kN]	3.0
Coeficiente de atrito de rolamento dos rolamentos KBO	0.001 – 0.0025

Capítulo 4

Configuração e teste do sistema completo

Tendo sido caracterizados os componentes principais do CNC modular e da mesa de posicionamento, e concluída a montagem dos elementos de acoplamento e fixação dos servomotores para cada eixo, apresenta-se neste capítulo, em duas secções, a integração do CNC no comando da mesa de posicionamento (Figura 4.1) e a execução de programas de comando numérico de forma a comprovar o correto funcionamento da mesa.

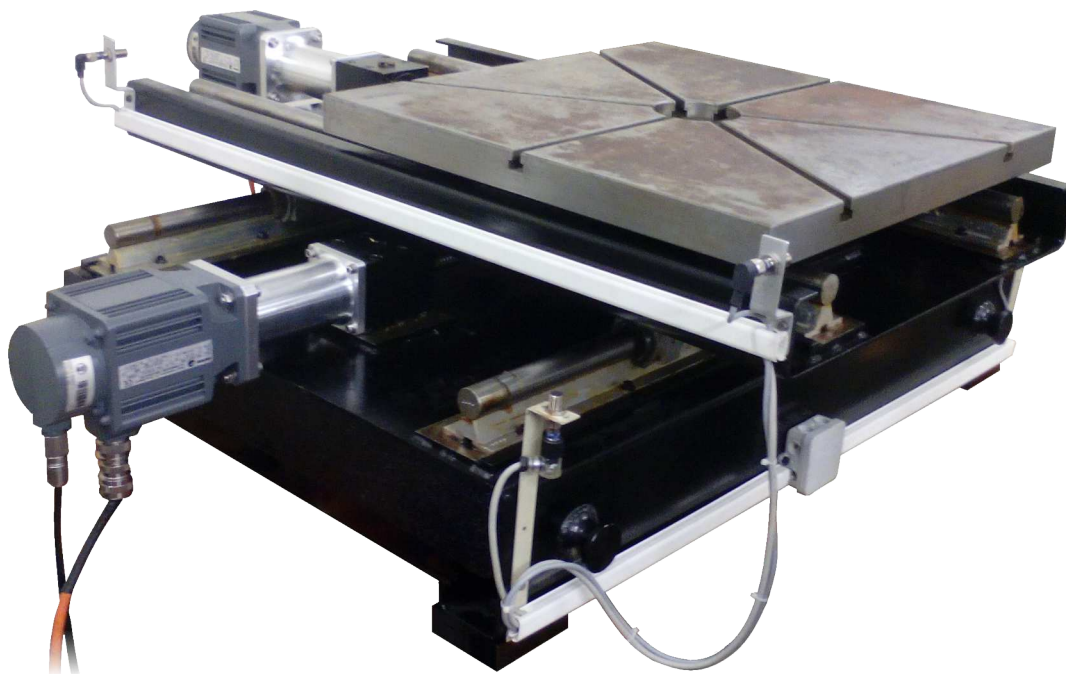


Figura 4.1 – Mesa de posicionamento com servomotores e fins de curso

4.1 Integração do CNC na mesa de posicionamento

Nesta secção é apresentada a limitação dos cursos da mesa através de sensores de proximidade indutivos e dos limites configurados, a configuração final do CNC juntamente com os procedimentos de cálculo e um modelo do sistema simplificado justificativos dessa configuração, bem como a programação final do PLC da máquina.

Esta integração revelou-se um processo iterativo, pelo que a ordem em que as subsecções são apresentadas não reflete a ordem pela qual os seus procedimentos respetivos foram executados.

4.1.1 Cálculo de parâmetros do sistema

São apresentados alguns procedimentos de cálculo que foram necessários realizar de forma a caracterizar a operação do sistema e a configurar determinados parâmetros do CNC, nomeadamente o cálculo da massa máxima que pode ser colocada na mesa de trabalho, o cálculo do tempo de aceleração do eixo com maior carga de forma a configurar o respetivo parâmetro e o cálculo da desaceleração a utilizar na travagem de emergência.

Cálculo da massa máxima a colocar na mesa

Como foi apresentado na secção 3.1.3 (p. 36), a massa máxima que pode ser colocada na mesa de posicionamento (383 kg) encontra-se relacionada com a carga estática nominal dos rolamentos lineares. No entanto, existe outra restrição que a pode limitar derivada da situação dinâmica inerente à aceleração da massa.

É especificado pelo fabricante dos servomotores que o momento de inércia da cadeia de transmissão e massa transportada referido ao eixo do motor (J_{Carga}) não deve ser superior ao momento de inércia do próprio motor (J_{Motor}) além de um fator K (equação 4.1) [11]. É também indicado que idealmente este fator é igual a 1, mas que num eixo de posicionamento K toma valores típicos entre 1 e 3.

$$J_{Motor} \geq \frac{J_{Carga}}{K} \quad (4.1)$$

Desta equação deduz-se que irá haver um valor mínimo de K quando a mesa não transporta qualquer massa e um valor máximo para quando a massa transportada é igual à carga máxima estática (383 kg). Será efetuado o cálculo destes dois valores de forma a concluir se o fator de carga K se encontra nos limites recomendados (1 a 3).

O momento de inércia do motor é dado pela equação 4.2 e o da cadeia de transmissão e massa transportada referido ao eixo do motor pela equação 4.3.

$$J_{Motor} = J_{Rotor} + J_{Travão} \quad (4.2)$$

$$J_{Carga} = J_{Fuso} + J_{Acoplamento} + J_{VeioExtensão} + J_{Mesa} \quad (4.3)$$

Na equação 4.3, o momento de inércia da mesa é dado pela equação 4.4.

$$J_{Mesa} = \frac{M_{Mesa} + M_{Transportada}}{\eta} \left(\frac{p}{2\pi} \right)^2 \quad (4.4)$$

Em que:

- M_{Mesa} : massa própria do eixo de movimento, neste caso da carruagem e mesa de trabalho [kg]
- $M_{Transportada}$: massa colocada na mesa de trabalho [kg]
- p : passo da rosca do fuso de esferas [mm]
- η : rendimento mecânico do eixo ¹

O fator de carga mínimo será obtido quando M_{Mesa} é máxima e $M_{Transportada}$ é nula. Esta situação corresponde ao acionamento do eixo inferior em vazio (sem carga na mesa de trabalho). Neste caso M_{Mesa} será igual à soma da massa da mesa de trabalho (124 kg) e da carruagem (105 kg), ou seja, 229 kg.

O fator de carga máximo será obtido quando ambas M_{Mesa} e $M_{Transportada}$ são máximas. Neste caso o valor da $M_{Transportada}$ é igual ao valor obtido na secção 3.1.3 (p. 36), ou seja, 383 kg.

Para realizar o cálculo do fator de carga máximo e mínimo, resta conhecer o momento de inércia dos outros componentes da cadeia de transmissão. Estes momentos de inércia juntamente com os resultados deste procedimento de cálculo encontram-se na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Momentos de inércia da cadeia de transmissão e resultados do procedimento de cálculo

Dados	Valor
$J_{Motor} = J_{Rotor}$ ² [kg.cm ²]	3.50
J_{Fuso} ³ [kg.cm ²]	1.88
$J_{Acoplamento}$ ⁴ [kg.cm ²]	0.65
$J_{VeioExtensão}$ ³ [kg.cm ²]	0.28
Resultados	Valor
J_{Mesa} ($M_{Transportada} = 0$ kg) [kg.cm ²]	1.61
J_{Mesa} ($M_{Transportada} = 383$ kg) [kg.cm ²]	4.31
J_{Carga} ($M_{Transportada} = 0$ kg) [kg.cm ²]	4.42
J_{Carga} ($M_{Transportada} = 383$ kg) [kg.cm ²]	7.12
K_{Min}	1.26
K_{Max}	2.03

A condicionante adicional à massa máxima que se pode colocar na mesa não se verifica, visto que o fator de carga máximo calculado se encontra dentro do intervalo de valores recomendados. Conclui-se então que o valor final a considerar da massa máxima que pode ser colocada na mesa, caso esta se encontre uniformemente distribuída, é de 383 kg.

¹É considerado um rendimento mecânico comum em fusos de esferas, cerca de 90%.

²Motor sem travão eletromecânico (Tabela 2.3, p. 18).

³Obtido a partir das ferramentas de avaliação de peça do *SolidWorks*.

⁴Tabelado no Anexo D.3.

Cálculo do tempo de aceleração

Define-se o tempo de aceleração como o intervalo de tempo que o eixo demora a acelerar do repouso até à sua velocidade máxima configurada. Este tempo é mínimo quando o servomotor impõe o seu binário de pico T_{Pico} (10.8 Nm no máximo durante 0.5 s). O binário útil de aceleração $T_{Aceleração}$, será igual a esse binário de pico menos o somatório dos binários resistentes, que no presente caso resultam dos diferentes atritos (equação 4.5, desprezando os atritos dos rolamentos de apoio) e ainda, caso existisse, a força de corte.

$$T_{Aceleração} = T_{Pico} - (T_{A.Guias} + T_{A.Porca}) \quad (4.5)$$

Em que:

- $T_{A.Guias}$: binário de atrito resultante do atrito de rolamento nas guias [Nm]
- $T_{A.Porca}$: binário de atrito na porca de esferas resultante da pré-carga [Nm]

O binário máximo de atrito resultante do atrito de rolamento nas guias pode simplesmente ser calculado através da equação 4.6 [11].

$$T_{A.Guias} = m \cdot g \cdot \mu \cdot \frac{p}{2\pi} \quad (4.6)$$

Em que:

- m : massa máxima suportada pelos rolamentos lineares [kg]
- g : aceleração da gravidade [m/s^2]
- μ : coeficiente de atrito de rolamento dos rolamentos lineares INA KBO30
- p : passo do fuso de esferas [m]

Conhecida a massa m (igual a 612 kg, calculada na secção 3.1.3, p. 37), a aceleração da gravidade ($9.81 m/s^2$), o coeficiente de atrito μ (igual a 0.0025 da Tabela 3.2, p. 37) e o passo do fuso de esferas (5 mm), calcula-se um binário resistente devido ao atrito nas guias lineares de 0.01 Nm.

O binário máximo de atrito na porca de esferas resultante da pré-carga é calculado através da equação 4.7 [24].

$$T_{A.Porca} = F_{PréCarga} \cdot \frac{p}{2\pi} \cdot \frac{0.05}{\sqrt{\tan \beta}} \quad (4.7)$$

Em que:

- $F_{PréCarga}$: força da pré-carga na porca de esferas [N]
- β : ângulo em graus da hélice do fuso, calculado através da equação 4.8 [18]

$$\beta = \arctan \left(\frac{p}{\pi \cdot d_0} \right) \quad (4.8)$$

O diâmetro nominal do fuso (d_0) é de 25 mm (Anexo D.1), pelo que através da equação 4.8 calcula-se um ângulo da hélice do fuso de 3.64° .

A aplicação de uma força de pré-carga permite eliminar a folga (*backlash*) na porca de esferas, mas traz como desvantagem um desgaste mais rápido do fuso e uma necessidade de maior binário no acionamento para contrariar o binário resistente criado por esta força. Os métodos mais comuns para a obtenção de uma pré-carga envolvem o sobre-dimensionamento das esferas, a utilização de duas porcas de esferas com um extensionador entre ambas ou a maquinagem de precisão da porca de forma a forçar as esferas contra o seu caminho.

Visto não ser conhecida a força de pré-carga aplicada nos fusos de esferas da mesa de posicionamento, foi considerado um valor típico em porcas de esferas numa situação como a atual em que existe uma porca de esferas única. Nesta situação, o fabricante do fuso e da porca especifica uma força de pré-carga de cerca de 2 % da carga nominal dinâmica da porca de esferas (12.3 kN) [14], ou seja 246 N.

Considerando então estes valores, estima-se através da equação 4.7 um binário de atrito na porca de esferas devido à pré-carga de 0.04 Nm.

Finalmente, a partir da equação 4.5 calcula-se um binário de aceleração de 10.75 Nm. Conhecido o binário útil de aceleração e o momento de inércia da cadeia de transmissão referido ao eixo do motor, pela segunda lei de Newton aplicada à rotação (equação 4.9), é possível obter o tempo de aceleração (equação 4.10) [11].

$$T_{acel} = J_{total} \cdot \alpha \Leftrightarrow T_{acel} = J_{total} \cdot \frac{\Delta\omega}{t_{acel}} \Leftrightarrow T_{acel} = J_{total} \cdot \frac{n_{nom}}{t_{acel}} \cdot \frac{2\pi}{60} \quad (4.9)$$

$$t_{acel} = J_{total} \cdot \frac{n_{nom}}{T_{acel}} \cdot \frac{2\pi}{60} \quad (4.10)$$

Considera-se que o momento de inércia total J_{total} , é dado pela expressão 4.11.

$$J_{total} = J_{motor} + J_{carga} \quad (4.11)$$

Como apresentado na Tabela 4.1 (p. 53), o momento de inércia máximo da carga é igual 7.12 kg.cm^2 e o momento de inércia do motor igual a 3.5 kg.cm^2 , pelo que o momento de inércia total será de 10.62 kg.cm^2 . Considerando este momento de inércia na equação 4.10, é possível traçar o gráfico da Figura 4.2.

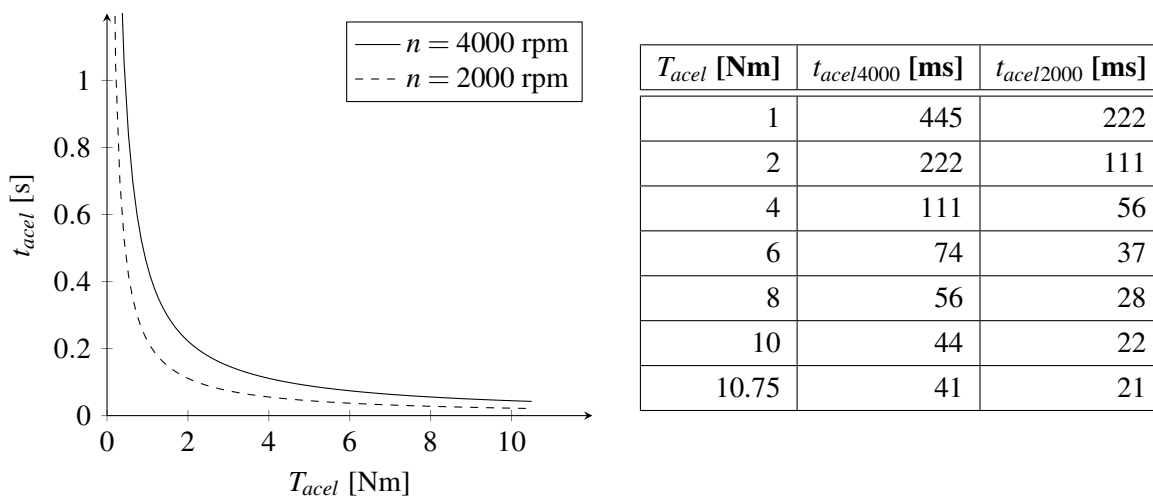


Figura 4.2 – Tempo de aceleração em função do binário de aceleração

Escolheu-se limitar a velocidade de rotação dos servomotores em 2000 rpm (velocidade linear de 10 m/min), pois apesar da velocidade máxima do servomotor ser suportada pelo fuso, é preferível por uma questão de segurança e de minimização do desgaste dos componentes que esta não seja tão elevada.

Considerando 2000 rpm como a velocidade máxima atingida, para o binário de aceleração máximo disponível (10.8 Nm) seria possível dispor de um tempo de aceleração mínimo de 21 ms. Optou-se no entanto por estabelecer um tempo de aceleração superior que permite dispor de um movimento de aceleração mais suave. Para tal este valor foi variado experimentalmente, tendo sido configurado em 500 ms (parâmetro ACCTIME (P18) das tabelas de parâmetros dos eixos). Este valor resulta numa aceleração linear de 0.33 m/s^2 . Visto que este parâmetro especifica tanto o tempo de aceleração como de desaceleração, é obtido o perfil de velocidade trapezoidal ilustrado na Figura 4.3.

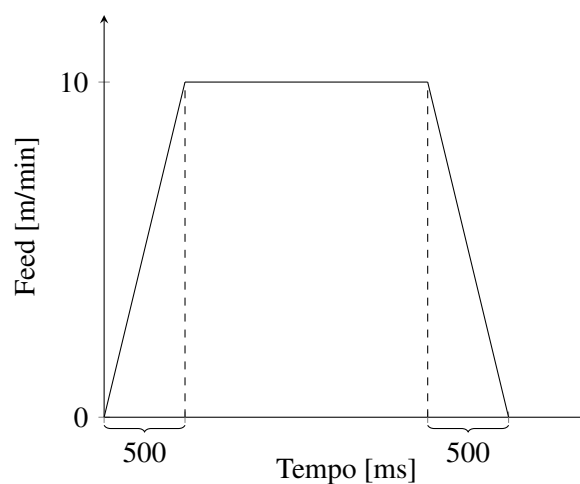


Figura 4.3 – Perfil de velocidade implementado

Cálculo da desaceleração máxima na travagem de emergência

Foi previamente referido na secção 2.1.2.1 (p. 15), que é possível configurar a rampa de velocidade utilizada pelo *driver* na travagem de emergência. A configuração desta é realizada através da especificação da desaceleração angular máxima α_{max} (parâmetro SP65 dos *drivers*). Este valor foi calculado através da equação 4.12, utilizando um tempo de desaceleração recomendado de 100 ms [11].

$$\alpha_{max} = \frac{\Delta\omega}{t_{desacel}} = \frac{n_{max}}{t_{desacel}} \cdot \frac{2\pi}{60} \quad (4.12)$$

Obtém-se assim uma desaceleração angular máxima de 2 094 rad/s² (ou seja, uma desaceleração linear de 1.67 m/s²). Este valor é utilizado na configuração dos *drivers* apresentada posteriormente.

4.1.2 Modelação simplificada de um eixo de acionamento

De acordo com o manual do CNC [3], parâmetros como o ganho *feed-forward*¹ e o ganho derivativo (parâmetros FFGAIN e DERGAIN respetivamente), ambos do controlador PD de posição do CNC, são normalmente configurados por métodos empíricos, nomeadamente pelo ajuste experimental até que a resposta do sistema seja igual à desejável.

A resposta desejável encontra-se relacionada com o tipo de aplicação pretendida. Caso se pretenda efetuar o controlo de posição ponto a ponto no plano XY (antes de haver movimento no eixo Z), como é o caso numa furadora ou puncionadora, uma sobre-elongação na resposta em posição é aceitável visto que normalmente essa situação se encontra relacionada com menor um tempo de resposta. No entanto caso se pretenda controlar a trajetória (contornamento), como seria o caso numa fresadora, a existência de uma sobre-elongação na resposta em posição do sistema não é aceitável, visto que isso corresponderia a uma remoção de material em excesso. No entanto uma sobre-elongação na resposta em velocidade não corresponde necessariamente a uma sobre-elongação na resposta em posição, pelo que existe um nível aceitável para esta característica na resposta em velocidade, justificando o ajuste empírico.

A resposta do sistema em velocidade pode ser observada através do osciloscópio virtual da aplicação WinDDSSetup. No entanto o mesmo programa não permite visualizar a resposta em posição dos eixos do sistema, visto a malha de posição ser fechada na UC e como tal os *drivers* desconhecem as coordenadas de posicionamento. Seria possível visualizar ambas as respostas no osciloscópio virtual da UC, mas infelizmente esta funcionalidade apenas se encontra disponível em versões mais atuais do modelo 8055M. A realização de um modelo do sistema, mesmo que simplificado, permite no entanto visualizar ambas as respostas sem limitações e desta forma estimar valores para os ganhos previamente referidos sem que adicionalmente se coloque o problema de esforços desnecessários nos componentes. Partiu-se então para a realização de um modelo simplificado de um eixo do sistema em controlo de velocidade, situação equiparável ao funcionamento em *jogging* contínuo manual.

Na Figura 4.4 encontra-se novamente esquematizado num diagrama de blocos o funcionamento de um eixo de acionamento deste sistema [11].

¹Ganho que impõe uma ação de controlo diretamente proporcional à referência, normalmente em percentagem.

