

## RESUM

Disseny d'una màquina automàtica per al mecanitzat de plaques no metàl·liques. La màquina consta de l'estructura o bancada, de tres eixos lineals anomenats X, Y i Z, d'una taula de treball o de recolzament de les plaques i d'una protecció. Té unes dimensions aproximades de 3,8 m d'amplada, 3,4 m d'alçària i 1,4 m de fons. S'ha dissenyat de forma vertical per tal que l'usuari desenvolupi les tasques d'una manera ergonòmica i per tant, més còmode i a la vegada ocupi menys espai del taller mecànic.

Els eixos X i Y són accionats amb un servomotor i l'eix Z que és el portador de l'eina, s'acciona amb un actuador lineal. El dispositiu per a foradar és un trepant amb canvi d'eina automàtic, el qual permet realitzar diferents diàmetres de mecanitzat.

S'ha realitzat el disseny mecànic de la màquina amb els plànols corresponents. S'ha modelitzat el sistema per tal de poder-lo estudiar en el camp de la cinemàtica i la dinàmica fent els càlculs justificatius del disseny. També s'ha dissenyat el control de la màquina i la configuració de la xarxa d'interacció de tots els elements.

D'altra banda, s'ha implementat un programa per a AutoCAD que interpreta els plànols de plaques dissenyats en el mateix AutoCAD i genera un arxiu amb les dades necessàries perquè la màquina pugui mecanitzar. El programa llegeix les dimensions de la placa i els forats amb les seves coordenades relatives a la placa i crea una llista. També s'ha creat un sistema de finestres perquè l'usuari pugui introduir les dades corresponents a les propietats de les plaques i, inclús, es pot arribar a crear un dibuix des del propi programa. Finalment, quan ja s'ha finalitzat tot el plànol envia un arxiu amb totes les dades recollides a la màquina, perquè les llegeixi i pugui fer els mecanitzats a la placa.

Per últim, s'ha realitzat un estudi econòmic de la màquina amb l'elaboració del pressupost i l'estudi de viabilitat de la inversió. També s'ha elaborat l'estudi de l'impacte ambiental que suposa la màquina.



**ÍNDEX**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. PRÒLEG.....</b>  | <b>5</b>  |
| 1.1. Origen del projecte .....                                       | 5         |
| 1.2. Motivació .....   | 5         |
| 1.3. Descripció de l'empresa SINERGES i el sistema modular ITEM..... | 6         |
| <b>2. INTRODUCCIÓ.....</b>   | <b>8</b>  |
| 2.1. Objectius del projecte .....                                    | 8         |
| 2.2. Abast del projecte .....  | 8         |
| 2.3. Eines de disseny utilitzades.....                               | 8         |
| <b>3. DISSENY MECÀNIC DE LA MÀQUINA.....</b>                         | <b>9</b>  |
| 3.1. Parts de la màquina.....  | 11        |
| 3.1.1. Estructura .....  | 11        |
| 3.1.2. Taula de treball.....   | 12        |
| 3.1.3. Eix X.....  | 13        |
| 3.1.4. Eix Y.....  | 15        |
| 3.1.5. Eix Z.....  | 18        |
| 3.1.6. Protecció .....   | 20        |
| <b>4. MODELITZACIÓ.....</b>  | <b>21</b> |
| 4.1. Model cinemàtic.....  | 22        |
| 4.2. Model dinàmic .....   | 25        |
| 4.2.1. Eix X.....  | 26        |
| 4.2.2. Eix Y.....  | 27        |
| 4.2.3. Eix Z.....  | 28        |
| 4.2.4. Equació del model dinàmic.....                                | 29        |
| 4.3. Funció de transferència i PID.....                              | 29        |
| <b>5. CÀLCULS I CONSIDERACIONS EN EL DISSENY MECÀNIC.....</b>        | <b>36</b> |
| 5.1. Taula de treball .....  | 36        |
| 5.2. Eix X.....  | 39        |
| 5.3. Eix Y.....  | 43        |
| 5.4. Eix Z .....   | 47        |
| <b>6. CONTROL DE LA MÀQUINA .....</b>                                | <b>49</b> |
| 6.1. Disseny de l'automatisme i control.....                         | 49        |

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| 6.1.1.    | Criteris d'elecció del PLC .....                                 | 50        |
| 6.1.2.    | Paràmetres dels controladors dels eixos .....                    | 52        |
| 6.1.3.    | Resta d'elements de control.....                                 | 54        |
| 6.2.      | Disseny de la xarxa .....  | 56        |
| 6.2.1.    | Configuració dels paràmetres de la xarxa.....                    | 58        |
| 6.3.      | Diagrama de flux .....   | 61        |
| <b>7.</b> | <b>  INTÈRPRET DE PLÀNOLS.....</b>                               | <b>67</b> |
| 7.1.      | Funcionament .....   | 67        |
| 7.2.      | Fitxers generats i de configuració.....                          | 70        |
| 7.3.      | Funcions bàsiques .....  | 71        |
| <b>8.</b> | <b>  ESTUDI ECONÒMIC .....</b>                                   | <b>75</b> |
| 8.1.      | Valoració econòmica del manipulador.....                         | 75        |
| 8.2.      | Estalvi de costos .....  | 76        |
| 8.3.      | Avaluació de la inversió.....                                    | 78        |
| <b>9.</b> | <b>  IMPACTE MEDIAMBIENTAL .....</b>                             | <b>80</b> |
| 9.1.      | Impacte en la fase del projecte i fabricació de la màquina ..... | 80        |
| 9.1.1.    | Consums.....   | 80        |
| 9.1.2.    | Generació de residus.....  | 81        |
| 9.2.      | Impacte amb la màquina en funcionament.....                      | 82        |
| 9.2.1.    | Consums.....   | 82        |
| 9.2.2.    | Generació de residus.....  | 83        |
| 9.2.3.    | Vida útil i final de vida de la màquina .....                    | 83        |
|           | <b>CONCLUSIONS .....</b>   | <b>84</b> |
|           | <b>PROPOSTES DE MILLORES.....</b>                                | <b>85</b> |
|           | <b>AGRAÏMENTS .....</b>  | <b>86</b> |
|           | <b>BIBLIOGRAFIA.....</b>   | <b>87</b> |
|           | <b>ANNEXOS</b>   |           |
|           | Volum I  |           |
|           | Annex A. Plànols   |           |
|           | Volum II   |           |
|           | Annex B. Programa AutoLISP                                       |           |
|           | Annex C. Pressupost i viabilitat econòmica                       |           |
|           | Annex D. Catàlegs i informació tècnica                           |           |

## **1. PRÒLEG**

### **1.1. Origen del projecte**

Des que vaig iniciar la llicenciatura d'enginyeria industrial que se'm va presentar la oportunitat de conèixer l'empresa Sinerges Tecmon, S.A.. Aquest fet em va permetre tenir contacte amb el món laboral, i en concret, d'una empresa relacionada amb l'enginyeria, mentre cursava els estudis, encara que fos de forma esporàdica durant els estius o de més llarga durada al finalitzar els estudis.

En les diverses ocasions que es va donar aquesta oportunitat, vaig fer diferents tasques dins l'empresa. Des de muntador al taller mecànic, fent tot tipus d'operacions amb màquines eina: tallar, foradar, roscar, etc. I fent muntatges de les estructures. Fins a passar per l'oficina tècnica preparant les ofertes per als clients, planificació i seguiment de les ordres de treball per al taller mecànic i disseny dels diferents projectes en AutoCAD.

Finalment després d'haver assolit un cert grau d'experiència dins la pròpia empresa i havent finalitzat totes les assignatures de la llicenciatura, va sorgir la idea de poder fer el projecte final de carrera allà mateix, ja que era beneficiós per ambdues parts. Aprofitant que Sinerges es plantejava construir una nova màquina eina per al mecanitzat de plaques no metàl·liques del seu taller, l'empresa em va oferir la possibilitat de fer el conveni de cooperació perquè fos jo qui realitzés aquest projecte.

### **1.2. Motivació**

A l'actualitat en el taller mecànic esmentat es fan una sèrie d'operacions manuals i minucioses a partir de la interpretació de plànols, que consisteixen en preforats, forats, roscats i aixamfranats. Aquesta operativa de treball és molt laboriosa i artesanal, ja que per situar la posició del forat a realitzar és l'operari el que amb un regle i llapis marca la posició. Així doncs, és una tasca difícil d'executar i on hi cap fàcilment l'error humà. Cal afegir, que el mecanitzat de plaques de dimensions més grans, és molt més complicat, ja que és difícil situar la placa correctament i accedir els comandaments del trepant manual.

Per aquests motius i per tal de millorar la productivitat i agilitzar les feines de mecanitzat del taller, es proposa la construcció del manipulador cartesià de tres eixos per al mecanitzat de plaques no metàl·liques. Les tasques que hauria de fer l'operari, o usuari de màquina, serien les de preparar la placa amb les mides adequades segons l'ordre de treball indicada per

pantalla, la col·locació de la placa a la màquina i executar l'ordre de mecanitzat. A partir d'aquí la màquina realitzarà totes les tasques deixant lliure l'operari per preparar noves ordres de treball o fer altres tasques paral·lelament.

Finalment cal esmentar que el projecte en sí és molt interessant, ja que s'adapta perfectament amb les tasques realitzades a l'empresa complementades amb tasques noves que el fan ideal per acabar convergint entre la universitat (intensificació d'automàtica) i el món laboral.

### 1.3. Descripció de l'empresa SINERGES i el sistema modular ITEM

Sinerges Tecmon, S.A. és una empresa del sector del metall que es dedica al disseny i construcció de maquinària i accessoris per a altres indústries. Des de fa més de 25 anys és el representant a la península ibèrica de l'empresa alemanya ITEM Industrietechnik GmbH, en el que han adquirit una dilatada experiència realitzant projectes de diferent envergadura per tot l'estat espanyol i Portugal.

El sistema que utilitzen es basa en un seguit de perfils metàl·lics d'alumini i un seguit d'accessoris que permeten construir de forma senzilla grans i petites estructures. Aquests perfils tenen diferents mides i opcions. A la Figura 1.1 s'observen algunes de les seccions possibles dels perfils de la sèrie 8 [1], el més utilitzats en aquest projecte:



Figura 1.1: Seccions dels perfils de la sèrie 8 [ITEM, 2014, p. 27-35]

Aquest tipus de perfil permet aprofitar les ranures longitudinals per tal de fer unions entre perfils de forma ràpida i senzilla. Les unions més usades són les universals i estàndards representades a la Figura 1.2. En el cas de la unió estàndard, el nucli del perfil horitzontal es mecanitza per poder rosar el cargol i al vertical se li mecanitza un forat per poder passar la clau i collar un perfil amb l'altre. Tot i així, existeixen més opcions d'unió i de posició entre perfils. El sistema també disposa d'elements dinàmics com unitats de rodament, guies lineals i diferents elements d'instal·lació i d'altres especials amb diferents funcions, que s'aniran introduint a mesura que apareguin en el disseny de la màquina.

Per a més informació a l'annex D s'inclouen les pàgines del catàleg dels elements utilitzats, de totes maneres per aprofundir en el sistema es recomana visitar les pàgines web de Sinerges Tecmon S.A. i ITEM Industrietechnik GmbH:

- <http://www.sinerges.com> [2]
- <http://www.item24.es> [3]

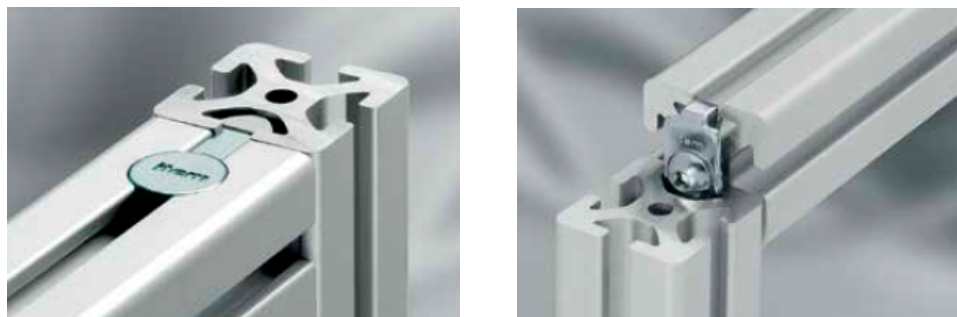


Figura 1.2: Unions universals 8 [ITEM, 2014, p. 79-80] i unions estàndards 8 [ITEM, 2014, p. 82-83]

## 2. INTRODUCCIÓ

En la present memòria es desenvolupa el disseny d'una màquina de mecanitzat automàtic construït amb el sistema modular ITEM i alguns elements especials. S'han tingut en compte aspectes com ara l'ergonomia de treball de l'usuari de màquina, espai ocupat per la pròpia màquina i millora en l'eficiència en el mecanitzat.

### 2.1. Objectius del projecte

Dissenyar una màquina de tres eixos capaç de mecanitzar automàticament plaques no metàl·liques, a partir d'un plànol dissenyat en una oficina tècnica. La màquina haurà de llegir les dades proporcionades pel plànol i executar l'automatisme per tal de coordinar els diferents elements motrius.

Valorar econòmicament la viabilitat de la màquina, així com la seva amortització i justificació pel que fa als costos associats als temps de preparació i fabricació de cada placa.

### 2.2. Abast del projecte

- Disseny de la part mecànica de la màquina
- Disseny i implementació de l'interpret de plànols CAD
- Disseny del control de la màquina
- Control de costos i estimació del preu hora-màquina
- Impacte mediambiental

### 2.3. Eines de disseny utilitzades

Per tal de dissenyar la màquina les eines emprades en cada cas, són les següents:

- Per al disseny mecànic AutoCAD amb els mòduls de d'inserció de blocs d'ITEM i de generació d'espejaments de SINERGES.
- Per a l'interpret de plànols CAD, s'ha programat amb AutoLISP. Llenguatge de programació del mateix AutoCAD.
- Per al disseny del control Cx-Programmer [4] i Network configurator [5] d'OMRON. I el programa Engineer [6] de LENZE.



### 3. DISSENY MECÀNIC DE LA MÀQUINA

Per explicar el disseny mecànic es desglossa la màquina en diferents conjunts, ja que són els mateixos que s'han fet servir per a l'elaboració dels plànols constructius inclosos a l'annex A. Els conjunts esmentats són els següents:

- Estructura principal
- Taula vertical de treball
- Tres eixos lineals i eina
- Protecció mecànica

Tota la part de disseny mecànic i estructura del manipulador està dissenyat per tal que es pugui construir amb el sistema modular ITEM que s'ha presentat anteriorment. Pel que fa als eixos lineals s'utilitzen dos servomotors LENZE per als eixos que s'anomenen X i Y, mentre que per a l'eix Z s'empra un actuador lineal de la marca IAI. El trepant és de la casa ELTE, en concret el model AF 60 CU [7] i permet fer el canvi d'eina automàtic de forma pneumàtica. Cada un d'aquests elements té associat un controlador propi. Els servomotors LENZE porten un variador de freqüència LENZE 8400 TopLine model E84AV-TC-E-222-4-S-X-0-EO [8], que permet adequar les rampes d'acceleració, frenada i velocitat dels motors. Pel que fa a l'actuador lineal d'IAI [9] també té associat una unitat de control de la mateixa marca IAI, el model és PCON-CA-56PI-PN [10], mentre que el trepant es controla a través d'un variador de freqüència també de la marca LENZE, en aquest cas un LENZE 8400 StateLine.

També consta de diversos elements pneumàtics usats per a la subjecció de plaques i moviments lineals de dues posicions. Així doncs, la subjecció de la placa a l'estructura es porta a terme mitjançant tres grups idèntics de tres elements pneumàtics, dos cilindres compactes de doble efecte per la part inferior i cilindre lineal i giratori per la part de sobre la placa.

Al voltant de l'eina trepant hi ha quatre cilindres que fixen la placa contra la taula de treball. Aquesta última també disposa d'un cilindre pneumàtic que desplaça la taula en dues posicions per tal de poder foradar en tota la superfície de la placa i no malmetre la pròpia estructura. Tots els elements pneumàtics van controlats per electrovàlvules que governaran els moviments d'aquests cilindres.

Aquests elements controlen els paràmetres de cada un dels eixos o els moviments lineals dels cilindres, i el que farà el control de tot el sistema serà un PLC de la marca OMRON, en concret el model CJ2M-CPU33 [11]. L'elecció d'aquest PLC es justifica al capítol de disseny del control.

A la Figura 3.1, es pot veure el conjunt de la màquina sense la protecció on hi ha tots els elements esmentats i s'observa l'estructura de la pròpia màquina que s'explica a continuació més detalladament.

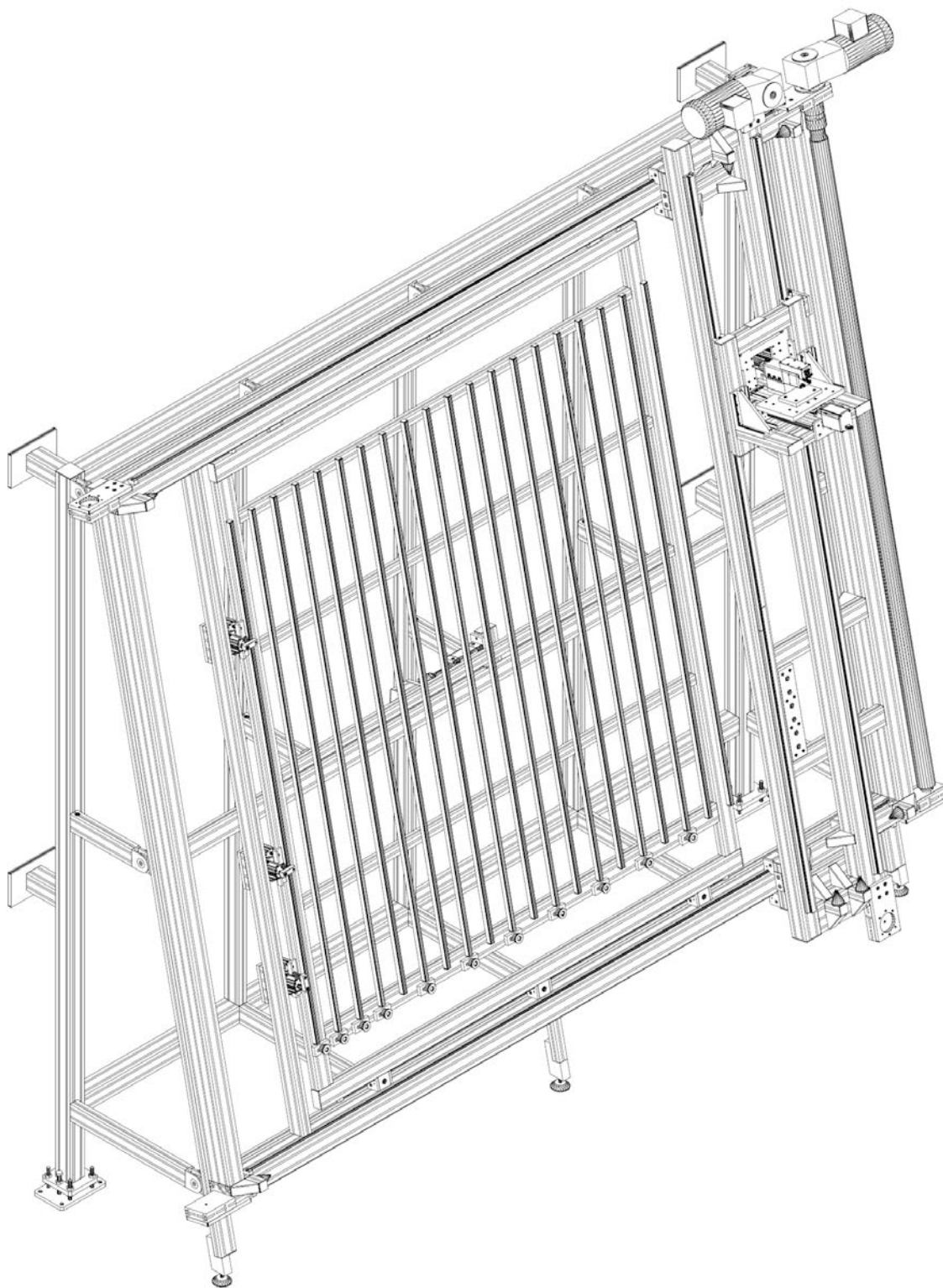


Figura 3.1: Manipulador de tres eixos complet (sense la protecció)

### 3.1. Parts de la màquina

#### 3.1.1. Estructura

L'estructura base de la màquina suporta totes les altres parts explicades en els següents subapartats, representada a la Figura 3.2.

S'ha dissenyat amb fixacions al terra i a la paret per tal de donar-li la màxima rigidesa i robustesa. Consta d'un marc vertical construït amb perfils 8 80x80 H [ITEM, 2014, p. 30] i un marc inclinat 12° respecte la vertical de perfils 8 80x40 H [ITEM, 2014, p. 29]. La part vertical reposa sobre dues plaques metàl·liques de 250 x 160 mm ancorades al terra, mentre que la part inclinada reposa sobre tres peus de diàmetre 76 mm agafats amb una peça especial a l'estructura inclinada per tal de

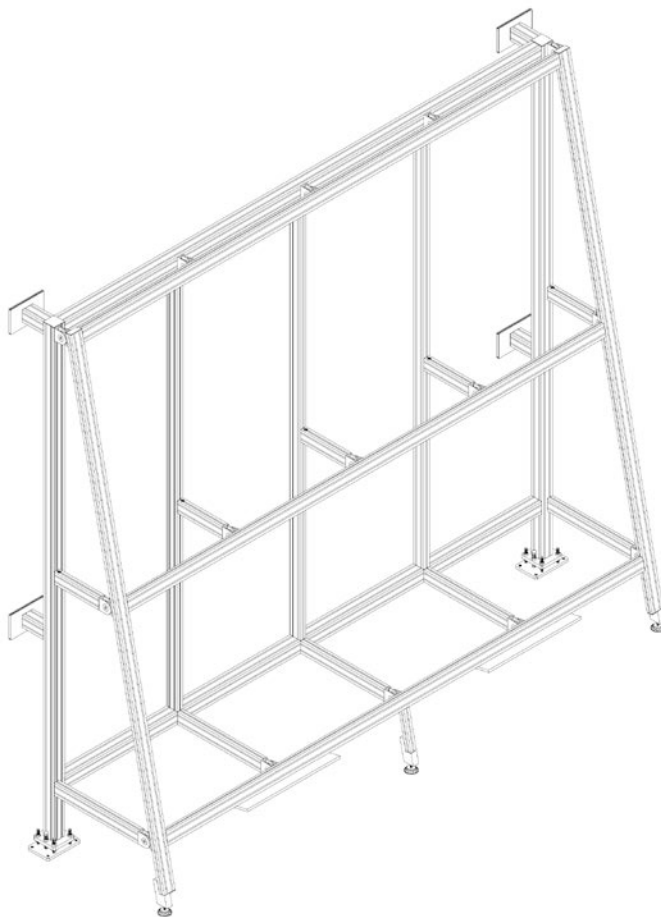


Figura 3.2: Estructura de la màquina

poder unir aquesta estructura amb el peu i que aquest recolzi horitzontalment sobre el terra. La part posterior té -per tal de fixar-la a la paret- quatre plaques de 250 x 160 mm unides a l'estructura.

Finalment l'esquelet interior de l'estructura està reforçat amb tres travessers de perfils 8 80x40 H que uneixen el marc vertical i l'inclinat entre sí amb articulacions 8 80x40 [ITEM, 2014, p. 107-108]. La resta d'unions entre perfil de l'estructura, al ser perpendiculars entre sí, s'han dissenyat amb unions estàndards 8 i unions universals 8.

A partir d'aquesta estructura es muntarà la resta de la màquina, servint així com a base de tota la màquina. Per a més detalls constructius veure a l'annex A el conjunt de plànols 0900.010 (Estructura).

### 3.1.2. Taula de treball

La taula de treball com el seu nom indica és on es situarà la placa a mecanitzar (veure la Figura 3.3). Consta de 20 travessers que són travessers perfils 5 20x20 [ITEM, 2014, p. 17] col·locats equidistants entre sí a 120 mm, sobre una base o marc exterior de perfils 8 80x40 H.

La superfície que abasten els perfils cobreix les mides màximes que pot tenir una placa, 2200 x 2200 mm. Cada perfil té instal·lat un perfil de lliscament del mateix sistema modular ITEM, d'un termoplàstic lleuger (PE-UHMW Polietilè Ultra-High-Molecular-Weight), perfil de lliscament 8 antiestàtic [ITEM, 2014, p. 365]. Això permet desplaçar la placa horitzontalment o longitudinalment a la taula de treball amb més facilitat i viceversa, és a dir, desplaçar la taula amb la placa ja fixada.

A la base de la placa, on es recolza, hi ha instal·lats uns corròns de diàmetre 40 mm dissenyats especialment per a desenvolupar aquesta funció. Aquests corròns s'han dissenyat de Durester (Polièster termoplàstic extruït, PETP), per raó de la seva gran resistència al desgast, alta resistència mecànica, rigidesa i duresa.

Al tractar-se d'una màquina per foradar les plaques, suposaria un problema que cada vegada que es mecanitzi en qualsevol part d'una placa es mecanitzés també la taula de treball. És per això, que aquesta taula està dissenyada amb un desplaçament horitzontal de dues posicions. Així doncs, depenent de la posició en el pla de treball on s'hagi d'executar el mecanitzat la taula estarà en una posició o la contrària, evitant així malmetre aquesta part de la màquina.

Aquest desplaçament lineal es fa mitjançant un cilindre pneumàtic de la marca FESTO, model DNC-50-50-PPV-A [12]. Es tracta d'un cilindre normalitzat segons la norma

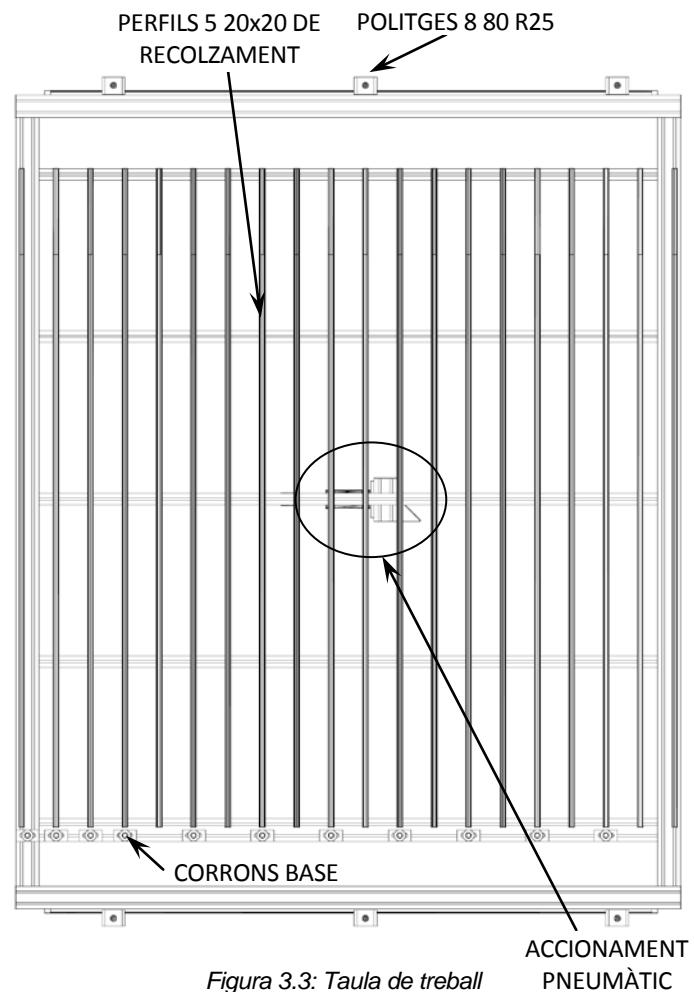


Figura 3.3: Taula de treball

ISO 15552, de diàmetre 50 mm i cursa 50 mm. D'aquesta manera assegurem que amb dues posicions podem lliurar tota l'àrea de treball de placa, ja que els perfils on es recolza la fan 20 mm d'ample i tenen una separació entre ells de 100 mm, si taula es desplaça 50 mm queda lliure la zona que hi teníem el perfil.

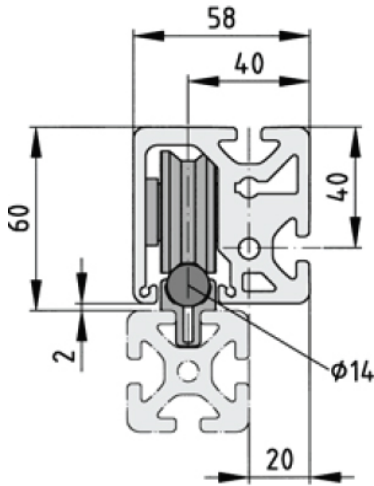


Figura 3.4: Guies lineals de rodament 8D14 [ITEM, 2014, p. 467 i p. 472]

I, per altra banda, que el cilindre sigui de diàmetre 50 mm assegura que pot efectuar una força de retrocés de 990 N i de 1178 N en l'avanç (segons el fabricant, veure annex D). Es justifica al subapartat 5.1 l'elecció d'aquest cilindre.

Finalment, la taula està fixada a l'estructura amb sis unitats de rodament i guia 8 D14 (esquema de les guies a la Figura 3.4) per tal de poder tenir moviment de translació de 50 mm que proporciona el cilindre pneumàtic. A l'annex A és el conjunt de plànols 0900.014 (Taula de treball).

### 3.1.3. Eix X

Aquest primer eix, és el que permet el moviment de translació de dreta a esquerra de la eina. Format per un marc d'uns 3800 x 3000 mm de perfil 8 120x80 H [ITEM, 2014, p. 30] acoblat i fixat a l'estructura per mitjà de dues plaques i cargolam entre perfils. Es recolza de forma vertical, amb la inclinació donada per l'estructura de 12° respecte la vertical. En aquest conjunt destaquen dos elements importants:

Primer de tot està dotat d'un sistema motriu que fa possible el moviment del carro de l'eix X. Aquest sistema està dissenyat amb elements ITEM format per guies lineals 8 D14 (Figura 3.4), calibrat D14 [ITEM, 2014, p. 470] i dos carros amb quatre unitats de rodament cadascun. Hi ha una guia a la part superior del marc i l'altra a la inferior, sobre aquestes guies s'hi desplacen els dos carros corresponents.