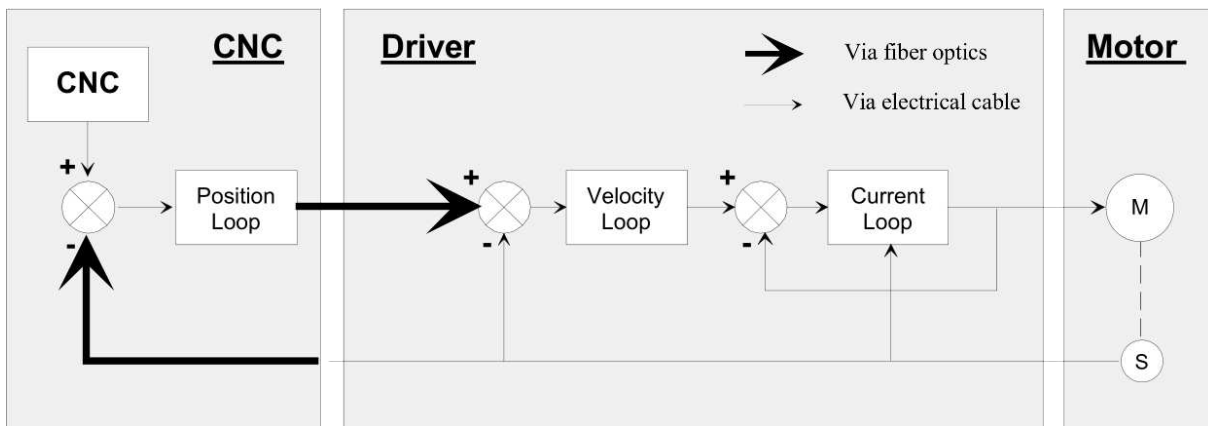


Figura 4.4 – Diagrama de blocos de um eixo de acionamento do sistema com o *driver* em controle de velocidade, adaptado de [11]

Foi modelada a malha de controle de posição implementado no controlador do CNC tendo em conta o funcionamento descrito no manual do CNC [3], mas as dinâmicas do *driver*, servomotor e mesa foram simplificadas através da utilização de uma função de transferência em malha aberta de um sistema de segunda ordem com resposta semelhante à resposta do sistema atual. O diagrama de blocos representativo do sistema modelado encontra-se ilustrado na Figura 4.5.

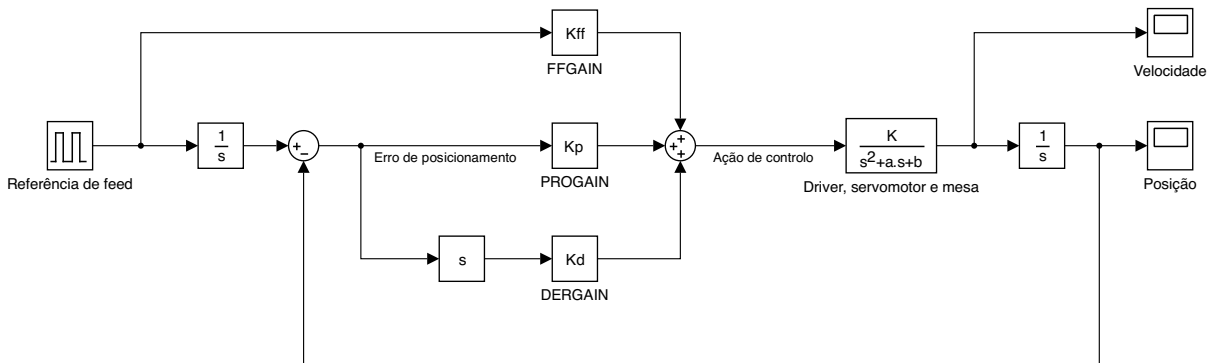


Figura 4.5 – Diagrama de blocos ilustrativo do funcionamento do sistema nas condições especificadas

A resposta em velocidade do sistema atual foi obtida experimentalmente utilizando a funcionalidade de osciloscópio da aplicação WinDDSSetup e impondo uma referência de velocidade em degrau de 1000 rpm através do gerador interno de referências da mesma aplicação. A referência imposta e a consequente resposta em velocidade obtida do eixo Y encontram-se representadas na Figura 4.6. Este teste foi no entanto realizado sem qualquer massa colocada no topo da mesa de trabalho, ou seja em vazio, pelo que os resultados obtidos apenas são válidos nesta situação.

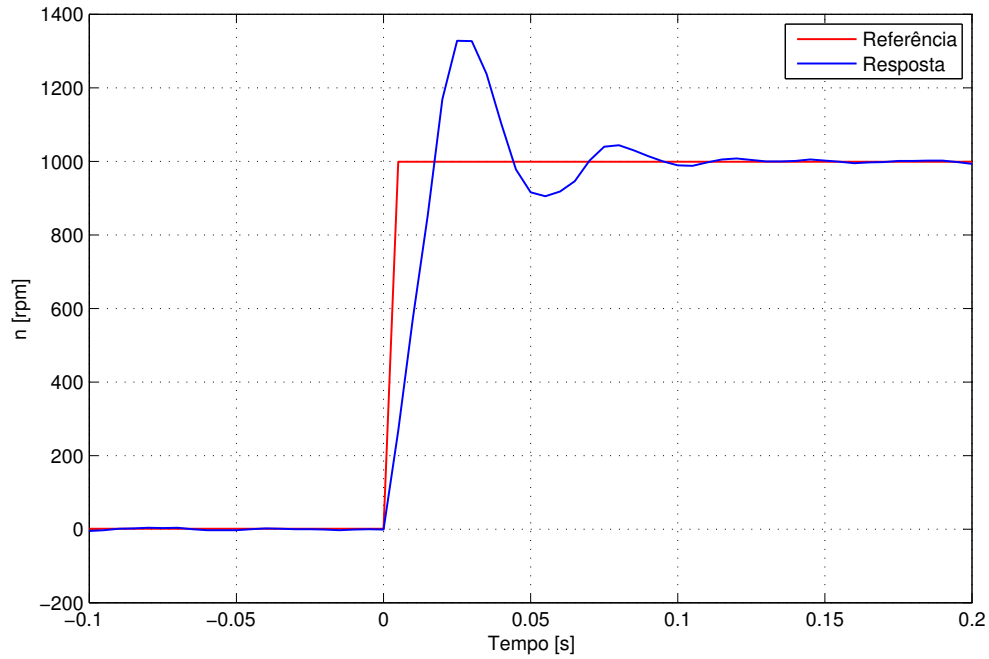


Figura 4.6 – Resposta em velocidade do sistema real a uma solicitação em degrau de 1000 rpm. Nota: A aparência ligeiramente inclinada do degrau é devida ao período de amostragem do osciloscópio virtual.

A resposta temporal de um sistema de segunda ordem ao degrau unitário será dada pela equação 4.13 [25].

$$u(t) = 1 - \frac{e^{-\zeta \omega_n t}}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \sin \left(\omega_d t + \arctan \frac{\sqrt{1 - \zeta^2}}{\zeta} \right) \quad (4.13)$$

Em que:

- ζ : Coeficiente de amortecimento do sistema
- ω_n : Frequência natural não amortecida [rad/s]
- ω_d : Frequência natural amortecida [rad/s] (Equação 4.14)

$$\omega_d = \omega_n \cdot \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (4.14)$$

A resposta temporal ao degrau de 1000 rpm (D_{ref}) será diretamente proporcional à resposta ao degrau unitário (equação 4.15).

$$n(t) = D_{ref} \cdot u(t) \quad (4.15)$$

Utilizando a funcionalidade *solver* de uma folha de cálculo da aplicação *Excel* da *Microsoft*, é possível obter os parâmetros que melhor ajustam a equação completa da resposta do sistema de segunda ordem à resposta em velocidade do sistema obtida na Figura 4.6. Este procedimento envolve a maximização de um coeficiente que caracteriza a qualidade do ajuste, pela variação iterativa das variáveis da equação. Os valores obtidos que maximizam a qualidade deste ajuste encontram-se na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Características calculadas do sistema. Nota: Apenas são válidas para o eixo Y sem cargas externas aplicadas.

Característica	Valor
ω_n - Frequência natural não amortecida [rad/s]	122.35
ζ - Coeficiente de amortecimento	0.33

Traçando o gráfico da resposta do sistema de segunda ordem com os parâmetros da Tabela 4.2 e comparando à resposta do sistema real, obtém-se o gráfico da Figura 4.7.

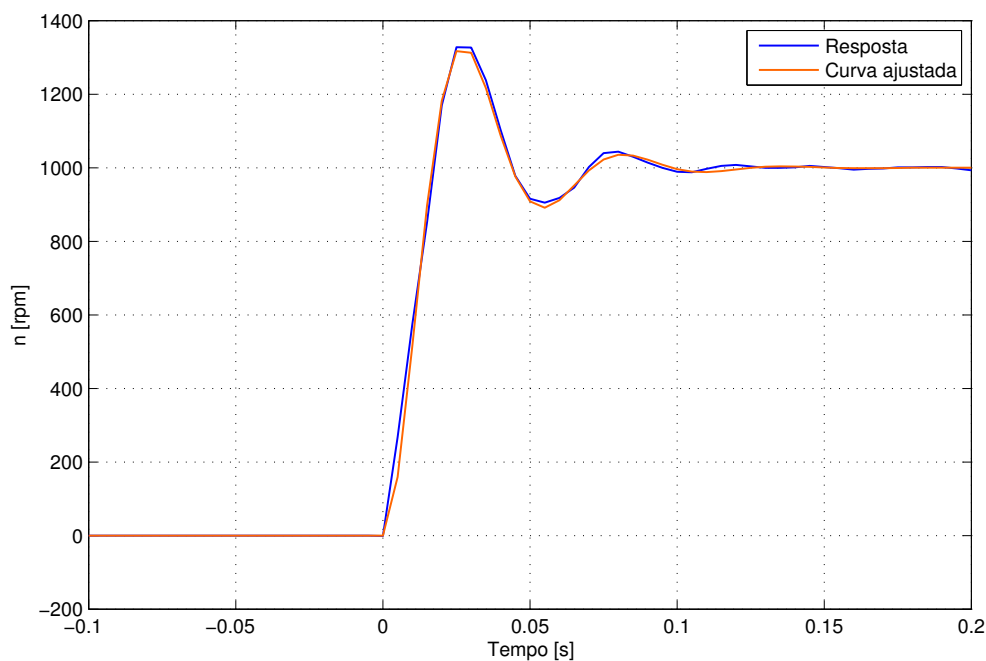


Figura 4.7 – Comparação entre a resposta real e a resposta de um sistema de segunda ordem de simplificação

A função de transferência de um sistema de segunda ordem é dada pela equação 4.16 [25].

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4.16)$$

Foi então inserida no modelo simplificado do sistema em *Simulink* a função de transferência de segunda ordem representativa das dinâmicas do *driver*, servomotor e eixo da mesa, utilizando os parâmetros da Tabela 4.2, resultando no modelo ilustrado na Figura 4.8.

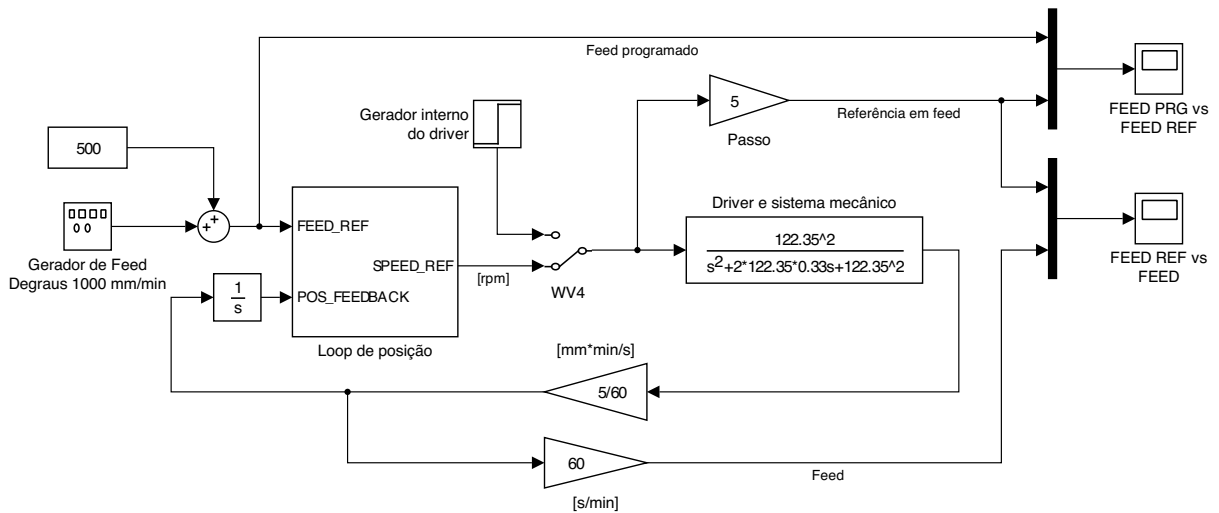


Figura 4.8 – Modelo simplificado de um eixo de acionamento

O controle de posição da Unidade Central do CNC (bloco “Loop de posição” na Figura 4.8) modelado de forma simplificada tendo em conta o funcionamento descrito no manual do CNC [3], encontra-se implementado de acordo com a Figura 4.9 (apenas foi considerado o ganho proporcional e *feed-forward*, tendo sido omitido o ganho derivativo).

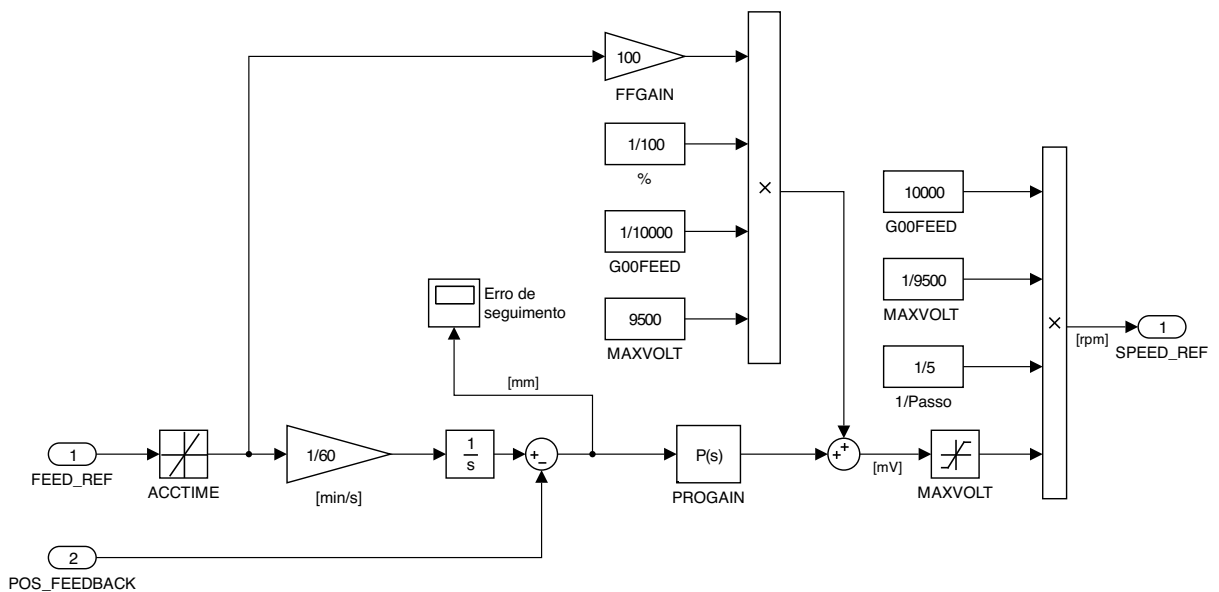


Figura 4.9 – Modelação do controle de posição efetuado na Unidade Central do CNC

Efeito do ganho *feed-forward*

Tendo sido obtido um modelo funcional, procedeu-se à variação do ganho *feed-forward* (parâmetro FFGAIN) de forma a verificar o seu efeito na resposta do sistema. O interesse deste ganho reside na sua capacidade de reduzir o tempo de resposta do sistema e diminuir erro de seguimento a referências de velocidade constantes. Pode no entanto provocar uma sobre-elongação não desejada caso tome um valor demasiado elevado. São apresentadas algumas respostas simuladas do sistema a referências de velocidade trapezoidais representativas do funcionamento em *jogging* manual contínuo. Estas referências impõem a aceleração previamente definida de 10 m/min por 500 ms, ou seja 0.33 m/s^2 . Estas respostas foram simuladas para diferentes valores do ganho *feed-forward*, nomeadamente 0 % na Figura 4.10, 60 % na Figura 4.11, 80 % na Figura 4.12 e finalmente 100 % na Figura 4.13 (as resposta com o ganho a 20 e 40 % foram omitidas visto as diferenças relativamente à resposta a 0 % serem mínimas).

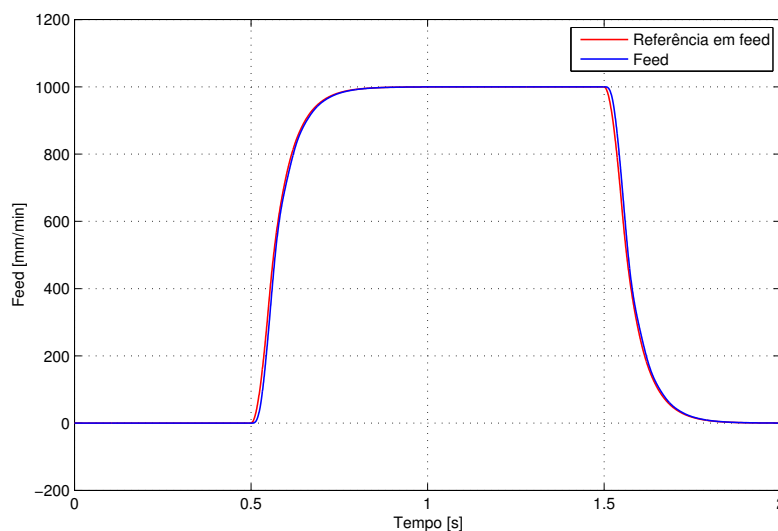


Figura 4.10 – Resposta simulada em velocidade ao perfil trapezoidal com ganho *feed-forward* a 0 %

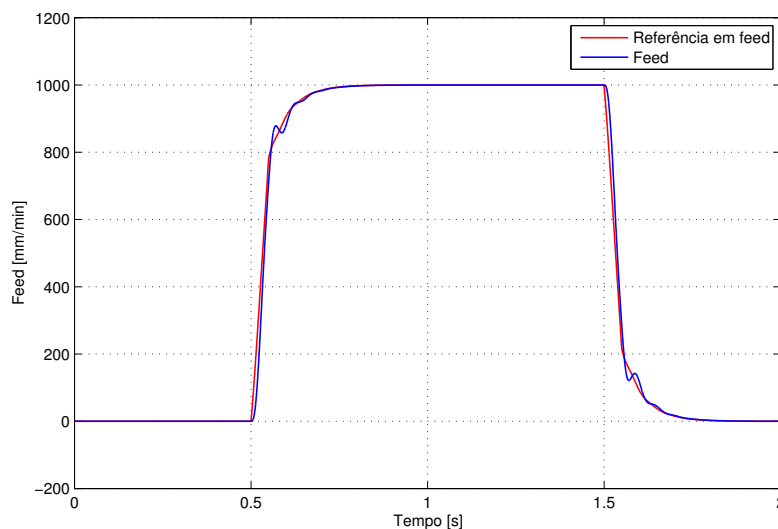


Figura 4.11 – Resposta simulada em velocidade ao perfil trapezoidal com ganho *feed-forward* a 60 %

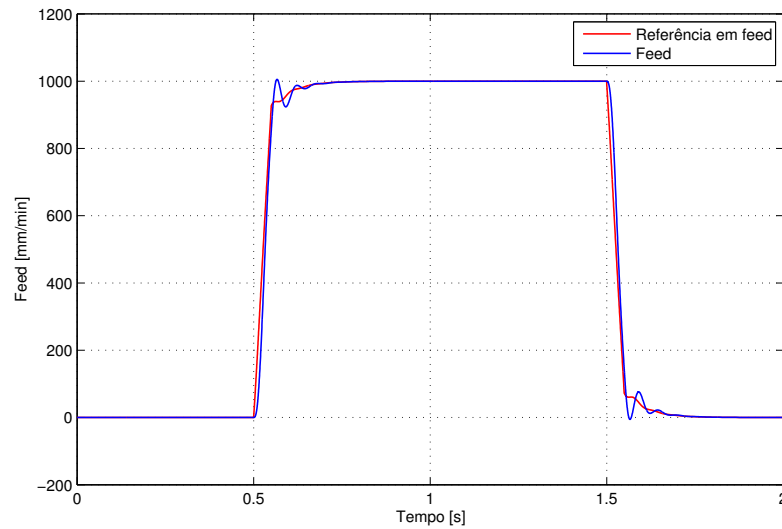


Figura 4.12 – Resposta simulada em velocidade ao perfil trapezoidal com ganho *feed-forward* a 80 %

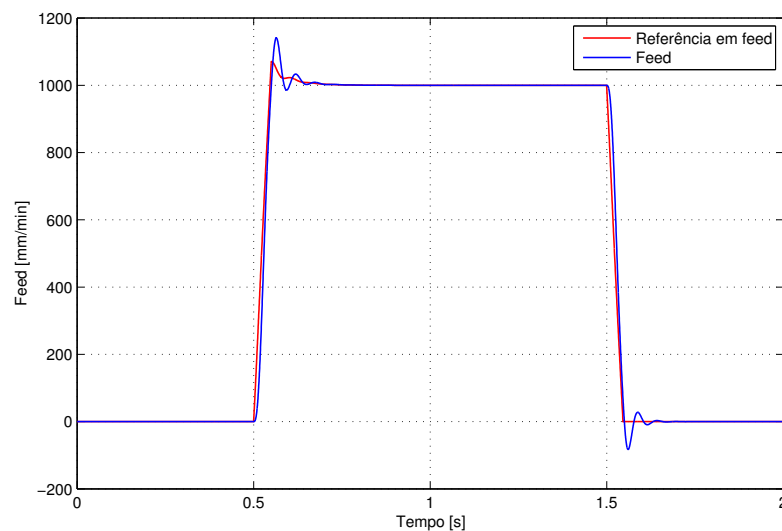


Figura 4.13 – Resposta simulada em velocidade ao perfil trapezoidal com ganho *feed-forward* a 100 %

É possível verificar que o aumento do ganho *feed-forward* resulta num aumento respetivo das oscilações na resposta em velocidade, traduzindo-se num acionamento menos suave no arranque e paragem do eixo.