Cada carro té una amplada de 450 mm i la distància entre els topalls mecànics de la guia és de 3410 mm, si hi deixem un marge de 100 mm per banda per temes de seguretat tenim una cursa total de l'eix X de 2760 mm. Suficients per abastar els 2200 mm màxims de placa.

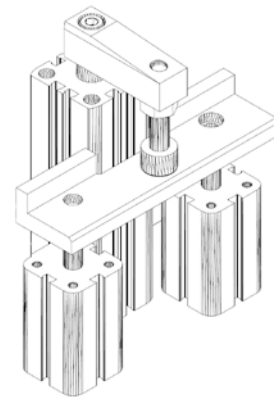
Els carros estan accionats per un servomotor que transmet el moviment a través de politges 8 80 R25 [ITEM, 2014, p. 526-527] amb corretja dentada R25 T10 [ITEM, 2014, p. 533] del mateix sistema ITEM. En aquest cas, com que hi ha dos carros en paral·lel estan acoblats a través d'un sincronisme que fa que el mateix motor faci rotar les dues politges a la vegada. El



servomotor escollit per a aquesta aplicació és de la marca LENZE i model MDSKS-RS-071-03-170 [13] amb un reductor LENZE GKR04 [14] de relació de transmissió  $i = 15,556$ .

Per altra banda, l'altre element important que forma part d'aquest conjunt són els tres grups de subjecció pneumàtics de la placa (representat a la Figura 3.5).

Per la part esquerra de la placa a mecanitzar es subjecta amb tres grups pneumàtics per tal que la placa quedi en el pla adequat de treball de la màquina. Cada conjunt consta de dos cilindres de la marca FESTO model ADVU-25-25-P-A [15] a la part inferior, és a dir dos cilindres compactes de doble efecte d'eix simple de diàmetre 25 mm i cursa també 25 mm.



*Figura 3.5: Conjunt fixació pneumàtic*

Aquests dos últims estan units entre sí per una peça on es recolza la cara posterior de la placa, també fabricada amb Durester. Per la part de dalt (o la cara anterior de la placa) es subjecta mitjançant un element de fixació lineal i giratori també FESTO CLR-32-20-L-P-A [16]. Aquest element pneumàtic gira la pinça que porta associada  $90^\circ$ , en la posició de l'eix a cursa = 0 mm la pinça es troba perpendicular a l'aresta de la placa i quan s'acciona i recorre la cursa fins a 20 mm la pinça gira fins a quedar en paral·lel a la placa. D'aquesta manera es deixa lliure la possible zona de treball i no interfereix al posar i treure la placa del manipulador.

Com que hi ha tres conjunts de fixació lateral, si algun d'ells s'hagués d'alliberar per tal de deixar lliure la zona afectada per la pinça i poder mecanitzar la placa, els altres dos conjunts seguirien subjectant la placa. D'aquesta manera s'assegura que la placa sempre queda fixada a l'hora d'executar les tasques de mecanitzat.

Finalment, hi trobem un suport unit al marc per la part interior o s'hi allotja una estació per guardar les eines o conjunts de broques necessaris per als mecanitzats. A la Figura 3.6 es pot observar tot el conjunt amb tots els elements esmentats. Per a més detalls veure l'annex A el conjunt de plànols 0900.011 (Eix X).

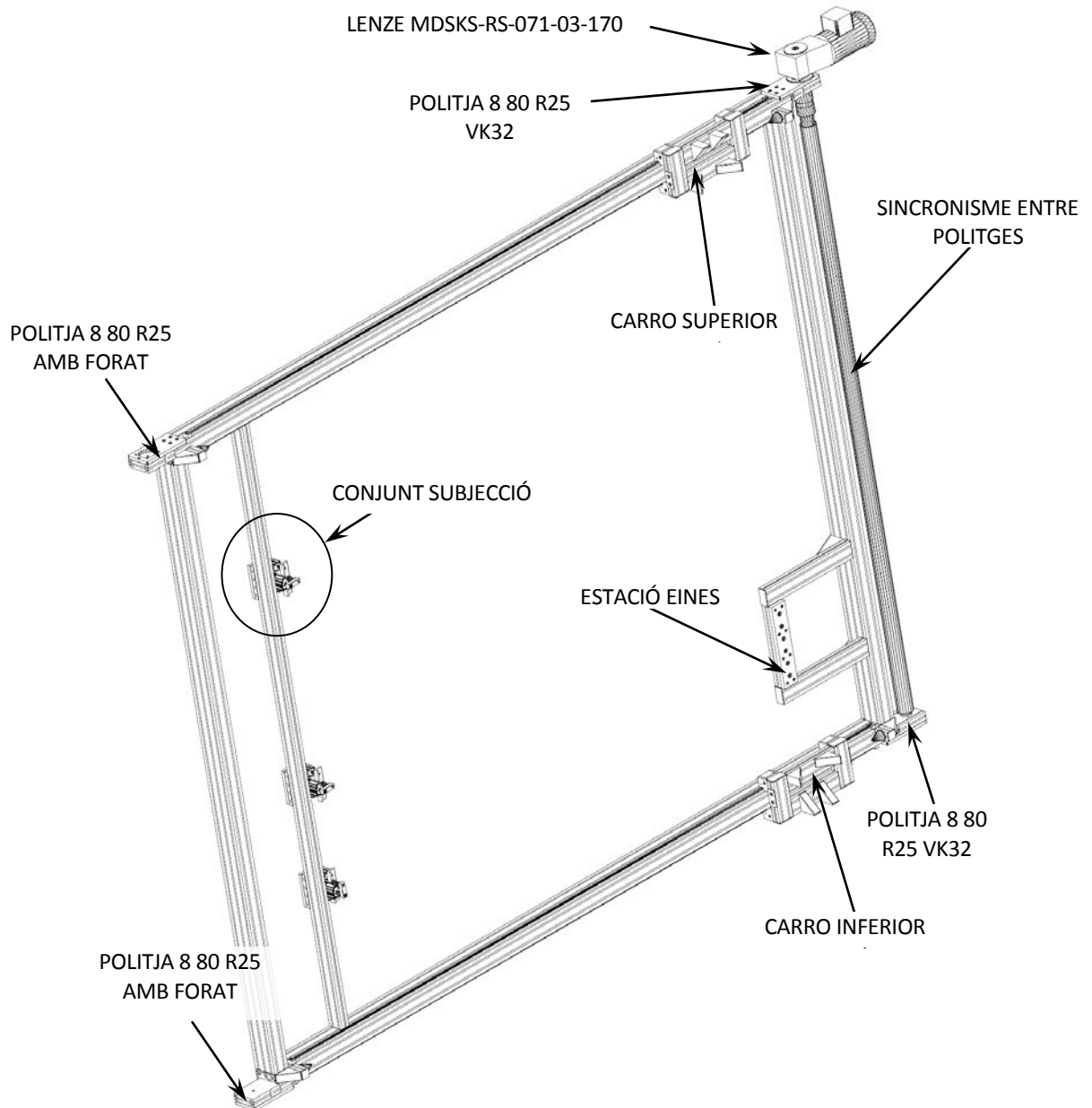


Figura 3.6: Conjunt eix X

### 3.1.4. Eix Y

L'eix transversal o eix Y, és per on es desplaça l'eina de forma vertical. El forma un marc rectangular de 450 mm d'ample per 3500 mm d'alt. Va fixat als carros de l'eix X mitjançant quatre escaires Zn 8 80x80 [ITEM, 2014, p. 93]. Els perfils que el formen són 8 80x80 H i 8 120x80 H. Les guies van instal·lades sobre el marc i en aquest cas es tracta del tipus de guia lineal prismàtica PS 4-25 (Figura 3.7). Aquest tipus de guies són més robustes i precises i al haver de treballar de forma gairebé vertical, asseguren un bon funcionament i durador.

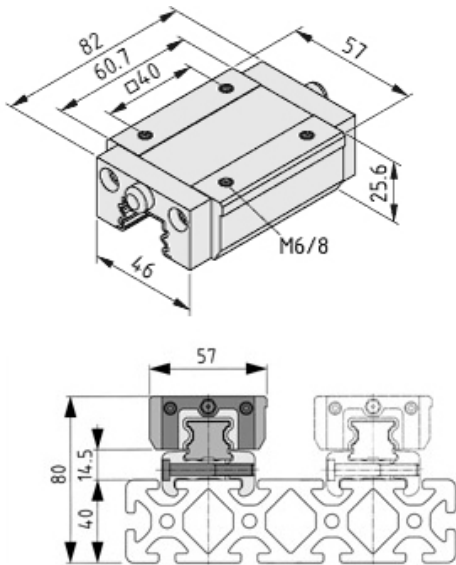


Figura 3.7: Guies lineals prismàtiques PS 4-25 [ITEM, 2014, p. 491, p. 493]

El carro que es desplaça per les guies mitjançant quatre carrets de boles PS 4-25 (Figura 3.7), està format per un marc de perfils 8 80x40 H i la seva longitud és de 500 mm. En ell s'hi fixen dues escaires 8 160x160 St M8 [ITEM, 2014, p. 96] que és on anirà subjectat l'eix Z. La longitud entre topalls de tota la guia fa 3130 mm i, com en el cas de l'eix X, deixant 200 mm de marge de seguretat en total, es disposa d'una cursa total de 2430 mm.

En el mateix carro de desplaçament hi van instal·lats quatre cilindres pneumàtics fixats amb una placa especial als perfils. Aquests quatre cilindres de la marca FESTO, model ADVU-32-80-PA [15] (cilindres compactes d'eix simple de diàmetre 32 mm i cursa 80 mm), permetran fixar el punt de la placa a perforar contra la taula de treball i així assegurar que la broca fa el treball correctament.

A la Figura 3.8 es visualitzen els detalls de la configuració de muntatge del carro amb les guies al marc principal i la disposició dels cilindres.

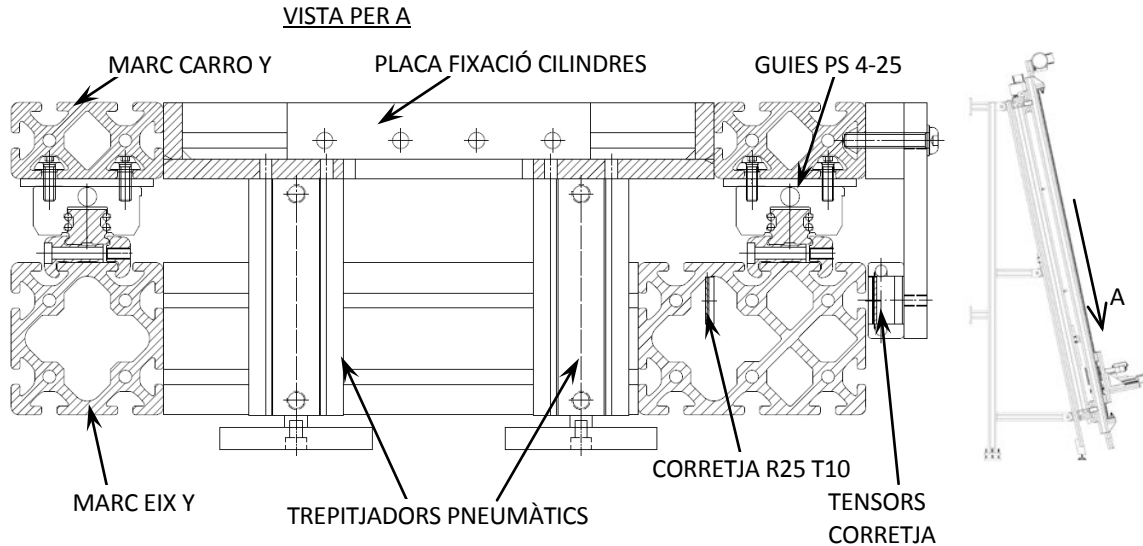


Figura 3.8: Detall de la secció longitudinal de l'eix Y

Finalment l'accionament motriu d'aquest eix es fa amb el mateix tipus de motor que a l'eix X, però amb un fre electromagnètic inclòs per si hi ha falta de tensió que es quedi a la posició on es troba i no pugui caure el carro. És un servomotor LENZE MDSKS-BS-071-03-170 amb un reductor LENZE GKR04 que té una relació de transmissió de  $i = 15,556$  i transmet el moviment



a través de cadena dentada R25 T10 i politges 8 80 R25. A la Figura 3.8 s'observa el detall de la configuració de la corretja, en què està fixada al carro per mitjà de tensors de corretja 8 R25 [ITEM, 2014, p. 534-535] i retorna pel propi nucli del perfil del marc de l'eix Y. Precisament aquest perfil s'ha escollit un 8 120x80 H per aquest motiu, ja que el nucli és més gran i permet el pas de la corretja. A la Figura 3.9, en aquesta mateixa pàgina, el dibuix de tot el conjunt de l'eix Y. Per a més detalls veure a l'annex A el conjunt de plànols 0900.012 (Eix Y).

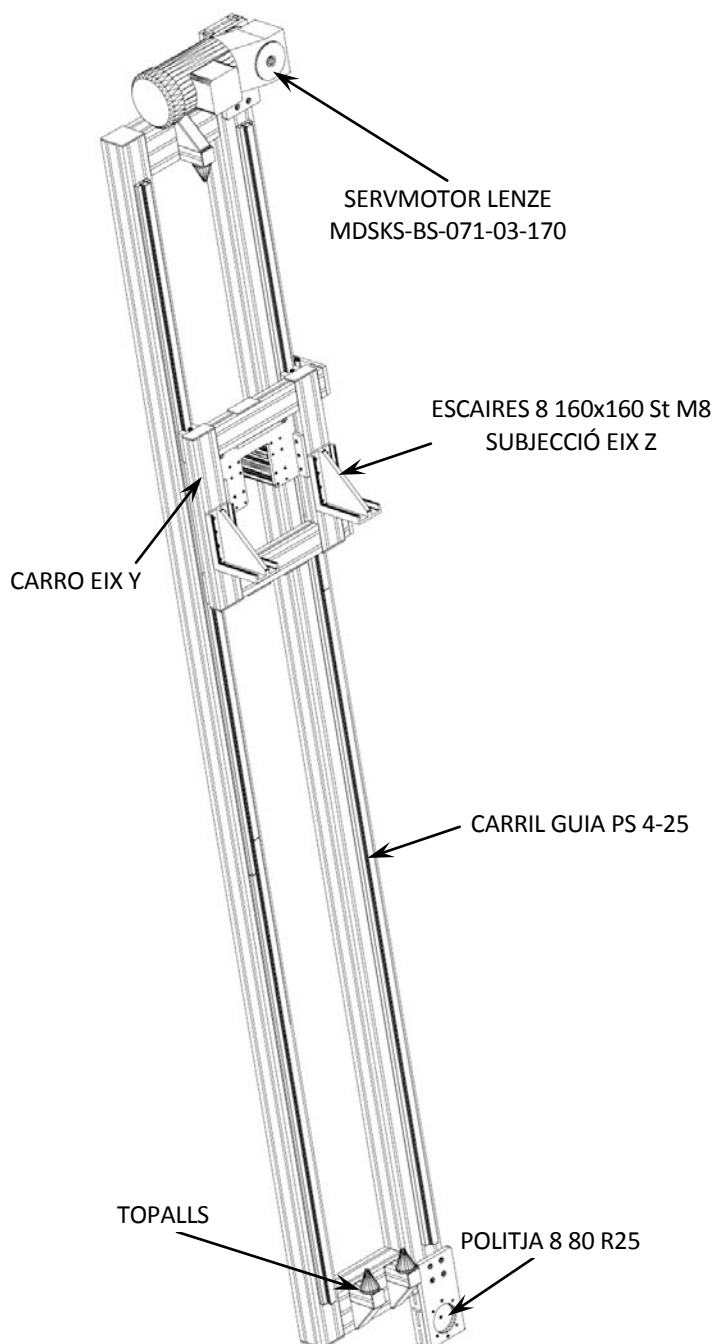


Figura 3.9: Eix Y

### 3.1.5. Eix Z

L'eix Z consta bàsicament de dos elements importants:

- Guia de desplaçament lineal IAI, model RCP4-SA7C-I-56P-4-200 [IAI, 2014, p. 13-14].
- Trepant amb canvi d'eina automàtic ELTE, model AF60CU.

L'estructura que els suporta és de perfils 8 80x40 H i 8 40x40 H [ITEM, 2014, p. 27] i té una amplada de 450 mm com el carro Y, que és on va fixat. El primer element esmentat és la guia IAI, és un conjunt tancat de guia lineal amb l'accionament incorporat. S'ha escollit aquest tipus de guia perquè té una característica important per la tasca a realitzar en aquest eix. Aquest tipus de guia té un control adaptatiu en funció de la càrrega de resistència que se li exerceix. És a dir, en funció de la força que hagi de fer el trepant per perforar la placa la guia adaptarà la velocitat d'avanç i en conseqüència treballarà de forma adequada segons cada tipus de placa.

La guia té una cursa de 200 mm definida per tal de tenir la posició de repòs a cursa = 0 mm i a 200 mm és la distància més llarga que ha de recorre fins a l'estació d'eines. Per tal de poder perforar les plaques queda en curses intermèdies i per tant ja compleix la funció necessària.

A la guia IAI se li ha adaptat un carro del sistema ITEM amb unitats de rodament 8 D14 i calibrat D14 pel qual es desplacen, tal com a l'eix X. Així, el propi pes del trepant i el seu manegament queden repartits entre la guia IAI i els rodaments. A les quatre unitats de rodament se'ls hi ha acoblat dues plaques i una peça distanciadora especialment dissenyades per a un muntatge fàcil del trepant al carro i per tal de centrar l'eix del mateix al centre dels quatre trepitjadors de l'eix Y. A la Figura 3.10, es mostra la configuració (vista en planta) de l'encaix de l'eix Z sobre el carro que es desplaça a l'eix Y.

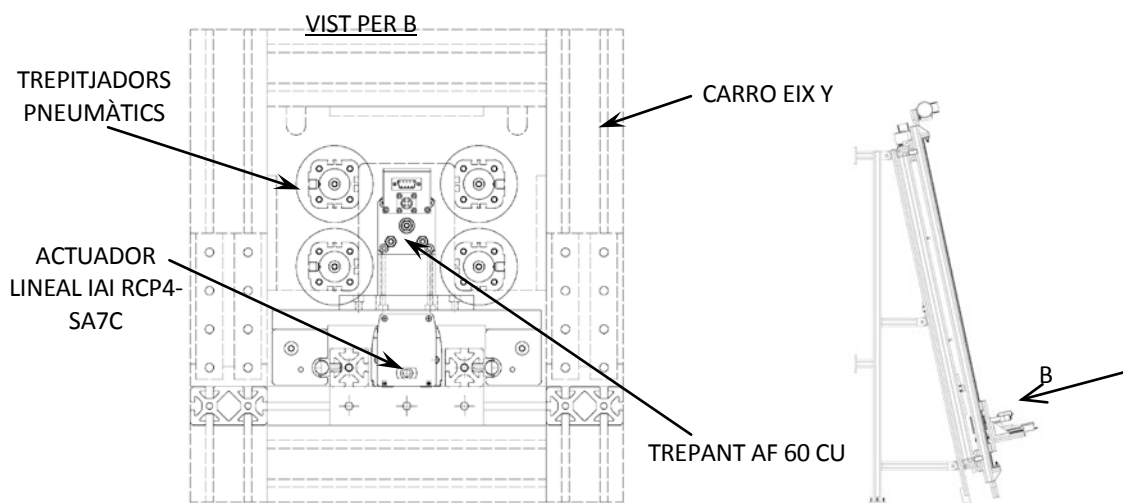


Figura 3.10: Vista en planta de l'eix Z muntat al carro Y

Pel que fa el trepant és una unitat compacte de la marca ELTE, en concret el model AF60CU, ja que per les característiques dels mecanitzats a realitzar, que són petits relativament, entre 4,5 mm i 10 mm de diàmetre.

Aquest equip resulta idoni perquè incorpora un sistema pneumàtic que permet fer el canvi d'eina automàticament. Ho fa a través d'un con ISO 10 que porta cada broca subjectada amb una pinça ER11 [7], com s'observa a la Figura 3.11. En aquesta màquina s'hi han previst sis tipus d'eina diferents amb les quals la màquina podrà intercanviar segons convingui.

Aquestes eines són broques DIN 338 [17], de cinc diàmetres diferents: 4,5 mm, 5,5 mm, 6,5 mm, 8,5 mm i 10 mm. La sisena eina és una eina fabricada especialment per a marcar i no foradar. Així la màquina pot realitzar línies de marcatge a la placa sense foradar-la. L'eina de marcar s'ha dissenyat de diàmetre 7 mm, perquè la pinça ER11 permet eines fins a aquest diàmetre. Per tant, les dues broques de diàmetre superior, la de 8,5 mm i la de 10 mm, se'ls hi ha previst fer un rebaix a 7 mm a la zona on la pinça agafa l'eina. Per més detalls de les eines veure els plànols 0900.013.000.006 i 0900.013.000.007 a l'annex A.

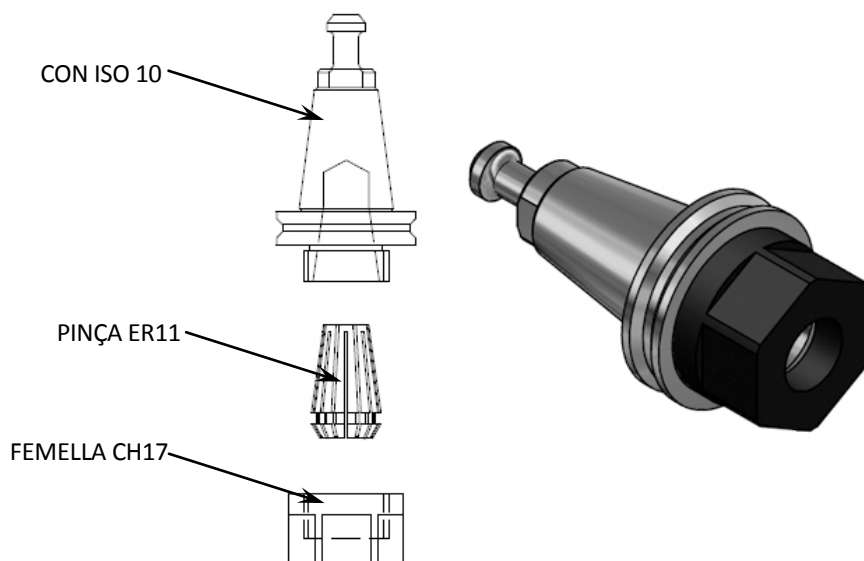


Figura 3.11: Representació del con ISO 10 amb la pinça ER11.

A la Figura 3.12 s'hi representa tot el conjunt en la vista de treball real de l'eix del trepant. Veure joc de plànols 0900.013 a l'annex A.

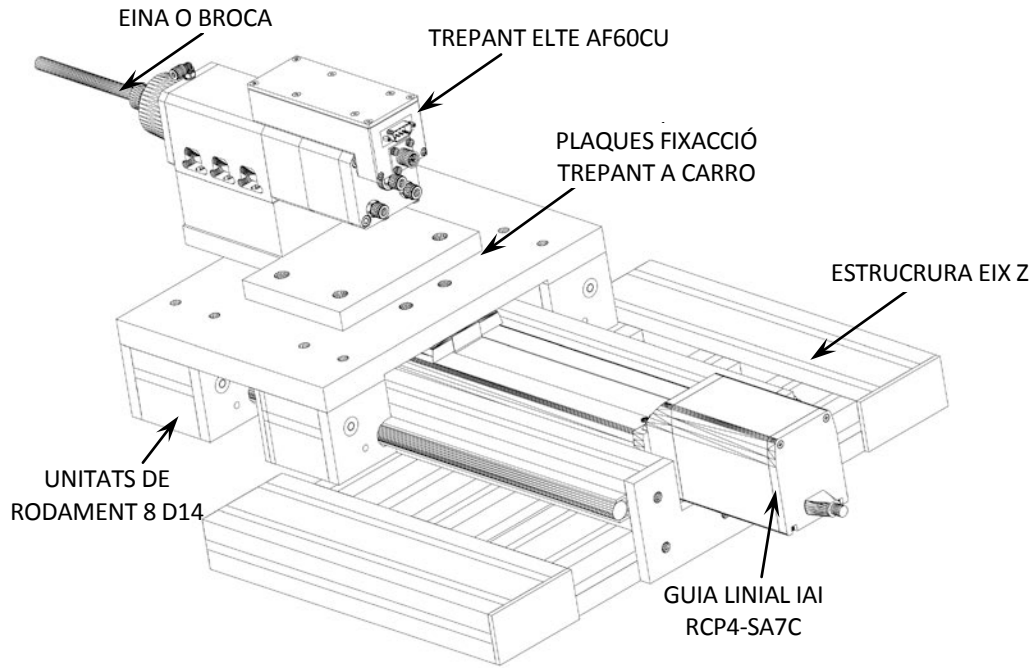


Figura 3.12: Conjunt eix Z

### 3.1.6. Protecció

La protecció consta de dues mampares laterals subjectades al terra i a la pròpia estructura del manipulador. Disposa d'una cortina òptica de la marca PEPPERL+FUCHS, el model SLC14-1050/129/130/151 [18] de seguretat per tal de parar la màquina si s'entra a la zona de treball mentre està funcionant. També s'hi inclou la base per la pantalla d'interfície d'usuari, on l'operari pot interactuar amb la màquina, escollint el treball a realitzar i les funcions varies. A l'annex A hi ha el conjunt de plànols 0900.015 (Protecció) on es reflecteixen tots els detalls constructius.

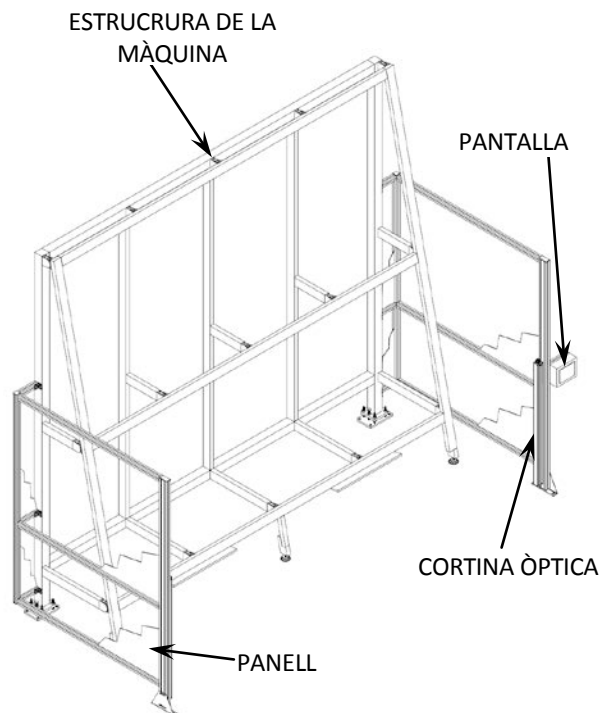


Figura 3.13: Protecció de la màquina

#### 4. MODELITZACIÓ

Prèviament als càlculs de disseny, a la configuració de la xarxa de la màquina i del disseny de tots els equips de control, es modelitza el sistema. Per a la modelització del control de la màquina s'han de situar els eixos de referència amb els quals es faran servir en els càlculs corresponents al model cinemàtic i dinàmic. En aquest cas, ja s'han definit anteriorment les direccions de cadascun dels eixos que intervenen i, per tant, es faran servir com a referència. Es pren com a origen la part inferior esquerra de la màquina al límit de la cursa de cada eix. És a dir, l'eix X a l'esquerra de tot, eix Y a la part inferior i l'eix Z amb l'actuador lineal IAI recollit (cursa = 0 mm). I es pren com a punt d'origen el centre de la punta del trepant, sense comptar amb la broca o eina. Es representa a la Figura 4.1

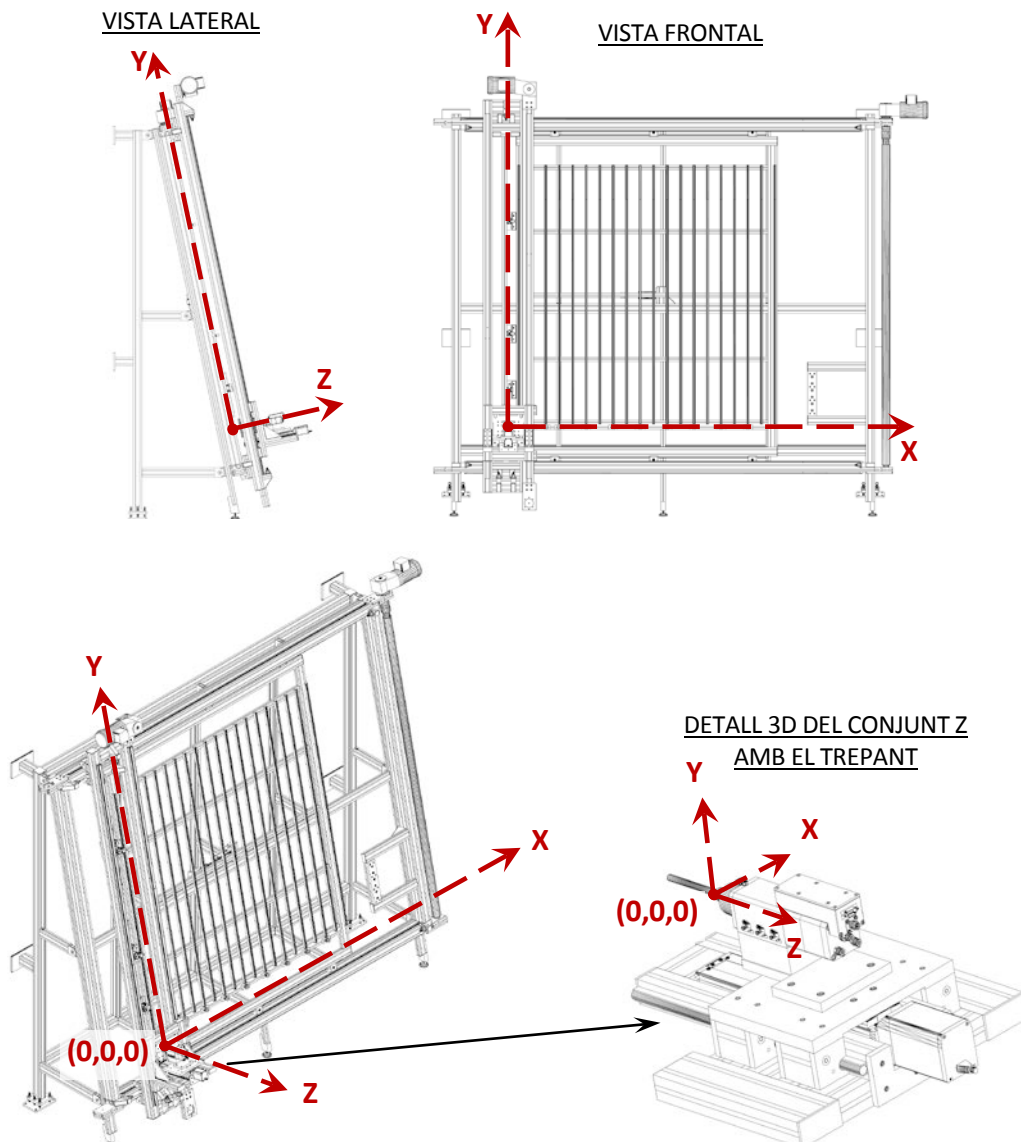


Figura 4.1: Posició dels eixos respecte la màquina

#### 4.1. Model cinemàtic

Per determinar el model cinemàtic cal saber que la màquina consta de tres eixos lineals, sense rotació i que per tant, cada eix té un moviment rectilini. Cadascun d'ells és accionat per un motor, així doncs, per tal de determinar la posició de l'eina es tindrà en compte que l'angle girat pel motor està associat a un desplaçament lineal de cada eix. Prenent com a referència els eixos esmentats es planteja el següent conjunt d'equacions (Eq. 4.1) que permet descriure la posició de la punta del trepant en tot moment, sabent que l'angle girat per una circumferència pel seu radi és l'arc de la circumferència descrit:

$$\begin{pmatrix} X \\ y \\ z \end{pmatrix} = (r_x \quad r_y \quad r_z) \cdot \begin{pmatrix} \theta_x \\ \theta_y \\ \theta_z \end{pmatrix} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

On  $\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$  és la posició de la punta de la broca en mm respecte l'origen de coordenades,

$(r_x \quad r_y \quad r_z)$  els radis equivalents de cada motor en mm i  $\begin{pmatrix} \theta_x \\ \theta_y \\ \theta_z \end{pmatrix}$  l'angle girat per a cada motor en

rad. Es considera en els tres casos que la rotació positiva de cada motor correspon al desplaçament positiu de cada eix del motor segons els sistema de referència definit. Per tant, en el cas particular de l'eix Z l'avanç de l'eina el farà a quan el motor giri en sentit negatiu i el retrocés en el positiu.