Determinou-se por sucessivas iterações que a partir de um ganho *feed-forward* de aproximadamente 90 % se passa a verificar uma sobre-elongação na resposta em posição (o eixo deixa de estar em atraso em relação à referência e passa a estar em avanço), pelo que é necessário utilizar um valor inferior na configuração.

4.1.3 Implementação de fins de curso

Posteriormente à finalização da solução de acoplamento e fixação dos servomotores à mesa de posicionamento, foi necessário instalar os fins de curso (X+, X-, Y+ e Y-) previstos no circuito de comando (Anexo A.3). Estes fins de curso permitem garantir que, numa situação excecional na qual um ou mais eixos excede o limite de curso definido, se dá uma paragem de emergência controlada, o que impede os eixos de atingir o limite físico dos seus respectivos cursos. Para tal foram adicionados sensores de proximidade indutivos *OsiSense XS* da *Schneider Electric* (XS512B1NAM12), porque eram os que se encontravam disponíveis. Um deste sensores encontra-se visível na Figura 4.14.



Figura 4.14 – Sensor de proximidade indutivo *OsiSense XS*

Consistem em sensores indutivos de proximidade NPN, de três fios, com um funcionamento equivalente a um contacto normalmente aberto, pelo que para obter a funcionalidade especificada no circuito de comando foi necessário recorrer à utilização de um relé auxiliar (D0) como ilustrado na Figura 4.15.

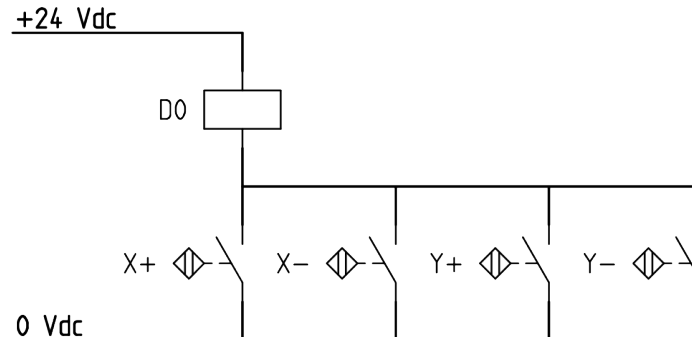


Figura 4.15 – Ligações entre os contactos normalmente abertos dos sensores indutivos

Nesta montagem o facto do relé D0 se encontrar antes dos contactos, deve-se à particularidade deste sensor indutivo ser NPN, e daí funcionar como coletor comum. Um sensor PNP permitiria uma montagem em fonte comum, mas em termos funcionais não se verifica diferença.

É de interesse conhecer a distância de travagem dos eixos numa situação de emergência, de forma a poder posicionar os sensores indutivos em relação aos limites do curso. São identificadas duas situações de paragem de emergência de um servomotor:

Paragem controlada – na transição negativa da função *Speed Enable* os *drivers* impõem um valor nulo da velocidade como referência.

Paragem por atrito – uma avaria ou transição negativa da função *Driver Enable* provoca uma perda de potência no motor e o eixo acaba por se imobilizar devido aos atritos.

Estas duas situações de paragem foram programadas (Anexo B.3) e executados diversos testes para cada uma das situações, sendo adquirida a distância percorrida na travagem correspondente. Os testes foram realizados para cada um dos eixos de forma independente. A velocidade linear de cada eixo quando é dada a ordem de paragem foi de 10 000 mm/min. Idealmente este teste deveria ser realizado para uma massa colocada na mesa de trabalho igual à massa máxima calculada (383 kg), no entanto não houve essa possibilidade pelo que as paragens foram realizadas sem carga em cima da mesa de trabalho.

Os resultados obtidos nos diversos testes são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Distâncias percorridas pelo eixo na travagem

Travagem controlada		Paragem por atrito (livre)	
Eixo X [mm]	Eixo Y [mm]	Eixo X [mm]	Eixo Y [mm]
12.406	13.878	36.034	29.056
14.918	12.208	36.883	28.635
12.888	13.015	36.775	27.568
14.218	13.741	36.652	28.459
12.161	16.408	36.579	28.730
12.528	15.145	37.044	28.801
12.718	15.219	37.339	34.258
11.210	13.006	36.954	29.155
15.893	14.548	36.307	30.394
12.601	12.482	38.111	31.246
Média [mm]		Média [mm]	
13.154	13.965	36.868	29.630
Máximo [mm]		Máximo [mm]	
15.893	16.408	38.111	34.258

É de relembrar que o *driver* dispõe da possibilidade de configurar o perfil de velocidade utilizado na travagem controlada de emergência. Este é ativado na transição negativa da função *Speed Enable*, seja pelo PLC (teste realizado) ou pelas ligações físicas. Esta rampa de desaceleração foi configurada de acordo com a secção 4.1.1 (p. 57) para a realização destes testes de travagem.

Numa situação excecional em que o servomotor perde a potência enquanto funciona à sua velocidade nominal e se encontra imediatamente antes da posição na qual o fim de curso é ativado, pelos testes realizados a distância percorrida nessa paragem livre será de aproximadamente 38 mm, na pior das situações, pelo que a distância entre o fim de curso e o curso máximo necessitará de ser superior a esse valor. É de notar no entanto que esta situação é altamente improvável relativamente a uma situação em que a máquina, por qualquer anormalidade, ativa o sensor indutivo e provoca uma paragem controlada.

Considerou-se a distância entre os locais de montagem dos fins de curso e os limites da mesa igual 50 mm, o que resulta num curso máximo configurável na máquina de 411 mm.

4.1.4 Configuração do comando numérico

No capítulo 2 é apresentada uma configuração do CNC que permitiu verificar o correto funcionamento do *jogging* manual e execução de programas de comando numérico. Essa configuração encontra-se no entanto incompleta relativamente a uma configuração final do CNC, pelo que nesta secção são apresentados os parâmetros configurados de forma a obter a configuração final. São apenas apresentados os parâmetros que sofreram alteração relativamente ao seu valor por defeito e que constam na tabela de parâmetros dos eixos. Na tabela de parâmetros gerais do CNC não foi feita qualquer alteração pelo que se mantêm os valores anteriormente definidos.

Deu-se início à configuração pela tabela de parâmetros dos eixos, visto não ter sido necessário alterar nenhum parâmetro adicional na tabela de parâmetros gerais do CNC:

LIMIT+ (P5) e LIMIT- (P6)

Definem os limites do curso do eixo respetivo em milímetros e são definidos em função do zero absoluto da máquina (origem do referencial da máquina).

Os limites foram então definidos experimentalmente utilizando os sensores indutivos como ponto de referência, visto ser conhecida a sua posição no curso do eixo. Os valores utilizados foram para o eixo superior (eixo X) P5=-41,874 e P6=358,326 e para o eixo inferior (eixo Y) P5=-398,753 e P6=1,447. Para estes valores obtém-se, para cada eixo, um curso efetivo de 400 mm (o CNC acrescenta uma margem de 0.1 mm a cada limite).

Posteriormente os eixos são movimentados para a sua posição mais recuada e definidos os zeros respetivos (internamente é definido um *offset* relativamente ao zero da máquina).

É de notar que caso os eixos sejam movimentados manualmente com o CNC desligado estes valores deixam de fazer sentido, sendo necessário repetir o procedimento de configuração.

PITCH (P7)

Este parâmetro define o passo do acionamento, ou seja, o deslocamento linear por rotação do veio do motor em mm/rot. É uma característica do fuso de esferas que tem o valor de 5 mm/rot.

AXISCHG (P13)

Altera o sentido de rotação do veio do motor ao movimentar o eixo na direção positiva. Encontra-se com o valor “YES”. Ao alterar este parâmetro, o parâmetro LOOPCHG (P26) tem que ser também obrigatoriamente alterado para o mesmo valor. A combinação da configuração destes sentidos de rotação com a atribuição do eixo X ao eixo superior e do eixo Y ao eixo inferior, significa que o sistema de eixos implementado será igual ao da Figura 4.16.

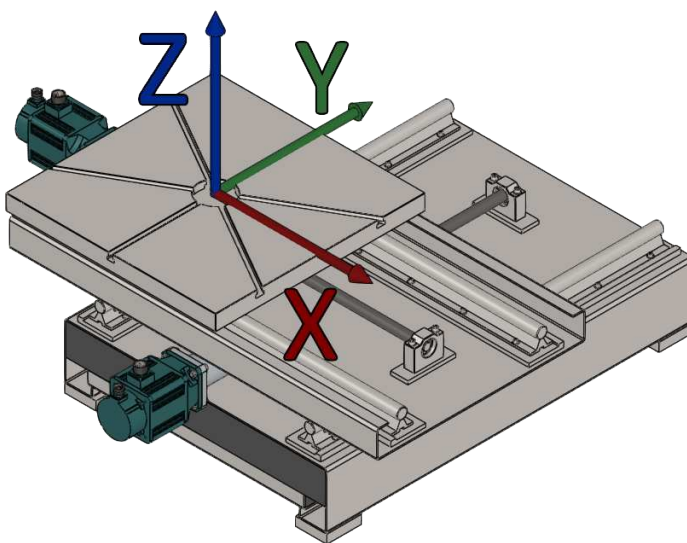


Figura 4.16 – Referencial implementado na mesa XY

ACCTIME (P18)

Define o tempo em milissegundos que o eixo demora a atingir a velocidade de deslocamento máxima configurada e a desacelerar dessa velocidade até ao repouso. Caso seja definida uma velocidade de deslocamento inferior, o tempo até atingir essa velocidade será linearmente proporcional. Foi definido com o valor 500 ms como apresentado na secção 4.1.1 (p. 54).

PROGAIN (P23)

Define o valor do ganho proporcional do controlador de posição do CNC em mV/mm. É recomendado pelo fabricante que este seja calculado através da especificação de uma velocidade linear (*feed*) comum no funcionamento da máquina e do erro de seguimento aceitável a essa velocidade. É calculado através da equação 4.17 [3].

$$\text{PROGAIN} = \frac{\text{MAXVOLT}}{\text{G00FEED}} \cdot \frac{\text{Feed especificado}}{\text{Erro especificado}} \quad (4.17)$$

Especificando um *feed* de 1000 mm/min e um erro de seguimento de 1 mm, obtém-se um ganho proporcional de 950 mV/mm.

FFGAIN (P25)

Define o valor do ganho *feed-forward* em percentagem. Como previamente referido na secção 4.1.2 (p. 62), este ganho gera uma ação de controlo diretamente proporcional à referência, permitindo reduzir o tempo de resposta e o erro de seguimento a referências de velocidade constantes. Foi definido em 60 %, obtendo-se assim um erro de seguimento de 0.4 mm (60 % inferior ao especificado quando calculado o ganho proporcional).

LOOPCHG (P26)

Indica o sinal da referência de velocidade que é transmitida ao *driver*. A sua configuração está dependente do parâmetro AXISCHG (P13). Caso esteja mal configurado o eixo pode “fugir”, ou seja ser acionado num sentido de forma descontrolada. Toma o valor “YES”.

DECINPUT (P31)

Este parâmetro indica se o eixo tem disponível um interruptor de referência (*home switch*). Tal não foi implementado na mesa XY, pelo que este parâmetro toma o valor “NO”.

MAXVOLT (P37)

Indica o valor do sinal de referência de velocidade, em mV, para o valor máximo da velocidade de avanço MAXFEED (P42). O seu valor é mantido igual ao por defeito e é de 9500 mV.

G00FEED (P38)

Especifica a velocidade de avanço do movimento de interpolação linear rápido G00. Foi definido como 10 000 mm/min.

MAXFEED (P42)

Indica a velocidade linear máxima programável. Foi definido em 10 000 mm/min.

JOGFEED (P43)

Especifica a velocidade linear a que se realiza o *jogging* manual caso não se encontre já uma programada. Foi definido com o valor 1000 mm/min.

Foi adicionalmente necessário ao nível das tabelas de parâmetros dos *drivers*, configurar o parâmetro que especifica o valor máximo da desaceleração angular utilizada na travagem de emergência. Esta funcionalidade é habilitada pela configuração em ambos os *drivers* (X e Y) do parâmetro SP70 com um valor 1 e pela especificação do valor máximo da aceleração angular em rad/s^2 no parâmetro SP65 [11]. Este valor é de 2094 rad/s^2 , como calculado na secção 4.1.1 (p. 57).

4.1.5 Programação final do PLC

O programa final implementado no PLC é apresentado no Anexo B.4. Relativamente ao programa utilizado inicialmente (Anexo B.1), este inclui as seguintes alterações:

- O *reset* do valor de todos os recursos do PLC no primeiro ciclo do programa (visto estes valores persistirem após o reinício da máquina);
- A ativação das funções *Speed Enable* e *Drive Enable* dependentes de verificações do estado do sistema, nomeadamente os sinais de emergência I1 e I3 provenientes do circuito de comando, a auto-verificação que o CNC executa no arranque, a inexistência de uma situação de alarme detetada pelo CNC a nível interno e não ter ocorrido uma situação de emergência nos últimos 5 segundos;
- Caso alguma destas condições se verifique (situação de emergência), o programa desativa imediatamente os sinais *Speed Enable* (SPENAn) e as saídas que ativam o *Speed Enable* dos *drivers* a partir do circuito de comando (O3, O5, O7), dando origem a uma paragem controlada dos servomotores. Provoca também pela desativação da saída O1, a desativação do sinal *System Speed Enable* na fonte de alimentação e o início da contagem do relé temporizador no circuito de comando (3 segundos), que chegando a zero desativa o contactor;
- Passados 500 ms da desativação dos sinais *Speed Enable* são desativados os sinais *Drive Enable*, cortando a alimentação dos servomotores caso isso ainda não tenha ocorrido (isto é no entanto redundante, visto que ao se dar a transição negativa do sinal *System Speed Enable* na fonte de alimentação, mal se verifique a paragem controlada dos motores, é cortada a alimentação elétrica);
- Ao fim de 5 segundos é novamente possível retomar ao normal funcionamento da máquina, ou seja, dentro deste intervalo de tempo não é possível os servomotores voltarem a ter alimentação elétrica por se deixar de verificar a condição que levou à situação de emergência (seja o rearmamento de uma botoneira de emergência, fim de curso indutivo, proteções do circuito de potência, etc).

Encontra-se também no fim deste programa o código relativo ao funcionamento do volante eletrónico, apresentado previamente no Anexo B.2.

4.2 Teste de funções de programação do CNC

Nesta secção são apresentadas apenas algumas das funcionalidades de programação em código G características do sistema Fagor 8055M e o acionamento da mesa de posicionamento através da execução dessas funções. De forma a registar experimentalmente o resultado da execução, foram utilizadas folhas de papel milimétrico fixas na mesa de trabalho e uma caneta especial que garante o contacto com a folha, como é possível verificar na Figura 4.17.

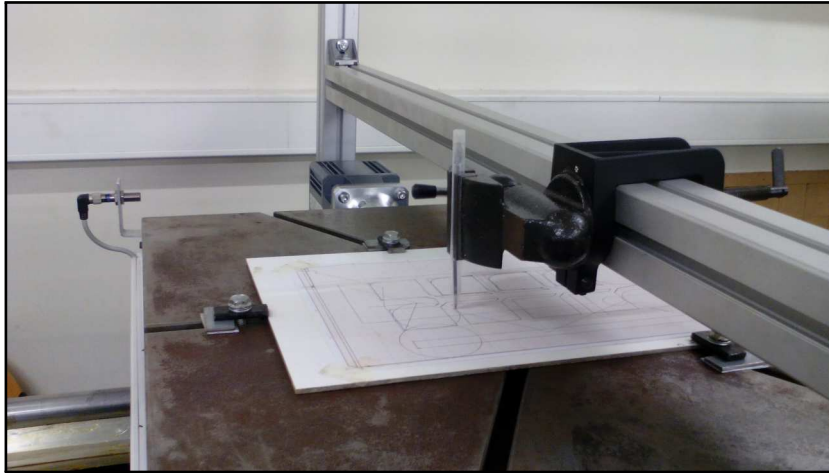


Figura 4.17 – Montagem utilizada no registo da execução de programas de comando numérico

4.2.1 Interpolação linear

A interpolação linear é umas das funções base de qualquer programa de comando numérico. Permite executar uma linha reta entre dois pontos a uma determinada velocidade linear. A sua utilização num programa é feita através da função G01 especificando uma determinada velocidade linear. Consiste numa função modal, ou seja, uma vez chamada mantém-se ativa até que seja chamada outra função que anule o seu efeito. É dado um exemplo da sua utilização num programa de comando numérico, juntamente com a sua representação gráfica ilustrada na Figura 4.18.

```
N10 G17 G71 G90           ;G17 - Seleção do plano XY
                           ;G71 - Coordenadas em mm
                           ;G90 - Coordenadas absolutas
N20 G00 X0 Y0             ;Movimento rápido para a origem da máquina
N30 G01 X375 Y125 F1000   ;Movimento em X e Y a 1000 mm/min
N40 Y375                  ;Movimento em Y a 1000 mm/min
N50 X125                  ;Movimento em X a 1000 mm/min
N60 X0 Y0                 ;Movimento em X e Y a 1000 mm/min
N70 M30                   ;Fim do programa
```

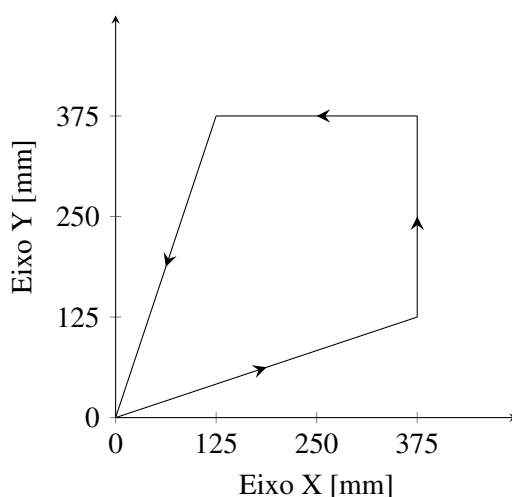


Figura 4.18 – Resultado da execução do exemplo da interpolação linear

Foi executado o programa do Anexo C.1 de forma a verificar a execução de sucessivas interpolações lineares a diferentes velocidades (100, 250, 500, 1000, 2500, 5000, 7500 e 10000 mm/min). Verificou-se que a velocidades superiores a 250 mm/min, o facto da estrutura sobre a qual a mesa de posicionamento se encontra colocada não ser suficientemente rígida cria uma oscilação perceptível que influencia os resultados registados. De forma a minimizar esta oscilação os testes posteriores foram realizados a velocidades iguais ou inferiores a este valor.

4.2.2 Interpolação circular

A interpolação circular permite programar arcos e círculos. Corresponde à função G02 na rotação no sentido dos ponteiros do relógio (CW) e à função G03 na rotação no sentido inverso aos ponteiros do relógio (CCW). São ambas modais. É dado um exemplo da utilização destas funções com a trajetória resultante ilustrada na Figura 4.19.

```

N10 G17 G71 G90 ;
N20 G0 X0 Y0 ;
N30 G3 X250 Y250 I0 J250 F100 ;Arco de 90 graus CCW
                                ;Ponto final do arco em X250 e Y250
                                ;Centro a 0 mm em X e 250 mm em Y do ponto atual
N40 X125 Y125 I-125 J0 ;Arco de 270 graus CCW
N50 G2 X0 Y0 R125 ;Arco de 90 graus CW (formato alternativo)
N60 M30 ;

```

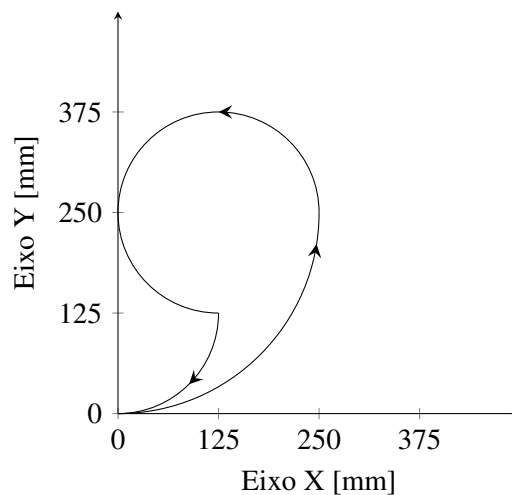


Figura 4.19 – Resultado da execução do exemplo da interpolação circular

No Anexo C.2 é apresentado um novo exemplo de um programa de comando numérico baseado em interpolações circulares e o resultado da sua execução registado em papel milimétrico.