La cursa de cada eix, com s'ha vist en el capítol 3, és respectivament per X, Y i Z 2760 mm, 2430 mm i 200 mm, llavors el rang de les variables de posició és el següent (Eq. 4.2):

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -200 \end{pmatrix} \leq \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \leq \begin{pmatrix} 2760 \\ 2430 \\ 0 \end{pmatrix} \text{ mm} \quad (\text{Eq. 4.2})$$

En els casos de l'eix X i Y són iguals i la transmissió del moviment es fa a través d'una politja 80 R25 del sistema ITEM en què 1 volta = 280 mm segons especificacions, veure la Figura 4.2.

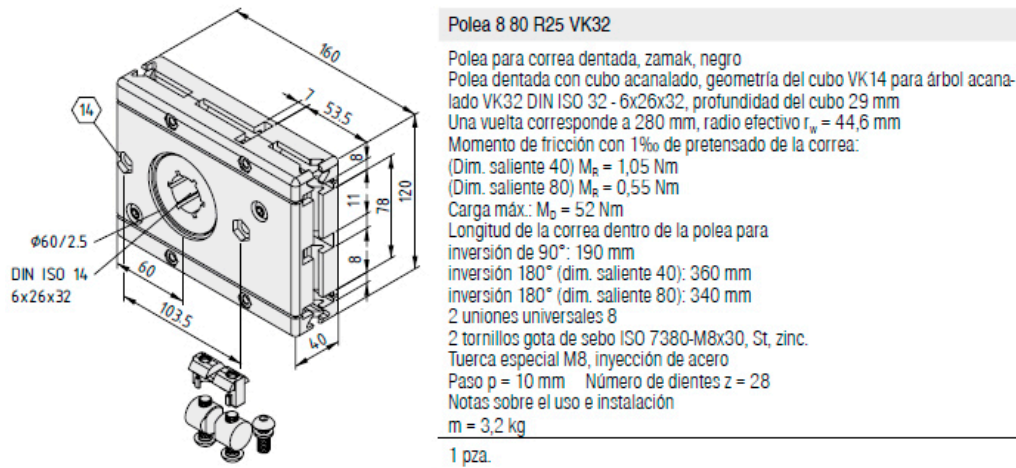


Figura 4.2: Característiques de les políges per corretja dentada 8 80 R25 [ITEM, 2014, p. 527]

Per tal d'associar l'equació cinemàtica a les voltes del motor, com que entre la politja i el motor hi ha el reductor LENZE GKR04 i se sap que la relació de transmissió és  $i = 15,556$ . Així doncs, es poden obtenir les següents equacions:

$$d_{eix} = \frac{280 \text{ mm}}{15,556} = \frac{18 \text{ mm}}{\text{volta motor}} \quad (\text{Eq. 4.3})$$

$$l = 2\pi r \quad (\text{Eq. 4.4})$$

$$r_m = \frac{l}{2\pi} = \frac{d_{eix}}{2\pi} = \frac{18 \text{ mm}}{2\pi} = 2,865 \text{ mm} \quad (\text{Eq. 4.5})$$

A la equació (Eq. 4.3) es troba el desplaçament lineal de l'eix amb la relació de transmissió, és a dir, resulta que per una volta del motor, el carro avança 18 mm lineals. Sabent la relació de l'arc de circumferència en funció del radi (Eq. 4.4), es pot aïllar el radi corresponent al radi equivalent del motor  $r_m$ . Per tant,  $r_{mx} = r_{my} = 2,856$  mm i per cada volta del motor corresponent els carros de l'eix X i Y s'avancen 18 mm lineals.

Pel que fa a l'eix Z, per especificacions del fabricant de les guies lineals IAI la guia del model RCP4-SA7C avança 4 mm per cada volta del motor, fent els mateixos càlculs que anteriorment s'obté el radi equivalent del motor Z (Eq. 4.6):

$$r_{mz} = \frac{d_{eix-z}}{2\pi} = \frac{4 \text{ mm}}{2\pi} = 0,637 \text{ mm} \quad (\text{Eq. 4.6})$$

Coneguts tots els radis de cadascun dels eixos, es coneix l'equació cinemàtica del moviment (Eq. 4.7):



$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2,856 & 2,856 & 0,637 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \theta_x \\ \theta_y \\ \theta_z \end{pmatrix} \quad (\text{Eq. 4.7})$$

Amb l'equació (Eq. 4.7) es pot saber en quina posició es troba en cada moment l'eina tenint en compte la posició dels eixos de referència esmentats al principi del capítol. Així, per exemple, si se sap que el motor de l'eix X ha fet dues voltes, és a dir, ha girat  $4\pi$  rad, l'eix X s'haurà desplaçat 36 mm (veure (Eq. 4.8)) respecte l'origen.

$$x = 2,856 \cdot 4\pi = 36 \text{ mm} \quad (\text{Eq. 4.8})$$

Per als eixos Y i Z es faria el mateix càlcul anàlogament, tenint en compte que el radi per a l'eix Y és igual que en el cas de l'exemple, mentre que per a l'eix Z és de 0,637 mm. En resum, es coneix la posició de l'eina a l'espai en funció de l'angle girat per a cada motor.

Fent la derivada respecte el temps de l'equació cinemàtica de la posició (Eq. 4.7), es té com a resultat l'equació cinemàtica de la velocitat (Eq. 4.9). En aquest, cas es fa la conversió dels radis de mil·límetres a metres per tal d'obtenir la velocitat lineal en m/s.

$$\begin{pmatrix} dx/dt \\ dy/dt \\ dz/dt \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,002856 & 0,002856 & 0,000637 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} d\theta_x/dt \\ d\theta_y/dt \\ d\theta_z/dt \end{pmatrix} \quad (\text{Eq. 4.9})$$

Si s'anomena  $\frac{dx}{dt}$  com la velocitat lineal  $v_x$  de l'eix X en m/s, i  $\frac{d\theta_x}{dt}$  la velocitat angular del motor  $\omega_x$  de l'eix X en rad/s, es pot reescriure l'equació (Eq. 4.9) com a l'equació (Eq. 4.10).

$$\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,002856 & 0,002856 & 0,000637 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{pmatrix} \quad (\text{Eq. 4.10})$$

On  $\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix}$  són les velocitats lineals de cada eix en m/s i  $\begin{pmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{pmatrix}$  les velocitats angulars de cada motor en rad/s. La velocitat de gir dels motors és coneguda en revolucions per minut ( $\text{min}^{-1}$ ), així fent la conversió representada a l'equació (Eq. 4.11) es pot obtenir la velocitat d'avanç de cada eix en funció de la velocitat de gir de cada motor.

$$1 \text{ min}^{-1} = \frac{2\pi \text{ rad}}{1} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \quad (\text{Eq. 4.11})$$

Per exemple, si el motor de l'eix X gira a  $3000 \text{ min}^{-1}$  la velocitat angular en rad/s serà 314,16



rad/s (Eq. 4.12) i per tant la velocitat d'avanç de l'eix X seria 0,9 m/s (Eq. 4.13). S'ha d'apunta que  $\omega_x$  és la velocitat angular del propi motor sense la reducció, ja que s'ha tingut en compte en el càlcul del radi equivalent del motor i per tant, l'equació relaciona directament velocitat d'avanç del carro amb velocitat de rotació del mateix motor. Per als eixos Y i Z es faria anàlogament.

$$\omega_x = 3000 \cdot \frac{2\pi}{60} = 314,16 \text{ rad/s} \quad (\text{Eq. 4.12})$$

$$v_x = 0,002856 \cdot 314,16 = 0,9 \text{ m/s} \quad (\text{Eq. 4.13})$$

D'aquesta manera, queda definit el model cinemàtic de la màquina tenint en compte la posició de l'eina en funció de l'angle de gir de cada motor a l'equació (Eq. 4.7), i tenint en compte la velocitat amb què es mouen el eixos en funció de la velocitat angular de cada motor a l'equació (Eq. 4.10).

## 4.2. Model dinàmic

Per al model dinàmic es faran servir com a referència els mateixos eixos representats a la Figura 4.1. En aquest cas, cal tenir en compte la segona llei de Newton (Eq. 4.14).

$$\sum F = m \cdot a \quad (\text{Eq. 4.14})$$

Per tant, si apliquem adequadament l'equació (Eq. 4.14) per a cada eix s'obtenen les equacions (Eq. 4.15), (Eq. 4.16) i (Eq. 4.17) respectivament:

$$F_x - f_{fx} = m_x \cdot a_x \quad (\text{Eq. 4.15})$$

$$F_y - f_{fy} = m_y \cdot a_y + m_y \cdot g \cdot \cos \alpha \quad (\text{Eq. 4.16})$$

$$F_z - f_{fz} = m_z \cdot a_z + m_z \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (\text{Eq. 4.17})$$

On  $F_x$ ,  $F_y$  i  $F_z$  són les forces aplicades a cada eix en N;  $f_{fx}$ ,  $f_{fy}$  i  $f_{fz}$  les forces de fregament o fricció també en N;  $m_x$ ,  $m_y$  i  $m_z$  les masses que mou cada eix en kg;  $a_x$ ,  $a_y$  i  $a_z$  les acceleracions de cada eix en  $\text{m/s}^2$ ;  $g$  l'acceleració de la gravetat de  $9,81 \text{ m/s}^2$  i finalment  $\alpha$  que és l'angle d'inclinació de l'estructura de la màquina que és de  $12^\circ$ .

En el cas de l'eix X només es tenen en compte les forces degudes al fregament i l'acció del parell del propi motor, mentre que en els casos de l'eix Y i Z, com s'observa a les equacions (Eq. 4.16) i (Eq. 4.17), s'ha de tenir en consideració l'acció de la gravetat. A la Figura 4.3 es

representa l'acció del pes en els eixos Y i Z, el signe en què afecten a l'equació dependrà del sentit dels eixos representats a la Figura 4.1. Com que la força deguda el pes en ambdós casos és en els sentit contrari al eixos apareix restant a l'equació en el costat del sumatori de forces.

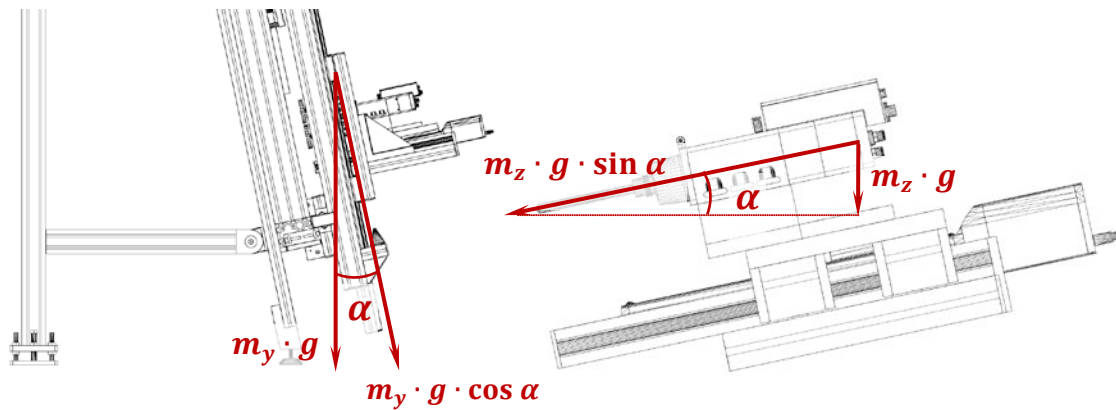
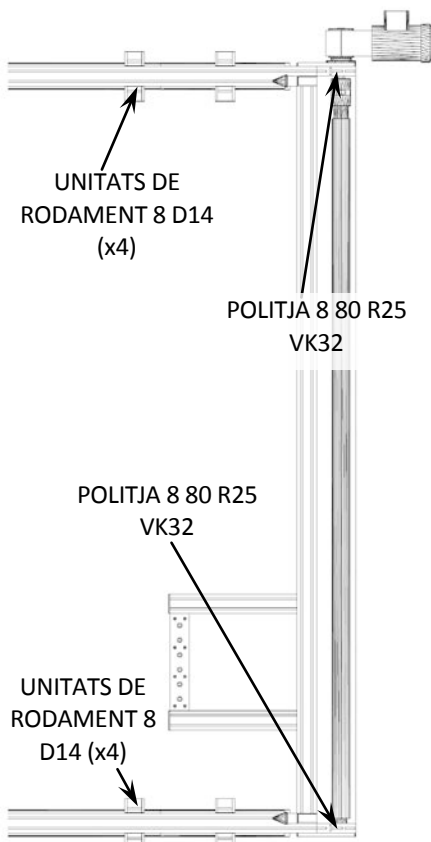


Figura 4.3: Acció de la força gravitatòria als eixos Y i Z.

A continuació s'estudia cada eix per separat per tal de determinar respectivament les forces de fricció i aplicar la segona llei de Newton.

### 4.2.1. Eix X



Per calcular les forces de fregament cal conèixer tots els elements que intervenen en el moviment. Com s'observa a la Figura 4.4 hi ha dos elements a tenir en consideració. Les unitats de rodament de cada carro, que llisquen pel perfil calibrat D14 i les politges 8 80 R25 que transmeten el moviment del motor als carros per mitja de la corretja dentada R25 T10.

Segons les dades del fabricant la fricció de les unitats de rodament és de 15 N per a cada carro de quatre unitats de rodament [ITEM, 2014, p. 468].

Pel que es refereix a les politges, n'hi ha quatre. Les dues motrius (reflectides a la Figura 4.4) i les altres dues a l'extrem oposat que són boges (es poden veure a la Figura 3.6). Segons les dades del fabricant, a la Figura 4.2, el moment de fricció de les politges, tenint en compte que la configuració de la corretja està dissenyada sortint a 80 mm, és de 0,55 N·m. Que al multiplicar per quatre

Figura 4.4: Part motriu de l'eix X

unitats s'obté un moment de fricció total de 2,2 N·m. En una roda o politja el moment es defineix com la força pel radi de la mateixa politja, (Eq. 4.18).

$$\tau = f \cdot r \quad (\text{Eq. 4.18})$$

Com que el radi efectiu de la politja és de  $r_W = 44,6 \text{ mm} = 0,0446 \text{ m}$ , segons especificacions (Figura 4.2), la força de fricció deguda a les politges és de 49,327 N, veure l'equació (Eq. 4.19).

$$f_{f_{\text{politges}_x}} = \frac{2,2 \text{ N} \cdot \text{m}}{0,0446 \text{ m}} = 49,327 \text{ N} \quad (\text{Eq. 4.19})$$

Així doncs, el conjunt de les forces de fricció a l'eix X són:

$$f_{fx} = 30 \text{ N} + 49,327 \text{ N} = 79,327 \text{ N} \quad (\text{Eq. 4.20})$$

El fabricant considera les forces de fregament constants i independents de la velocitat, però per tal de simplificar el model i ja que les unitats de rodament porten les tapetes de lubricació i les politges van lubricades es pot considerar com un fregament viscos. És per això que es fa una aproximació fent el següent supòsit, si s'anomena  $b_x$  el coeficient de fregament viscos a l'eix X,  $f_{fx}$  la força deguda al fregament en N i  $v_x$  la velocitat de desplaçament de l'eix, i es considera que a una velocitat promig d'1 m/s el fregament és de 79,327 N tal com indica el fabricant, llavors s'obté un coeficient de fregament viscos de 79,327 N·s/m, tal com es mostra a l'equació (Eq. 4.21):

$$f_{fx} = b_x \cdot v_x \Rightarrow 79,327 \text{ N} = b_x \cdot 1 \frac{\text{m}}{\text{s}} \Rightarrow b_x = 79,327 \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}} \quad (\text{Eq. 4.21})$$

Pel que fa a la massa, s'ha tingut en compte el pes dels propis carros de l'eix X, tot l'eix Y i l'eix Z complet, en total  $m_x = 218 \text{ kg}$ .

Recuperant l'equació (Eq. 4.15) i afegint els valors obtinguts obtenim l'equació dinàmica per l'eix X:

$$F_x = 218 \cdot a_x + 79,327 \cdot v_x \quad (\text{Eq. 4.22})$$

#### 4.2.2. Eix Y

A l'eix Y els elements que s'han de tenir en compte per la fricció són els quatre carrets de boles PS 4-25 que fan lliscar el carro pels carrils guies i dues politges 8 80 R25 que transmeten el moviment.

Els carrets PS 4-25, segons el catàleg del fabricant [ITEM, 2014, p. 491], se'ls hi ha d'aplicar una força de fricció de 10 N per cadascun, en total 40 N, ja que són quatre carrets de boles.

Les politges, com en l'eix X, la sortida de la corretja dentada és a 80 mm de separació així que el moment de fricció que s'aplicarà també serà de 0,55 N·m per cada politja. En total 1,1 N·m. Fent el mateix càlcul que en l'equació (Eq. 4.19), s'obté que la força de fricció deguda a les politges en aquest cas és de 24,664 N. Per tant:

$$f_{fy} = 40 \text{ N} + 24,664 \text{ N} = 64,664 \text{ N} \quad (\text{Eq. 4.23})$$

Fent el mateix supòsit que a l'eix Y i considerant el fregament com a viscos tot el fregament degut als carrets i politges, anàlogament a l'equació (Eq. 4.21), s'obté  $b_y$ .

$$f_{fy} = b_y \cdot v_y \Rightarrow 64,664 \text{ N} = b_y \cdot 1 \frac{\text{m}}{\text{s}} \Rightarrow b_y = 64,664 \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}} \quad (\text{Eq. 4.24})$$

La massa que s'ha de tenir en compte en aquest cas és la del propi carro Y, on s'inclouen els trepitjadors, marc i escaires de fixació, i tot el que fa referència a l'eix Z. Obtenim doncs, que  $m_y = 53 \text{ kg}$ .

Seguint els mateixos passos i recuperant l'equació (Eq. 4.16) es pot obtenir l'equació del model dinàmic per l'eix Y:

$$F_y = 53 \cdot a_y + 53 \cdot g \cdot \cos \alpha + 64,664 \cdot v_y \quad (\text{Eq. 4.25})$$

### 4.2.3. Eix Z

En aquest últim cas s'ha de tenir en compte les quatre unitats de rodament, que com s'ha explicat per l'eix X, la força de fregament de quatre unitats és de 15 N. I les forces de fregament de la pròpia guia |A|. Aquesta guia en el seu catàleg i especificacions no surten reflectides les forces de fregament, pel que es fa una estimació a partir de les dades que es tenen de les guies de rodament ITEM 8 D14. Es considera una força de fricció per la guia |A| de 10 N. Llavors, la força de fricció total a l'eix Z tenint en compte que també és viscos i que una velocitat d'1 m/s la força de fregament és de 25 N s'obté l'equació (Eq. 4.26):

$$f_{fz} = b_z \cdot v_z = 25 \cdot v_z \quad (\text{Eq. 4.26})$$

La massa a tenir en compte serà totes les unitats de rodament 8 D14 amb les plaques de manegament del trepant i el propi trepant, en total  $m_z = 18,5 \text{ kg}$ .

Tornant a les equacions inicials, si apliquem els valors obtinguts a l'equació (Eq. 4.17) s'obté:

$$F_z = 18,5 \cdot a_z + 18,5 \cdot g \cdot \sin \alpha + 25 \cdot v_z \quad (\text{Eq. 4.27})$$

#### 4.2.4. Equació del model dinàmic

Les equacions obtingues anteriorment (Eq. 4.22), (Eq. 4.25) i (Eq. 4.27) defineixen el model dinàmic de la màquina. En l'equació (Eq. 4.28) es representa el sistema d'equacions que ho resumeix.

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 218 \\ 53 \\ 18,5 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 53 \cdot g \cdot \cos \alpha \\ 18,5 \cdot g \cdot \sin \alpha \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 79,327 \\ 64,664 \\ 25 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix} \quad (\text{Eq. 4.28})$$

#### 4.3. Funció de transferència i PID

Per modelitzar el control de la velocitat dels motors es necessita la funció de transferència del sistema. En la definició del sistema es fixa com a variable d'entrada o de control la posició



Figura 4.5: Sistema en temps discret

desitjada  $x_d(t)$  i la sortida la posició real  $x(t)$  en funció del temps. Si es passa a temps discret per poder fer l'estudi del PID el sistema que s'estudia és el de la Figura 4.5 amb la variable d'entrada  $X_d(s)$  i de sortida  $X(s)$ .

Per tal de dissenyar el PID per assignació de pols es té en compte el model dinàmic obtingut a l'equació (Eq. 4.28), però es reescriu de forma genèrica per als tres eixos de la següent manera en temps continu:

$$f_m(t) = m \cdot \ddot{x}(t) + b \cdot \dot{x}(t) + m \cdot g \quad (\text{Eq. 4.29})$$

On  $f_m(t)$  és la força equivalent del motor en N,  $m$  la massa en kg,  $g$  l'acceleració de la gravetat de  $9,81 \text{ m/s}^2$ ,  $b$  el coeficient de fregament viscos  $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}$ ,  $\ddot{x}(t)$  l'acceleració en  $\text{m/s}^2$  i  $\dot{x}(t)$  la velocitat en  $\text{m/s}$ . Amb els valors de cada eix corresponents i tenint en compte que a l'eix X no hi intervé la gravetat.

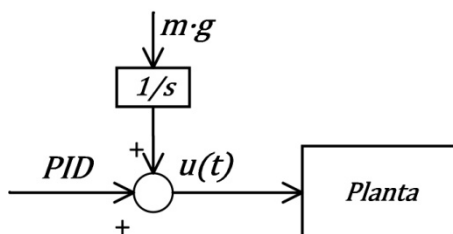


Figura 4.6: Pertorbació de la gravetat en el sistema

Com s'observa a la Figura 4.6, al control de la planta li afectarà el PID i l'acció de la gravetat. Per tant, la consigna de la planta  $u(t)$  serà una certa  $u_c(t)$  (consigna de control) més  $m \cdot g$ , és a dir:

$$u(t) = u_c(t) + m \cdot g \quad (\text{Eq. 4.30})$$

La consigna de control  $u_c(t)$  és el PID i que és per definició:

$$u_c(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(t) \cdot dt + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (\text{Eq. 4.31})$$

On  $e(t)$  és la consigna de l'error. De l'equació (Eq. 4.29) se sap que  $f_m(t)$  és la consigna a controlar i per tant, igualant termes s'obté l'equació (Eq. 4.32):

$$K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(t) \cdot dt + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} + m \cdot g = m \cdot \ddot{x}(t) + b \cdot \dot{x}(t) + m \cdot g \quad (\text{Eq. 4.32})$$

Com es pot observar a l'equació (Eq. 4.32) els termes de la gravetat s'anul·len entre ells. Així doncs, el PID és amb compensació de la gravetat i es pot fer l'estudi del sistema tal com el de l'equació (Eq. 4.33).

$$f(t) = m \cdot \ddot{x}(t) + b \cdot \dot{x}(t) \quad (\text{Eq. 4.33})$$

Com que el controlador actuarà directament sobre el parell del motor i aquest el transmetrà al carro amb una força determinada, es pot considerar que la relació entre el parell i aquesta força és lineal i estan relacionats per una constant que s'anomena  $K$ . Abans de fer la transformada de Laplace de l'equació, es busquen els valors de  $K$  per a cada eix. En el primer cas, l'eix X, la relació entre el parell del motor i la força aplicada al carro serà:

$$f_x(t) = K_x \cdot \tau_x(t) \quad (\text{Eq. 4.34})$$

El parell proporcionat pel motor s'ha de tenir en compte el seu propi rendiment i la relació de transmissió del reductor, també cal saber que el radi efectiu de la politja com es pot observar a la Figura 4.2 és de  $r_w = 44,6 \text{ mm} = 0,0446 \text{ m}$  i per tant, la relació entre la força aplicada al carro i el parell del motor serà:

$$\begin{aligned} f_x(t) &= \frac{\tau_x(t) \cdot i \cdot \eta}{r_w} \Rightarrow \\ \Rightarrow K_x &= \frac{i \cdot \eta}{r_w} = \frac{15,556 \cdot 0,85}{0,0446} = 296,47 \end{aligned} \quad (\text{Eq. 4.35})$$

On  $i$  és la relació de transmissió del reductor de 15,556 i  $\eta$  el rendiment del motor, que en aquest cas és del 85% [LENZE. 2013, p. 5.2-17].

El segon eix, l'Y, la relació entre el parell del motor i la força aplicada al carro serà la mateixa que en el cas de l'eix X ja que el motor i el reductor s'han escollit iguals, així que  $K_y = 296,47$ .

Pel que fa a l'eix Z, funciona amb l'actuador lineal IAI RCP4-SA7C i com que el fabricant no dóna cap indicació sobre el parell proporcionat, es suposarà que el radi equivalent del motor trobat a l'equació (Eq. 4.6) relaciona directament la força aplicada al carro i que per tant,  $K_z = \frac{1}{r_{mz}} = 1569,86$ .

Fent la transformada de Laplace a l'equació (Eq. 4.33) per tal de passar-ho a temps discret es té la següent equació (Eq. 4.36) i la funció de transferència de la planta (Eq. 4.37).

$$F(s) = m \cdot s^2 \cdot X(s) + b \cdot s \cdot X(s) \quad (\text{Eq. 4.36})$$

$$G_p(s) = \frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1}{m \cdot s^2 + b \cdot s} \quad (\text{Eq. 4.37})$$

Així doncs, el sistema descrit a la Figura 4.5 es desglossa de la següent forma:

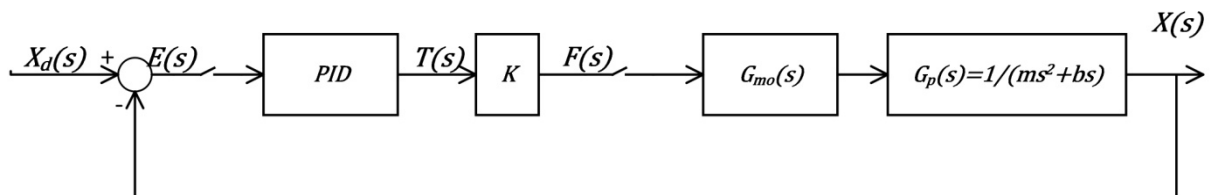


Figura 4.7: Diagrama de blocs del control de cada eix

On  $E(s)$  és l'error donat per la diferència de la posició real amb la desitjada que se li dóna al PID,  $G_{mo}(s)$  un mantenidor d'ordre zero per tal de passar la senyal discreta a continua i  $T(s)$  el parell del motor. Com s'observa a la Figura 4.7 abans del bloc del PID i abans del mantenidor es representen el mostrejadors de temps discret.

Per a realitzar els càlculs s'anomenarà  $G(s)$  a:

$$G(s) = K \cdot G_{mo}(s) \cdot G_p(s) = K \cdot G_{mo}(s) \cdot \frac{1}{m \cdot s^2 + b \cdot s} \quad (\text{Eq. 4.38})$$

I per definició el mantenidor d'ordre zero és:

$$G_{mo}(s) = \frac{1 - e^{-s \cdot T}}{s} \quad (\text{Eq. 4.39})$$

On  $T$  és el període de mostratge dels mostrejadors en segons.

L'estudi dels pols es farà en el pla  $Z$  pel que s'haurà de fer la transformada  $\mathfrak{z}$  de  $G(s)$ ,  $\mathfrak{z}\{G(s)\}$ :

$$G(z) = \mathfrak{z}\left\{K \cdot G_{mo}(s) \cdot \frac{1}{m \cdot s^2 + b \cdot s}\right\} = \frac{K}{b} \cdot \mathfrak{z}\left\{\frac{1 - e^{-sT}}{s}\right\} \cdot \mathfrak{z}\left\{\frac{\frac{b}{m}}{s^2 \left(s + \frac{b}{m}\right)}\right\} =$$

$$= \frac{K}{b} \cdot (1 - z^{-1}) \cdot \frac{z \cdot \left[\left(\frac{b}{m} \cdot T - 1 + e^{-\frac{b}{m}T}\right) \cdot z + \left(1 - e^{-\frac{b}{m}T} + \frac{b}{m} \cdot T \cdot e^{-\frac{b}{m}T}\right)\right]}{\frac{b}{m} \cdot (z - 1)^2 \cdot \left(z - e^{-\frac{b}{m}T}\right)} \quad (\text{Eq. 4.40})$$

Per tant, simplificant i reordenant la funció de transferència de la planta és:

$$G(z) = \frac{\frac{K \cdot m}{b^2} \cdot \left(\frac{b}{m} \cdot T - 1 + e^{-\frac{b}{m}T}\right) \cdot z + \frac{K \cdot m}{b^2} \cdot \left(1 - e^{-\frac{b}{m}T} + \frac{b}{m} \cdot T \cdot e^{-\frac{b}{m}T}\right)}{z^2 - \left(1 + e^{-\frac{b}{m}T}\right) \cdot z + e^{-\frac{b}{m}T}} \quad (\text{Eq. 4.41})$$

Pel que fa a la funció de transferència del controlador PID en el pla  $Z$  és:

$$PID(z) = k_p + k_i \cdot \frac{T \cdot (z + 1)}{2 \cdot (z - 1)} + k_d \cdot \frac{z - 1}{T \cdot z} \quad (\text{Eq. 4.42})$$

On  $k_p$  és el guany proporcional,  $k_i$  el guany integral,  $k_d$  el guany derivatiu i  $T$  el període de mostratge. Amb les constants  $k_p$ ,  $k_i$  i  $k_d$  podem definir el controlador i són els paràmetres que s'introduiran al controlador real per tal de posicionar els eixos.