4.2.3 Raio de concordância e chanfro automáticos

Este CNC dispõe de duas funções não-modais que permitem produzir automaticamente cantos arredondados (G36) ou com chanfros a 45° (G39). Dado que na programação *offline* ao utilizar um *software* CAM esse representa este tipo de geometrias da peça por interpolações lineares ou circulares, as funções G36 e G39 apenas são úteis quando se pretende reduzir o tempo necessário à escrita manual de um programa ou é desejado um programa mais compacto. É exemplificada a sua utilização num programa de comando numérico com o respetivo resultado da execução deste exemplo ilustrado na Figura 4.20.

```

N10 G17 G71 G90 ;
N20 G00 X0 Y0 ;
N30 X125 Y125 ;
N40 G01 Y375 F100 ;Canto normal
N50 G36 R100 X375 ;Canto com raio de 100 mm automático
N60 G39 R100 Y125 ;Canto com chanfro de 100x100 mm automático
N70 X125 ;
N80 G00 X0 Y0 ;
N90 M30 ;

```

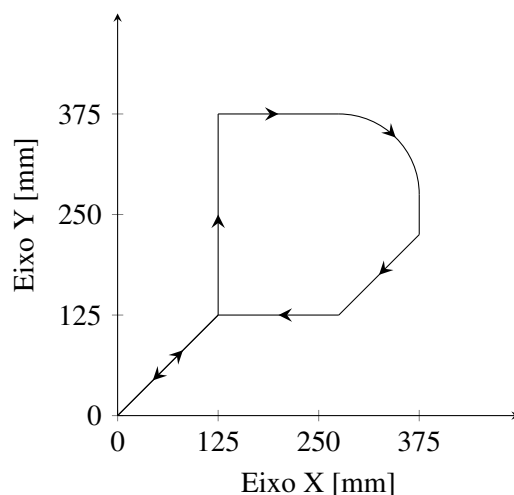


Figura 4.20 – Resultado da execução do exemplo dos raios e chanfros automáticos

No Anexo C.3 é apresentado um novo exemplo de um programa de comando numérico no qual se utilizam estas funções e o resultado da sua execução registado em papel milimétrico.

4.2.4 Compensação automática do raio da ferramenta

Em operações de fresagem de forma a obter as dimensões desejadas na peça final, é necessário ter em conta o raio da ferramenta de corte na criação da trajetória da mesma. Esta compensação pode ser realizada através da definição exata da trajetória da ferramenta, ou mais convenientemente, através da programação do contorno da peça e utilização da função de compensação automática do raio da ferramenta existente. Ao utilizar esta função o CNC tem em conta o raio da ferramenta definido na tabela dos *offsets*, na criação da trajetória final.

Esta funcionalidade reparte-se em três funções preparatórias modais: a função G40 desativa a compensação do raio, a função G41 aplica uma compensação do lado direito da ferramenta e a função G42 do lado esquerdo como ilustrado na Figura 4.21.



Figura 4.21 – Efeito do uso das funções de compensação do raio da ferramenta G41 e G42 [3]

É apresentado um breve exemplo da utilização destas funções num programa de comando numérico. A representação gráfica da execução deste exemplo encontra-se ilustrada na Figura 4.22, na qual a linha a traço descontinuo representa as dimensões desejadas da peça e a linha a traço contínuo a trajetória da ferramenta automaticamente calculada pelo CNC.

```

N10 G17 G71 G90      ;
N20 T1 D1 M06        ;Assinala a ferramenta escolhida T1
                      ;Aplicação do offset D1 (Raio da ferramenta = 25 mm)
                      ;M06 - Rotina auxiliar que efetua a troca da ferramenta

N30 G00 X0 Y0        ;
N40 G41 X125 Y125     ;Início da compensação
N50 G01 Y375 F100    ;
N60 X375              ;
N70 Y125              ;
N80 X125              ;
N90 G00 G40 X0 Y0    ;Fim da compensação
N100 M30              ;

```

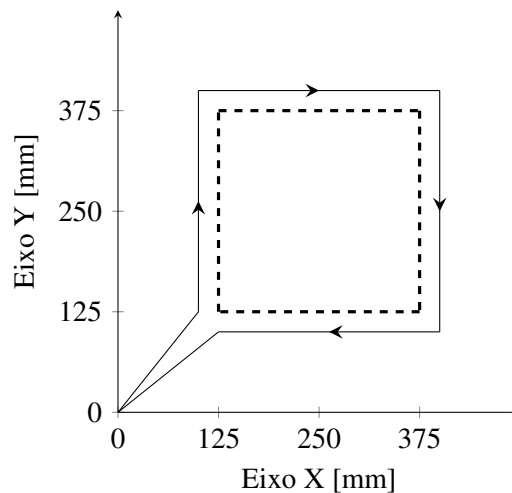


Figura 4.22 – Resultado da execução do programa de comando numérico

No Anexo C.4 é apresentado um novo exemplo de um programa de CN no qual se utilizam estas funções e o respetivo resultado da execução registado em papel milimétrico. É inicialmente realizado o contorno com as dimensões da peça e posteriormente a compensação considerando uma ferramenta com raio 2 mm.

4.2.5 Look-ahead

O *look-ahead* consiste numa função de programação de CN que permite minimizar a redução de velocidade linear entre pontos ao considerar os blocos sucessivos e a velocidade programada. É assim possível obter tempos de maquinagem mais reduzidos em programas de CN compostos por sucessivos blocos que realizem movimentos de reduzido comprimento [1].

De forma a implementar esta função, este CNC em particular analisa os 50 blocos à frente do bloco atual e calcula a velocidade máxima linear para cada um desses blocos. É utilizado num programa de CN através da função preparatória modal G51 e especificação do erro máximo do contorno. Pode ser desativada pela programação das funções modais G07, G08, G50 (cantos retos, redondos descontrolados e controlados respetivamente) [3].

```
N10 G17 G71 G90      ;  
N20 G51 E0.1         ;Início do look-ahead com erro máximo de 0.1 mm  
N30 G01 X100 Y100 F100 ;  
N40 X101 Y101        ;  
N50 X102 Y102        ;  
N60 X103 Y103        ;  
N70 X104 Y104        ;  
N80 G07 X200 Y200     ;Fim do look-ahead (cantos retos)  
(...)
```

No Anexo C.5 é apresentado um programa de CN composto por sucessivos blocos de curto comprimento e o resultado da execução desse programa registado em papel milimétrico. Este programa foi criado a partir de um contorno desenhado em *SolidWorks* utilizando a aplicação HSMXpress¹ para gerar a trajetória e a pós-processar, resultando num programa de código G que o CNC é capaz de interpretar. O programa gerado aproxima uma trajetória originalmente descrita por curvas polinomiais (*splines*) utilizando sucessivos segmentos de reta.

Ao executar este programa foi registado o seu tempo de execução de forma a verificar o efeito da utilização do *look-ahead*. Foi verificado que não utilizando esta função, o tempo de execução do programa é de 2 minutos e 55 segundos. Ao ativar esta função este tempo é reduzido a 2 minutos e 27 segundos.

¹Software CAM gratuito desenvolvido pela Autodesk, que se integra na interface do *SolidWorks*

Capítulo 5

Conclusões e propostas de trabalhos futuros

Verificou-se que foi possível utilizar o CNC existente no comando da mesa de posicionamento XY, aplicando os servomotores no acionamento dos eixos de movimento, tendo sido assim cumprindo o principal objetivo especificado no início desta dissertação.

O estado de funcionalidade obtido permite movimentar ambos os eixos, tanto ao executar programas de CN como ao efetuar o *jogging* manual utilizando a interface do CNC ou o volante eletrônico, tendo sido atingidas as funcionalidades essenciais de um sistema de CN. No entanto, as rotinas e equipamentos de segurança implementados, enquanto que cumprem os requisitos de segurança estabelecidos, nomeadamente a paragem de emergência controlada dos eixos, necessitam de um contínuo desenvolvimento de forma a melhor proteger o utilizador da máquina e o equipamento.

Para possibilitar a utilização dos equipamentos existentes, todos os circuitos do sistema foram revistos e implementados de acordo com os esquemas desenvolvidos, foram configurados os parâmetros do CNC de forma personalizada para o sistema existente e desenvolvida uma rotina executada pelo autómato programável necessária ao funcionamento do sistema. Foi inclusive detetada uma falha de um dos equipamentos do sistema, o que permitiu evidenciar uma das vantagens de um sistema modular, nomeadamente a flexibilidade deste tipo de sistemas, visto que ao remover o equipamento com avaria foi possível reconfigurar o CNC de forma a manter um certo nível de funcionalidade em função dos equipamentos existentes.

A utilização dos acionamentos eletromecânicos necessitou do desenvolvimento de um meio de acoplamento entre veios e um meio de fixação à mesa. Foram investigadas diferentes alternativas, tendo sido projetada uma solução viável para ambos, que foi por fim implementada permitindo a movimentação dos eixos da mesa.

Ao longo deste trabalho foram criadas condições que permitem estabelecer novas perspectivas de trabalhos futuros. A mais natural dessas perspectivas será o desenvolvimento e implementação de um terceiro eixo de movimento utilizando o servomotor e *driver* já disponíveis, e posteriormente a inclusão de um elemento terminal que poderá ser baseado num eixo de corte ou até mesmo numa cabeça de extrusão, tornando efetivamente o sistema numa impressora 3D.

Quanto a possibilidades de desenvolvimento mais imediatas, destacam-se alguns pontos de interesse:

- Implementar a pesquisa do ponto de referência da máquina (*home search*).
- Continuar o teste das funções de programação do comando numérico.
- Aprofundar a investigação sobre as possibilidades de integração do CNC com sistemas *Windows*, tais como DNC e gestão de programas a partir de um PC.
- Aplicar fins de cursos normalmente fechados no limite dos cursos físicos da mesa com novos suportes rígidos (em substituição aos atuais) e aproveitar o sinal de cada fim de curso para sinalizar o excesso do curso ao nível do PLC.
- Implementar novos sistemas de segurança, como barreiras de luz ou um espaço fechado com sensores que detetem a abertura do mesmo.
- Implementar um transdutor linear de forma a dispor de uma medição direta da posição dos eixos de movimento e assim obter uma melhor exatidão no controlo de posição.
- Aferir a exatidão real dos eixos de movimento, bem como a folga exata entre componentes (especificamente ao nível da porca de esferas).
- Modelar as dinâmicas do sistema de forma a simular o controlo de posição de ambos os eixos, o que permitiria prever o comportamento do sistema em variadas situações e assim ajustar os parâmetros do CNC sem que isso resulte no desgaste dos componentes da mesa e bancada.

Referências

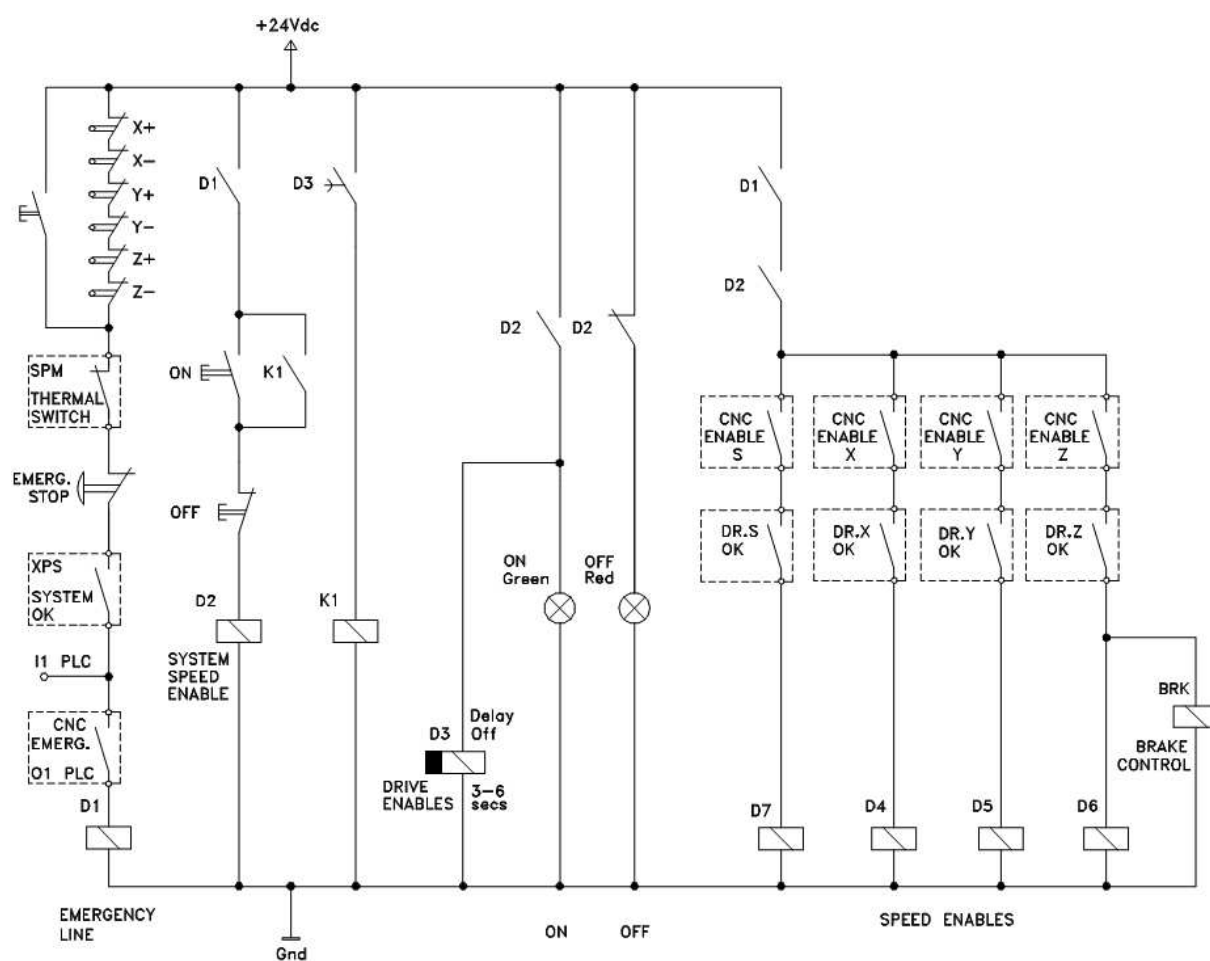
- [1] Suh, S.-H. et al. *Theory and Design of CNC Systems*. Springer Science & Business Media, agosto de 2008. ISBN: 9781848003361 (Citado nas páginas 1–3, 75).
- [2] *The Father of the Second Industrial Revolution*. URL: <http://www.sme.org/Tertiary.aspx?id=36002> (acedido em julho de 2015) (Citado na página 1).
- [3] Fagor Automation. *CNC 8055: Installation manual*. Versão 0204. Abril de 2002 (Citado nas páginas 3, 22, 57, 58, 61, 67, 73, 75).
- [4] Fagor Automation. *CNC 8065 catalog*. 2011. URL: http://www.fagorautomation.com/downloads/catalogos/en/cat_cnc_8065.pdf (acedido em julho de 2015) (Citado na página 4).
- [5] FANUC. *CNC Controls product overview*. 2014. URL: http://www.fanuc.eu/~media/files/pdf/products/cnc/cnc%20control/cnc-overview/cnc%20controls%20product%20overview_en.pdf (acedido em julho de 2015) (Citado na página 4).
- [6] FANUC. *Series 0i and 0i Mate - MODEL D catalog*. 2013. URL: http://cnc.fanucamerica.com/media/2905/mba-004-en_07_1308_0id_med.pdf (acedido em julho de 2015) (Citado nas páginas 4, 5).
- [7] FANUC. *Series 30i/31i/32i - MODEL B catalog*. 2014. URL: http://cnc.fanucamerica.com/media/2753/mba-007-en_04_1401_30ib_med.pdf (acedido em julho de 2015) (Citado na página 5).
- [8] Siemens. *SINUMERIK CNC controls*. URL: <http://w3.siemens.com/mcms/mc-systems/en/automation-systems/cnc-sinumerik/sinumerik-controls> (acedido em julho de 2015) (Citado na página 6).
- [9] Siemens. *SINUMERIK 840D sl Type 1B catalog*. 2012. URL: http://w3app.siemens.com/mcms/infocenter/dokumentencenter/mc/Documentsu20Catalogs/NC62_2012_E2.pdf (acedido em julho de 2015) (Citado na página 6).
- [10] Heidenhain. *TNC 640 - Contouring Control for Machining Centers and Milling/Turning Machines*. Março de 2014. URL: http://www.heidenhain.de/de_EN/php/documentation-information/brochures/popup/media/media/file/view/file-0355/file.pdf (acedido em julho de 2015) (Citado na página 6).
- [11] Fagor Automation. *Servo-Drive System: General manual*. Versão 0112. Setembro de 2000 (Citado nas páginas 14, 15, 17, 26, 52, 54, 55, 57, 58, 68, 81).
- [12] Suh, J. D. e Lee, D. G. «Design and manufacture of hybrid polymer concrete bed for high-speed CNC milling machine». Em: *International Journal of Mechanics and Materials in Design* (23 de janeiro de 2008). DOI: 10.1007/s10999-007-9033-3. URL: <http://link.springer.com/article/10.1007/s10999-007-9033-3> (acedido em maio de 2015) (Citado na página 31).

- [13] Lucefin Group. *C45E Technical card*. 2012. URL: http://www.lucefin.com/wp-content/files_mf/c45eeng.pdf (acedido em maio de 2015) (Citado nas páginas 31, 46, 47).
- [14] INA. *Precision Rolled Ball Screw Drives Catalog*. Schaeffler Group USA, julho de 2010. URL: <http://www.ina.de/content.ina.de/en/mediathek/library/library-detail-language.jsp?id=2316827> (acedido em maio de 2015) (Citado nas páginas 33, 34, 40, 55, 108).
- [15] International Organization for Standardization. *ISO 3408-1, Ball screws - Part 1: Vocabulary and designation*. 2006 (Citado nas páginas 35, 36).
- [16] Thomson. *Precision Screws Catalog*. Agosto de 2014. URL: http://www.thomsonlinear.com/downloads/screws/Precision_Screws_ctuk.pdf (acedido em maio de 2015) (Citado na página 36).
- [17] INA. *Shaft Guidance Systems*. Schaeffler Technologies AG & Co. KG, fevereiro de 2014. URL: <http://www.ina.de/content.ina.de/en/mediathek/library/library-detail-language.jsp?id=2791138> (acedido em maio de 2015) (Citado nas páginas 36, 37).
- [18] Budynas, R. e Nisbett, K. *Shigley's Mechanical Engineering Design*. McGraw-Hill Education, 29 de janeiro de 2010. ISBN: 9780073529288 (Citado nas páginas 39, 40, 54).
- [19] Ramada Aços. *Catálogo interativo*. URL: <http://www.ramada.pt/index.php?cat=45&eb=13> (acedido em maio de 2015) (Citado nas páginas 39, 47).
- [20] Pedersen, N. L. «Stress concentrations in keyways and optimization of keyway design». Em: *Journal of Strain Analysis for Engineering Design* (abril de 2010). DOI: 10.1243/03093247JSA632. URL: http://orbit.dtu.dk/fedora/objects/orbit:22372/datastreams/file_5130583/content (acedido em junho de 2015) (Citado na página 40).
- [21] Lucefin Group. *Cf 53 Technical card*. URL: http://www.lucefin.com/wp-content/files_mf/03cf5375.pdf (acedido em maio de 2015) (Citado na página 41).
- [22] International Electrotechnical Commission. *IEC 60072-1, Dimensions and output series for rotating electrical machines*. 1991 (Citado na página 44).
- [23] KMS - Comércio de materiais técnicos. *Brochura Web*. URL: <http://www.kms.com.pt/images/KMS%20-%20Brochura%20-%20Web.pdf> (acedido em maio de 2015) (Citado nas páginas 46, 47).
- [24] NSK. *Precision Machine Componentes*. NSK Precision America Inc., 2014. URL: http://www.nskamericas.com/cps/rde/xbcr/na_en/e3162d_Precision_Machine_components_bookmarked.pdf (acedido em julho de 2015) (Citado na página 54).
- [25] Ogata, K. *Modern control engineering*. 5ª ed. Prentice-Hall, 2010. ISBN: 9780136156734 (Citado nas páginas 59, 60).
- [26] INA. *Vis à billes roulées - Vis trapézoïdales roulées*. Schaeffler France SAS, março de 2006. URL: <http://www.ina.de/content.ina.de/en/mediathek/library/library-detail-language.jsp?id=2927942> (acedido em maio de 2015) (Citado na página 109).
- [27] R+W. *Precision Couplings Catalog*. Fevereiro de 2013. URL: http://www.rw-couplings.com/fileadmin/images/seiten/PDF/Kataloge_und_Downloads/Kataloge_als_PDF/Kataloge_eng/CataloguePrecisionCouplings.pdf (acedido em maio de 2015) (Citado na página 110).