Per simplificar es planteja el següent canvi:

$$k_i^* = \frac{k_i \cdot T}{2} \quad (\text{Eq. 4.43})$$

$$k_d^* = \frac{k_d}{T} \quad (\text{Eq. 4.44})$$

Amb la qual cosa l'equació (Eq. 4.42) del PID queda:

$$PID(z) = k_p + k_i^* \cdot \frac{z + 1}{z - 1} + k_d^* \cdot \frac{z - 1}{z} \quad (\text{Eq. 4.45})$$

Amb les equacions (Eq. 4.41) i (Eq. 4.45) es pot escriure la transmitància de llaç tancat com:

$$llaç(z) = \frac{PID(z) \cdot G(z)}{1 + PID(z) \cdot G(z)} = \frac{N(z)}{D(z)} \quad (\text{Eq. 4.46})$$

Per simplificar els càlculs, a l'equació de la funció de transferència de la planta (Eq. 4.41) se li



assignen etiquetes a cada coeficient de tal manera que s'escriu l'equació:

$$G(z) = \frac{n_1 \cdot z + n_0}{z^2 + d_1 \cdot z + d_0}$$

$$n_1 = \frac{K \cdot m}{b^2} \cdot \left( \frac{b}{m} \cdot T - 1 + e^{-\frac{b}{m}T} \right), n_0 = \frac{K \cdot m}{b^2} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{b}{m}T} + \frac{b}{m} \cdot T \cdot e^{-\frac{b}{m}T} \right) \quad (\text{Eq. 4.47})$$

$$d_1 = - \left( 1 + e^{-\frac{b}{m}T} \right), d_0 = e^{-\frac{b}{m}T}$$

Per buscar el PID per assignació de pols cal trobar els pols del sistema, per tant, el denominador de la transmitància de laç  $D(z)$  és el que els defineix. Com que al desenvolupar el denominador  $D(z)$  queda un polinomi de quart grau, significa que s'hauran de buscar quatre pols i que factoritzant el mateix denominador la forma que hauria de prendre seria com la descrita a continuació:

$$D(z) = (z - p_1) \cdot (z - p_2) \cdot (z - p_3) \cdot (z - p_4) \quad (\text{Eq. 4.48})$$

On  $p_1, p_2, p_3$  i  $p_4$  són els pols del sistema i que per tant, comparant els coeficients  $D(z) = 1 + PID(z) \cdot G(z)$  amb els que s'obtenen de l'equació (Eq. 4.48) es poden trobar els paràmetres del controlador. Desenvolupant ambdós polinomis i igualant-ne els seus coeficients s'obté:

$$\begin{aligned} -1 + k_i^* n_1 + d_1 + k_d^* n_1 + k_p n_1 &= (-p_1 - p_2 - p_3 - p_4) \\ -d_1 - k_p n_1 + k_p n_0 + d_0 - 2k_d^* n_1 + k_i^* n_0 + k_i^* n_1 + k_d^* n_0 &= \\ &= (p_1 p_2 - (-p_1 - p_2) p_3 - (-p_1 - p_2 - p_3) p_4) \\ -2k_d^* n_1 + k_i^* n_0 + k_i^* n_1 + k_d^* n_0 &= (-p_1 p_2 p_3 - (p_1 p_2 - (-p_1 - p_2) p_3) p_4) \\ k_d^* n_0 &= p_1 p_2 p_3 p_4 \end{aligned} \quad (\text{Eq. 4.49})$$

Com que en resulta un sistema de quatre equacions hi ha quatre incògnites, que són els paràmetres dels controlador PID  $k_p, k_i^*$  i  $k_d^*$  més un dels pols que quedarà lliure, per exemple  $p_4$ . Els altres tres s'hauran de fixar prèviament. Per tal de fixar els dos primers pols  $p_1$  i  $p_2$ , fixem com a requeriments del sistema que el coeficient d'esmoreïment sigui de  $\xi = 0,5$  i els temps d'establiment d'un segon, és a dir, que s'estabilitza en un segon. Sabent que el temps d'establiment és:

$$t_s = \frac{4}{\xi \cdot \omega_n} \quad (\text{Eq. 4.50})$$

Es pot obtenir la freqüència natural  $\omega_n$ :

$$\omega_n = \frac{4}{\xi \cdot t_s} = \frac{4}{0,5 \cdot 1} = 8 \text{ rad/s} \tag{Eq. 4.51}$$

Com que es tracta d'un sistema de segon ordre els pols  $p_1$  i  $p_2$  seran en el pla s:

$$s_{1,2} = -\xi \cdot \omega_n \pm j \cdot \omega_n \cdot \sqrt{1 - \xi^2} \tag{Eq. 4.52}$$

Passant al pla Z el mòdul dels pols serà  $|z| = e^{-\xi \cdot \omega_n \cdot T}$  i l'argument  $\arg(z) = (\omega_n \cdot \sqrt{1 - \xi^2}) \cdot T$  on  $T$  és el mateix període de mostratge que ve definit pels mostrejadors de la Figura 4.7.

En les especificacions dels controladors de LENZE 8400, el que s'utilitzarà en el control dels eixos com es pot en el proper capítol 6 del control de la màquina, s'indica un període de mostratge per defecte de 1 ms, és per aquesta raó que es farà servir aquesta dada per a fer tots els càlculs a continuació. Per tant,  $T = 0,001 \text{ s}$ .

D'aquesta manera, substituint els valors obtinguts es poden trobar els dos primers pols en el pla Z:

$$\begin{aligned} |z| &= e^{-\xi \cdot \omega_n \cdot T} = e^{-0,5 \cdot 8 \cdot 0,001} = 0,996 \\ \arg(z) &= (\omega_n \cdot \sqrt{1 - \xi^2}) \cdot T = (8 \cdot \sqrt{1 - 0,5^2}) \cdot 0,001 = 0,00693 \text{ rad} \end{aligned} \tag{Eq. 4.53}$$

Transformant de coordenades polars a imaginàries els dos primers pols assignats són:

$$\begin{aligned} p_1 &= 0,996 + 0,0069 \cdot j \\ p_2 &= 0,996 - 0,0069 \cdot j \end{aligned} \tag{Eq. 4.54}$$

El tercer pol es fixa prop de l'origen i real per tal que no faci inestable el sistema, per exemple,  $p_3 = 0,01$ .

Ara cal resoldre el sistema d'equacions plantejat a (Eq. 4.49) que si s'expressa matricialment en resulta:

$$\begin{bmatrix} -1 & -n_1 & -n_1 & -n_1 \\ p_2 + p_3 + p_1 & n_1 - n_0 & -n_1 - n_0 & -n_0 + 2n_1 \\ -p_1 p_2 - p_1 p_3 - p_2 p_3 & n_0 & -n_0 & 2n_0 - n_1 \\ p_1 p_2 p_3 & 0 & 0 & -n_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_4 \\ k_p \\ k_i^* \\ k_d^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_1 + p_2 + p_3 - 1 + d_1 \\ -p_1 p_2 - p_1 p_3 - p_2 p_3 + d_0 - d_1 \\ p_1 p_2 p_3 - d_0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{Eq. 4.55}$$

Aquest sistema lineal (Eq. 4.55)  $Ax=b$ , es pot resoldre fent  $x=\text{inv}(A) \cdot b$ , ja que la matriu és quadrada de 4x4 i el vector b té 4 elements. Resolent amb algun programa tipus MATLAB o similar s'obtenen els resultats es mostren a continuació per a cada eix.

Per a l'eix X:

$$m_x = 218 \text{ kg}, b_x = 79,327 \text{ N} \cdot \text{s/m}, K_x = 296,47 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \begin{cases} k_{px} = 117,27 \\ k_{ix} = 566,80 \\ k_{dx} = 14,41 \end{cases} \quad (\text{Eq. 4.56})$$

Per a l'eix Y:

$$m_y = 53 \text{ kg}, b_y = 64,664 \text{ N} \cdot \text{s/m}, K_y = 296,47 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \begin{cases} k_{py} = 29,73 \\ k_{iy} = 147,49 \\ k_{dy} = 3,50 \end{cases} \quad (\text{Eq. 4.57})$$

I finalment per a l'eix Z:

$$m_z = 18,5 \text{ kg}, b_z = 25 \text{ N} \cdot \text{s/m}, K_z = 1569,86 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \begin{cases} k_{pz} = 1,97 \\ k_{iz} = 9,82 \\ k_{dz} = 0,23 \end{cases} \quad (\text{Eq. 4.58})$$

Aquests valors són els que s'utilitzaran en els controladors de cada eix.

## 5. CÀLCULS I CONSIDERACIONS EN EL DISSENY MECÀNIC

En aquest apartat es presenten els càlculs justificatius per al disseny mecànic de la màquina. Dels conjunts presentats al capítol 3 es destaquen els més representatius de cada un.

### 5.1. Taula de treball

L'accionament de la taula es fa a través d'un cilindre pneumàtic DNC-50-50-PPV-A tal com s'ha vist en el disseny. Les especificacions dels fabricant, FESTO, indiquen una força a l'avançar de 1178 N i de 990 N en el retrocés [FESTO, DNC. 2014, p. 10]. Per veure que aquestes forces són suficients per fer la translació de la taula es comprovaran les forces a vèncer. La taula es desplaça a través de sis unitats de rodament com s'ha vist a la Figura 3.3, aquestes unitats de rodament tenen una força de fricció de 15 N cada quatre unitats que conformen un carro [ITEM, 2014, p. 468]. En aquest cas, són sis unitats el que representen 22,5 N de fregament. També cal tenir en compte que sobre la taula s'hi recolzarà la placa, es considera el pitjor cas (placa gran i pesada) que seria una placa de resina cel·lulòsica de 2200 x 2200 mm i gruix de 10 mm. Tenint en compte les seves característiques [ITEM, 2014, p. 304], la seva densitat és de 1,4 g/cm<sup>3</sup>, és a dir, la placa de les dimensions esmentades té un pes de 67,76 kg. Sabent que la definició de la força de fregament és (Eq. 5.1):

$$F_f = \mu \cdot N \quad (\text{Eq. 5.1})$$

On N és la normal en N i  $\mu$  el coeficient de fricció. Com que la taula està inclinada 12° respecte la vertical (Figura 5.1) la força pes que defineix la normal N és de 138,20 N, veure (Eq. 5.2) i (Eq. 5.3).

$$N = m \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (\text{Eq. 5.2})$$

$$N = 67,76 \cdot 9,81 \cdot \sin 12^\circ = 138,20 \text{ N} \quad (\text{Eq. 5.3})$$

Si es considera el coeficient de fricció dels perfils de lliscament que s'agafa com a referència de  $\mu = 0,2$  [26], la força de fregament serà de 27,64 N (Eq. 5.4).

$$F_f = 0,2 \cdot 138,20 = 27,64 \text{ N} \quad (\text{Eq. 5.4})$$

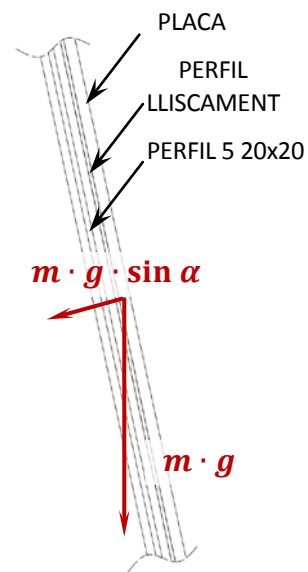


Figura 5.1: Distribució del pes de la placa

En total, per tant, el cilindre DNC haurà de vèncer els 22,5 N de fregament dels rodaments i els 27,64 N de la placa, 50,14 N. Així doncs, es comprova com el cilindre escollit té marge de sobres per poder treballar sense estar forçat.

La taula de treball és on es recolzarà la placa i els trepitjadors la fixaran contra els perfils de suport per a fer el forat tal com es mostra a la Figura 5.2. Quan el trepant es disposa a mecanitzar la placa exercirà una força contra la placa. Per tal d'assegurar que es podrà mecanitzar sense dificultat es calcula la fletxa que es genera a la placa degut a aquesta força.

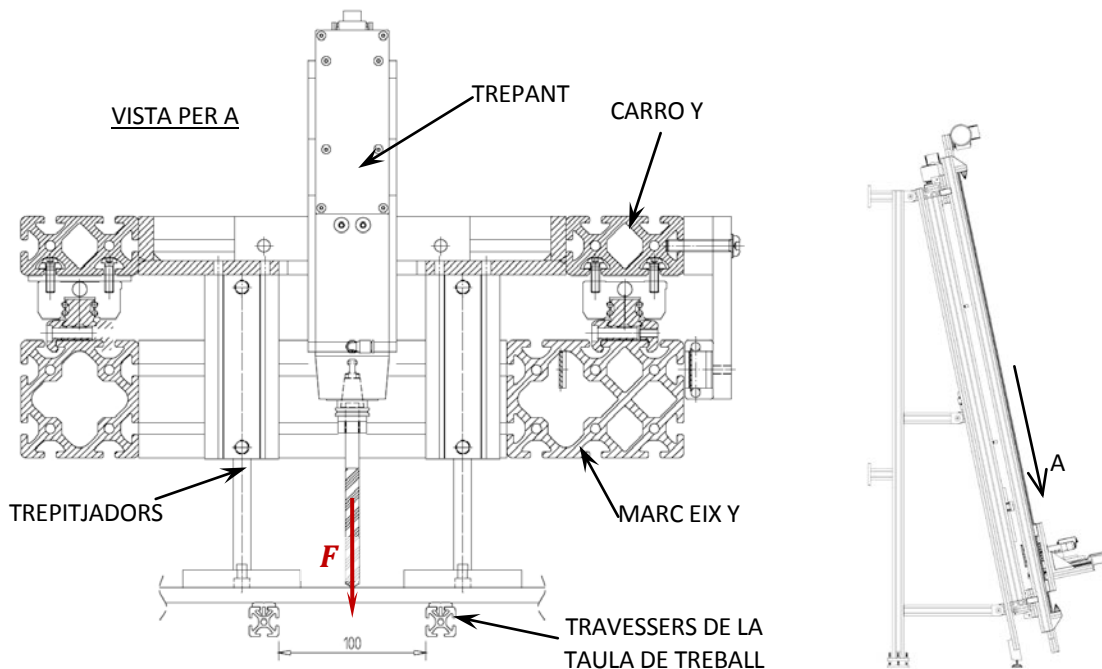


Figura 5.2: Força del mecanitzat a la placa (vista superior)

Com s'observa a la Figura 5.2 la placa es pot considerar que està completament fixada pels dos extrems per tant, es pot usar la equació (Eq. 5.5) [ITEM, 2014, p. 602-603].

$$f = \frac{F \cdot l^3}{192 \cdot E \cdot I \cdot 10^4} \quad (\text{Eq. 5.5})$$

On  $f$  és la fletxa en mm,  $F$  la força o càrrega en N,  $l$  la longitud entre perfils en mm,  $E$  el mòdul d'elasticitat en  $\text{N/mm}^2$  i per últim,  $I$  el moment d'inèrcia en  $\text{cm}^4$ . Per a fer els càlculs es suposa que es forada una placa de policarbonat, en què  $E = 2200 \text{ N/mm}^2$  [ITEM, 2014, p. 299] i el càlcul del seu moment d'inèrcia seria, en cm, ample de 10 cm i alt de 0,3 cm (Eq. 5.6):

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{10 \cdot 0,3^3}{12} = 0,0225 \text{ cm}^4 \quad (\text{Eq. 5.6})$$

Aplicant els valors a l'equació (Eq. 5.5) i suposant que la força que s'exerceix és equivalent a uns 12 kg, arrodonint a 120 N, s'obté una fletxa de 1,26 mm, suficientment petita com perquè el trepant pugui realitzar el mecanitzat.

També es pot tenir en compte que els anomenats trepitjadors en el moment d'estar exercint força contra la placa per fixar-la a la taula, no es deformin massa els perfils 5 20x20 on recolza la placa. Tal com es mostra a la Figura 5.3.

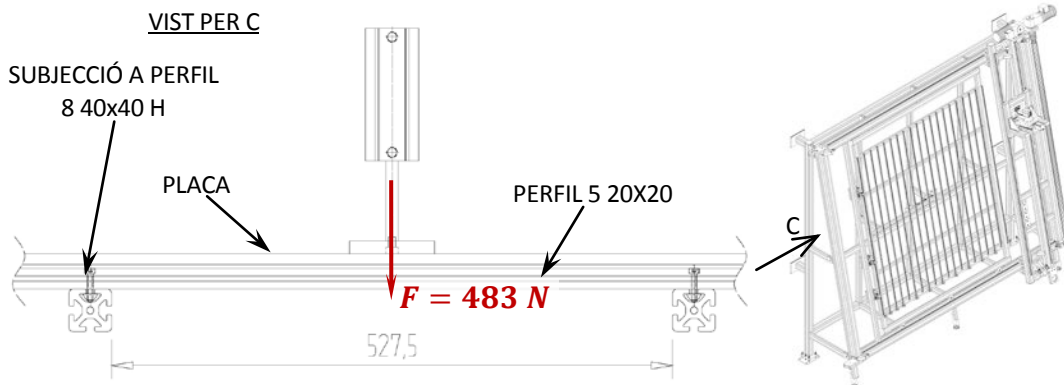


Figura 5.3: Força dels trepitjadors a l'estructura de la taula

Per calcular la deformació del perfil 5 20x20 es farà servir la mateixa equació (Eq. 5.5) ja que estan fixats als perfils transversers 8 40x40 H. La força que fa el cilindre compacte segons el fabricant és de 483 N a l'avanç [FESTO, ADVU. 2014, p. 12]. El moment d'inèrcia del perfil 5 20x20 és de  $0,72 \text{ cm}^4$ , segons especificacions [ITEM. 2014, p. 17], mentre que el mòdul d'elasticitat de l'alumini és de  $70000 \text{ N/mm}^2$ . Com s'observa a la Figura 5.3 la longitud entre perfils és de 527,5 mm d'acord amb el disseny de la màquina. Aplicant els valors s'obté com a resultat una fletxa de 0,73 mm (veure (Eq. 5.7)).

$$f = \frac{F \cdot l^3}{192 \cdot E \cdot I \cdot 10^4} = \frac{483 \cdot (527,5)^3}{192 \cdot 70000 \cdot 0,72 \cdot 10^4} = 0,73 \text{ mm} \quad (\text{Eq. 5.7})$$

Aquest resultat és òptim ja que la fletxa obtinguda no arriba ni al mil·límetre de deformació, amb la qual cosa és completament acceptable.

## 5.2. Eix X

Per l'eix X es trasllada pràcticament tota la màquina, ja que els dos carros que disposa mouen tot l'eix Y i el Z. Això significa que ha de desplaçar una massa de 218 kg tenint en compte el propi pes dels carros. Per això resulta interessant comprovar els esforços màxims que podran suportar les unitats de rodament que s'utilitzen. Al catàleg d'ITEM [ITEM. 2014, p. 469], s'especifiquen els esforços i moments màxim de les unitats de rodaments 8 D14. A la Figura 5.4 es representen la força axial i radials màxims que pot assumir un sol rodament, que en el cas de les guies 8 D14 són de  $F_R = 1200 \text{ N}$  i  $F_A = 400 \text{ N}$ . Com que l'eix X està inclinat respecte la vertical  $12^\circ$ , els esforços del propi pes de la màquina quedaran repartits com es mostra a la Figura 5.5.

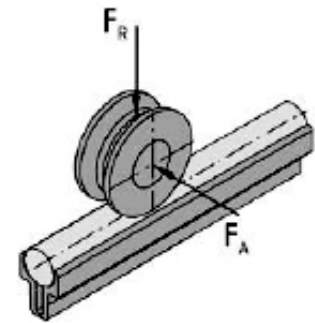


Figura 5.4: Esforços al rodament [ITEM. 2014, p. 469]

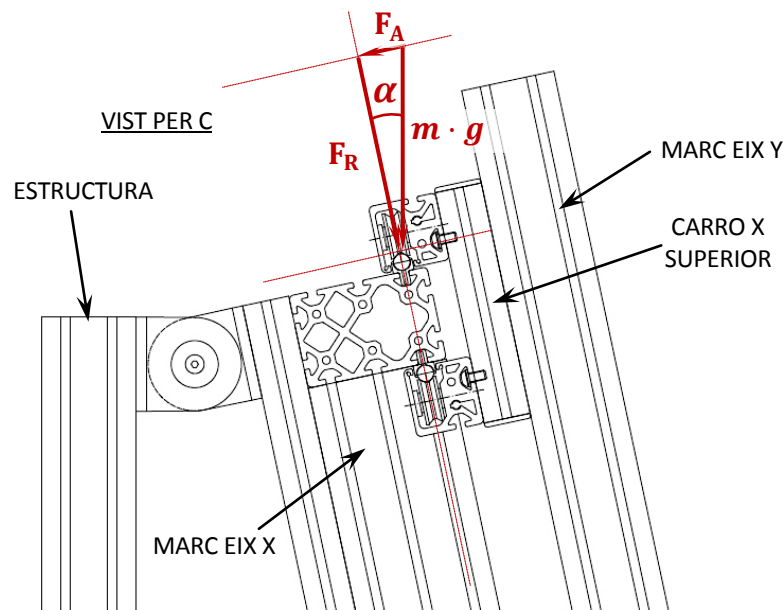


Figura 5.5: Esforços axials i radials a les unitats de rodament

A la Figura 5.5 es pot observar el carro superior, però en el capítol 3 s'ha vist que disposa de dos carros i que per tant, en total, hi ha vuit unitats de rodament 8 D14. Amb la qual cosa els esforços  $F_A$  queden repartits entre les vuit unitats de rodament, mentre que  $F_R$  es reparteix entre les quatre unitats de rodament que es desplacen per la part superior del perfil i suporten tota la component vertical del pes. Així doncs es planteja el problema de la següent manera:

$$F_A = m \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (\text{Eq. 5.8})$$

$$F_{A(MAX)} = 400 \text{ N} \cdot 8 \text{ unitats} = 3200 \text{ N} \Rightarrow \quad (\text{Eq. 5.9})$$

$$\Rightarrow 3200 = m_{(MAX)} \cdot 9,81 \cdot \sin 12^\circ \Rightarrow m_{(MAX)} = 1568,93 \text{ kg}$$

$$F_R = m \cdot g \cdot \cos \alpha \quad (\text{Eq. 5.10})$$

$$F_{R(MAX)} = 1200 \text{ N} \cdot 4 \text{ unitats} = 4800 \text{ N} \Rightarrow \quad (\text{Eq. 5.11})$$

$$\Rightarrow 4800 = m_{(MAX)} \cdot 9,81 \cdot \sin 12^\circ \Rightarrow m_{(MAX)} = 500,23 \text{ kg}$$

A les equacions (Eq. 4.9) i (Eq. 4.11) es troba la massa màxima admesa coneixent els esforços màxims que admet. El segon cas és el més restrictiu i per tant el que s'ha de tenir en consideració. Com que tot el pes que hauran de traslladar és de 218 kg els rodaments podran treballar sobradament.

La vida útil dels rodaments segons el fabricant és [ITEM. 2014, p. 612]:

$$L = \left(\frac{C}{P}\right)^3 \cdot 100 \quad (\text{Eq. 5.12})$$

$$L_h = \left(\frac{C}{P}\right)^3 \cdot \frac{1666}{\bar{v}} \quad (\text{Eq. 5.13})$$

On  $L$  és la vida en km,  $L_h$  la vida útil en hores,  $C$  el factor de càrrega dinàmica en N que per les unitats de rodament 8 D14 és de 7800 N [ITEM. 2014, p. 472],  $P$  la càrrega en N i  $\bar{v}$  la velocitat mitja del carro en m/min. Si es considera la càrrega completa dividida entre les vuit unitats de rodament, és a dir,  $218 \text{ kg} / 8 \text{ unitats} = 27,25 \text{ kg/unitat}$  la càrrega  $P$  és de 267,32 N. I com a velocitat mitja s'agafa la màxima de  $1 \text{ m/s} = 60 \text{ m/min}$ , la vida útil dels rodaments aplicant aquests valors a les equacions (Eq. 5.12) i (Eq. 5.13) serà de:

$$L = \left(\frac{7800}{267,32}\right)^3 \cdot 100 = 2.484.146,85 \text{ km} \quad (\text{Eq. 5.14})$$

$$L_h = \left(\frac{7800}{267,32}\right)^3 \cdot \frac{1666}{60} = 689.764,78 \text{ h} = 78,74 \text{ anys} \quad (\text{Eq. 5.15})$$

Com s'observa les unitats de rodament en condicions normals de servei i funcionaments poden funcionar durant molt de temps.

També és útil calcular el factor de seguretat de càrrega, que segons el fabricant hauria de ser



superior a 3 i es calcula com [ITEM. 2014, p. 612]:

$$S_0 = \frac{C_0}{P} > 3 \quad (\text{Eq. 5.16})$$

On a l'equació (Eq. 5.16),  $S_0$  és el factor de càrrega i és adimensional,  $C_0$  el factor de càrrega estàtica en N que per les unitats de rodament 8 D14 és de 4400 N i  $P$  la càrrega en N. La càrrega és de 267,32 N i per tant,  $S_0 = 16,5 > 3$ , és més gran que el recomanat.

Finalment, es calcula el moment màxim que cada carro segons les dades de la Figura 5.6. Sabent que la configuració dels dos carros de l'eix X la  $b$  és  $b = 80 \text{ mm} = 0,08 \text{ m}$ , ja que està muntat sobre un perfil 8 120x80 H (veure la Figura 5.5) per la part que fa 80 mm i que la separació entre rodaments  $l$  és de 0,37 m (veure plànols constructius a l'annex A) es poden trobar els diferents moments

màxims que pot assumir cada carro. En aquest cas és rellevant conèixer  $M_z$  (segons la referència de la Figura 5.6) ja que és el moment en la direcció del desplaçament.

$$M_z = 800 \cdot b = 800 \cdot 0,37 = 296 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (\text{Eq. 5.17})$$

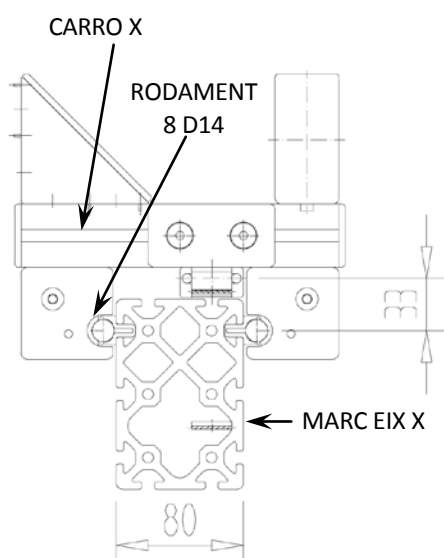


Figura 5.7: Posició de la corretja respecte les unitats de rodament

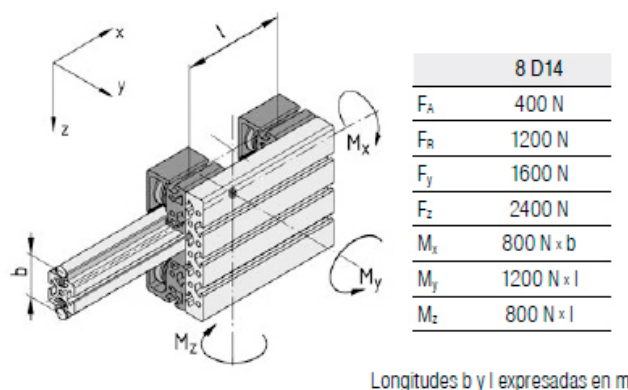


Figura 5.6: Moment màxims aplicables al carro amb unitats de rodaments 8 D14 [ITEM. 2014, p. 469]

El parell nominal del motor, que en el cas del model escollit és de 5,7 N·m [LENZE. 2013, p. 5.2-17] multiplicat per la relació de transmissió del reductor  $i = 15,556$  i considerant el rendiment del motor del 85%, s'obté un parell de 75,37 N·m (Eq. 5.18) que es transmetria a les dues politzes 8 80 R25 VK32.

$$M_N = 5,7 \cdot 15,556 \cdot 0,85 = 75,37 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (\text{Eq. 5.18})$$

Les politzes al seu temps transmeten aquest parell a través de la corretja al carro, com que el radi efectiu de la politzeta és de 0,0446 m significa que transmet una força al carro de 1689,88N (Eq. 5.19).

$$M = F \cdot r \Rightarrow 75,37 = F \cdot 0,0446 \Rightarrow F = 1689,88 \text{ N} \quad (\text{Eq. 5.19})$$

A la Figura 5.7 es mostra la posició de la corretja respecte les unitats de rodament a l'eix X. Com que la distància entre el centre del rodament i la corretja és de 33 mm, o sigui, 0,033 m el moment que rebria el carro seria de 55,77 N·m (Eq. 5.21), molt per sota dels 296 N·m admesos de l'equació (Eq. 5.17).

$$M_{\text{carro}} = 1689,88 \text{ N} \cdot 0,033 \text{ m} = 55,77 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (\text{Eq. 5.20})$$

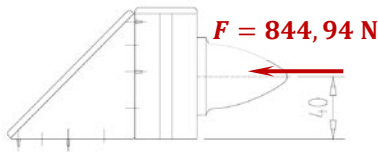


Figura 5.8: Topall mecànic

Seguint en el supòsit que el motor està proporcionant un parell nominal i que s'està aplicant una força de desplaçament al carro de 1689,88 N, es comprova que els topalls mecànics poden absorbir un suposat impacte (Figura 5.8). El propi topall parabòlic M10 D50x58 [ITEM. 2014, p. 427] absorbeix fins a 1057 N amb una deformació de 35 mm, segons característiques.