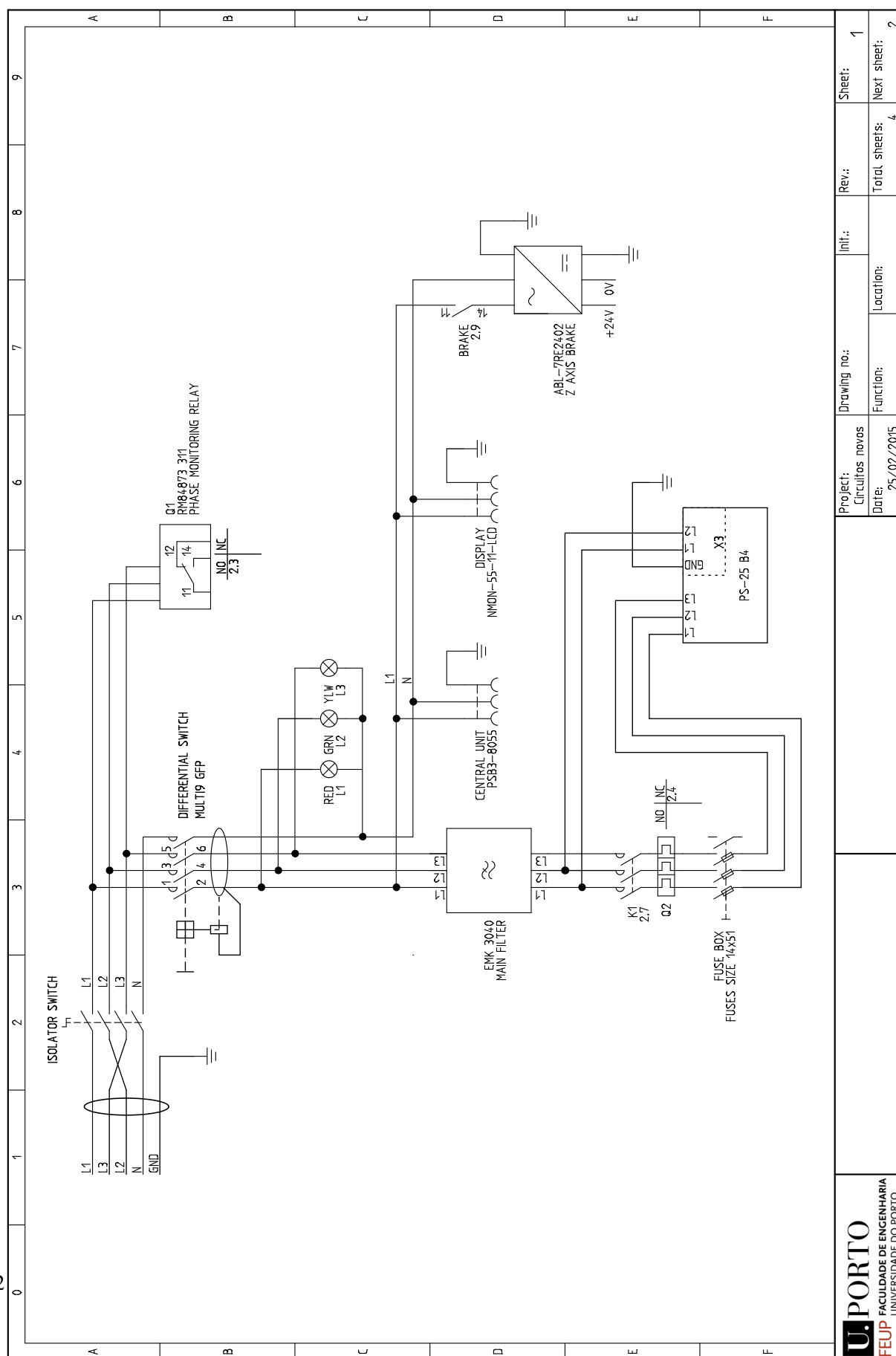
Anexo A

Esquemas elétricos

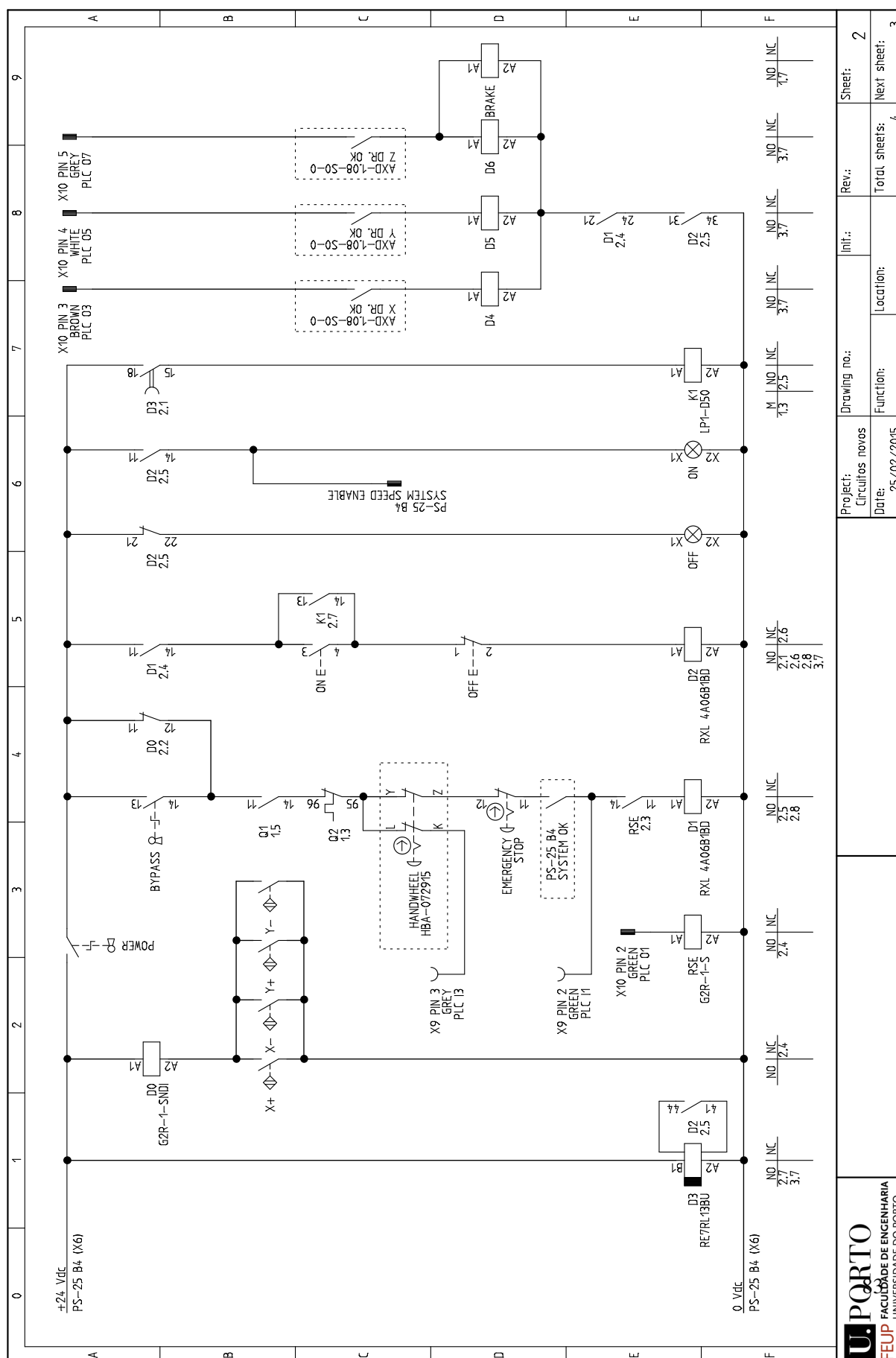
A.1 Circuito de comando recomendado pela Fagor [11]



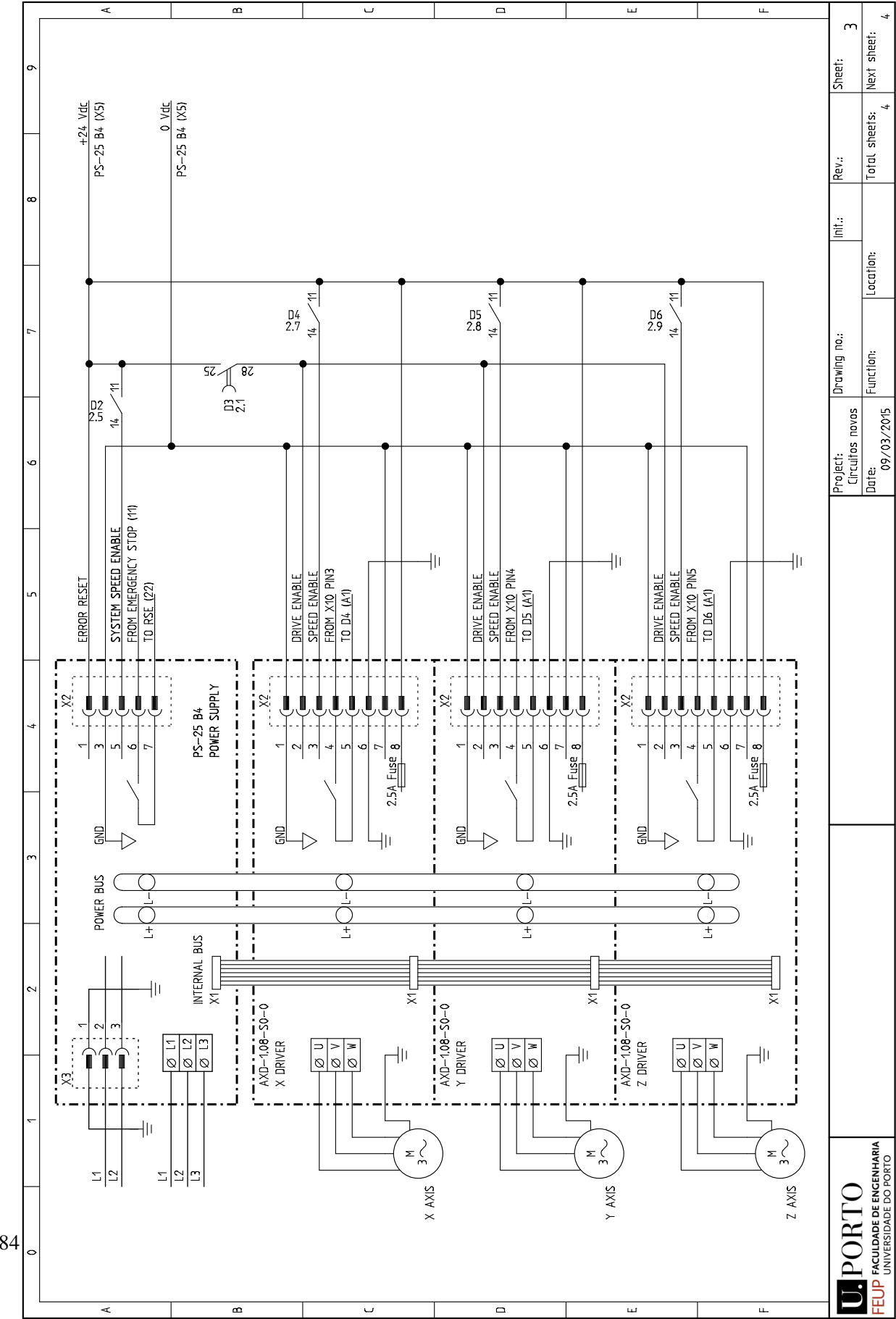
A.2 Circuito de potência implementado na bancada didática

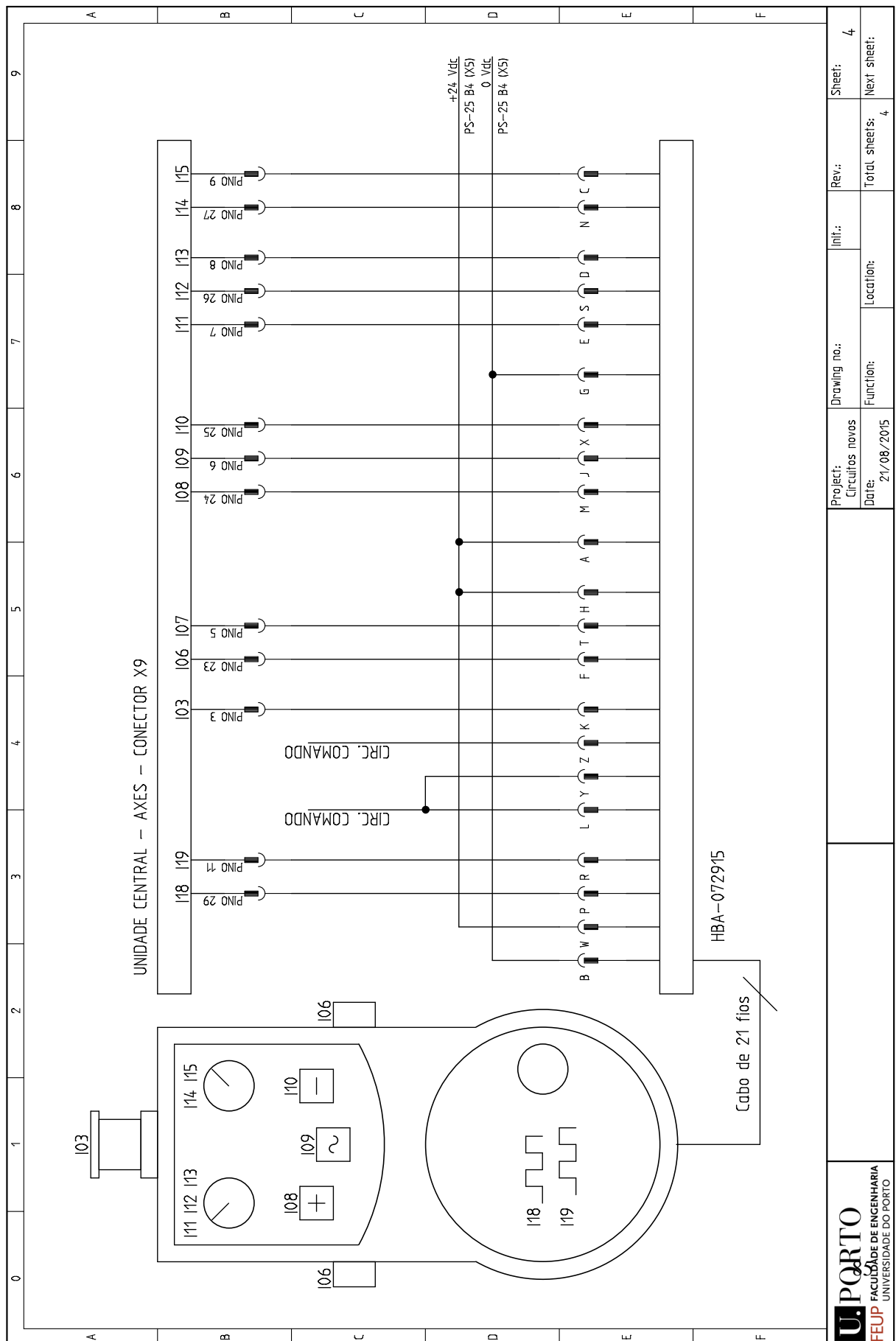


A.3 Circuito de comando implementado na bancada didática



A.4 Ligações entre módulos da bancada didática





A.6 Explicação da lógica implementada nos circuitos

Circuito de potência

- A alimentação trifásica à bancada didática é estabelecida através do seletor denominado “ISOLATOR SWITCH”.
- É feita a monitorização das três fases pelo relé Q1. Este permite detetar a ausência de uma das fases, ordem de ligação incorreta ou assimetria.
- Dispõe-se de um interruptor diferencial de forma a abrir o circuito de potência caso sejam detetadas correntes de fuga (neste caso superiores a 300 mA).
- Na face frontal da bancada didática dispõe-se de três sinalizadores luminosos que indicam a presença de cada uma das fases L1, L2 e L3, à saída do interruptor diferencial.
- Posteriormente a esta secção do circuito de potência, a fase L1 é utilizada para fornecer energia elétrica à unidade central, *display* e travão do terceiro servomotor.
- Ligado ao contactor dispõe-se de um relé térmico Q2 de forma a proteger os componentes contra sobrecargas de corrente.

Circuito de comando

- O contacto acionado por chave "POWER", liga a alimentação do circuito de comando.
- O contacto acionado por chave "BYPASS", permite ignorar o sinal dos fins de curso (caso um fim de curso seja excedido e seja necessário movimentar o respetivo eixo).
- O acionamento do relé D1 está dependente do relé de falta de fase (Q1), do relé térmico (Q2), do botão de emergência do volante manual, do botão de emergência do painel frontal do CNC, da ausência de erros na fonte de alimentação (PS-25 B4) e finalmente do relé acionado diretamente pelo CNC. Numa situação normal em Q1 e Q2 existe sinal na entrada do PLC I3. Na mesma situação com a adição dos restantes contactos do ramo existe sinal na entrada I1 do PLC. A ausência de um destes sinais ativa o sinal de emergência no CNC.
- Numa situação de emergência detetada pelo *software*, é cortada a alimentação ao relé RSE (saída do PLC O1).
- No correto acionamento de D1 e ao premir a botoneira monoestável ON, o relé D2 é alimentado. Na alimentação do relé D2, o relé temporizado D3 (TOFF), é alimentado. No correto acionamento do relé D3 é alimentado o contactor K1. Na alimentação de K1, o contacto NO do mesmo ligado em paralelo com a botoneira ON, permite que o ramo se mantenha com tensão ao largar essa mesma botoneira.
- O acionamento de D2 também envia um sinal para a fonte de alimentação que ativa o bus de potência (caso não exista impedimento originado da comunicação com os drivers).

A.7 Listagem de componentes

Elementos do CNC Fagor 8055M			
Fabricante	Referência	Qtd.	Descrição
Fagor	CPU 8055/AB-M	1	Módulo CPU da UC
Fagor	AXES 8055	1	Módulo dos eixos da UC
Fagor	HD 8055-E	1	Módulo disco rígido c\ <i>ethernet</i> da UC
Fagor	PSB3-8055	1	Chassis e fonte de alimentação da UC
Fagor	MEM.KEY CARD 55/BC	1	Cartão de memória de 4MB da UC
Fagor	HBA-072915	1	Volante eletrônico
Fagor	NMON-55-11-LCD	1	Display do CNC
Fagor	OP-55MCO/TCO	1	Teclado do CNC
Elementos do Fagor <i>Digital Drive System</i>			
Fabricante	Referência	Qtd.	Descrição
Fagor	AXD-1.08-S0-0	3	Módulo driver de servomotor
Fagor	PS-25 B4	1	Módulo fonte de alimentação
Fagor	FXM31.40A.E1.000	2	Servomotor trifásico síncrono
Fagor	FXM31.40A.E1.010	1	Servomotor trifásico síncrono c\ travão
Fagor	EMK 3040	1	Filtro trifásico do circuito de potência
Elementos do circuito de potência			
Fabricante	Referência	Qtd.	Descrição
Telemecanique	57M9	1	Interruptor seccionador
Telemecanique	RM84873311	1	Relé monitor de fases
Merlin Gerin	IDa 16964	1	Interruptor diferencial
Telemecanique	ZBV-M3	1	Sinalizador luminoso verde
Telemecanique	ZBV-M4	1	Sinalizador luminoso vermelho
Telemecanique	ZBV-M5	1	Sinalizador luminoso amarelo
Telemecanique	LP1-D5011	1	Contactador trifásico
Telemecanique	LR2-D3359	1	Relé térmico
Telemecanique	GK1-EH	1	Porta-fusíveis
Bussmann	FWP-40A14FI	3	Fusíveis de alta velocidade (40A)
Telemecanique	ABL7RE2402	1	Fonte de alimentação do travão do servomotor
Elementos do circuito de comando			
Fabricante	Referência	Qtd.	Descrição
Telemecanique	RXL 4A06B1BD	7	Relé com 4 contactos inversores
Omron	G2R-1-S	1	Relé com 1 contacto inversor
Omron	G2R-1-SNDI	1	Relé com 1 contacto inversor
Telemecanique	RE7RL13BU	1	Relé temporizador na desativação
Schneider Electric	XS512B1NAM12	4	Sensor de proximidade indutivo NO NPN

Anexo B

Programas do PLC

B.1 Programa para verificar o funcionamento básico do sistema

CY1

```
;Reset das variáveis de estado significativas  
( ) = RES SERV010N = RES SERV020N = RES SERV030N  
( ) = RES SPENA1 = RES SPENA2 = RES SPENA3  
( ) = RES DRENA1 = RES DRENA2 = RES DRENA3  
END
```

PRG

```
;Ativação dos Driver e Speed Enables no circuito de comando  
( ) = 03 = 05 = 07  
;Ativação dos servomotores ao nível do CNC  
( ) = SERV010N = SERV020N = SERV030N  
;Ativação dos Speed Enables ao nível do PLC  
( ) = SPENA1 = SPENA2 = SPENA3  
;Ativação dos Driver Enables ao nível do PLC  
( ) = DRENA1 = DRENA2 = DRENA3  
  
;Permissão para executar programas de CN  
( ) = /STOP  
;Permissão para mover os eixos  
( ) = /FEEDHOL  
;Permissão para executar o próximo bloco do programa de CN  
( ) = /XFERINH  
;Atuação do botão de início de execução de programa de CN provoca o início do mesmo  
START = CYSTART  
END
```

B.2 Excerto de programa que interpreta os sinais do volante manual

```
DEF HDWON M600
DEF JOGON M601
DEF XSEL M602
DEF YSEL M603
DEF ZSEL M604
```

PRG

(...)