Com que queda repartit entre els dos topalls cadascun absorbiria la meitat, és a dir, 844,94 N. I pel que fa a l'escaire Zn 8 80x80, que subjecta el topall, pot assumir un moment inferior a 150 N·m [ITEM. 2014, p. 90], per tant, tal com s'observa a la Figura 5.8 si la força és de 844,94 N i està a una distància de 40 mm, o 0,04 m el moment d'impacte al topall seria de:

$$M_{\text{escaire}} = 844,94 \text{ N} \cdot 0,04 \text{ m} = 33,80 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (\text{Eq. 5.21})$$

El resultat obtingut a l'equació (Eq. 5.21) és força inferior a l'admissible que és de 150N·m. Si es fa el supòsit que el servomotor es descontrola i passa a donar el seu parell màxim de 23,6 N·m i que per tant transmetrà a les politges 312,05 N·m .

$$M_{\text{MAX}} = 23,6 \cdot 15,556 \cdot 0,85 = 312,05 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (\text{Eq. 5.22})$$

Si es realitzen els mateixos càlculs anteriors amb aquest nou valor s'obtenen els següents resultats:

$$F_{\text{MAX}} = \frac{312,05}{0,0446} = 6996,71 \text{ N} \quad (\text{Eq. 5.23})$$

$$M_{\text{carro}} = 6996,71 \text{ N} \cdot 0,033 \text{ m} = 230,89 \text{ N} \cdot \text{m} < 296 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (\text{Eq. 5.24})$$

$$M_{\text{escaire}} = \frac{6996,71}{2} \cdot 0,04 = 139,93 \text{ N} \cdot \text{m} < 150 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (\text{Eq. 5.25})$$

Com es veu a les equacions (Eq. 5.23), (Eq. 5.24) i (Eq. 5.25) els valors obtinguts en un suposat cas extrem del motor descontrolat aplicant el seu parell màxim, serien admissibles pels rodaments i pels topalls, encara que estaria treballant al límit i per exemple el parabòlic de M10 D50x58 ja no absorbiria tota la força de l'impacte.

Per altra banda, de l'equació de l'equació de la cinemàtica (Eq. 4.10) i considerant que el motor gira a velocitat nominal,  $3400 \text{ min}^{-1}$  segons el catàleg, podem saber la velocitat lineal a la que es mou el carro:

$$v_x = 0,002856 \text{ m} \cdot 3400 \text{ min}^{-1} \cdot \frac{2 \cdot \pi \text{ rad}}{1} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 1,02 \text{ m/s} \quad (\text{Eq. 5.26})$$

Llavors, a partir de la velocitat obtinguda a l'equació (Eq. 5.26) i aplicant l'equació de la dinàmica d'aquest eix (Eq. 4.22) amb la força aplicada al carro trobada a l'equació (Eq. 5.19) s'obté com a resultat l'acceleració del carro:

$$a_x = \frac{F_x - 79,327 \cdot v_x}{218} = \frac{1689,88 - 79,327 \cdot 1,02}{218} = 7,38 \text{ m/s}^2 \quad (\text{Eq. 5.27})$$

### 5.3. Eix Y

El desplaçament del carro de l'eix Y és pràcticament vertical com es pot observar a la Figura 3.1 i a la Figura 3.9, és per això que en aquest cas l'acció de la gravetat serà destacable. Per aquest motiu, en aquest cas el disseny de les guies s'ha fet amb la guia prismàtica PS 4-25, en lloc de les guies lineals 8 D14 escollides per la taula de treball i l'eix X. Les característiques principals de cada carret de boles estan resumides a la Figura 5.9.

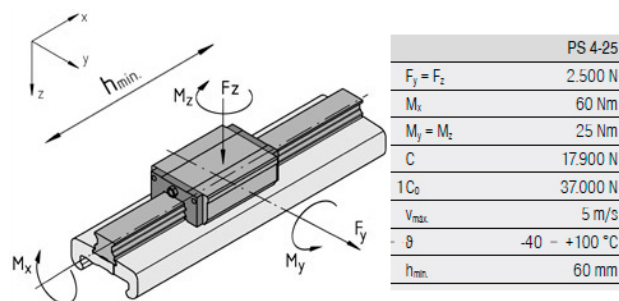


Figura 5.9: Característiques de les guies lineals PS 4-25 [ITEM. 2014, p. 491]

En aquest cas els esforços màxims són  $F_y = F_z = 2500 \text{ N}$  tal com s'indica a les característiques. La massa que mourà el carro Y, és la seva pròpia tenint en compte que porta incorporats el trepitjadors pneumàtics i la seva placa de fixació, més tot el conjunt de l'eix Z, en total 53 kg.

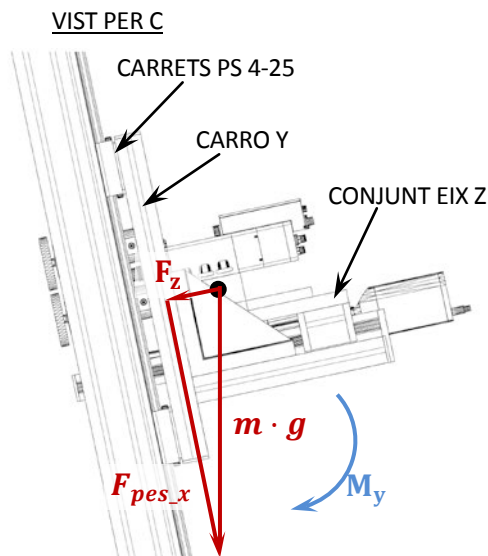


Figura 5.10: Distribució de forces i moments al carro de l'eix Y

Tal com es representa a la Figura 5.10 usant les referències i nomenclatura de la Figura 5.9, la força  $F_z$  serà:

$$F_z = m \cdot g \cdot \sin \alpha \Rightarrow \Rightarrow F_z = 53 \cdot 9,81 \cdot \sin 12^\circ = 108,10 \text{ N} \quad (\text{Eq. 5.28})$$

De l'equació (Eq. 5.28) es comprova que la força  $F_z$  és molt inferior als 2500 N admesos pels carrets.

Pel que fa al càlcul del moment  $M_y$  (de la Figura 5.9) es considera la força  $F_{pes_x}$  deguda al pes i tenint en compte que el centre de gravetat quan la cursa de l'eix Z és 0 mm, és de 60 mm ( $d_{CGL} = 0,06 \text{ m}$ )

desplaçat respecte del carro Y, tal com es representa a la mateixa Figura 5.10. La força i el parell degut al pes seran respectivament:

$$F_{pes_x} = m \cdot g \cdot \cos \alpha = 53 \cdot 9,81 \cdot \cos 12^\circ = 508,57 \text{ N} \quad (\text{Eq. 5.29})$$

$$M_{pes_x} = 508,57 \cdot 0,06 = 30,51 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (\text{Eq. 5.30})$$

La força provocada pel motor si està aplicant el seu parell nominal en el mateix sentit que el del pes és de 1689,88 N, com es veu a les equacions (Eq. 5.18) i (Eq. 5.19). Aquesta força deguda al motor s'ha de tenir en compte que la distància entre el tensor, punt on es transmet la força al carro, fins als carrets és de 20 mm ( $d_{tensor} = 0,02 \text{ m}$ ) i per tant, fent els càlculs corresponents (Eq. 5.31), el parell  $M_y$  seria de 64,31 N·m.

$$M_y = F_{motor} \cdot d_{tensor} + M_{pes_x} = 1689,88 \cdot 0,02 + 30,51 = 64,31 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (\text{Eq. 5.31})$$

El moment màxim és de 25 N·m (veure la Figura 5.9) per cada carret de boles. El parell que s'ha obtingut a l'equació (Eq. 5.31) és de 64,31 N·m que s'ha de repartir entre els quatre carrets de boles del carro, és a dir, cada carret estarà sotmès a un parell de 16,08 N·m, inferior als 25 N·m admissibles.

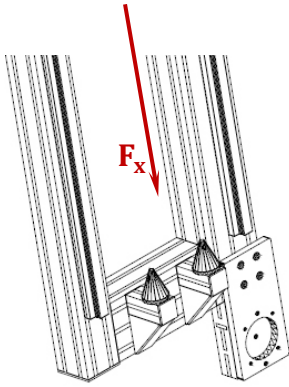


Figura 5.11: Topalls inferiors eix Y

La mateixa força  $F_{pes_x}$  deguda al propi pes, calculada a l'equació (Eq. 5.29), es pot usar per a calcular l'hipotètic cas de fallada de la màquina i el carro Y quedés lliure respecte el motor i així poden descendir fins a topiar amb els topalls inferiors. El motor instal·lat a l'eix Y incorpora un fre electromagnètic que, en cas de tall de corrent, evitaria aquesta situació, de totes maneres es pot tenir en consideració. En aquest supòsit el carro toparia contra els dos topalls mecànics tal com es veu a la Figura 5.11 i la força  $F_{pes_x}$  es repartiria entre els dos. Tal com en el subapartat anterior (5.2), la disposició és similar al de la Figura 5.8, la única diferència és que la distància del topall a la base és de 60 mm enlloc dels 40 mm anterior. Així doncs,

els càlculs serien els següents:

$$M_{escaire} = \frac{F_{pes_x} \cdot d}{2 \text{ unitats}} = \frac{508,57 \cdot 0,06}{2} = 15,26 \text{ N} \cdot \text{m} < 150 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (\text{Eq. 5.32})$$

Com s'ha vist anteriorment els topalls parabolòtics cadascun absorbeix una força fins a 1057 N i el moment màxim de cada escaire 8 80x80 Zn és de 150 N·m, per tant, absorbirien una suposada caiguda lliure del carro.

Si ara es suposa que el motor proporciona el parell nominal en la direcció de la gravetat i xoca per accident a la part inferior de l'eix, llavors es tindria com a l'equació (Eq. 5.19) 1689,88 N a més a més de la força  $F_{pes_x}$  deguda al pes. Sumant aquestes dues forces en resulten 2198,45 N que aplicats als topalls, arribarien a aguantar l'impacte com es demostra a l'equació (Eq. 5.33).

$$M_{escaire} = \frac{F_{pes_x} \cdot d}{2 \text{ unitats}} = \frac{2198,45 \cdot 0,06}{2} = 65,95 \text{ N} \cdot \text{m} < 150 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (\text{Eq. 5.33})$$

Si es suposa, com a l'eix X, que el motor es descontrola i dona el parell màxim en el sentit de caiguda del carro, s'assoleixen valors que ja no serien admissibles pels topall ni les guies. En aquest cas recuperant l'equació (Eq. 5.23) la força del motor seria 6996,71 N. Tornant a refer els càlculs s'obté:

$$M_y = \frac{F_{MAX} \cdot d_{tensor} + F_{pes_x} \cdot d_{CGL}}{4 \text{ unitats}} = \frac{6996,71 \cdot 0,02 + 508,57 \cdot 0,06}{4} = 42,61 \text{ N} \cdot \text{m} > 25 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (\text{Eq. 5.34})$$

$$M_{escaire} = \frac{6996,71 + 508,57}{2} \cdot 0,06 = 225,16 \text{ N} \cdot \text{m} > 150 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (\text{Eq. 5.35})$$

A les equacions (Eq. 5.34) i (Eq. 5.35) es veu com es superen el límits si es porta a l'extrem el cas de fallada del motor i aplica el seu màxim parell en el sentit de la força pes. Per això en el control del motor es pot limitar el parell màxim proporcionat.

Aplicant el model dinàmic obtingut al capítol anterior, i recuperant l'equació (Eq. 4.25) es pot observar com es comporta aquest eix. Per mantenir el carro quiet cal aplicar una força igual i de sentit oposat a la gravetat, és a dir, si a l'equació (Eq. 4.25) imposem una velocitat i acceleracions nul·les obtenim la força que ha d'aplicar el motor al carro:

$$F_y = 53 \cdot 0 + 53 \cdot 9,81 \cdot \cos 12^\circ + 64,664 \cdot 0 = 508,57 \quad (\text{Eq. 5.36})$$

Per tant, el motor per mantenir el carro en una posició parada ha de fer un parell de 1,7 N·m (Eq. 5.37).

$$M_{min} = 508,57 \cdot 0,0446 = 22,68 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$M_{motor} = \frac{22,68}{15,556 \cdot 0,85} = 1,7 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (\text{Eq. 5.37})$$

Obtenint el parell que se li hauria d'aplicar a la politja per tenir aquesta força aplicada al carro s'obté que el motor, tenint en compte la reducció i el rendiment, ha de proporcionar un parell de 1,7 N·m. Com s'ha vist abans el parell nominal del servomotor LENZE MDSKS-BS-071-03 és de 5,7 N·m, per tant, resulta suficient per compensar la força de la gravetat i va sobrat per poder aplicar més parell i moure el carro.

Volem que el carro es mogui a una velocitat d'1 m/s i que assoleixi aquesta velocitat en una dècima de segon, és a dir, en 0,1 s per tant l'acceleració serà de 10 m/s<sup>2</sup>. Amb aquestes premisses i aplicant els valors a l'equació de la dinàmica s'obté el següent resultat:

$$F_y = 53 \cdot 10 + 53 \cdot 9,81 \cdot \cos 12^\circ + 64,664 \cdot 1 = 1103,23 \text{ N} \quad (\text{Eq. 5.38})$$

Per tant, el parell sol·licitat al motor serà de 3,72 N·m si es té en compte que hi ha el reductor i el radi efectiu de la politja són 0,0446 m.

$$M_{politja} = F_y \cdot r_w = 1103,23 \cdot 0,0446 = 49,20 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (\text{Eq. 5.39})$$

$$M_{motor} = \frac{49,20}{15,556 \cdot 0,85} = 3,72 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (\text{Eq. 5.40})$$

Així doncs, en condicions de funcionament normals el motor estarà treballant una mica per sota del seu parell nominal i tindria marge.

Finalment i anàlogament a l'eix X es pot calcular la vida útil i el factor de seguretat dels carrets de boles en condicions normals de treball utilitzant les mateixes equacions (Eq. 5.12), (Eq. 5.13) i (Eq. 5.16). En aquest cas la càrrega  $P$  es consideren els 53 kg, és a dir, arrodonint a l'alça 530 N, utilitzant la mateixa velocitat mitja d'1 m/s i les dades característiques de la guies PS de la Figura 5.9.

$$L = \left(\frac{17900}{530}\right)^3 \cdot 100 = 3.852.400,98 \text{ km} \quad (\text{Eq. 5.41})$$

$$L_h = \left(\frac{17900}{530}\right)^3 \cdot \frac{1666}{60} = 1.069.683,34 \text{ h} = 122,1 \text{ anys} \quad (\text{Eq. 5.42})$$

$$S_0 = \frac{37000}{530} = 69,81 > 3 \quad (\text{Eq. 5.43})$$

#### 5.4. Eix Z

Aquest últim eix treballa de forma diferent, ja que s'ha dissenyat amb actuator lineal de la marca IAI, en concret el model RCP4-SA7C amb un pas de 4 mm. La màxima càrrega si treballa en horitzontal d'aquest equip és de 45 kg [IAI. 2014, p. 13], com que està inclinat  $12^\circ$  respecte la horitzontal considerarem que la càrrega màxima serà de 44 kg (Eq. 5.44).

$$P_{MAX} = 45 \cdot \cos 12 = 44,01 \text{ kg} \quad (\text{Eq. 5.44})$$

El pes del trepant i les plaques de fixació que mou la guia és de 18,5 kg, per tant la guia pot funcionar perfectament.

Cal comprovar també que serà capaç d'exercir suficient força tal que el trepant pugui mecanitzar les plaques. Com es mostra a la Figura 5.12 quan la broca entra en contacte amb la placa a mecanitzar ha de superar una força de 120 N, mencionat en el subapartat 5.1, i

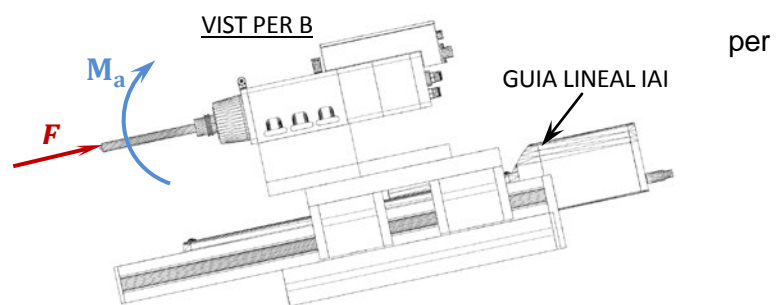


Figura 5.12: Moment aplicat al moment de foradar

aquesta generarà un moment descrit a la figura com a  $M_a$ . Aquest moment segons el fabricant IAI en la guia escollida pot ser com a màxim de 13,9 N·m [IAI. 2014, p. 13]. Donat que l'eix del trepant és a una distància de 100 mm de la base de la guia, el moment que haurà de superar serà de.

$$M_a = F \cdot d = 120 \cdot 0,1 = 12 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (\text{Eq. 5.45})$$

En el resultat de l'equació (Eq. 5.45) es comprova que és menor de 13,9 N·m.

La velocitat de desplaçament de l'eix |A| ve marcat per la correlació de velocitats i càrregues que indica el fabricant [IAI. 2014, p.13], ja que no indica parell nominal. Pel gràfic de treball en horitzontal, que seria el més similar al cas que ens ocupa, amb el model d'actuador escollit i una càrrega de 18 kg la velocitat màxima és aproximadament de 0,2 m/s. Aplicant l'equació de la dinàmica (Eq. 4.27) i considerant la força descrita als paràgrafs anteriors de 120 N l'acceleració de l'eix és de 4,18 m/s<sup>2</sup>.

$$120 = 18,5 \cdot a_z + 18,5 \cdot 9,81 \cdot \sin 12^\circ + 25 \cdot 0,2 \Rightarrow a_z = 4,18 \text{ m/s}^2 \quad (\text{Eq. 5.46})$$

Suficient per al moviment d'aquest eix.



## 6. CONTROL DE LA MÀQUINA

Com s'ha vist en el capítol 3 del disseny mecànic, la màquina es compon de tres eixos lineals i un trepant com a elements en moviment. Tal com s'esmentava, en el cas dels eixos X (longitudinal) i Y (transversal) el moviment ve donat per un servomotor de la marca LENZE mentre que a l'eix Z s'hi instal·la un actuador lineal de la marca IAI. Per últim, el trepant amb canvi d'eina automàtic és de la marca ELTE.

Per altra banda, també disposa de grups pneumàtics tots de la marca FESTO, usats principalment per a la subjecció de la placa a la màquina i, en el cas de la taula de treball, per al desplaçament longitudinal de la mateixa.

Tots aquests dispositius per tal de poder fer la funció pel qual han estat dissenyats, han de ser governats per algun tipus de controlador que coordini tots els moviments i decisions a prendre en l'execució de les tasques. Com es veurà a continuació s'ha dissenyat amb un PLC (*Programmable Logic Controller*, controlador lògic programable o autòmat programable) com a element de control global i convertidors de freqüència, posicionadors i electrovàlvules per al govern concret de cada element.

Finalment, per tal de rebre la informació de cada ordre de treball i poder executar el programa per a cada cas, tot el sistema ha d'estar connectat entre sí. Des de l'ordinador d'oficina tècnica, on es fan el dissenys de la placa i on es generarà l'arxiu d'ordre de treball, fins a cada controlador de cada eix ha d'existir un lligam.

Aquest lligam es farà a través del protocol FTP per transferir l'arxiu des de l'oficina tècnica a la memòria del PLC a través de la pròpia xarxa ofimàtica ja existent i amb el sistema Ethernet/IP™ per connectar el PLC amb la resta d'elements. Mentre que la interfície de l'usuari de màquina, des d'on s'executarà l'ordre de treball, serà un HMI [19] (*Human Machine Interface*) de la marca OMRON connectat al PLC a través d'USB. Pel que fa a la part pneumàtica el PLC controlarà directament les electrovàlvules per mitjà de les sortides digitals.

### 6.1. Disseny de l'automatisme i control

Els tres eixos estan accionats per servomotors i un actuador lineal, a part d'aquests hi intervenen altres elements que caldrà controlar-ne els seus moviments per tal de poder realitzar les operacions de mecanitzat a les plaques, és a dir, fer el control de la posició de l'eina i la velocitat. A més a més, també hi intervenen altres accionaments per poder fixar la placa entre

d'altres. A la Taula 6.1 es resumeix cadascun d'aquests elements associats al corresponent controlador i la seva funció a realitzar.

|                  | Element   | Unitats | Controlador  | Unitats | Funció   |
|------------------|---|---------|--|---------|--|
| Eix X            | Servomotor<br>LENZE MDSKS-RS-071-03                           | 1       | Servocontrolador<br>LENZE 8400 TOPLINE<br>E84AVTCE2224SB0-<br>EO | 1       | Accionament<br>eix X                                       |
|                  | Element de fixació lineal i giratori<br>FESTO CLR-32-20-L-P-A | 3       | Electrovàlvula<br>CPE14-M1BH-5J-1/8<br>[20]                      | 3       | Fixació de la<br>placa a<br>l'estructura                   |
|                  | Cilindre compacte<br>FESTO ADVU-25-25-P-A                     | 6       | Electrovàlvula<br>CPE14-M1BH-5J-1/8                              | 6       | Fixació de la<br>placa a<br>l'estructura                   |
| Eix Y            | Servomotor<br>LENZE MDSKS-BS-071-03                           | 1       | Servocontrolador<br>LENZE 8400 TOPLINE<br>E84AVTCE2224SB0-<br>EO | 1       | Accionament<br>eix Y                                       |
|                  | Cilindre compacte<br>FESTO ADVU-32-80-P-A                     | 4       | Electrovàlvula<br>CPE14-M1BH-5J-1/8                              | 4       | Fixació de la<br>placa contra la<br>taula<br>(trpitjadors) |
| Eix Z            | Actuador lineal<br>IAI RCP4-SA7C-I-56P-4-200-P3               | 1       | Posicionador<br>IAI PCON-CA-56PI-EP                              | 1       | Accionament<br>eix Z                                       |
|                  | Trepant<br>ELTE AF 60 CU                                      | 1       | Variador de freqüència<br>LENZE 8400<br>STATELINE                | 1       | Eina per<br>foradar  |
| Taula de treball | Cilindre normalitzat<br>FESTO DNC-50-50-PPV-A                 | 1       | Electrovàlvula<br>CPE14-M1BH-5J-1/8                              | 1       | Accionament<br>taula de treball                            |

Taula 6.1: Elements motrius amb els controladors corresponents i la seva funció

Tots aquests elements es controlaran des d'un autòmat programable o PLC. I l'usuari interactuarà amb la màquina a través del terminal d'usuari. A continuació es justifica l'elecció del PLC.

### 6.1.1. Criteris d'elecció del PLC

L'element que governarà tots els moviments de la màquina és el PLC. Per escollir la marca i el model s'han seguit els següents criteris:

El primer que cal tenir en compte per escollir tots els controladors i PLC és la connexió que

s'utilitzarà per treballar entre ells i que sigui compatible en tots els casos.

Un altre aspecte a tenir en compte és que tingui una memòria interna on poder emmagatzemar els arxius generats a l'oficina tècnica amb cada seqüència de comandes a realitzar per a cada ordre de treball o placa a mecanitzar.

Es tindrà en compte la mateixa marca tingui algun tipus de dispositiu HMI (*Human Machine Interface*), el terminal d'usuari on es programen les pantalles en què l'usuari interactuï amb la pròpia màquina.

També cal preveure la memòria de programa i dades del propi PLC sigui suficient per a realitzar l'aplicació. Finalment el preu, la relació qualitat-preu també serà determinant a l'hora d'escollir el PLC.

A la Taula 6.2 es presenta una comparativa entre les principals característiques de tres models de marques diferents de PLC, que compleixen els diferents requisits esmentats.

| Marca i model                      | Connectivitat a interfície CPU | Memòria per fitxers              | Capacitat programa i dades                 | Preu                                       |
|------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|--|--|
| OMRON CJ2M-CPU33                   | Ethernet/IP RJ45               | Targeta de memòria de 128 Mbytes | Programa: 20 Kbytes<br>Dades: 160 Kbytes   | 1080 €                                     |
| SIEMENS Simatic S7-300 CPU314 [21] | Mòdul a part PROFINET RJ45     | Targeta de memòria 8 Mbytes      | Programa: 1024 Kbytes<br>Dades: 256 Kbytes | CPU 314: 850 €<br>Mòdul interfície: 1880 € |
| SCHNEIDER TM258LF42DT4L [22]       | CAN-OPEN RS485                 | Memòria flash 128 Mbytes         | Programa: 128 Kbytes<br>Dades: 160 Kbytes  | 1200 €                                     |

Taula 6.2: Comparativa d'autòmats programables (PLC)

Comparant les connectivitats, els PLC de Siemens i Omron utilitzen diferents protocols, però el mateix suport hardware, mentre que el d'Schneider és diferent. Com que amb els controladors dels eixos escollits tots estan preparats per poder enviar i rebre informació tant en Ethernet/IP com en PROFINET i en canvi el CAN-OPEN pel controlador de l'eix Z és incompatible, llavors per connectar aquest eix s'hauria de fer una línia independent a les altres i complicaria tota la instal·lació i configuració, per això el PLC d'Schneider es podria descartar.

Observant la resta de característiques entre Siemens i Omron, el primer té més capacitat de programa i dades, però el mòdul de connectivitat PROFINET va a part de la unitat central i el conjunt és més car i, a més, la memòria per a fitxers externs és molt petita.

És per això que s'escull el PLC de la marca OMRON i en concret el model CJ2M-CPU33, ja que a part de ser més econòmic es consideren suficients els 20 Kbytes per al programa i 160 Kbytes per a les dades.

Amb el PLC escollit, queda configurada la xarxa amb Ethernet/IP, xarxa que permet el control i la informació en temps real de tot tipus de processos i els interconnecta entre ells. A l'apartat 6.2 es donen més detalls de la configuració de la xarxa.

### 6.1.2. Paràmetres dels controladors dels eixos

Amb les dades obtingudes de la modelització s'han extret els valors de  $k_p$ ,  $k_i$  i  $k_d$  que serviran per configurar cadascun dels servocontroladors i el posicionador de l'eix Z. Cal esmentar, que amb els valors teòrics obtinguts es realitzarien les proves de posada en marxa de la màquina per tal de verificar que s'ajusten a la realitat i realitza els moviment predits en la modelització. A partir d'aquesta posada en marxa caldria ajustar segons les necessitats reals de cada eix a l'hora de realitzar el moviment. També cal recordar que els valors obtinguts s'han calculat a partir de la hipòtesi que s'accepta un coeficient d'esmoreïment de  $\xi = 0,5$  i un temps d'establiment d'un segon, es podrien modificar aquests valors per a trobar nous paràmetres del controlador PID i millorar la resposta del sistema en el cas que fos necessari.

En el cas dels controladors dels eixos X i Y, els LENZE 8400 TOPLINE, des del programa de configuració dels servocontroladors, l'esmenta't a la introducció Engineer de LENZE, es poden configurar aquests paràmetres. Creant un nou projecte amb Engineer el primer que demana és que editem la configuració del sistema, per tal que quedi definit quin és el servocontrolador usat i el motor i reductor els quals haurà de controlar. A la Figura 6.1 es veu com a la part esquerra del programa hi ha l'esquema dels elements escollits per al control d'un dels eixos mentre que a la dreta es llisten les característiques de cadascun i és on es mostraran les opcions de configuració.

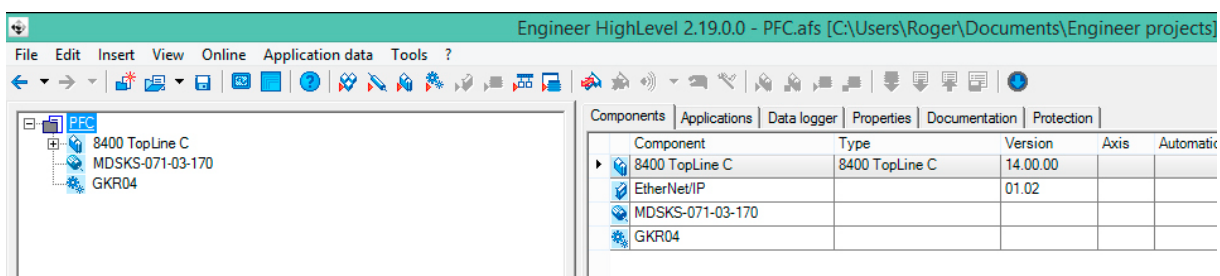


Figura 6.1: Pantalla inicial amb els elements escollits per al control d'un eix

Un cop escollits els element controlador, servomotor i reductor, es poden configurar els paràmetres de control del servo. Fent clic a l'esquema de l'esquerra en el controlador LENZE 8400, a la dreta apareixen una sèrie de pantalles separades per pestanyes de la configuració del propi controlador. Com que s'han calculat els paràmetres teòrics del PID, en aquest cas el que es faria és escollir la pestanya anomenada "Application Parameters" i apareix una pantalla com la de la Figura 6.2 on es poden configurar els paràmetres del sistema. En aquesta pantalla apareix una opció "Process controller operating mode" on es pot escollir el tipus de control que es vol realitzar. En el cas de l'eix X s'escollirà l'opció 2 "PID input values nSet\_a and nAct\_a" ja que no hi afecta la gravetat, mentre que en el cas de l'eix Y l'opció que s'escollirà serà la 1 "nSet + nSet\_PID" on si que té en compte la compensació de la gravetat.