I6 AND (I14 OR I15) = HDWON

**I6 AND NOT I14 AND NOT I15 AND (SELECT3 AND NOT SELECT2 AND NOT SELECT1 AND NOT
SELECT0) = JOGON**

NOT I13 AND NOT I12 AND NOT I11 = XSEL

NOT I13 AND NOT I12 AND I11 = YSEL

NOT I13 AND I12 AND I11 = ZSEL

() = MOV 0 R60

HDWON AND XSEL = MOV 1 R60

HDWON AND YSEL = MOV 8 R60

HDWON AND ZSEL = MOV 64 R60

I15 AND I14 = RL1 R60 1 R60

I15 AND NOT I14 = RL1 R60 2 R60

() = OR R60 \$40000000 R60

DFU HDWON OR CPS R60 NE R61 = MOV R60 R61 = CNCWR(R61,HBEVAR,M201)

DFD HDWON = MOV 0 R61 = CNCWR(R61,HBEVAR,M201)

JOGON AND I8 AND XSEL = AXIS+1

JOGON AND I8 AND YSEL = AXIS+2

JOGON AND I8 AND ZSEL = AXIS+3

JOGON AND I10 AND XSEL = AXIS-1

JOGON AND I10 AND YSEL = AXIS-2

JOGON AND I10 AND ZSEL = AXIS-3

JOGON AND DFU I9 = CPL MANRAPID

(...)

END

B.3 Excerto de programa utilizado nos teste de travagem

PRG

(...)

;Este valor corresponde à variável do CNC ORGX54 (Offset do zero do eixo X)

() = **MOV** 2073949 R40

;É lida a posição do eixo X e armazenada no registo 41

() = **CNCRD**(POSX,R41,M100)

;É somado o offset à posição virtual do eixo de forma a obter a posição real

() = **ADS** R40 R41 R42

;Se a posição real for maior ou igual a 200 mm, TCLED2=1 e o LED 2 liga

CPS R42 **GE** 2000000 = TCLED2

;É feito o mesmo procedimento para o eixo Y

() = **MOV** 1754280 R50

() = **CNCRD**(POSY,R51,M101)

() = **ADS** R50 R51 R52

CPS R52 **GE** 2000000 = TCLED4

;A transição ascendente do botão 01 alterna TCLED1 e o respetivo LED

DFU B28R561 = **CPL** TCLED1

(...)

;Para travagem por atrito:

;() = DRENA1 = DRENA2 = DRENA3

DFU TCLED2 **OR** **DFU** TCLED4 = **RES** DRENA1 = **RES** DRENA2 = **RES** DRENA3

TCLED1 = **SET** DRENA1 = **SET** DRENA2 = **SET** DRENA3

;Para travagem de emergência:

;() = SPENA1 = SPENA2 = SPENA3

DFU TCLED2 **OR** **DFU** TCLED4 = **RES** SPENA1 = **RES** SPENA2 = **RES** SPENA3

TCLED1 = **SET** SPENA1 = **SET** SPENA2 = **SET** SPENA3

(...)

END

B.4 Programa final implementado

```

;Declaração de variáveis utilizadas no funcionamento do volante eletrónico
DEF HDWON M600
DEF JOGON M601
DEF XSEL M602
DEF YSEL M603
DEF ZSEL M604

CY1
;Reset de todos os recursos do PLC
() = ERA 01 512 = ERA C1 256 = ERA T1 256 = ERA R1 256 = ERA M1 2000
() = ERA M4000 4127 = ERA M4500 4563 = ERA M4700 4955
END

PRG
REA
;Permissão para executar programas de CN
() = /STOP
;Permissão para mover os eixos
() = /FEEDHOL
;Permissão para executar o próximo bloco do programa de CN
() = /XFERINH
;Atuação do botão de início de execução de programa de CN provoca o início do mesmo
START = CYSTART
;Ausência de emergências vindas do circuito de comando, a inexistência de uma
;situação de emergência à 5 segundos, inexistência de alarme ao nível do CNC e
;resultados normais dos testes realizados pelo CNC no arranque ativam uma memória
;que sinaliza a ausência de emergência.
I1 AND I3 AND NOT T2 AND /ALARM AND CNCREADY = /EMERGEN
;Na deteção de emergência iniciam-se os temporizadores que governam os Drivers
;Enable e o tempo mínimo necessário ao reativo do sistema.
DFD /EMERGEN = TG1 1 500 = TG1 2 5000
;Malha de posição fechada, ou seja, existe feedback
NOT LOPEN = SERV01ON = SERV02ON = SERV03ON
;Na ausência de emergência, os Speed Enables ao nível do circuito de comando e PLC
;e o Driver Enables ao nível do circuito de comando encontram-se ativos.
/EMERGEN = SPENA1 = SPENA2 = SPENA3
/EMERGEN = 01 = 03 = 05 = 07

```

```

;Na ausência de emergência ou durante a contagem do temporizador T1, os Driver
;Enables ao nível do PLC encontram-se ativos.
/EMERGEN OR T1 = DRENA1 = DRENA2 = DRENA3
;----- Start Handwheel -----
I6 AND (I14 OR I15) = HDWON
I6 AND NOT I14 AND NOT I15 AND (SELECT3 AND NOT SELECT2 AND NOT SELECT1 AND NOT
    SELECT0) = JOGON
NOT I13 AND NOT I12 AND NOT I11 = XSEL
NOT I13 AND NOT I12 AND I11 = YSEL
NOT I13 AND I12 AND I11 = ZSEL
() = MOV 0 R60
HDWON AND XSEL = MOV 1 R60
HDWON AND YSEL = MOV 8 R60
HDWON AND ZSEL = MOV 64 R60
I15 AND I14 = RL1 R60 1 R60
I15 AND NOT I14 = RL1 R60 2 R60
()= OR R60 $40000000 R60
DFU HDWON OR CPS R60 NE R61 = MOV R60 R61 = CNCWR(R61,HBEVAR,M201)
DFD HDWON = MOV 0 R61 = CNCWR(R61,HBEVAR,M201)
JOGON AND I8 AND XSEL = AXIS+1
JOGON AND I8 AND YSEL = AXIS+2
JOGON AND I8 AND ZSEL = AXIS+3
JOGON AND DFU I9 = CPL MANRAPID
JOGON AND I10 AND XSEL = AXIS-1
JOGON AND I10 AND YSEL = AXIS-2
JOGON AND I10 AND ZSEL = AXIS-3
;----- End Handwheel -----
END

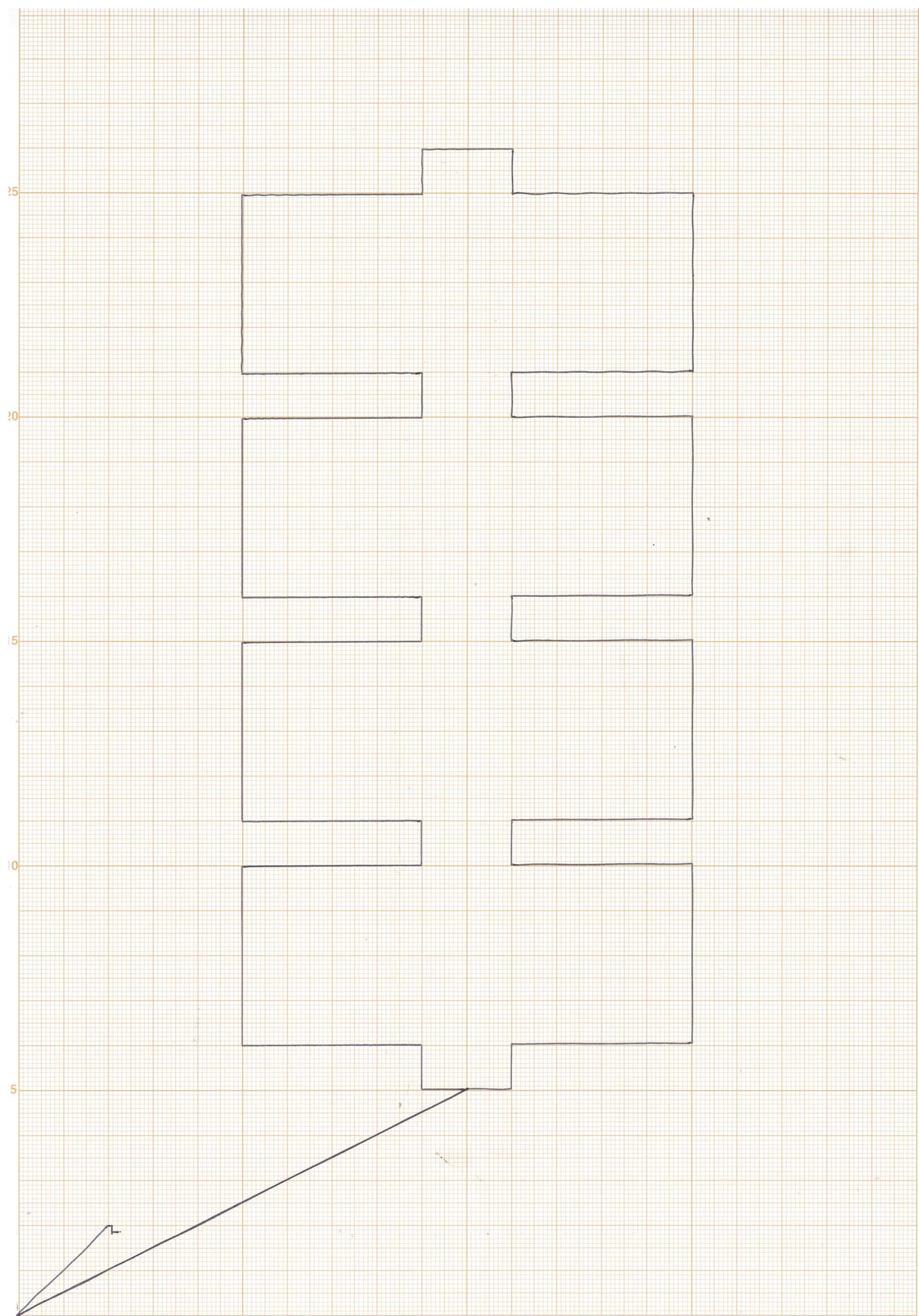
```


Anexo C

Programas de comando numérico

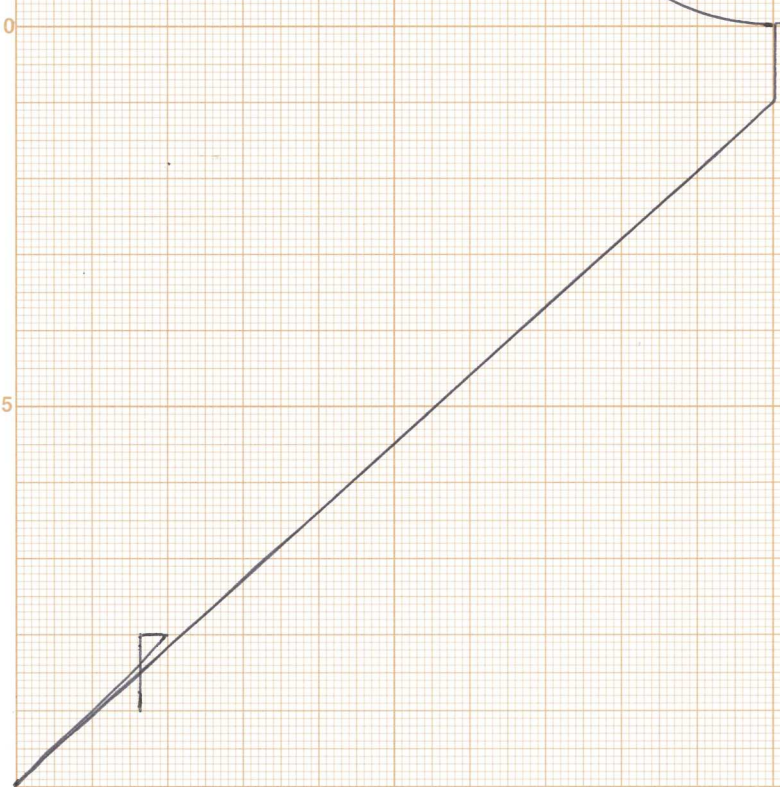
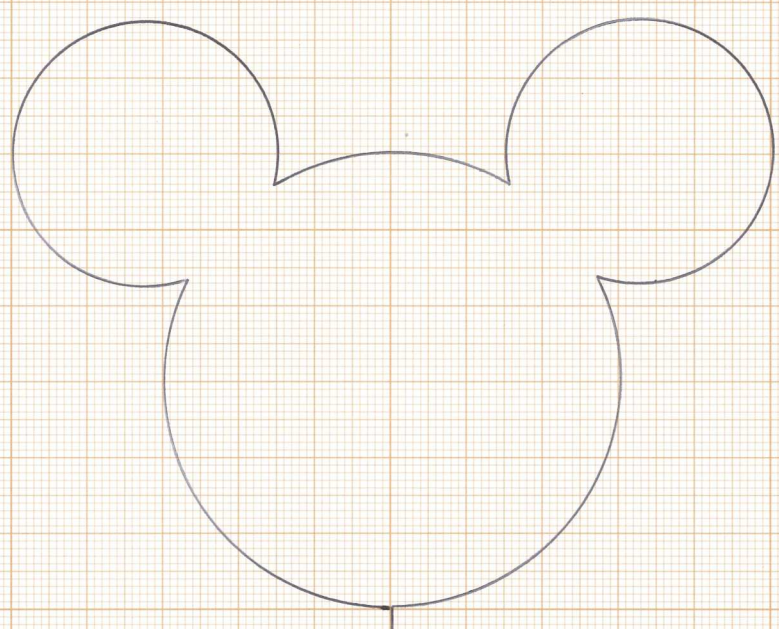
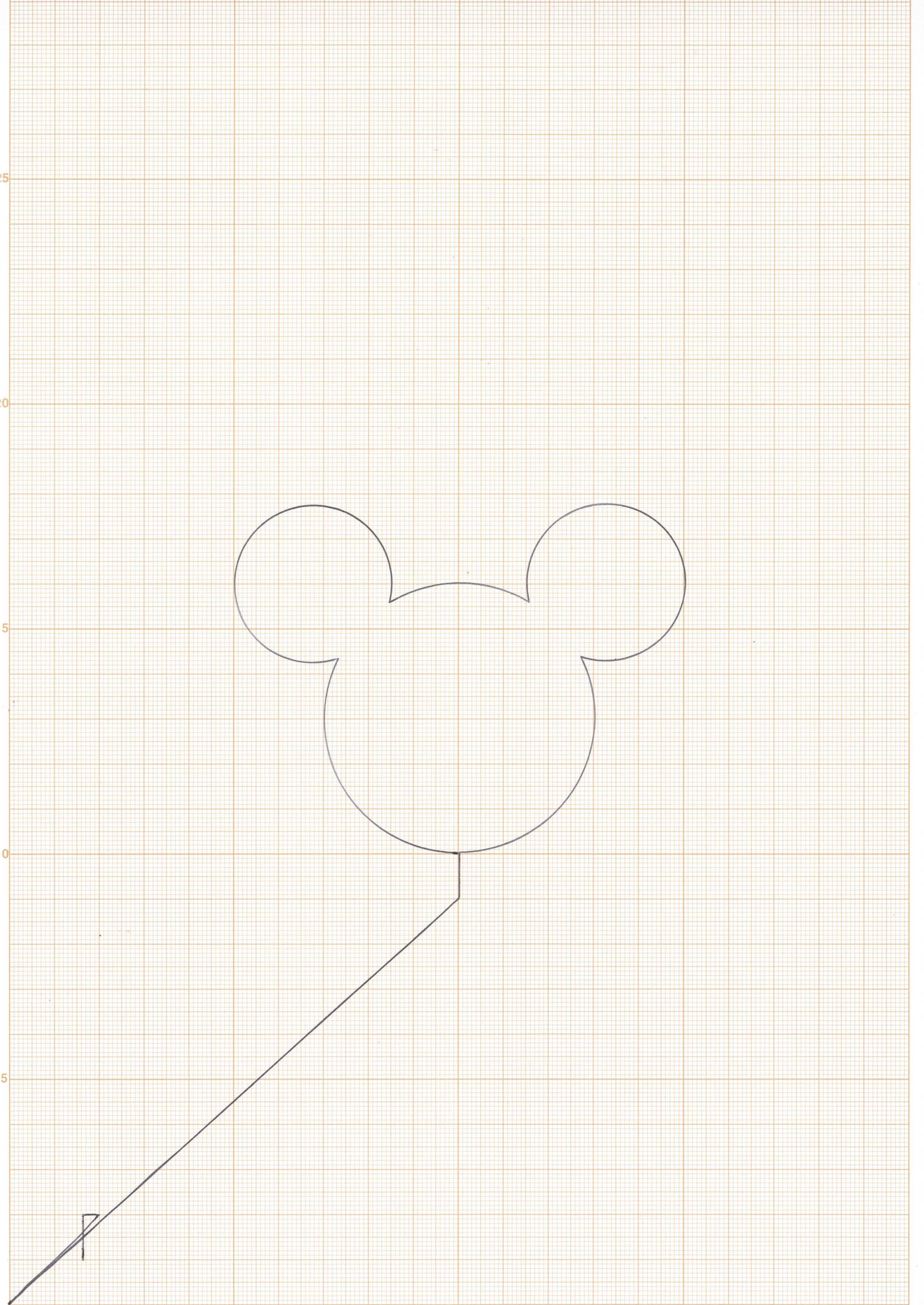
C.1 Interpolações lineares com variação da velocidade

```
N10 G17 G71 G90 ;
N20 G00 X0 Y0 ;
N30 X100 Y50 ;
N40 G01 X90 F100 ;
N50 Y60 ;
N60 X50 ;
N70 Y100 ;
N80 X90 ;
N90 Y110 F250 ;
N100 X50 ;
N110 Y150 ;
N120 X90 ;
N130 Y160 F500 ;
N140 X50 ;
N150 Y200 ;
N160 X90 ;
N170 Y210 F1000 ;
N180 X50 ;
N190 Y250 ;
N200 X90 ;
N210 Y260 ;
N220 X100 ;
N230 X110 F2500 ;
N240 Y250 ;
N250 X150 ;
N260 Y210 ;
N270 X110 ;
N280 Y200 F5000 ;
N290 X150 ;
N300 Y160 ;
N310 X110 ;
N320 Y150 F7500 ;
N330 X150 ;
N340 Y110 ;
N350 X110 ;
N360 Y100 F10000 ;
N370 X150 ;
N380 Y60 ;
N390 X110 ;
N400 Y50 ;
N410 X100 ;
N420 G00 X0 Y0 ;
N430 M30 ;
```



C.2 Interpolações circulares

```
N10 G17 G71 G90 ;  
N20 G00 X0 Y0 ;  
N30 X100 Y90 ;  
N40 G01 Y100 F100 ;  
N50 G02 X73.183 Y143.449 R30 ;  
N60 X84.453 Y155.657 R-17.5 ;  
N70 X115.547 Y155.654 R30 ;  
N80 X126.817 Y143.449 R-17.5 ;  
N90 X100 Y100 R30 ;  
N100 G01 X100 Y90 ;  
N110 G00 X0 Y0 ;  
N120 M30 ;
```

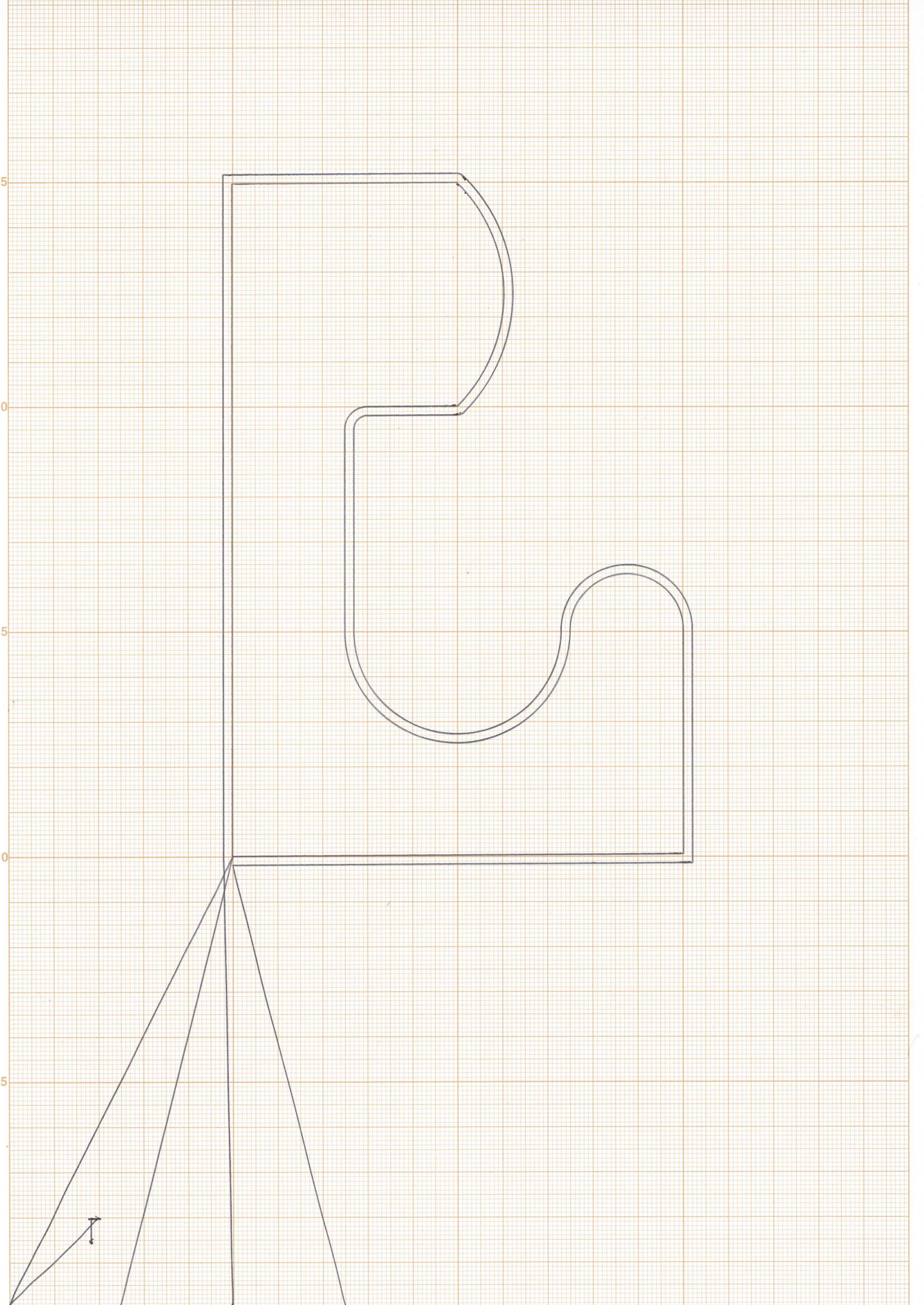


C.3 Raios e chanfros automáticos

```
N10 G17 G71 G90 ;  
N20 G00 X0 Y0 ;  
N30 X100 Y90 ;  
N40 G01 Y100 F100 ;  
N50 X100 Y100 ;  
N60 G36 R5 X75 ;  
N70 G36 R5 Y125 ;  
N80 G36 R5 X50 ;  
N90 G36 R5 Y175 ;  
N100 G36 R5 X75 ;  
N110 G36 R5 Y200 ;  
N120 G39 R5 X125 ;  
N130 G39 R5 Y175 ;  
N140 G39 R5 X150 ;  
N150 G39 R5 Y125 ;  
N160 G39 R5 X125 ;  
N170 G39 R5 Y100 ;  
N180 X100 ;  
N190 Y90 ;  
N200 G00 X0 Y0 ;  
N210 M30 ;
```