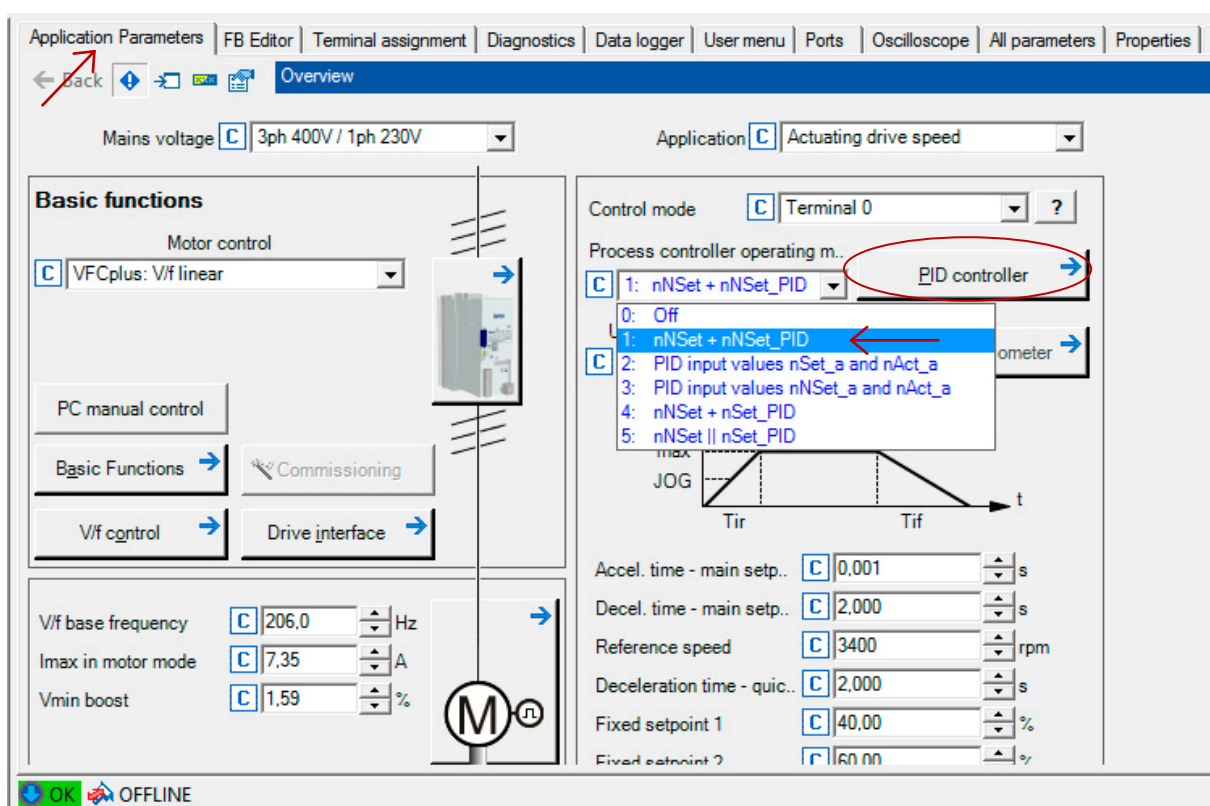


Figura 6.2: Pantalla de configuració dels paràmetres

Una vegada s'ha escollida l'opció, es prem el botó "PID controller" per ajustar-ne els paràmetres. Com s'observa a la Figura 6.3 amb l'opció "nSet + nSet\_PID" escollida, es poden configurar els tres paràmetres  $V_p$ ,  $T_n$  i  $K_d$  que corresponen als números de paràmetres C00222, C00223, C00224 del controlador LENZE [23] i se'ls hi assignaran els valors obtinguts a l'apartat 4.3. On  $V_p$  correspondrà al guany proporcional,  $T_n$  a l'integral i  $K_d$  al derivatiu. I per tal de tenir en compte la compensació de la gravetat, en el cas de l'eix Y, s'hauria de modificar el valor "nSet\_a" que afegeix a la sortida del controlador aquesta compensació. Aquest és el paràmetre C00830 del controlador.

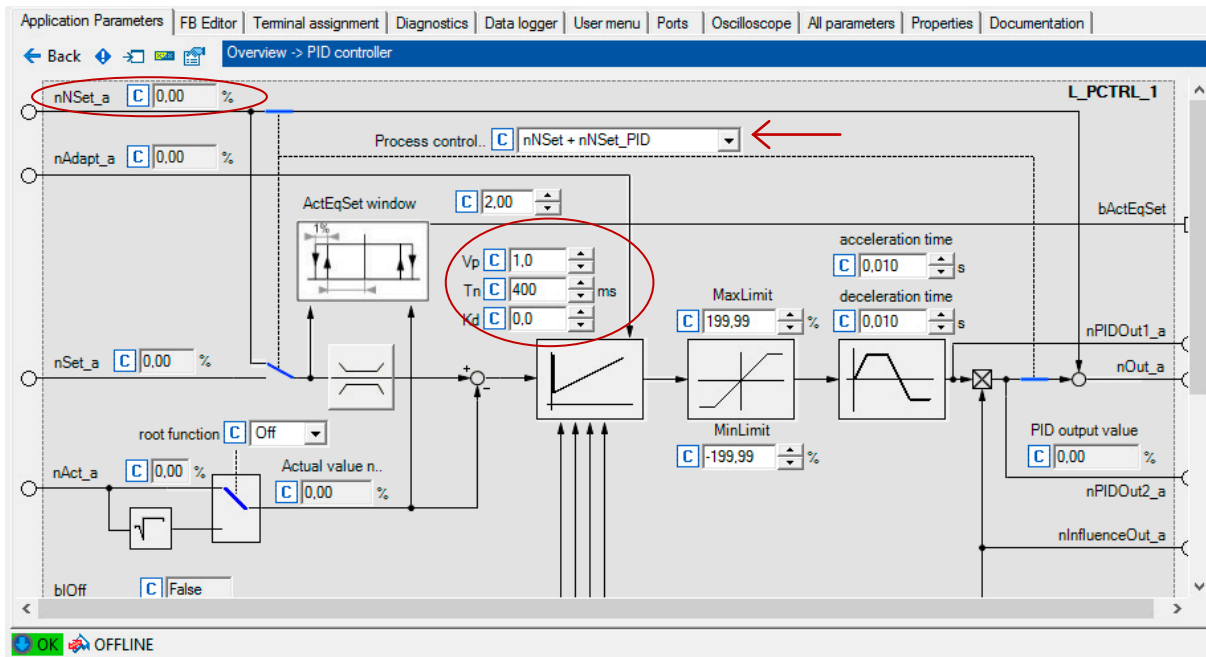


Figura 6.3: Configuració dels paràmetres del PID

Quan s'ha finalitzat l'assignació dels paràmetres es configuraria la resta de variables com ara limitació de velocitat, parell màxim admès, configuració dels límits de l'eix, etc. i es faria una primera prova per veure'n el resultat del moviment. Aquest ajust que s'ha realitzat modificant els paràmetres de control manualment és una opció de l'ajust pel moviment d'aquests eixos, però també hi ha la possibilitat d'autoajustar el controlador PID automàticament des del mateix servocontrolador, ja que el motor porta un resolver o encoder que fa el control en llaç tancat de la velocitat amb el controlador. D'aquesta forma els valors empírics es podrien comparar amb els teòrics.

En el cas de l'eix Z com que hi ha instal·lat la guia IAI, el procediment serà diferent. En aquest cas fent servir el programari propi d'IAI segons el manual d'instruccions del posicionador PCON-CA [24], només es disposa del paràmetre del guany proporcional (paràmetre núm. 31) i del guany integral (paràmetre núm. 32). Per tant, es modificarien aquests dos paràmetres amb els obtinguts per a realitzar les primeres proves de funcionament i a partir d'aquí ajustar-ho.

### 6.1.3. Resta d'elements de control

La resta d'elements que queden per configurar seran el variador de freqüència del trepant i les electrovàlvules dels components pneumàtics

El variador de freqüència s'ha escollit el LENZE 8400 StateLine que és similar al dels eixos X i Y però amb menys prestacions en quan al control. En aquest cas com que es tracta del trepant

només caldrà engegar i parar la rotació del trepant quan s'hagi de mecanitzar, així que pràcticament és un arrencada i parada. El canvi d'eina automàtic és pneumàtic pel que es farà mitjançant una electrovàlvula connectada al PLC.

Els conjunts pneumàtics a controlar, a més del canvi d'eina del trepant, són els tres grups de subjecció de la placa lateral explicats en el disseny de l'eix X, el desplaçament horitzontal de la taula de treball i els quatre trepitjadors de la placa situats al carro de l'eix Y. En tots els casos s'ha utilitzat la mateixa configuració una electrovàlvula 5/2 vies amb un grup regulador i antiretorn a cada via de l'element pneumàtic. Les electrovàlvules escollides són de FESTO el model CPE14-M1BH-5J-1/8, que són vàlvules de 5/2 vies biestables que funcionen a 24 V DC. A la Figura 6.4 es representen els esquemes pneumàtics dels quatre conjunts esmentat de control pneumàtic.

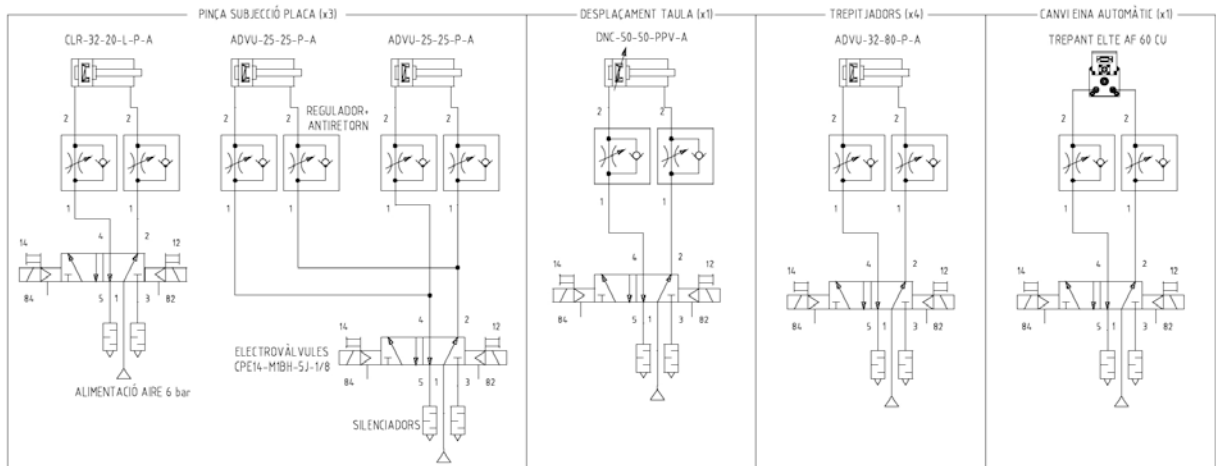


Figura 6.4: Esquema pneumàtic dels diferents conjunts de la màquina

Un altre element que intervé en el control de la màquina són els sensors. Aquests permeten delimitar les zones de treball dels elements mòbils. Els sensors són un contacte obert o tancat que quan detecten l'element que es vol detectar canvien l'estat a tancat o obert respectivament. Aquest contacte s'envia a un controlador o PLC a la targeta d'entrades per tal de llegir en tot moment en quin estat es troba.

Els primers sensors són els dels límits de cursa de cada eix de la màquina, que quan el carro arriba a la posició de detecció se sap que està al final de la cursa. Per aquesta tasca el sensor escollit són detectors inductius que es connectaran directament al controlador de cada eix. El carro porta incorporat un testimoni instal·lat estratègicament per tal que el detecti el sensor. Cal esmentar que la guia IAI porta incorporat dins la carcassa els seus propis sensors i ja transmet la informació directament al posicionador.



Per detectar si la placa està en posició o no es farà servir una fotocèl·lula que es connectarà al PLC per tenir com a dada si hi ha placa o no.

Els cilindres FESTO també porten incorporats detectors magnètics en els propis carrils del cilindre que detecten si està en la posició de repòs o amb la tija completament fora. La senyal s'envia al PLC perquè gestioni l'accionament de les electrovàlvules.

Uns altres elements de control de la màquina són polsadors d'emergència o polsadors perquè l'usuari de la màquina pugui aturar-la en cas d'emergència o per exemple en aquest cas s'instal·laria un polsador perquè l'usuari confirmi que la placa està situada correctament i el PLC accioni les pinces lateral pneumàtiques per subjectar-la.

Finalment l'últim element que queda per descriure és el terminal d'usuari o HMI. Aquest és una pantalla de 8" a color on es configuraran les pantalles d'interacció amb l'usuari, per tal que pugui escollir quina placa es disposa a mecanitzar i validar que és correcte. Aquest element s'ha escollit OMRON, en concret NSJ8, perquè el PLC escollit és de la mateixa marca.

## **6.2. Disseny de la xarxa**

Com s'esmentava a la introducció d'aquest capítol i al subapartat 6.1.1, per interconnectar tots els elements de control s'ha d'utilitzar algun tipus de xarxa per coordinar tots els moviments de la màquina, enviar i rebre informació i executar les ordres del PLC. En aquest cas s'ha escollit una xarxa Ethernet fent servir els protocols FTP per enviar l'arxiu d'ordre de treball i Ethernet/IP per comunicar el PLC amb els controladors dels accionaments dels eixos.

A la Figura 6.5 es representa l'esquema de funcionament de tota la xarxa i es visualitzen les connexions entre tots els equips existents a la màquina.



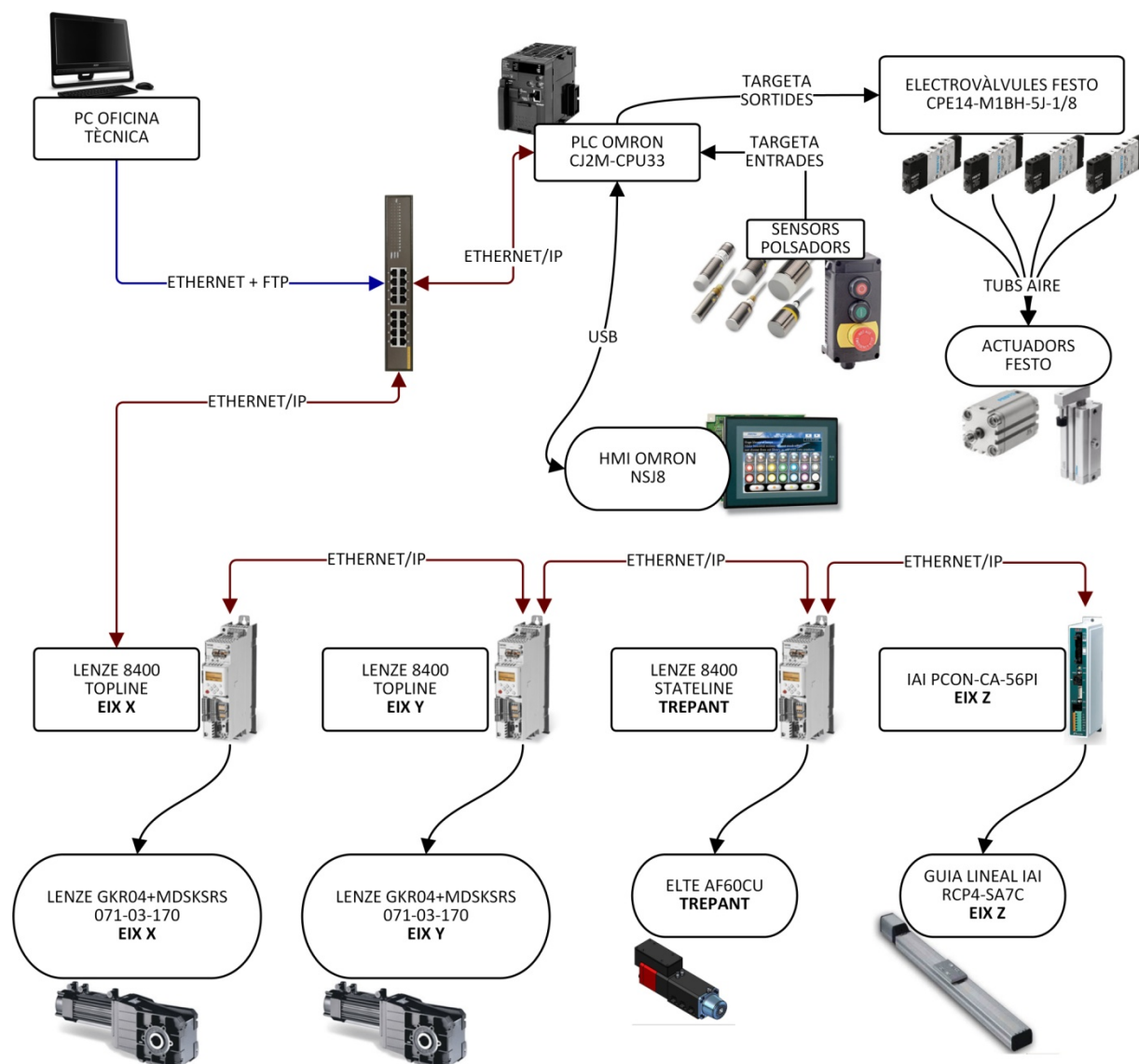


Figura 6.5: Esquema de configuració de la xarxa i elements de control

La xarxa permet tenir sobre un mateix suport físic tots els elements que hi intervenen interconnectats a través d'un switch. És a dir, que connectant el PLC al mateix switch amb un sol cable RJ45, pot rebre la informació d'oficina tècnica a través del protocol FTP i enviar la informació als controladors de cada eix. Després cada controlador com s'ha vist, fa la seva gestió del control de la velocitat i posició de cada motor.

A la CPU o part central del PLC se li afegixen mòduls d'entrades i sortides digitals per tal de connectar, per exemple, els sensors o les electrovàlvules de la part pneumàtica. En concret les electrovàlvules es connectaran a la targeta de sortides per tal que el PLC en pugui fer la gestió i activar-les o desactivar-les.

### 6.2.1. Configuració dels paràmetres de la xarxa

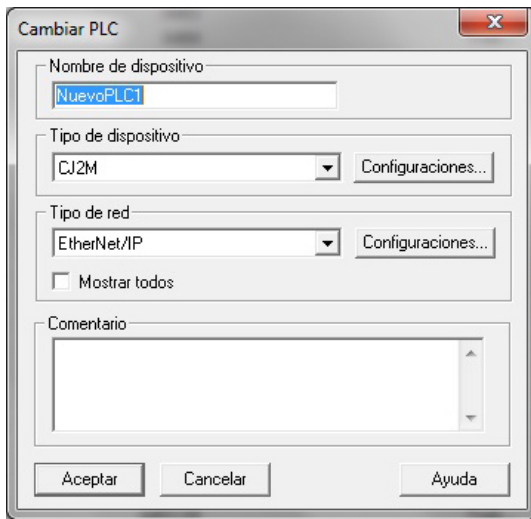


Figura 6.6: Elecció del PLC i tipus de xarxa

Amb el software de programació del PLC OMRON, el programari Cx-Programmer es defineix el projecte escollint el PLC triat per a l'aplicació i escollint com a tipus de xarxa Ethernet/IP tal com a la Figura 6.6 es mostra.

A continuació caldrà definir les variables que s'utilitzaran per comunicar-se amb els diferents controlador de cada eix, és a dir, es defineixen variables que apunten a una paraula de la memòria del PLC per tal d'emmagatzemar la informació rebuda per un dels controlador o per guardar la informació a enviar a cada controlador. Aquestes variables a definir es creen des del

programa com a "nou símbol" del projecte i quan s'editen s'han de definir com a tipus de dades "CHANNEL" i seleccionar la opció de "Net. Variable" tot indicant si serà una variable d'entrada o de sortida.

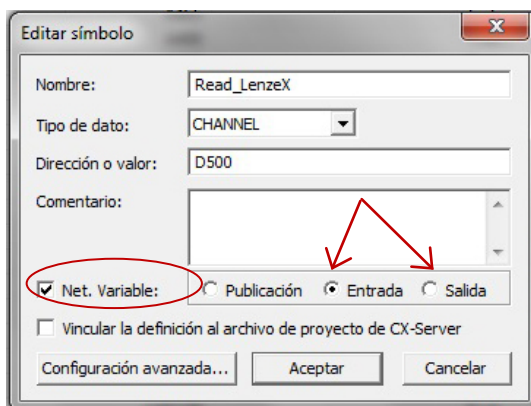


Figura 6.7: Edició d'una variable

Com es mostra a la Figura 6.7 també es posarà un nom a la variable per tal que es pugui identificar a l'hora de fer la gestió de la pròpia variable i una adreça, que en aquest cas es posarà l'adreça de les paraules de memòria del PLC que es vulguin assignar, en l'exemple de la Figura 6.7, s'ha creat una variable d'entrada que s'emmagatzemarà a l'adreça D500 del PLC, s'ha etiquetat com "Read\_LenzeX" per denotar que serà la lectura de les dades proporcionades pel

servocontrolador de l'eix X i per això es defineix com variable d'entrada al PLC. En el cas que es volgués enviar dades al controlador s'hauria creat com a variable de sortida i s'hauria etiquetat amb un nom que així ho fes entendre.

Amb el botó de configuració avançada de l'edició de símbols de la Figura 6.7 es defineix la mida de la matriu de dades que es farà servir. Sempre haurà de ser parell i es deixarà marge perquè quedin alguns paràmetres lliures.

Una vegada definides totes les variables de tots els eixos amb el Cx-Programmer i deixant obert el programa, s'executarà un segon programa també d'OMRON anomenat Network Configurator.

Primer de tot cal introduir la informació de cada un dels equips que hi intervenen en el Network Configurator. Cada controlador o dispositiu porta uns arxius de configuració amb tota la informació de l'equip depenent del tipus de xarxa de connexió que faci servir. En el cas de l'Ethernet/IP els arxius tenen l'extensió \*.eds. Per tant, caldrà buscar aquest arxiu de cadascun dels equips a connectar, en aquest cas els dos servocontroladors LENZE 8400, el posicionador IAI PCON-CA i el varador de freqüència pel trepant LENZE 8400 Stateline. En el menú del Network Configurator escollir "EDS File" > "Install EDS file" i s'obre una finestra per escollir els arxius corresponents.

Un cop instal·lats tots els equips necessaris, es pot començar a muntar la xarxa. La pantalla del programa consta de dues parts principals, a l'esquerra apareixen tots els dispositius disponibles (els que s'hagin instal·lat prèviament amb el fitxer EDS) i a la dreta un espai gràfic en blanc per al disseny de la xarxa de forma visual. Seleccionant el dispositiu i arrossegant cap a l'espai gràfic es va dibuixant la xarxa tal com es mostra a la Figura 6.8. A mesura que es van afegint equips el mateix programa assigna una adreça IP per a cadascun d'ells.

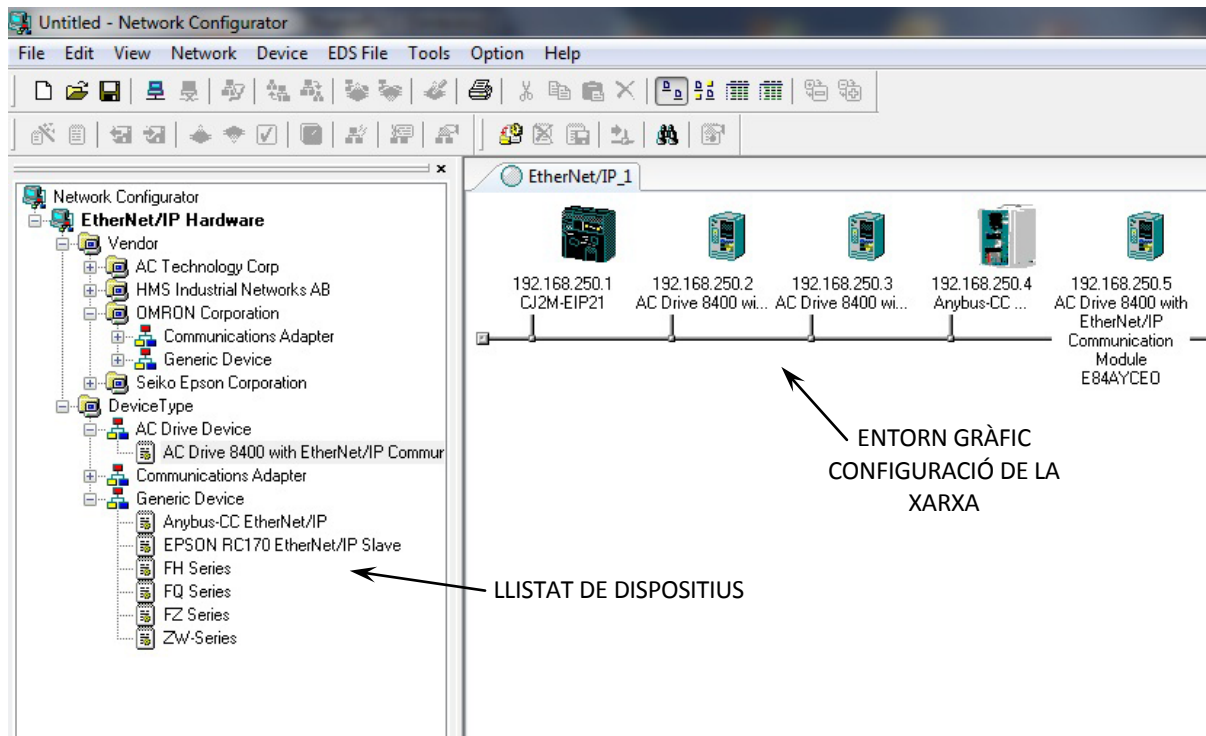


Figura 6.8: Configuració de la xarxa Ethernet/IP

Una vegada definida tota la xarxa i els equips instal·lats caldrà fer el lligam entre les variables d'entrada i sortida del PLC que s'han creat abans amb el Cx-Programmer i els equips configurats a la xarxa. Per poder fer això s'ha de fer doble clic sobre l'element que controla el sistema, és a dir, en aquest el PLC OMRON CJ2M-CPU33. S'obre una finestra tal com la de la Figura 6.9.

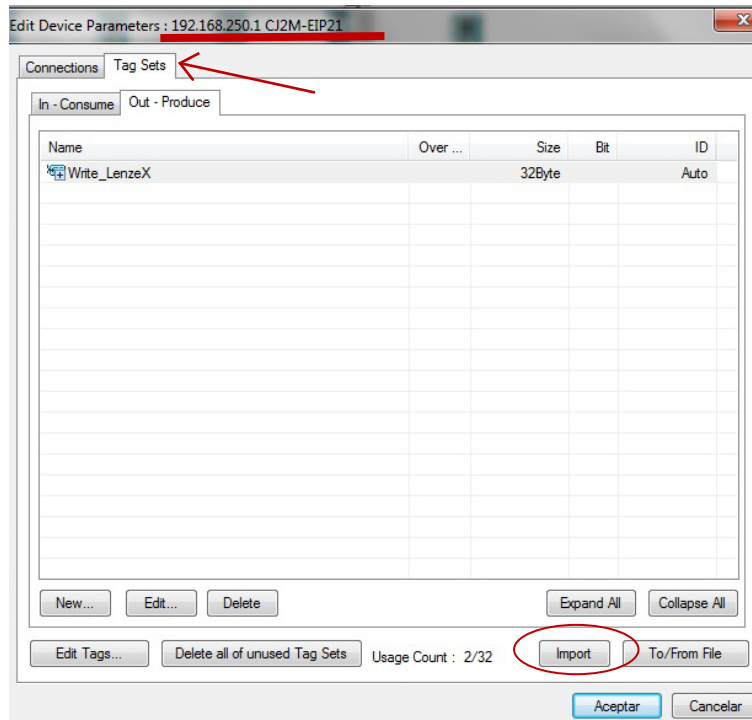


Figura 6.9: Finestra d'importació de variables del sistema

S'escull la pestanya "Tag sets" i amb el Cx-Programmer amb el projecte en qüestió obert, es prem el botó "Import" per importar totes les variables creades anteriorment com a "Net. variable". Com s'observa a la Figura 6.9 a la pantalla apareixeran en dues pestanyes totes les variables d'entrada (pestanya "In - Consume") i les de sortida (pestanya "Out - Produce") creades abans. En l'exemple es veu som s'ha importat una variable d'escriptura al PLC amb les dades del controlador LENZE de l'eix X, "Write\_LenzeX".

Ara cal passar a configurar cadascun dels dispositius amb les variables importades. Per això fent clic en la icona del dispositiu amb el botó dret s'escull la opció de propietats "Property" i s'obrirà una nova finestra de configuració com la de la Figura 6.10 on a les caselles indicades caldrà escollir totes les variables de lectura i escriptura que se li han assignat a cada equip. Un cop assignades i registrades les variables de cadascun dels dispositius de l'eix X, Y, Z i el trepant, quedarà definida la xarxa i lligada amb les variables de cada controlador i el PLC.

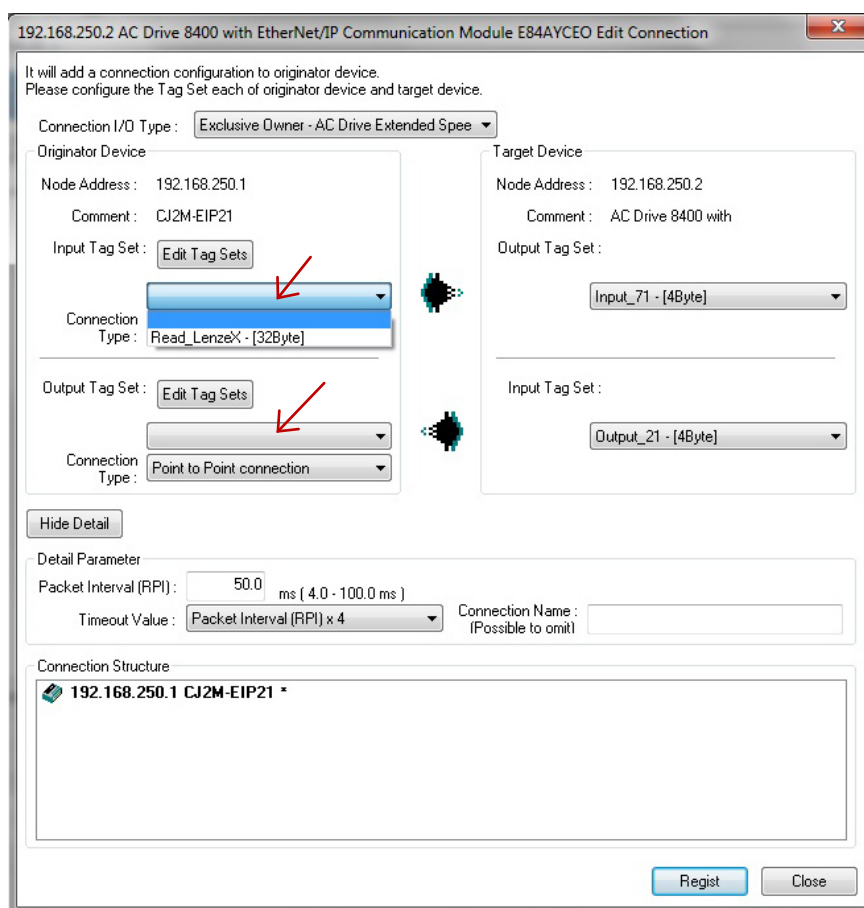


Figura 6.10: Assignació de les variables a cada dispositiu

### 6.3. Diagrama de flux

A continuació es presenten els diagrames de fluxos que representen totes les accions i tasques que la màquina haurà de realitzar. A partir d'aquest diagrama es programaria el graficet del PLC per tal de controlar tots els dispositius configurats. Caldria assignar les variables d'entrada i sortida a cada un dels passos i assignar les paraules de la memòria reservades per cada un dels estats.