C.4 Compensação de raio da ferramenta

```
N10 G17 G71 G90 ;
N15 G00 X0 Y0 ;
N20 X50 Y100 ;
N25 G01 Y250 F250 ;
N30 X100 ;
N35 G02 Y200 I-25 J-25 ;
N40 G01 X80 ;
N45 G03 X75 Y195 I0 J-5 ;
N50 G01 Y150 ;
N55 G03 X125 I25 J0 ;
N60 G02 X150 I12.5 J0 ;
N65 G01 Y100 ;
N70 X50 Y100 ;
N75 G00 X25 Y0 ;
N80 X50 ;
N85 T1 D1 M06 ;
N90 G41 Y100 ;
N95 G01 Y250 F250 ;
N100 X100 ;
N105 G02 Y200 I-25 J-25 ;
N110 G01 X80 ;
N115 G03 X75 Y195 I0 J-5 ;
N120 G01 Y150 ;
N125 G03 X125 I25 J0 ;
N130 G02 X150 I12.5 J0 ;
N135 G01 Y100 ;
N140 X50 Y100 ;
N145 G40 G00 X75 Y0 ;
N150 M30 ;
```



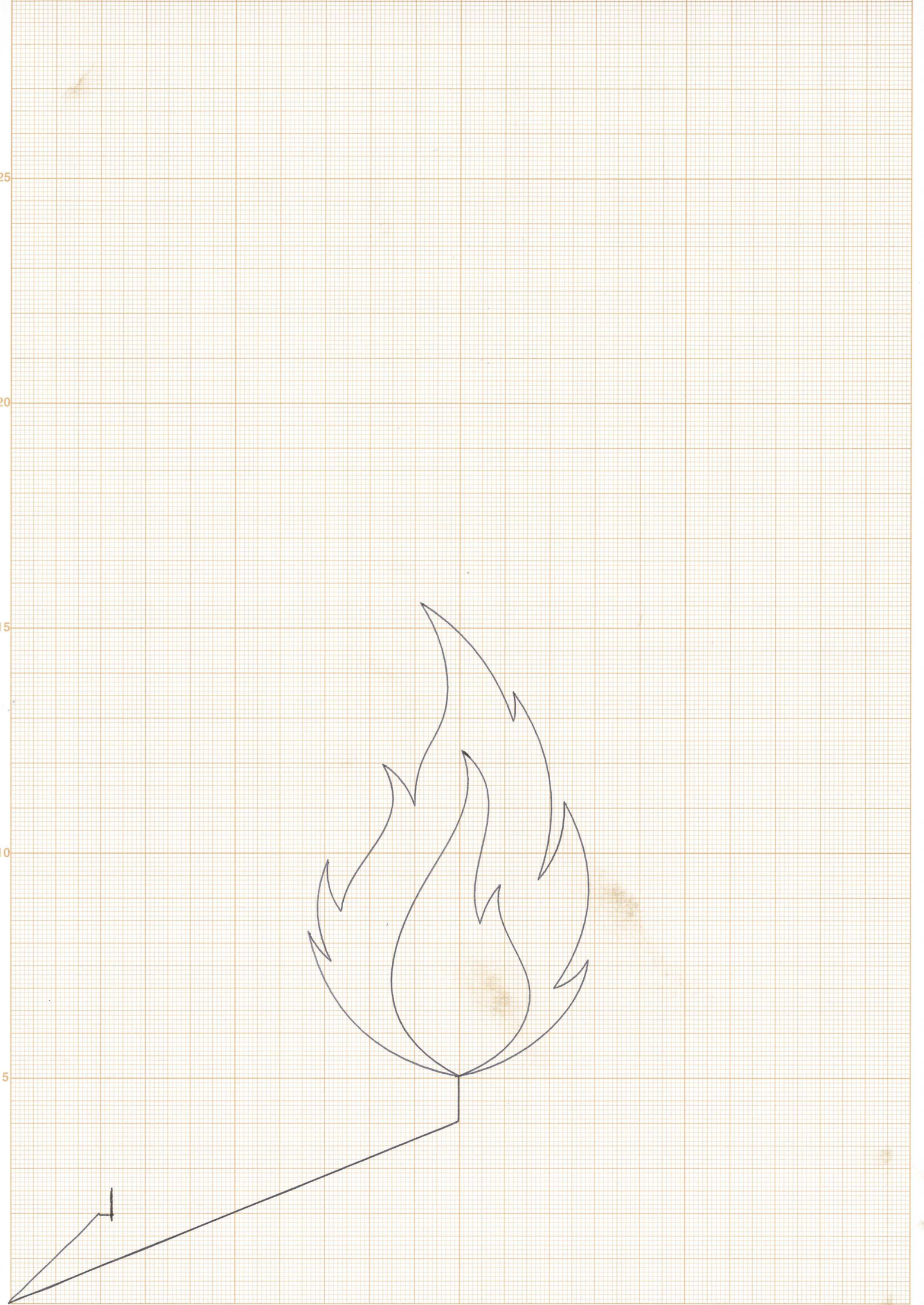
C.5 Exemplo de utilização do look-ahead

```

N00 G17 G71 G90 ;
N10 G51 E0.1 ;
N20 G00 X0 Y0 ;
N30 X100.000 Y40.000 ;
N35 G01 Y50.000 F250 ;
N40 X95.751 Y51.029 ;
N50 X91.775 Y52.333 ;
N60 X88.073 Y53.911 ;
N70 X84.645 Y55.764 ;
N80 X81.489 Y57.893 ;
N90 X78.607 Y60.296 ;
N100 X75.998 Y62.973 ;
N110 X73.847 Y65.669 ;
N120 X71.925 Y68.596 ;
N130 X70.233 Y71.754 ;
N140 X68.771 Y75.143 ;
N150 X67.538 Y78.762 ;
N160 X66.535 Y82.613 ;
N170 X67.652 Y80.421 ;
N180 X69.041 Y78.435 ;
N190 X70.323 Y77.018 ;
N200 X71.773 Y75.729 ;
N210 X70.603 Y78.230 ;
N220 X69.708 Y80.742 ;
N230 X69.088 Y83.265 ;
N240 X68.743 Y85.799 ;
N250 X68.672 Y88.345 ;
N260 X68.870 Y90.855 ;
N270 X69.334 Y93.377 ;
N280 X70.062 Y95.908 ;
N290 X71.055 Y98.451 ;
N300 X70.848 Y96.069 ;
N310 X70.982 Y93.780 ;
N320 X71.457 Y91.584 ;
N330 X72.070 Y89.924 ;
N340 X72.892 Y88.321 ;
N350 X73.926 Y86.776 ;
N360 X74.240 Y88.753 ;
N370 X74.802 Y90.644 ;
N380 X75.569 Y92.464 ;
N390 X76.498 Y94.224 ;
N400 X77.548 Y95.938 ;
N410 X82.030 Y102.476 ;
N420 X83.167 Y104.351 ;
N430 X84.136 Y106.267 ;
N440 X84.877 Y108.243 ;
N450 X85.333 Y110.295 ;
N460 X85.452 Y112.006 ;
N470 X85.321 Y113.787 ;
N480 X84.909 Y115.647 ;
N490 X84.186 Y117.597 ;
N500 X83.122 Y119.646 ;
N510 X84.979 Y118.246 ;
N520 X86.599 Y116.673 ;
N530 X87.983 Y114.927 ;
N540 X88.904 Y113.434 ;
N550 X89.679 Y111.833 ;
N560 X90.308 Y110.125 ;
N570 X90.320 Y112.409 ;
N580 X90.478 Y114.474 ;
N590 X90.772 Y116.353 ;
N600 X91.188 Y118.079 ;
N610 X91.714 Y119.682 ;
N620 X92.548 Y121.652 ;
N630 X93.519 Y123.540 ;
N640 X94.551 Y125.401 ;
N650 X95.602 Y127.414 ;
N660 X96.465 Y129.497 ;
N670 X97.072 Y131.673 ;
N680 X97.434 Y133.923 ;
N690 X97.569 Y136.223 ;
N700 X97.438 Y139.197 ;
N710 X97.000 Y142.175 ;
N720 X96.293 Y145.110 ;
N730 X95.351 Y147.957 ;
N740 X94.211 Y150.672 ;
N750 X92.909 Y153.210 ;
N760 X91.480 Y155.524 ;
N770 X94.762 Y153.261 ;
N780 X97.801 Y150.814 ;
N790 X100.599 Y148.182 ;
N800 X103.154 Y145.366 ;
N810 X105.467 Y142.365 ;
N820 X107.503 Y139.237 ;
N830 X109.305 Y135.932 ;
N840 X110.873 Y132.448 ;
N850 X112.207 Y128.787 ;
N860 X112.518 Y130.678 ;
N870 X112.560 Y132.567 ;
N880 X112.405 Y134.050 ;
N890 X112.085 Y135.532 ;
N900 X114.419 Y131.870 ;
N910 X116.379 Y128.153 ;
N920 X117.965 Y124.382 ;
N930 X119.176 Y120.557 ;
N940 X120.012 Y116.677 ;
N950 X120.473 Y112.743 ;
N960 X120.566 Y108.984 ;
N970 X120.325 Y105.176 ;
N980 X119.751 Y101.320 ;
N990 X118.844 Y97.416 ;
N1000 X117.604 Y93.464 ;
N1010 X119.244 Y95.633 ;
N1020 X120.613 Y97.896 ;
N1030 X121.710 Y100.252 ;
N1040 X122.537 Y102.701 ;
N1050 X123.111 Y105.366 ;
N1060 X123.389 Y108.133 ;
N1070 X123.368 Y111.002 ;
N1080 X125.111 Y107.527 ;
N1090 X126.517 Y104.075 ;

```

N1100 X127.587 Y100.647 ;	N1470 X86.944 Y62.380 ;	N1840 X103.600 Y92.473 ;
N1110 X128.321 Y97.243 ;	N1480 X86.147 Y64.321 ;	N1850 X103.492 Y90.276 ;
N1120 X128.719 Y93.863 ;	N1490 X85.571 Y66.298 ;	N1860 X103.611 Y88.087 ;
N1130 X128.780 Y90.507 ;	N1500 X85.135 Y68.857 ;	N1870 X104.005 Y85.909 ;
N1140 X128.505 Y87.175 ;	N1510 X85.011 Y71.457 ;	N1880 X104.726 Y83.746 ;
N1150 X127.958 Y84.141 ;	N1520 X85.171 Y74.090 ;	N1890 X105.208 Y85.581 ;
N1160 X127.129 Y81.128 ;	N1530 X85.591 Y76.744 ;	N1900 X105.855 Y87.331 ;
N1170 X126.017 Y78.135 ;	N1540 X86.243 Y79.413 ;	N1910 X106.665 Y88.996 ;
N1180 X124.623 Y75.162 ;	N1550 X87.102 Y82.087 ;	N1920 X107.831 Y90.848 ;
N1190 X122.946 Y72.209 ;	N1560 X88.346 Y85.232 ;	N1930 X109.226 Y92.582 ;
N1200 X120.987 Y69.276 ;	N1570 X89.800 Y88.356 ;	N1940 X108.826 Y90.726 ;
N1210 X122.818 Y69.990 ;	N1580 X91.421 Y91.445 ;	N1950 X108.736 Y88.905 ;
N1220 X124.468 Y70.929 ;	N1590 X93.166 Y94.484 ;	N1960 X108.910 Y87.116 ;
N1230 X125.936 Y72.093 ;	N1600 X96.440 Y99.897 ;	N1970 X109.305 Y85.356 ;
N1240 X126.962 Y73.166 ;	N1610 X97.985 Y102.582 ;	N1980 X109.877 Y83.621 ;
N1250 X127.875 Y74.378 ;	N1620 X99.377 Y105.277 ;	N1990 X110.583 Y81.909 ;
N1260 X128.676 Y75.729 ;	N1630 X100.547 Y107.998 ;	N2000 X111.377 Y80.216 ;
N1270 X128.351 Y73.522 ;	N1640 X101.208 Y109.967 ;	N2010 X113.330 Y76.324 ;
N1280 X127.703 Y71.274 ;	N1650 X101.695 Y111.966 ;	N2020 X114.224 Y74.398 ;
N1290 X126.750 Y69.009 ;	N1660 X101.982 Y113.999 ;	N2030 X114.970 Y72.479 ;
N1300 X125.509 Y66.753 ;	N1670 X102.045 Y116.074 ;	N2040 X115.499 Y70.562 ;
N1310 X123.996 Y64.530 ;	N1680 X101.858 Y118.196 ;	N2050 X115.756 Y68.646 ;
N1320 X122.228 Y62.366 ;	N1690 X101.397 Y120.373 ;	N2060 X115.705 Y66.361 ;
N1330 X120.223 Y60.285 ;	N1700 X100.635 Y122.610 ;	N2070 X115.275 Y64.113 ;
N1340 X117.996 Y58.314 ;	N1710 X102.220 Y121.126 ;	N2080 X114.482 Y61.923 ;
N1350 X115.444 Y56.392 ;	N1720 X103.525 Y119.620 ;	N2090 X113.340 Y59.811 ;
N1360 X112.688 Y54.647 ;	N1730 X104.569 Y118.094 ;	N2100 X111.865 Y57.801 ;
N1370 X109.746 Y53.106 ;	N1740 X105.375 Y116.548 ;	N2110 X110.070 Y55.912 ;
N1380 X106.638 Y51.799 ;	N1750 X105.964 Y114.985 ;	N2120 X107.972 Y54.166 ;
N1390 X103.383 Y50.754 ;	N1760 X106.358 Y113.405 ;	N2130 X105.584 Y52.584 ;
N1400 X100.000 Y50.000 ;	N1770 X106.631 Y111.008 ;	N2140 X102.922 Y51.189 ;
N1410 X97.236 Y51.596 ;	N1780 X106.586 Y108.581 ;	N2150 X100.000 Y50.000 ;
N1420 X94.791 Y53.261 ;	N1790 X106.297 Y106.130 ;	N2155 Y40.000 ;
N1430 X92.654 Y54.990 ;	N1800 X105.836 Y103.660 ;	N2160 G00 X0 Y0 ;
N1440 X90.811 Y56.777 ;	N1810 X105.207 Y100.875 ;	N2170 M30 ;
N1450 X89.248 Y58.620 ;	N1820 X104.556 Y98.078 ;	
N1460 X87.973 Y60.478 ;	N1830 X103.986 Y95.275 ;	



Anexo D

Características de componentes da mesa de posicionamento de dois eixos

D.1 Características do veio do fuso de esferas INA KGS [14]

Rolled Ball Screws

Series KGS

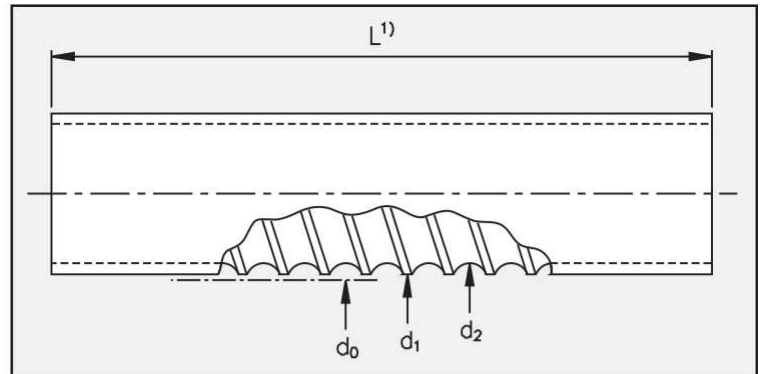


Figure 6 • KGS Rolled Ball Screw

Nominal Pitch Diameter d_0	Designation	Accuracy Class ($\mu\text{m}/300\text{ mm}$)	Dimensions in (mm)						Mass (kg/m)
			d_0	Lead P	d_1 (h_{11})	d_2	Number Of Starts	$L_{\text{max}1}$	
16	KGS 1605	23 / 50	16	5	15.5	12.9	1	5600	1.26
	KGS 1610	23 / 50	16	10	15.4	13.0	2	5600	1.26
20	KGS 2005	23 / 50	20	5	19.5	16.9	1	5600	2.04
	KGS 2020	23 / 50	20	20	19.5	16.9	4	5600	2.07
	KGS 2050	23 / 50	20	50	19.1	16.5	5	5600	2.04
25	KGS 2505	23 / 50	25	5	24.5	21.9	1	5600	3.33
	KGS 2510	23 / 50	25	10	24.5	21.9	1	5600	3.33
	KGS 2520	23 / 50	25	20	24.6	22.0	4	5600	3.33
	KGS 2525	23 / 50	25	25	24.5	22.0	5	5600	3.33
	KGS 2550	23 / 50	25	50	24.5	21.5	5	5600	3.33
32	KGS 3205	23 / 50	32	5	31.5	28.9	1	5600	5.61
	KGS 3210	23 / 50	32	10	32.7	27.3	1	5600	5.60
	KGS 3220	23 / 50	32	20	31.7	27.9	2	5600	5.61
	KGS 3240	23 / 50	32	40	30.9	28.3	4	5600	5.61
40	KGS 4005	23 / 50	40	5	39.5	36.9	1	5600	9.03
	KGS 4010	23 / 50	40	10	39.5	34.1	2	5600	8.33
	KGS 4020	23 / 50	40	20	39.7	35.9	2	5600	9.01
	KGS 4040	23 / 50	40	40	38.9	36.3	4	5600	9.01
50	KGS 5010	50	50	10	49.5	44.1	1	5600	13.48
	KGS 5020	50	50	20	49.5	44.1	2	5600	13.50
63	KGS 6310	50	63	10	62.5	57.1	1	5600	22.04

Notes

1) For 5600mm, delivered length is 6000 mm with both ends soft-annealed over a length of 200 mm.