A la Figura 6.11 es mostra el diagrama general de la màquina i a continuació els diferents subprocessos definits.

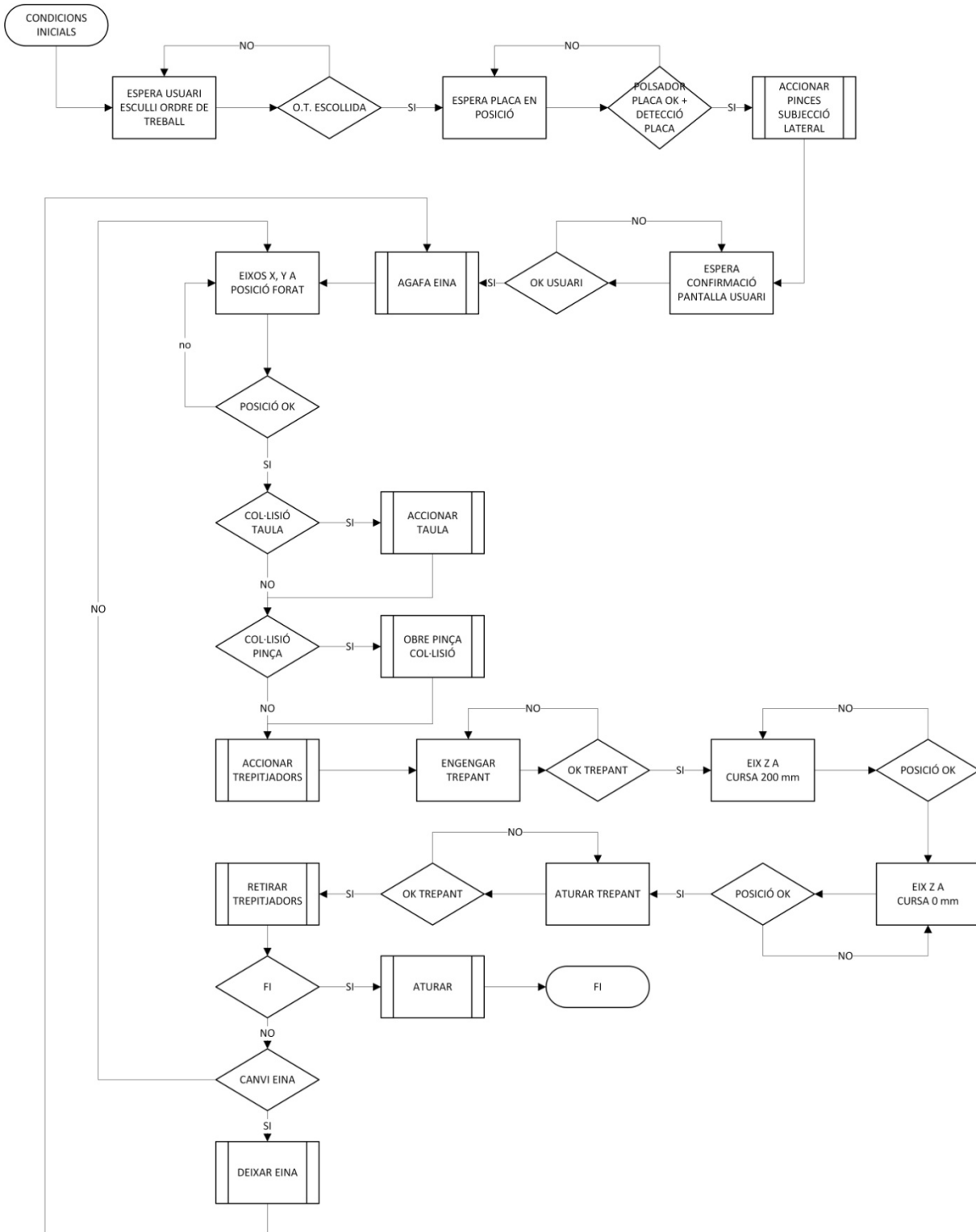


Figura 6.11: Diagrama de flux general

Es consideren les condicions inicials que la màquina té tensió i que no té cap eina en el trepant. També s'ha de considerar que el polsador de parada d'emergència i la cortina òptica de seguretat estan sempre actius i en qualsevol cas d'emergència o intrusió dins la zona d'acció

de la màquina aquesta s'aturaria si estigues en marxa. Com que el motor de l'eix Y s'ha dissenyat amb un fre electromecànic, en aquest suposat cas el carro Y quedaria blocat a la posició on es trobés.

Dins el diagrama de la Figura 6.11 s'han definit diferents subprocessos que es detallen a continuació per ordre d'aparició. El primer de tots és el de la Figura 6.12 en què es defineixen les accions per tancar les pinces de subjecció lateral de la placa. Quan es diu que el cilindre és a posició 0, és amb la tija recollida, i a posició 1, amb la tija completa estesa o oberta. Aquest diagrama com que hi ha tres conjunts de subjecció, es repetiria per a cadascun d'ells.

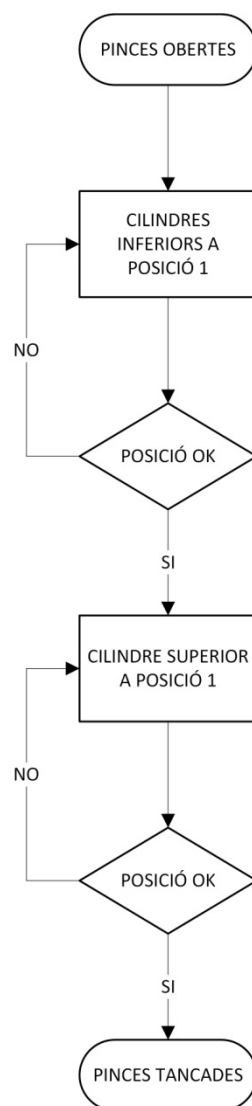


Figura 6.12: Accionar pinces subjecció lateral

El següent a aparèixer és la seqüència per agafar l'eina que es mostra a la Figura 6.13:

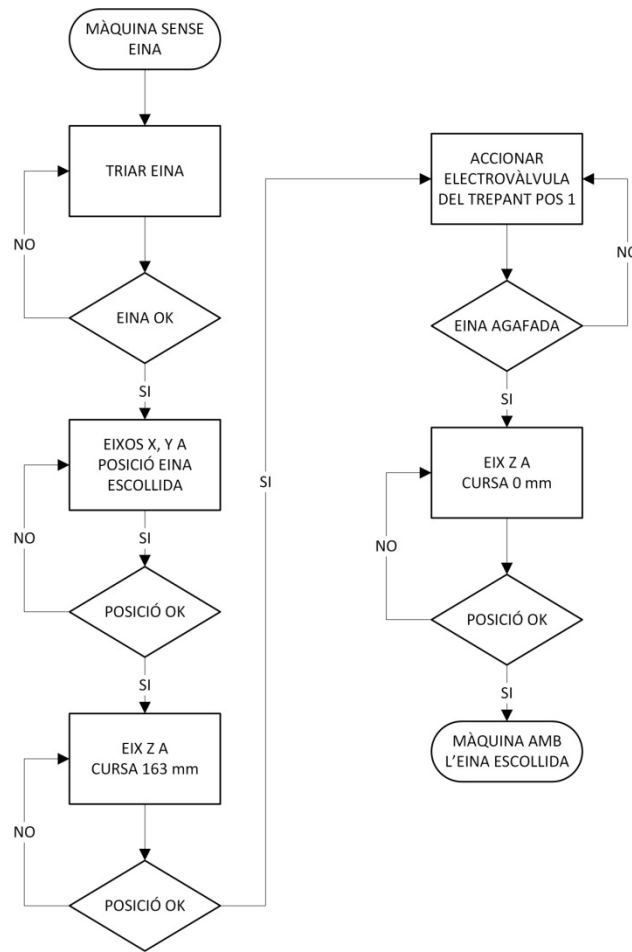


Figura 6.13: Agafar eina

L'accionament de la taula en cas que la posició on s'hagi de fer el forat coincideixi amb els travessers de la pròpia taula de treball. El diagrama seria el de la Figura 6.14:

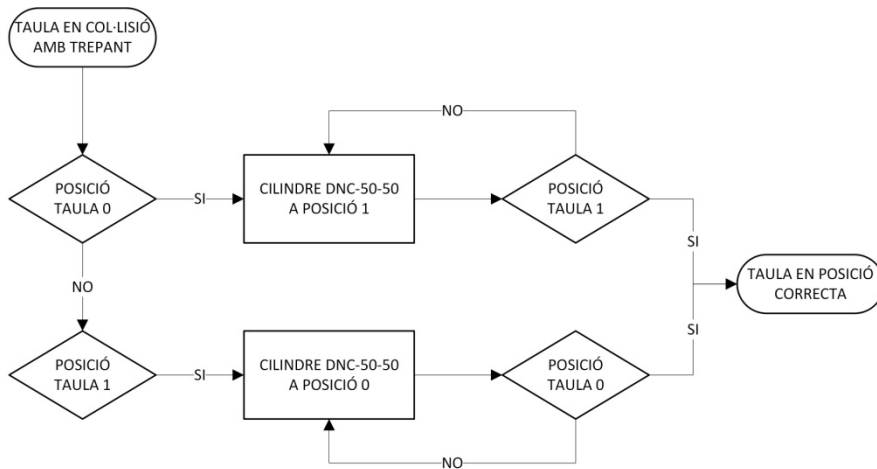


Figura 6.14: Accionar taula



El de la Figura 6.15 és per obrir les pinces de subjecció lateral, com en el procés de tancar són tres conjunts idèntics.

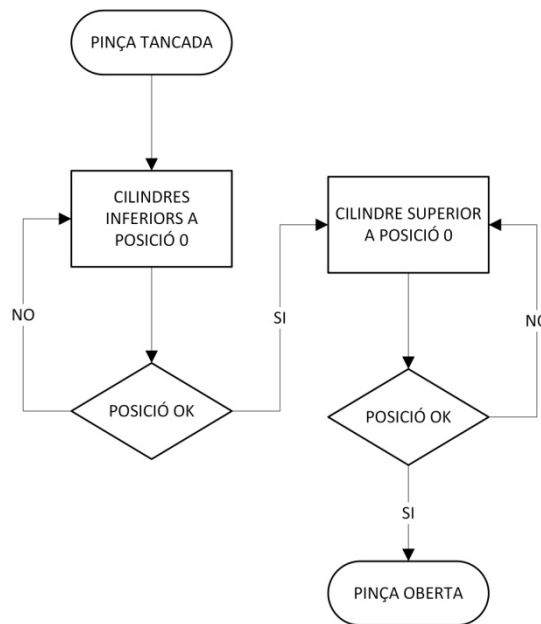


Figura 6.15: Obre una pinça

A l'accionament dels trepitjadors, Figura 6.16, s'ha de tenir en compte els límits de la placa on només actuaran dos cilindres dels quatre instal·lats. Els límits queden definits pel disseny de la màquina, si el forat que s'ha de fer està a menys de 85 mm del límit de la placa només actuaran dos trepitjadors.

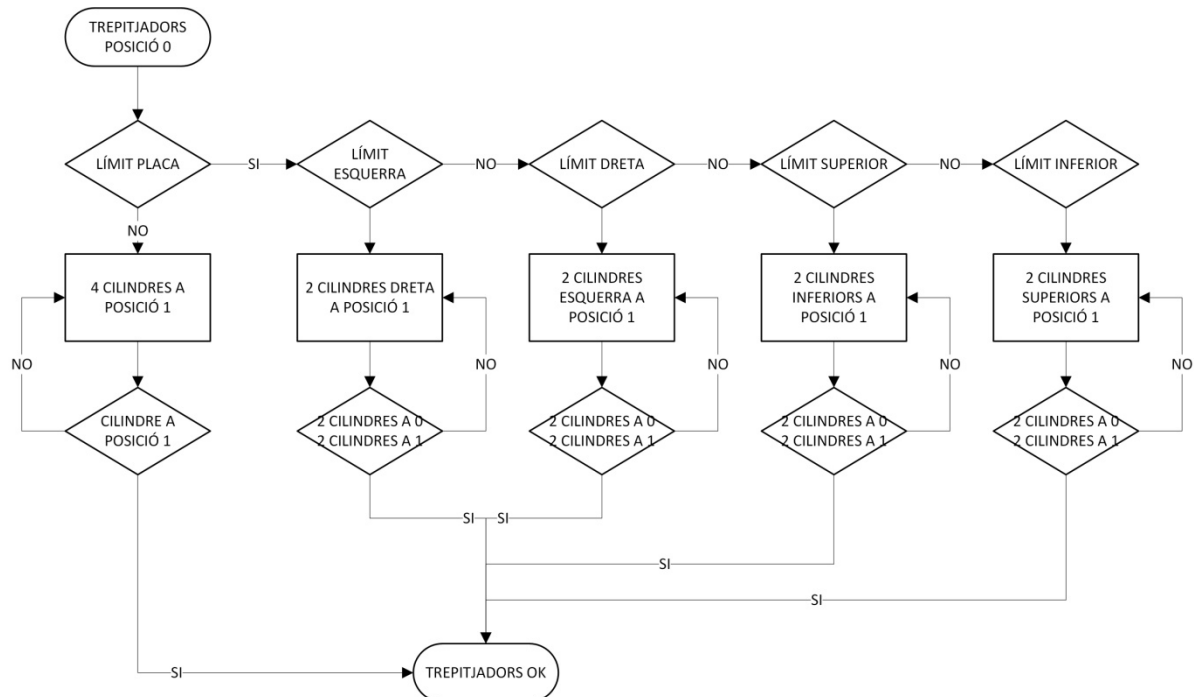


Figura 6.16: Accionar trepitjadors

Finalment els dos últims subprocessos són el de recollir els trepitjadors (Figura 6.17) i el d'aturar la màquina (Figura 6.18). En aquest últim s'ha suposat que la màquina es deixa a la posició de l'última eina que ha deixat, per això a la següent operació ja està al més a prop possible de les eines. Caldria tenir en compte fer un subprocés de manteniment, per tal de retirar els eixos de la zona de canvi de broques en el manteniment.

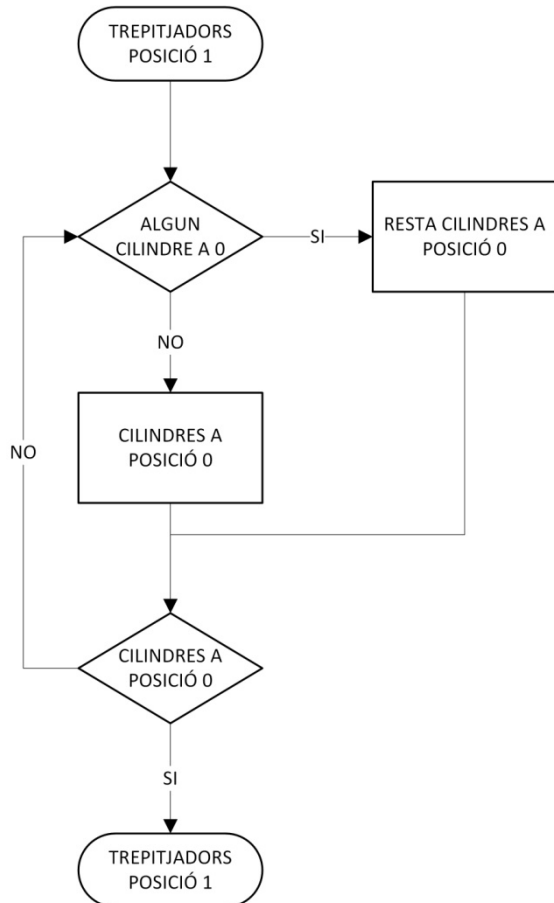


Figura 6.17: Retirar els trepitjadors

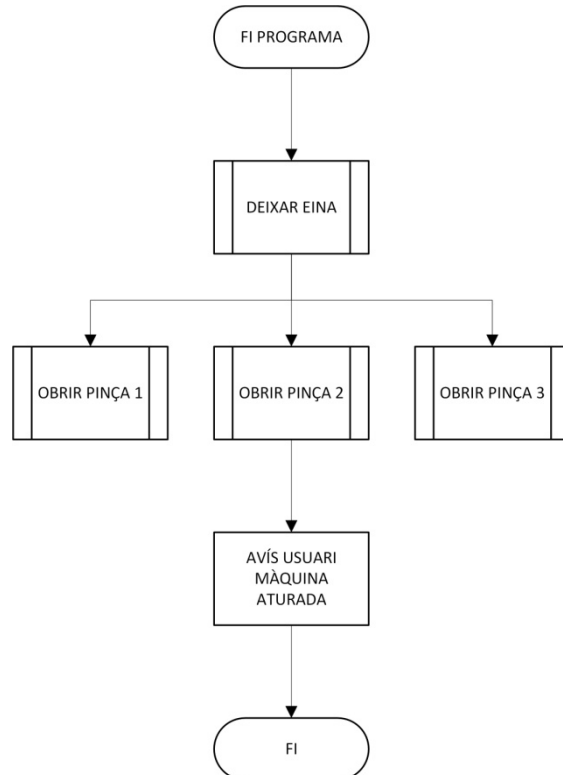


Figura 6.18: Aturar

## 7. INTÈRPRET DE PLÀNOLS

L'interpret de plànols consisteix en una extensió de l'AutoCAD que permet extreure la informació del plànol de la placa a mecanitzar i exportar-la a un llenguatge que la màquina sàpiga llegir per tal de rebre les coordenades i instruccions necessàries per poder fer els moviments. D'aquesta manera s'envia al PLC un arxiu per cada placa a mecanitzar o ordre de treball, que s'emmagatzema a la memòria i que conté tota la informació de la placa, característiques, mides i els forats a mecanitzar de forma ordenada per distància i diàmetre del forat. També des de la mateixa extensió es pot generar el plànol de la placa des de zero.

Aquest programa s'ha implementat amb el llenguatge de programació del mateix AutoCAD, que és l'AutoLISP. A l'annex B s'adjunta tot el codi font associat.

### 7.1. Funcionament

El programa l'executarà l'usuari d'oficina tècnica que dissenyi la placa a mecanitzar.

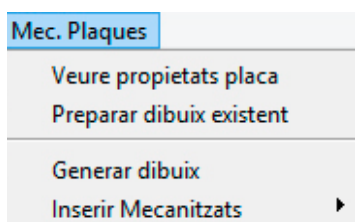


Figura 7.1: Menú a l'AutoCAD

La primera opció de totes "Veure propietats placa" servirà per visualitzar en una finestra les característiques com ara les mides, material i codificació de la placa d'un plànol on ja s'hagin introduït totes aquestes dades. A la Figura 7.2 es mostra la pantalla de visualització de les propietats de placa.

La segona opció, "Preparar dibuix existent", un cop el plànol és definitiu i es pot enviar a la màquina, comprova que en l'actual document obert a l'AutoCAD hi hagi un dibuix amb una sèrie d'elements existents per tal de poder

S'executarà des de la mateixa barra de menús d'AutoCAD que s'haurà editat prèviament per tal que aparegui el menú com el de la Figura 7.1. Com s'observa hi ha quatre opcions diferents a escollir, les dues primeres són per a plànols de plaques que ja existeixen o ja han sigut creats. Les últimes per generar el dibuix des del mateix programa.

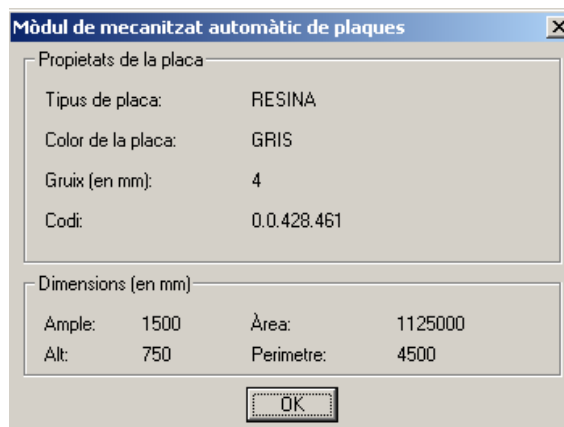


Figura 7.2: Finestra de propietats de la placa

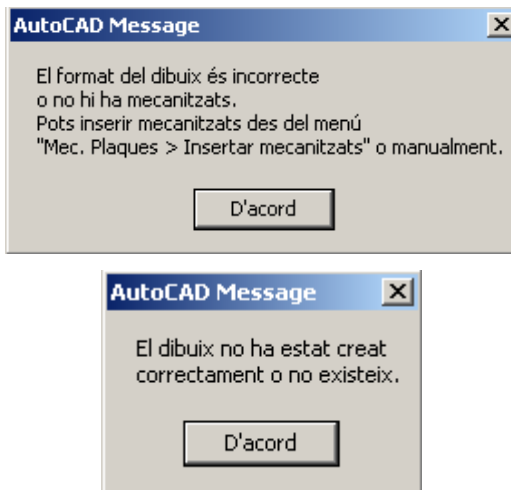


Figura 7.3: Avisos de dibuix no adequat

començar a introduir les característiques. És a dir, es fa una cerca d'elements d'AutoCAD com ara línies, cercles i blocs per tal d'assegurar que s'estan associant les dades a un document complet i que té algun mecanitzat. Si no és així, el propi programa ens avisa mitjançant finestres d'avís com les de la Figura 7.3. Una altra comprovació que es fa abans d'introduir les dades és que l'arxiu del dibuix estigui desat per tal de guardar l'arxiu de dades a generar a la mateixa ubicació i amb el mateix nom. En el cas que ja existeixi, l'arxiu el programa carregarà les dades existents donant l'opció a modificar-les.

Una vegada s'han fet totes les comprovacions necessàries i tot és correcte, s'obre una nova finestra com la de la Figura 7.4 amb diferents camps que emplenarà l'usuari i amb les mides de la placa llegides del plànol. El primer camp que haurà d'escollir és el tipus de placa. Les

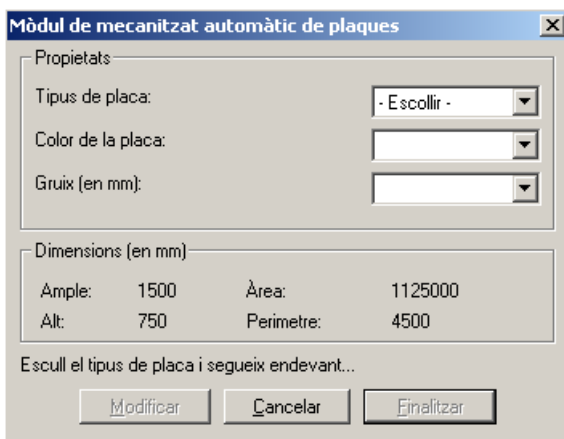


Figura 7.4: Edició de les propietats de la placa

plaques poden ser de diferents materials com ara resines cel·lulòsiques, policarbonat, metacrilat o altres. El segon serà el color de la placa escollida i per últim, el tercer, el gruix de la placa en mil·límetres. Com es veu a la mateixa Figura 7.4 a la part inferior de la finestra apareixen les dimensions de la placa en mil·límetres ja introduïdes. Aquestes dades el programa les llegeix del dibuix d'AutoCAD buscant les línies que hi ha en el plànol.

L'ordre de selecció dels camps sempre serà el mateixa, ja que les llistes són dependents les unes de les altres, és a dir, segons el tipus de placa escollida es disposaran uns colors o altres, i segons el color escollit uns gruixos de placa. Si en algun dels passos hi ha hagut un error es pot anar prement el botó de "Modificar" per anar canviant cada llista.

Amb els tres camps mencionats ja seleccionats i correctes es prem el botó "Finalitzar", és llavors quan el programa llegeix totes les dades dels mecanitzats buscant cercles o blocs d'AutoCAD prèviament predefinitis i genera l'arxiu en format \*.txt per enviar a la màquina amb tota la informació referent a la placa i als seus mecanitzats. Com que la comunicació es fa a

través del protocol FTP, només caldrà fer una còpia de l'arxiu a l'adreça habilitada per a tal ús.

Les dues últimes funcions del menú "Generar dibuix" i "Inserir Mecanitzats" pretenen ser una ajuda i a l'hora estandardització per a la creació dels plànols de plaques. Així doncs, el primer permet crear d'un document buit, les quatre línies que conformen el rectangle de la placa mitjançant el mateix sistema de pantalles descrit anteriorment. Al prémer l'opció "Generar dibuix" s'obre una finestra tal com la de la Figura 7.5 on es demanen les propietats de la placa en sí. Aquesta finestra és similar a la descrita a la Figura 7.4, però amb la diferència que a la part de les dimensions apareix sense cap dada. Serà una vegada s'hagin introduït totes les propietats de la placa que s'activaran els camps de les dimensions i el botó per a poder validar-les (Figura 7.6).

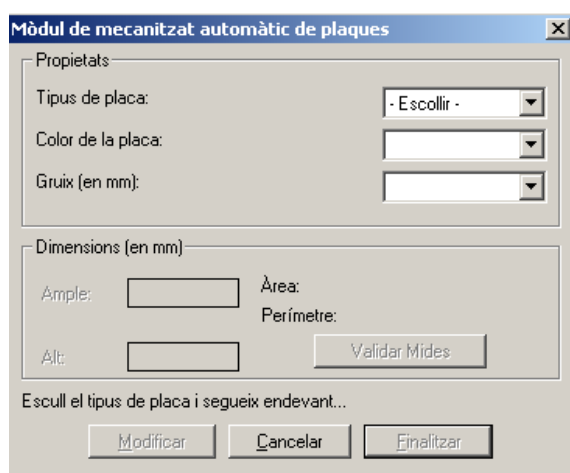


Figura 7.5: Dibuix nou, propietats de la placa

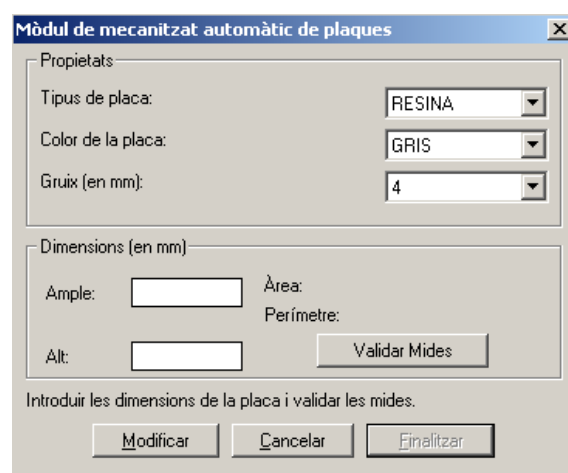


Figura 7.6: Dibuix nou, dimensions de la placa

Quan ja s'han introduït les dimensions de la placa es prem el botó "Validar Mides", si aquestes entren dins els rangs admesos s'activa el botó "Finalitzar" per a generar el dibuix. En aquest moment en el dibuix actiu d'AutoCAD es genera un rectangle amb les dimensions introduïdes i les propietats de la placa es desen a l'arxiu \*.txt.

Ara només caldria inserir els forats que s'hauran de mecanitzar a la placa. Es poden inserir manualment dibuixant cercles dins del rectangle o també mitjançant la quarta opció del menú

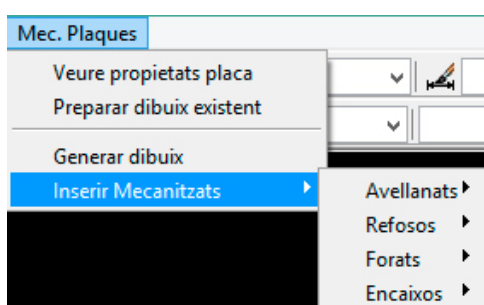


Figura 7.7: Menú d'inserció de mecanitzats

"Inserir Mecanitzats" que desplega un segon menú amb una sèrie d'opcions de forats o mecanitzats com per exemple a la Figura 7.7 on hi ha quatre opcions. Dins de cada opció es podrà triar entre els diferents diàmetres o mides i el que farà el programa és agafar uns blocs predissenyats en AutoCAD per tal que l'usuari l'insereixi en la posició correcta. Aquests blocs

s'hauran creat amb noms específics per tal que el programa els pugui reconèixer com a mecanitzat i estaran definits a l'arxiu de configuració.

## 7.2. Fitxers generats i de configuració

Per tal que el programa pugui funcionar en AutoCAD s'han creat dos arxius de codi "mec\_pl.lsp" i "menus.dcl" on està tot el codi amb les funcions necessàries perquè el programa descrit funcioni. El primer és on hi ha totes les funcions de lectura de dades, ordenació i escriptura i el segon genera les pantalles de configuració descrites a l'apartat anterior.

A més d'aquests dos arxius de programa se n'han creat dos més de configuració. Per tal que el programa sigui més versàtil es deixa la opció de poder configurar els tipus de plaques, colors, gruixos amb els codis corresponents, i també les opcions de mecanitzat. Aquest arxiu s'anomena "llista\_plaques.txt" i és editable per tal d'afegir, modificar o eliminar plaques a poder mecanitzar. El segon arxiu s'anomena "config.txt" i és on es defineixen els diàmetres de les broques dels quals disposa la màquina. El diàmetre de broca utilitzat per a preforats, en el cas per exemple que siguin mecanitzats especials o de diàmetre superior a les broques disponibles, i finalment els blocs de mecanitzats a reconèixer que s'han creat prèviament.

En funció d'aquestes dades introduïdes als arxius de configuració, el programa utilitzarà unes dades o unes altres i per exemple gestionarà l'elecció del diàmetre de la broca en funció de les disponibles. En el cas que sigui un mecanitzat especial, més gran que la broca màxima o no tingui el diàmetre de broca disponible, li assignarà per defecte el diàmetre de broca definit pels preforats. Si pel contrari és més petit que la broca mínima el programa avisarà que aquells mecanitzats no es podran fer.

Tots aquests arxius de codi es troben íntegrament a l'annex B.