D.2 Características da porca de esferas INA KGF [26]

Forme S			Forme E										Plan de perçage 1 Forme de flasque B selon DIN 69051										Plan de perçage 2 Forme de flasque B selon DIN 69051										Plan de perçage 3									
Matière: 1.7131 (ESP65) ou 1.3505 (100 Cr 6)																																										
Type			Dimensions en (mm)													Jeu axial maxi (mm)	Nombre de de circuits	Charges de base (kN)																								
Diamètre (mm) Pas (mm)	Forme	Plan de perçage	D ₁ ¹⁾	D ₄	D ₅	D ₆	L ₁	L ₂	L ₆	L ₇	L ₈	L ₉	L ₁₀	Orifice de lubrification C			C ₃ ²⁾	C ₀ = C _{0a}																								
KGF-N 1605 RH-EE	E	3	28	38	5,5	48	8	44	—	12	—	8	6	M6	0,08	3	9,3	13,1																								
KGF-D 1605 RH-EE	E	1	28	38	5,5	48	10	42	—	10	40	10	5	M6	0,08	3	9,3	13,1																								
KGF-D 1610 RH-EE	E	1	28	38	5,5	48	10	55	—	10	40	10	5	M6	0,08	4	15,4	26,5																								
KGF-N 2005 RH-EE	E	3	32	45	7	55	8	44	—	12	—	8	6	M6	0,08	3	10,5	16,6																								
KGF-D 2005 RH-EE	E	1	36	47	6,6	58	10	42	—	10	44	10	5	M6	0,08	3	10,5	16,6																								
KGF-N 2020 RH-EE	S	3	35	50	7	62	4	30	8	10	—	8	5	M6	0,08	4	11,6	18,4																								
KGF-N 2050 RH-EE	S	3	35	50	7	62	10	56	9	10	—	8	5	M6	0,15	5	13,0	24,6																								
KGF-N 2505 RH-EE	E	3	38	50	7	62	8	46	—	14	—	8	7	M6	0,08	3	12,3	22,5																								
KGF-D 2505 RH-EE	E	1	40	51	6,6	62	10	42	—	10	48	10	5	M6	0,08	3	12,3	22,5																								
KGF-D 2510 RH-EE	E	1	40	51	6,6	62	16	55	—	10	48	10	5	M6	0,08	3	13,2	25,3																								
KGF-D 2520 RH-EE	S	1	40	51	6,6	62	4	35	10,5	10	48	8	5	M6	0,15	4	13,0	23,3																								
KGF-D 2525 RH-EE	S	1	40	51	6,6	62	9	35 ⁶⁾	8 ⁶⁾	10	4 ⁶⁾	8	5	M6	0,08	5	16,7 ⁶⁾	32,2 ⁶⁾																								
KGF-D 2550 RH-EE	S	1	40	51	6,6	62	10	58	10	10	48	8	5	M6	0,15	5	15,4	31,7																								
KGF-N 3205 RH-EE	E	3	45	58	7	70	10	59	—	16	—	8	8	M6	0,08	5	21,5	49,3																								
KGF-D 3205 RH-EE	E	1	50	65	9	80	10	55	—	12	62	10	6	M6	0,08	5	21,5	49,3																								
KGF-N 3210 RH-EE	E	3	53	68	7	80	10	73	—	16	—	8	8	M8×1	0,08	3	33,4	54,5																								
KGF-D 3210 RH-EE	E	1	53 ²⁾	65	9	80	16	69	—	12	62	10	6	M8×1	0,08	3	33,4	54,5																								
KGF-D 3220 RH-EE	E	1	53 ²⁾	65	9	80	16	80	—	12	62	10	6	M6	0,08	4	29,7	59,8																								
KGF-N 3240 RH-EE	S	3	53	68	7	80	14	45	7,5	16	—	10	8	M6	0,08	4	14,9	32,4																								
KGF-N 4005 RH-EE	E	3	53	68	7	80	10	59	—	16	—	8	8	M6	0,08	5	23,8	63,1																								
KGF-D 4005 RH-EE	E	2	63	78	9	93	10	57	—	14	70	10	7	M6	0,08	5	23,8	63,1																								
KGF-N 4010 RH-EE	E	3	63	78	9	95	10	73	—	16	—	8	8	M8×1	0,08	3	38,0	69,1																								
KGF-D 4010 RH-EE	E	2	63	78	9	93	16	71	—	14	70	10	7	M8×1	0,08	3	38,0	69,1																								
KGF-D 4020 RH-EE	E	2	63	78	9	93	16	80	—	14	70	10	7	M8×1	0,08	4	33,3	76,1																								
KGF-D 4040 RH-EE	S	2	63	78	9	93	16	85	7,5	14	4 ¹⁾	10	7	M8×1	0,08	8	35,0	101,9																								
KGF-N 5010 RH-EE	E	3	72	90	11	110	10	97	—	18	—	8	9	M8×1	0,08	5	68,7	155,8																								
KGF-D 5010 RH-EE	E	2	75	93	11	110	16	95	—	16	85	10	8	M8×1	0,08	5	68,7	155,8																								
KGF-D 5020 RH-EE	E	2	85 ²⁾	103 ²⁾	11	125	22	95	—	18	95	10	9	M8×1	0,08	4	60,0	136,3																								
KGF-N 6310 RH-EE	E	3	85	105	11	125	10	99	—	20	—	8	10	M8×1	0,08	5	76,0	197,0																								
KGF-D 6310 RH-EE ⁵⁾	E	2	90	108	11	125	16	97	—	18	95	10	9	M8×1	0,08	5	76,0	197,0																								
KGF-D 6320 RH-EE ⁵⁾	E	2	95 ²⁾	115	14	135	25	99	—	20	100	10	10	M8×1	0,08	4	78,4	171,3																								
KGF-N 8010 RH-EE ⁵⁾	E	3	105	125	14	145	10	101	—	22	—	8	11	M8×1	0,08	5	69,0	260,0																								
KGF-D 2005 LH-EE	E	1	36	47	6,6	58	10	42	—	10	44	10	5	M6	0,08	3	10,5	16,6																								

1) D₁ conforme à DIN 690512) D₁ non conforme à DIN 69051

3) Charge de base dynamique selon DIN 69051.

4) Flasque rond

5) Sur demande.

6) Nous consulter

D.3 Características do acoplamento de fole R+W BKL [27]

BKL

WITH CLAMPING HUB

2 - 500 Nm



ABOUT

FEATURES

- easy to mount
- light weight and low moment of inertia
- economical design

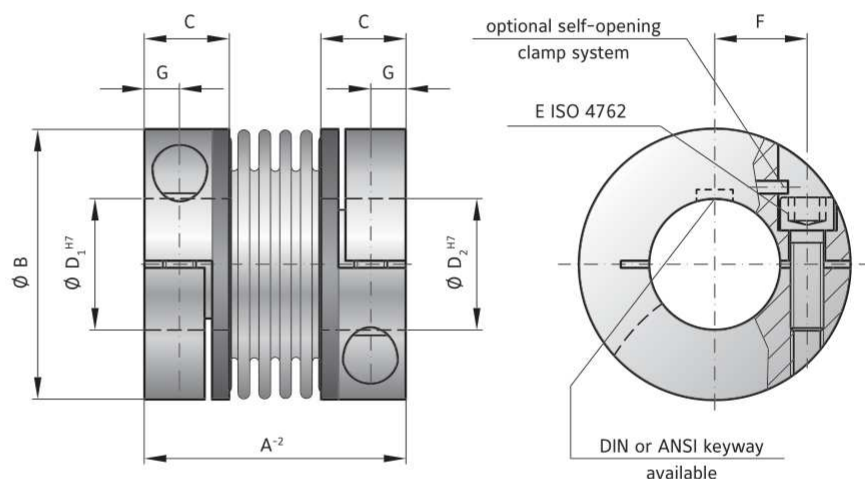
MATERIAL

- **Bellows:** high grade stainless steel
- **Hubs:** see table

DESIGN

Two clamping hubs concentrically mounted to flexible bellows.
Brief overloads of up to 1.5x the rated torque are acceptable.

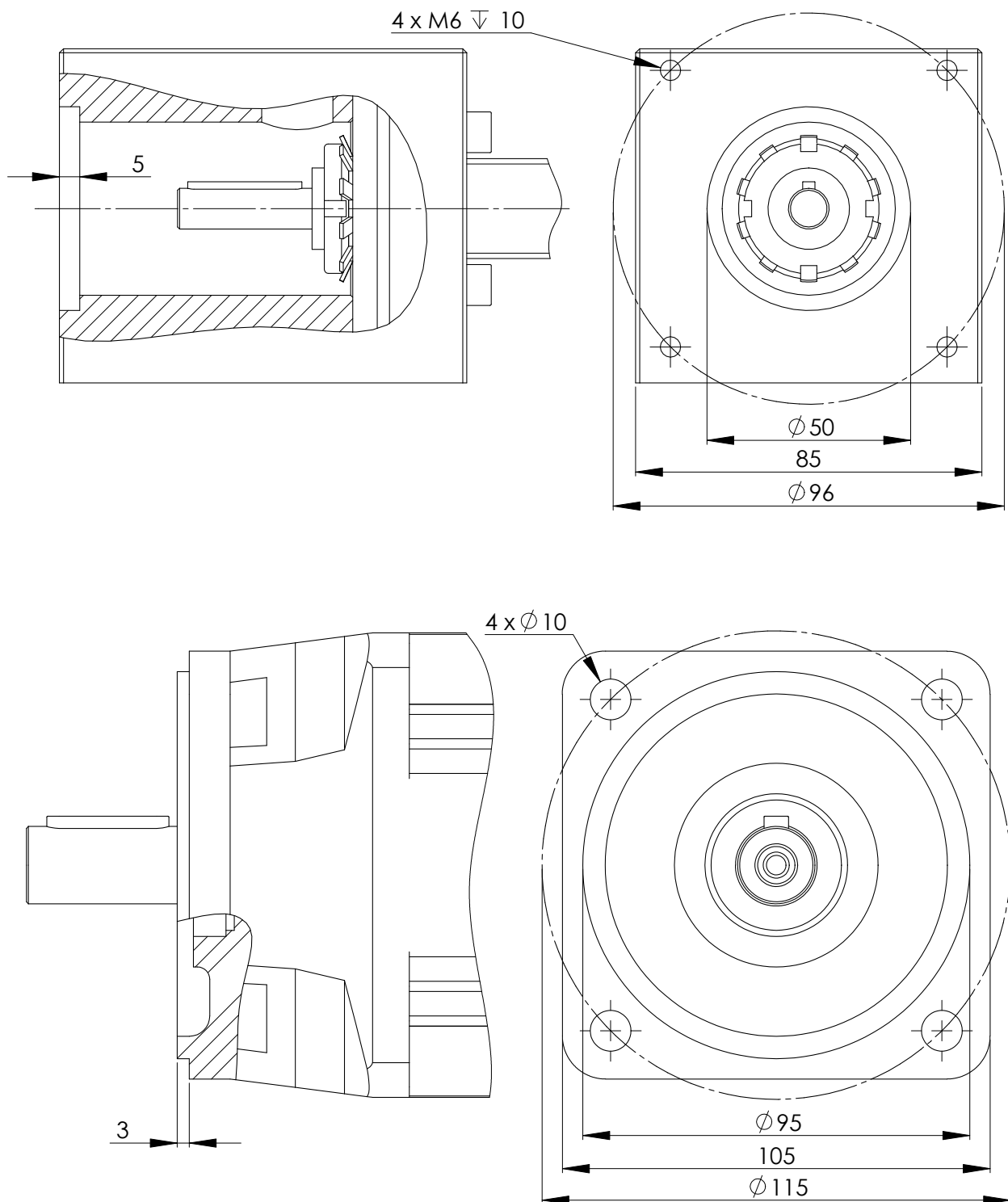
Optional:
self-opening clamp system to open the bore during installation and removal by backing out the clamping screw.



MODEL BKL

SIZE		2	4.5	10	15	30	60	80	150	300	500
Rated torque (Nm)	T_{KN}	2	4.5	10	15	30	60	80	150	300	500
Overall length (mm)	A^{-2}	30	40	44	58	68	79	92	92	109	114
Outside diameter (mm)	B	25	32	40	49	56	66	82	82	110	123
Fit length (mm)	C	10.5	13	13	21.5	26	28	32.5	32.5	41	42.5
Inside diameter possible from $\varnothing$ to $\varnothing$ H7 (mm)	$D_{1/2}$	4-12.7	6-16	6-24	8-28	10-32	14-35	16-42	19-42	24-60	35-62
Fastening screw ISO 4762		M3	M4	M4	M5	M6	M8	M10	M10	M12	M16
Tightening torque of the fastening screw (Nm)	E	2.3	4	4.5	8	15	40	70	85	120	200
Distance between centerlines (mm)	F	8	11	14	17	20	23	27	27	39	41
Distance (mm)	G	4	5	5	6.5	7.5	9.5	11	11	13	17
Moment of inertia (10^{-3} kgm ²)	J_{ges}	0.002	0.007	0.016	0.065	0.12	0.3	0.75	1.8 0.8	7.5 3.1	11.7 4.9
Hub material		AL optional steel	AL optional steel	AL optional steel	AL optional steel	AL optional steel	AL optional steel	AL optional steel	steel optional AL	steel optional AL	steel optional AL
Approximate weight (kg)		0.02	0.05	0.06	0.16	0.25	0.4	0.7	1.7 0.75	3.8 1.6	4.9 2.1
Torsional stiffness (10^3 Nm/rad)	C_T	1.5	7	9	23	31	72	80	141	157	290
Axial $\pm$ (mm)		0.5	1	1	1	1	1.5	2	2	2	2.5
Lateral $\pm$ (mm)	Max. values	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Angular $\pm$ (degree)		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Axial spring stiffness (N/mm)	C_a	8	35	30	30	50	67	44	77	112	72
Lateral spring stiffness (N/mm)	C_r	50	350	320	315	366	679	590	960	2940	1450

D.4 Dimensões das faces de montagem do servomotor FXM31 e do apoio do fuso de esferas (Escala 1:1.5)

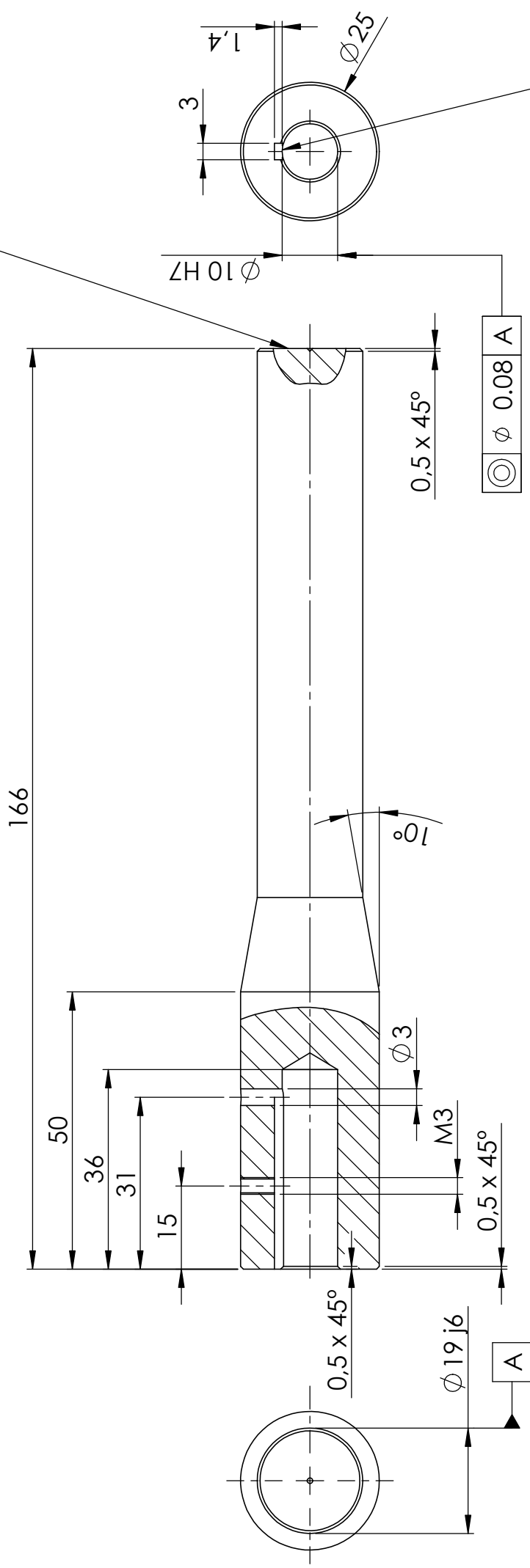


Anexo E

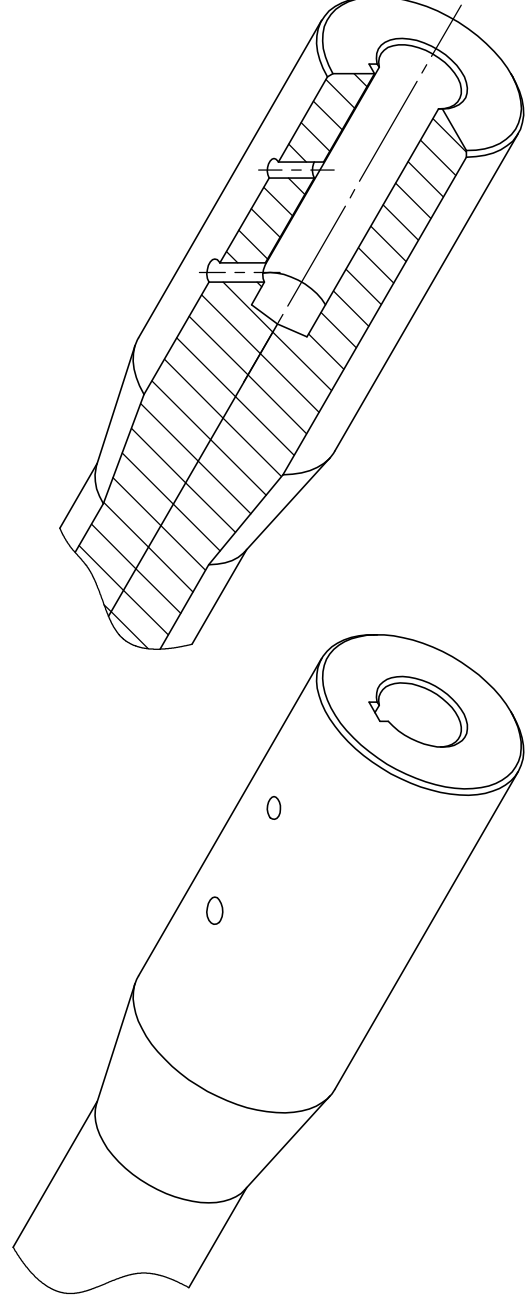
Desenhos técnicos

E.1 Desenho de definição do veio de extensão

Face não funcional, ponto de centragem p/ torneamento possível



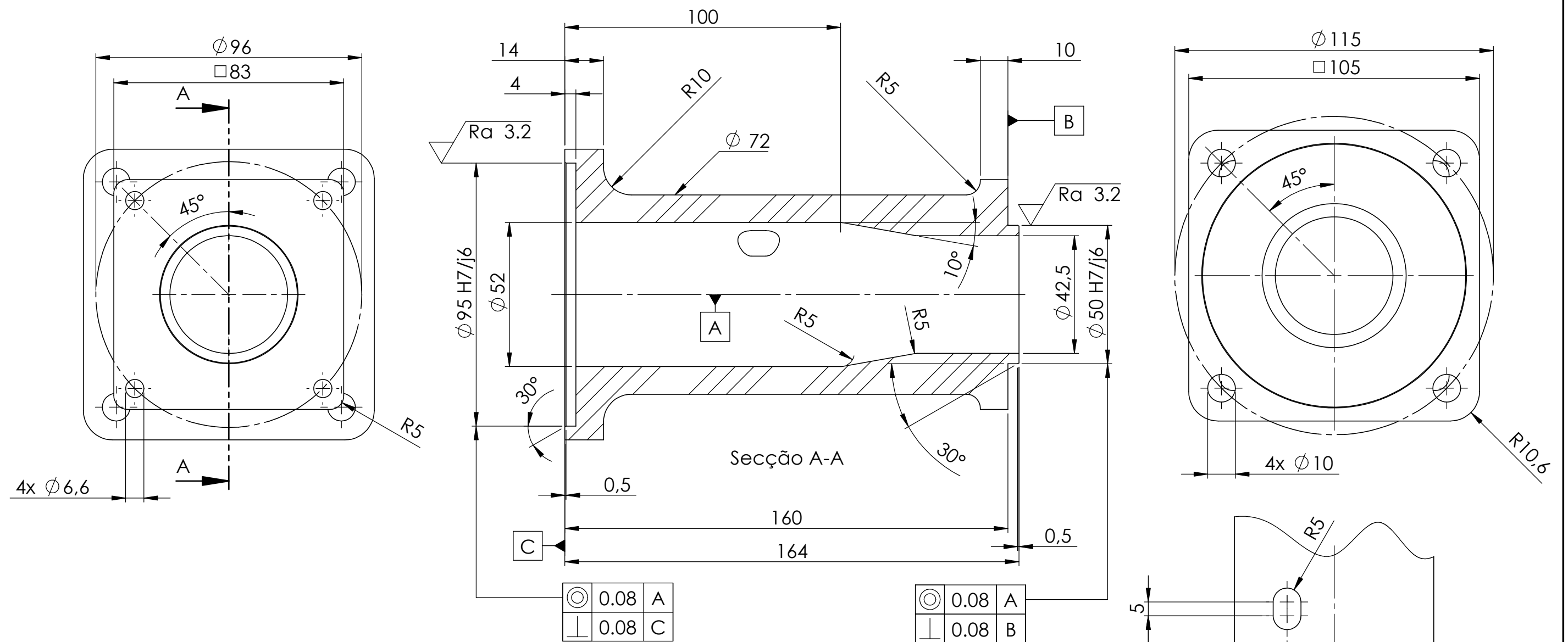
Escatel para chavea DIN 6885 3X3X28



ISO 2768 - m

Extensão e redução de veio		A4
Autor: Diogo Gonçalves	Desenho de definição	
Data: 22 de junho de 2015	Escala: 1:1	
Dissertação 2º Semestre 2014/2015	Página 1 de 1	

E.2 Desenho de definição da luneta de fixação e suporte dos servomotores FXM31



Vistas isométricas do lado da flange do motor
e do mancal respetivamente

ISO 2768 - m

Luneta FXM31		A3
Autor: Diogo Gonçalves	Desenho de definição da luneta	
Data: 12 de junho de 2015	Escala: 1:1.5	
Dissertação 2º Semestre 2014/2015	Página 1 de 1	