### 7.3. Funcions bàsiques

A continuació, a la Taula 7.1 es mostra una llista de les funcions principals usades en el codi per tal de reflectir els criteris seguits en el tractament de les dades d'AutoCAD i la gestió de la informació.

|                                 |               |   |
|---------------------------------|---------------|---|
| <b>Inicialitzar</b>             | Nom:          | Inicialitza ( )   |
|                                 | Paràmetres:   | -   |
|                                 | Funcionament: | La funció inicialitza busca si hi ha entitats "POLYLINE" dibuixades, si les troba les explota convertint-les en entitat "LINE". Si no troba les polilínes busca directament les línies. En el cas que no trobi cap d'aquestes entitats dóna un avís. En el cas que ho trobi fa una llista amb totes les línies i guarda en dues variables de tipus llista ( <code>coord_x</code> i <code>coord_y</code> ) les coordenades dels vèrtexs x i y respectivament de totes les línies. Amb aquestes dades busca el contorn de la placa i posa el vèrtex inferior esquerra en el punt 0.0,0.0,0.0 (origen de coordenades). |
| <b>Buscar el diàmetre mínim</b> | Nom:          | Busca_Diam_Min (llista)   |
|                                 | Paràmetres:   | llista és un vector compostat per quatre components, el tipus de mecanitzat en format de cadena de caràcters, el diàmetre un número real, la coordenada x i la coordenada y números reals.  |
|                                 | Funcionament: | Donada una llista amb el format descrit guarda la variable <code>diam_min</code> el diàmetre o el mètric més petit de tota la llista, i a la variable <code>elem_diam_min</code> guarda el component sencer corresponent al diàmetre/mètric més petit.  |
| <b>Llista de mecanitzats</b>    | Nom:          | Llista_Mec (minim maxim list_block)   |
|                                 | Paràmetres:   | minim és el diàmetre mínim i és un real, maxim és el diàmetre màxim també real. list_block és la llista de noms de blocs prèviament definits.   |

|  |               |   |
|--|---------------|---|
|  | Funcionament: | Busca els blocs amb el nom igual que els definits a l'arxiu "config.txt" i entitats "CIRCLE" que hi ha a l'espai model. Els filtra segons els mecanitzats que pot fer la màquina i guarda el tipus de mecanitzat, el diàmetre i les coordenades llista anomenada list_mec.  |
| <b>Ordenar</b>                         | Nom:          | Ordena_Mecanitzats (list_mec)   |
|  | Paràmetres:   | list_mec llista de tots els mecanitzats de la placa, és un vector com el de la variable llista de Busca_Diam_Min.   |
|  | Funcionament: | Ordena la llista de mecanitzats (list_mec) de diàmetre/mètric menor a major i en l'ordre més òptim de recorregut i ho guarda a la llista list_mec_ord. Per tal d'ordenar-los fa servir una subfunció anomenada Ent_Dist_Min (pt llista) que busca la distància mínima entre un punt d'origen pt qualsevol i els punts mig o de referència de les entitats "LINE" i "ARC" de la llista.                                    |
| <b>Mecanitzats que no són forats</b>   | Nom:          | Mecanitzats_Especials ()  |
|  | Paràmetres:   | -   |
|  | Funcionament: | Busca entitats "LINE" i "ARC" que no pertanyin al contorn estricte, és a dir que no formin part del rectangle de contorn de les mides de la placa, com ara xamfrans, arrodoniments de cantonades, mecanitzats interiors que no siguin forats, encaixos, etc. I els guarda en una llista anomenada list_mec_esp ja ordenats segons la proximitat a l'origen, seguin el recorregut mínim fent ús de la funció Ent_Dist_Min. |
| <b>Llegeix l'arxiu de configuració</b> | Nom:          | Llegeix_Config (ruta_abs)   |
|  | Paràmetres:   | ruta_abs és una cadena de caràcters que conté la ruta on està guardat l'arxiu de configuració.  |
|  | Funcionament: | Llegeix les dades dels arxius configurables pels usuaris en format  |



|                                |               |   |
|--------------------------------|---------------|---|
|                                |               | <p>*.txt. Llegeix línia a línia del document i filtra les dades amb els formats corresponents guardant-les en llistes:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• broques de tipus "LIST"</li> <li>• pretal de tipus "REAL"</li> <li>• bks de tipus "LIST"</li> <li>• list_plaques de tipus "LIST"</li> </ul>   |
| <b>Escriu document per PLC</b> | Nom:          | Escriu_txt (placa mecs mecs_esp ruta)   |
|                                | Paràmetres:   | placa és un vector que conté les propietats de la placa a mecanitzar, com el gruix, color i mides. mecs conté la llista de mecanitzats ja ordenada. mecs_esp conté els mecanitzats especials ordenats. I ruta conté l'adreça on s'ha de guardar l'arxiu.  |
|                                | Funcionament: | <p>Recull les dades obtingudes, propietats de la placa, dimensions, mecanitzats a realitzar i els escriu sobre un arxiu *.txt a la mateixa carpeta i amb el mateix nom que el dibuix que l'ha generat. El format de l'arxiu és el següent:</p> <pre> PLACA("gruix");DIM("ample","alt"); MATERIAL("material","color"); EINA("diam","tipus forat"); MOVE("coordenada x","coordenada y");TAL("diam"); FI(); </pre> |

Taula 7.1: Funcions bàsiques del programa d'AtuoLISP

A continuació hi ha un exemple d'un dibuix d'una placa creat amb AutoCAD (Figura 7.8) i el corresponent arxiu general per l'interpret (Taula 7.2):

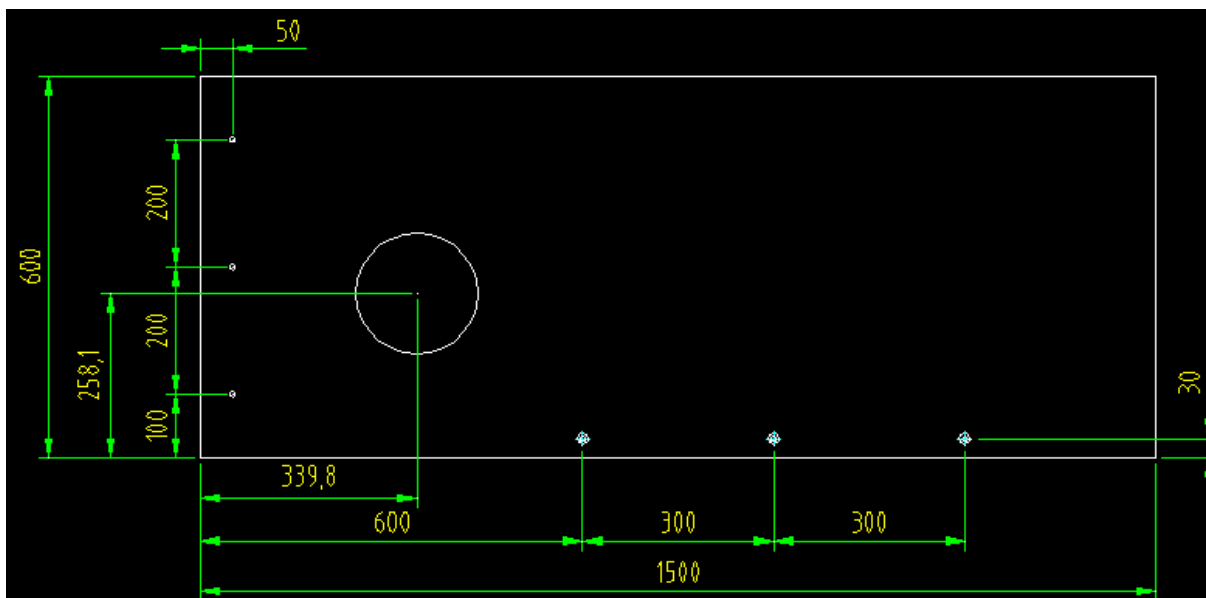


Figura 7.8: Dibuix d'una placa en AutoCAD

```

PLACA(10);DIM(1500,600);MATERIAL(RESINA,GRIS);
EINA(8.5,TAL);
MOVE(50,500);TAL(8.5);
MOVE(50,300);TAL(8.5);
MOVE(50,100);TAL(8.5);
EINA(8,AV);
MOVE(1200,30);AV(8);
MOVE(900,30);AV(8);
MOVE(600,30);AV(8);
EINA(4.5,TAL);
MOVE(339.8,258.1);TAL(4.5);
FI();
    
```

Taula 7.2: Arxiu \*.txt generat a partir del dibuix de la Figura 7.8

## 8. ESTUDI ECONÒMIC

Per a poder estudiar la viabilitat econòmica de la construcció de la màquina i saber el cost de la pròpia màquina, s'ha elaborat un pressupost. Als següents apartats es mostra el resum del pressupost econòmic de la màquina. Els temps de fabricació manual i temps de fabricació de la màquina, per tal de conèixer l'estalvi de costos i finalment l'avaluació de la inversió.

### 8.1. Valoració econòmica del manipulador

A la Taula 8.1 es presenta el resum del pressupost de la màquina desglossat en els diferents conjunts ja usats anteriorment. Cal esmentar que de la posició 01 a la 08 són preus reals del material i diferents costos de construcció. També s'ha d'apuntar que dins la posició 08, la part corresponent a instal·lacions és una estimació molt aproximada basada en altres projectes cedits per l'empresa Sinerges Tecmon, S.A.. De la posició 09 a la 13 són valoracions estimades en funció del volum en hores de treball. També cal tenir en compte que les posicions per 09, 10 i 13 s'haurien de repartir en funció del número de màquines que es fabriquessin. Per veure el pressupost detallat de cada conjunt veure l'annex C.

| Posició                                | Descripció                         | Quantitat | Preu unitari | Preu total         |
|--|------------------------------------|-----------|--------------|--------------------|
| 01                                     | Estructura màquina                 | 1         | 4.744,15 €   | 4.744,15 €         |
| 02                                     | Eix X                              | 1         | 7.455,85 €   | 7.455,85 €         |
| 03                                     | Eix Y                              | 1         | 5.860,04 €   | 5.860,04 €         |
| 04                                     | Eix Z                              | 1         | 920,82 €     | 920,82 €           |
| 05                                     | Taula de treball                   | 1         | 2.844,33 €   | 2.844,33 €         |
| 06                                     | Protecció                          | 1         | 1.078,55 €   | 1.078,55 €         |
| 07                                     | Accionament i trepant              | 1         | 7.283,82 €   | 7.283,82 €         |
| 08                                     | Automatisme i instal·lació         | 1         | 11.351,70 €  | 11.351,70 €        |
| 09                                     | Intèrpret de plànols               | 1         | 1.500,00 €   | 1.500,00 €         |
| 10                                     | Programació i configuració control | 40        | 40,00 €      | 1.600,00 €         |
| 11                                     | Muntatge elèctric i pneumàtic      | 40        | 28,00 €      | 1.120,00 €         |
| 12                                     | Muntatge mecànic                   | 96        | 28,00 €      | 2.688,00 €         |
| 13                                     | Enginyeria                         | 45        | 45,00 €      | 2.025,00 €         |
| <b>IMPORT TOTAL MÀQUINA TRES EIXOS</b> |                                    |           |              | <b>50.472,25 €</b> |

Taula 8.1: Resum pressupost màquina de tres eixos

## 8.2. Estalvi de costos

A l'actualitat en el taller mecànic les operacions de mecanitzat de plaques no metàl·liques es realitzen manualment (Figura 8.1). Per estimar el temps que un operari triga a fer un mecanitzat s'ha de tenir en consideració les operacions següents:



Figura 8.1: Trepant manual del taller de Sinerges Tecmon, S.A. (Imatge cedida per Sinerges Tecmon, S.A.)

- a) Llegir el plànol imprès a l'oficina tècnica per veure quins mecanitzats s'han de realitzar.
- b) Marcar la posició dels forats amb el metre i un llapis.
- c) Preparar la broca de diàmetre adequat.
- d) Posicionar la placa a la taula de treball del trepant de tal manera que l'eix de la broca coincideixi amb la posició on s'ha de mecanitzar.
- e) Encendre el trepant i accionar les palanques per baixar la broca, mentre es subjecta la placa amb l'altra mà.
- f) Parar el trepant i retirar la placa.

S'obvia el tall de la pròpia placa a les mides adequades, ja que en ambdós casos la operació dels mecanitzats de forats es realitza amb la placa ja a mida. Per tant, es considera una condició prèvia a les operacions a realitzar en aquest cas.

Pel que fa a les operacions a realitzar en el cas de la màquina de tres eixos, són les descrites a continuació:

- a) Seleccionar al terminal HMI l'ordre de treball a realitzar.
- b) Posar la placa pertinent a la màquina i prémer polsador de confirmació per fixar la placa.
- c) Sortir de la zona d'acció de la màquina i seleccionar per pantalla que iniciï les tasques.
- d) Esperar que la màquina realitzi els mecanitzats.
- e) Retirar la placa.

S'ha de tenir en compte que a l'operació d) l'operari pot realitzar altres tasques mentre espera que la màquina mecanitzi, per tant l'operari queda lliure.

Per a poder comparar entre un cas i l'altre s'elabora la Taula 8.2, suposant que es mecanitzen

dos forats de diàmetre diferent per tal de poder tenir la valoració de temps del canvi d'eina:

| Amb trepant manual           |                |       | Amb màquina de tres eixos |                |       |
|------------------------------|----------------|-------|---------------------------|----------------|-------|
| Operació                     | Operari ocupat | Temps | Operació                  | Operari ocupat | Temps |
| a)                           | sí             | 60 s  | a)                        | sí             | 30 s  |
| b)                           | sí             | 30 s  | b)                        | sí             | 15 s  |
| c)                           | sí             | 30 s  | c)                        | sí             | 5 s   |
| d)                           | sí             | 15 s  | d)                        | no             | 22 s  |
| e)                           | sí             | 15 s  | e)                        | sí             | 10 s  |
| Es repeteixen<br>c), d) i e) | sí             | 60 s  |                           |                |       |
| f)                           | sí             | 10 s  |                           |                |       |
| Temps operari ocupat:        |                | 220 s | Temps operari ocupat:     |                | 60 s  |
| Temps total:                 |                | 220 s | Temps total:              |                | 82 s  |

Taula 8.2: Comparació temps d'operacions

S'han de tenir en consideració els següents aspectes:

- Els temps d'operació on intervé l'operari en ambdós casos són estimatius.
- El temps de mecanitzat de la màquina s'ha calculat tenint en compte que parteix de l'origen de coordenades descrit anteriorment, fa el recorregut fins agafar l'eina i torna a una posició intermèdia a fer el mecanitzat. Agafant com velocitats de desplaçament 1 m/s als eixos X i Y, i de 0,2 m/s en l'avanç de l'eix Z. Per tant, si es suposa que descriu 6 m a l'eix X, 1 m a l'eix Y i 0,8 m al Z ho realitzaria en 11 s, al fer dos mecanitzats i un canvi d'eina es considera el doble de temps, 22 s.

Per a calcular l'estalvi de costos es consideren els temps anteriors com a una unitat de temps estàndard representativa per a cada dos mecanitzats, així doncs, s'utilitzen com a mitjana d'operació unitària 110 s en el cas manual i 30 s amb la màquina de tres eixos. Es tindrà només en compte l'estalvi que representa en hores d'operari, ja que es suposen el costos fixos i variables de consum o manteniment iguals en el cas del trepant manual com en la màquina de tres eixos o gairebé menyspreables.

En conclusió, l'estalvi de temps d'operari entre el trepant manual i la màquina de tres eixos és de 80 s per a cada mecanitzat. Si es consideren una mitjana anual d'uns 20.000 forats que es realitzen, significa un estalvi de 444,44 h d'operari. Si considerem el preu hora de 28 €/h representen 12.444,44 €/anuals d'estalvi.

### 8.3. Avaluació de la inversió

Amb les dades obtingudes a l'apartat anterior es pot avaluar la inversió i saber quin és el període de retorn de la inversió (pay-back), el valor actual net (VAN) i la taxa interna de rendibilitat (TIR). Per a poder estudiar-ho, s'han de conèixer els fluxos de caixa aquests ve donat pels fons generats menys els invertits. S'ha elaborat una taula completa amb els fluxos de caixa que es pot consultar a l'annex C, apartat C.2. Per elaborar aquesta taula d'estudi o avaluació de la inversió s'ha considerat:

- Els fons invertits l'any 0 són de 50.472,25 € (veure el pressupost a la Taula 8.1).
- Es consideren els estalvis anuals d'12.444,44 € obtinguts a l'apartat 8.2 com els beneficis amb un increment anual del 5%.
- L'amortització de la màquina es valora en 10 anys a raó de 5.047,22 €/anuals amortitzats.
- L'impost de societats es considera d'un 30% [25].

A la taula si s'observa el flux acumulat es pot extreure que entre l'any 3 i 4 es recupera la inversió. Per tant, interpolant, s'obté un període de retorn de la inversió o pay-back de 3,52 anys o aproximadament 3 anys i 6 mesos.

Per a calcular el VAN i el TIR s'aplicaran les equacions (Eq. 8.1) i (Eq. 8.2):

$$VAN = \sum_{t=0}^n \frac{Q_t}{(1+k)^t} \quad (\text{Eq. 8.1})$$

On  $t$  és l'índex temporal i el seu rang és de 0 a 10,  $Q_t$  són els fluxos de caixa de cada any  $t$  i finalment,  $k$ , que és el cost del capital.

$$\sum_{t=0}^n \frac{Q_t}{(1+r)^t} = 0 \Rightarrow \text{TIR} = r \quad (\text{Eq. 8.2})$$

Igualant a 0 el VAN i anomenant la  $k$  com a  $r$ , si s'aïlla s'obté la taxa interna de rendibilitat (TIR).

Amb les dades de la taula adjuntada a l'annex C els valors que s'obtenen de la inversió són:

$$VAN(k = 15\%) = 23.387,38 \text{ €} \quad (\text{Eq. 8.3})$$

$$\text{TIR} = 27\% \quad (\text{Eq. 8.4})$$

$$\text{Pay - back} = 3,52 \text{ anys} \quad (\text{Eq. 8.5})$$

S'ha considerat un cost de capital ( $k$ ) del 15% per al càlcul del VAN. El VAN que s'obté és força elevat i positiu el que significa que la inversió produirà beneficis. El projecte tindria una rendibilitat del 27% i es recuperaria la inversió inicial abans dels 4 anys.

## 9. IMPACTE MEDIAMBIENTAL

### 9.1. Impacte en la fase del projecte i fabricació de la màquina

En l'elaboració del projecte no es consideren impactes al medi ja que són molt petits, només es requereix d'un ordinador i hores d'una persona. Pel que fa a la fabricació de la màquina en sí, cal valorar els consums energètics i els residus generats. Tot i així, no es tindrà en consideració la fabricació d'elements com els motors o altres que es compren ja muntats per a la màquina. Per tant, com que la construcció de la màquina és amb perfils d'alumini que es tallen i mecanitzen per poder fer el muntatge, es valorarà el consum per tallar aquests perfils i els residus generats en aquest procés.

#### 9.1.1. Consums

Com es comentava en el paràgraf anterior, el consum majoritari per a la construcció de la màquina serà energia elèctrica consumida per la màquina de tall de perfils, pel trepant per mecanitzar els perfils i per l'eina de roscar els nuclis dels perfils. Per saber els consums energètics cal saber el número de mecanitzats que s'hauran de fer. La màquina es compon per uns 105 perfils i per tant, s'hauran de fer 105 talls de perfil d'alumini, mentre que els mecanitzats per fer el muntatge i poder instal·lar les unions seran uns 290 mecanitzats. La potència consumida per les màquines seria la següent:

- Serra de tall, 1,5 kW
- Trepant per perfil d'alumini, 0,5 kW
- Roscadora 0,7 kW

Si es considera que per fer un tall de perfil es triguen uns 30 segons de mitjana, ja que dependrà de la mida de cada perfil, que per foradar es triguen 25 segons i per roscar 20 segons, l'energia total consumida per fabricar la màquina seria:

$$E_{serra} = 1,5 \text{ kW} \cdot 105 \text{ talls} \cdot 30 \frac{\text{s}}{\text{tall}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 1,31 \text{ kWh}$$

$$E_{trepant} = 0,5 \text{ kW} \cdot 290 \text{ forat} \cdot 25 \frac{\text{s}}{\text{forat}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 1,01 \text{ kWh} \quad (\text{Eq. 9.1})$$

$$E_{serra} = 0,7 \text{ kW} \cdot 290 \text{ rosca} \cdot 20 \frac{\text{s}}{\text{rosca}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 1,13 \text{ kWh}$$

Així doncs, el consum total d'energia elèctrica en la fabricació seria de 3,45 kWh. Valor que es



pot considerar bastant petit. No cal tenir en compte més consums, ja que el muntatge de la màquina es fa manualment i totes les unions són cargolades.

### 9.1.2. Generació de residus

El residu generat en la fabricació serà el que es desprengui del tall i perforat dels perfils d'alumini que es mecanitzaran. Com s'ha comentat anteriorment s'han de comptabilitzar 105 talls i 290 forats. En el càlcul del residu no es tindrà en compte el material eliminat en l'elaboració de les rosques, ja que és menyspreable.

En el cas dels talls de perfils es considerarà per fer una mitjana el perfil de 80x80 H que té una secció de 0,08 x 0,08 m, si l'eina de tall té un gruix de 3 mm o sigui 0,003 m, el volum aproximat d'alumini perdut en el tall d'un sol perfil seria de:

$$V = 0,08 \cdot 0,08 \cdot 0,003 = 0,0000192 \text{ m}^3 \quad (\text{Eq. 9.2})$$

I per tant pels 105 talls que s'han de fer serien en total 0,002016 m<sup>3</sup> d'alumini que s'hauria de tractar com a residu.

En el cas dels forats per a les unions també considerant el perfil de 80x80 H i una broca de diàmetre 8 mm, com a cas mig de tots els forats, es pot deduir que el volum per un forat seria de:

$$V = \pi r^2 h = \pi \cdot \left(\frac{0,008}{2}\right)^2 \cdot 0,08 = 4,02 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \quad (\text{Eq. 9.3})$$

Pels 290 mecanitzats, el total seria de 0,00117 m<sup>3</sup> d'alumini. El total entre els talls i els forats són 0,00318 m<sup>3</sup> de residu d'alumini generat en tota la fabricació de la màquina. Se sap que l'alumini té una densitat de 2700 kg/m<sup>3</sup>. Per tant:

$$\text{Residus generats} = 2700 \cdot 0,00318 = 8,59 \text{ kg} \quad (\text{Eq. 9.4})$$

Com s'observa a l'equació (Eq. 9.4) es generen menys de 10 kg de residu d'alumini que s'hauria de reciclar convenientment i d'acord amb la normativa vigent aplicable. Cal apuntar però, que els volums calculats s'han fet tenint en compte tota la secció del perfil com si fos un bloc massís, com s'ha vist al llarg del projecte els perfils són de seccions diferents, i per tant, inferiors als valors obtinguts.

## 9.2. Impacte amb la màquina en funcionament

Com es comentava a la introducció d'aquest projecte un dels avantatges de la instal·lació d'aquesta màquina és una millora en les tasques a realitzar per un operari d'un taller mecànic i optimització de l'espai en el taller. Per tant, el primer impacte sobre el medi, en aquest cas un taller mecànic, és una millora en l'ergonomia de treball a l'haver de posar les plaques verticalment sobre la màquina i es pot guanyar espai en el taller ja que ocupa menys.

Una altra implicació sobre els operaris (la societat del taller), és que els hi facilita la feina en el moment que evita que hi hagi errors humans, ja que la posició del forat marcada manualment passaria a fer-se automàticament per la màquina. Només haurà de comprovar que la placa té les dimensions adequades, posar-la a la màquina i confirmar que tot és a la posició correcta.

### 9.2.1. Consums

Els elements utilitzats a la màquina que consumeixen algun tipus d'energia són elèctrics i els seus consums són els següents:

- Servomotors LENZE eix X i Y de 2,35 kW cadascun.
- Conjunt IAI de l'eix Z de 0,08 kW.
- Trepant ELTE de 0,78 kW.
- Tres fonts d'alimentació de 24 V i 5 A, de 0,138 kW cadascuna.

És a dir, que en total la màquina pot consumir 5,974 kW. Si es considera que fa 20000 forats anuals i que el temps promig per a fer cadascun és de 41 s (veure la Taula 8.2) significa que funciona durant 227,78 h anualment. Així doncs, el consum elèctric anual de la màquina rondarà els 1360,744 kWh.

Comparat amb el consum de l'anterior màquina, que té un consum de 2 kW, la diferència és de gairebé 4 kW. Tot i així es considera un impacte relativament petit dins dels consums elèctrics d'un taller mecànic, on es considera que hi pot haver més equips i també de més potència. Per tant, s'hauria de tenir en compte aquest petit augment de potència i confirmar que és assumible.

Per altra banda també hi hauria un consum d'aire comprimit pels diferents actuadors pneumàtics. En les especificacions del fabricant, en aquest cas FESTO, no s'especifiquen els consum específics de cada equip utilitzat en aquest projecte, així que es tindrà en compte que es necessita una pressió constant de 6 bar per al correcte funcionament d'aquests equips. Com

que es considera que en el taller ja hi ha un compressor d'aire comprimit i que el consum d'aquests equips es poden considerar menyspreables, no es té en compte aquest consum.

### 9.2.2. Generació de residus

Al mecanitzar les plaques es generen encenalls a la part on s'ha fet el forat. Aquests serà l'únic tipus de residu que generarà la màquina. Per calcular quin és el volum de residu estimat es suposa el pitjor cas, que seria amb plaques de 10 mm de gruix i fer-li un forat de diàmetre 10 mm, el volum de residu generat és:

$$V = \pi r^2 h = \pi(0,005)^2 \cdot 0,01 = 7,85 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 = 0,785 \text{ cm}^3 \quad (\text{Eq. 9.5})$$

I el cas amb menor generació de residu que seria una placa de 4 mm de gruix i forat a mecanitzar de diàmetre 4,5 mm.

$$V = \pi r^2 h = \pi(0,00225)^2 \cdot 0,004 = 0,636 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 = 0,0636 \text{ cm}^3 \quad (\text{Eq. 9.6})$$

Agafant una mitja entre el cas amb major i menor generació de residu de les equacions (Eq. 9.5) i (Eq. 9.6), s'agafa un volum de residu de  $0,424 \text{ cm}^3$ . La densitat de les plaques de resina cel·lulòsica, que són les més utilitzades, és  $1,3 \text{ g/cm}^3$ . Per tant, el residu generat per a cada forat és de 0,552 grams de mitjana. Usant la dada esmentada al capítol anterior en què fa referència a la mitjana de forats que es realitzen anualment s'obté la quantitat de residu generat anualment de mitja que seria d'11,04 kg. Al ser una quantitat tant petita es preveu fàcil la seva recollida i posterior reciclatge.

### 9.2.3. Vida útil i final de vida de la màquina

Pel tipus de materials i composició de la màquina s'ha pensat perquè com a mínim tingui una vida útil d'uns deu anys. Això no vol dir que passats aquests deu anys quedi inservible completament, però sí que s'hauria de revisar la seva funcionalitat.

Referent al final de vida de la màquina, es tindrà en compte que part de la màquina és reutilitzable i d'altres que hauran de ser convenientment eliminades com a residus segons les normatives vigents. Tot el conjunt de perfils estructurals, carros, marcs de suport, la protecció, etc. no sotmesos a esforços de fatiga són fàcilment reutilitzables per a la construcció d'altres estructures o altres aplicacions. Mentre que la resta d'elements sotmesos a fatiga com les unitats de rodaments i guies, s'haurien d'eliminar, és a dir, reciclar. Tots els components elèctrics, motors, sensors, etc. també caldria valorar-ne la seva eliminació.

## CONCLUSIONS

Un cop fet el disseny mecànic, la modelització, el control dels eixos, el programa d'interpretació de plànols i d'haver valorat econòmicament i ambientalment tot el conjunt, es poden fer diverses anàlisis.

En primer lloc, el disseny de la màquina és prou compacte i versàtil, ja que permet treballar amb plaques fins a dimensions grans en el mínim espai. El fet de treballar en vertical per a mecanitzar plaques li dóna un cert valor afegit, tant a l'hora de treballar-hi el personal, com amb l'espai estalviat en el taller. També s'ha vist que és una màquina robusta i de llarga durada gràcies als seus components i al sistema amb el qual s'ha dissenyat.

El model cinemàtic resulta fàcil i intuïtiu ja que es tracta de moviments lineals sense rotacions relatives i per tant, la relació entre l'angle de gir dels motors i la posició de l'eina, és pràcticament immediata. Del model dinàmic se n'extreu la mateixa relació pel que fa a la dinàmica i es pot obtenir un model del controlador que permetria ajustar el control real de la màquina. En el disseny del control s'ha vist que és factible aplicar el model obtingut a la realitat i que per tant, ajudaria a interpretar els resultats aplicant-los en un controlador real, observant la resposta un cop implementat.

L'eina implementada per a la interpretació de plànols sobre un programa de CAD i posterior comunicació amb l'autòmat de la màquina, permet una millor gestió de les ordres de treball entre l'oficina tècnica i el taller, automatitzant d'aquesta manera tot el procés de gestió i verificació de plànols de les plaques. També és una eina que facilita la feina de l'oficina tècnica en el mateix disseny de les plaques.

Pel que respecte a la part econòmica, cal dir que per a una empresa mitjana és una inversió prou considerable i a tenir en compte, ja que les xifres del pressupost són elevades. Encara que, com s'ha vist, la viabilitat econòmica és favorable i és rendible. Malgrat aquesta rendibilitat estigui al llindar entre una inversió arriscada a d'una profitosa, la màquina té el valor afegit de millora considerable de la forma de treball de l'usuari i es redueixen els possibles errors humans a l'hora de la confecció de plaques. Caldria també valorar aquest factor per si pot ser rellevant a l'hora de prendre una decisió.

Finalment, les afectacions al medi són mínimes i es podria destacar que en general és una millora per a l'entorn i per al personal que en farà ús. I que les afectacions que es podrien considerar negatives, com el consum o generació de residus, són molt petites.

## PROPOSTES DE MILLORES

Tal i com s'ha dissenyat la màquina permet incloure ampliacions o millores, com ara més canvis d'eina i amb eines de diferents formats, i per tant, una diversificació de mecanitzats. D'aquesta manera a part de foradar o marcar la placa, també es podria fresar, avellanar, preparar un forat refós o d'altres mecanitzats.

Per introduir aquesta millora només caldria definir a l'autòmat les noves operacions que hauria d'executar i amb quina eina caldria fer-ho. I evidentment, augmentar la capacitat de l'estació d'eines, que com que està integrada en el sistema modular ITEM, és senzill ampliar-la. Pel que fa a l'interpret com que s'ha deixat lliure d'edició i amb arxius que es poden configurar sembla fàcil poder adaptar-lo.

## AGRAÏMENTS

En primer lloc agrair a l'empresa Sinerges Tecmon i tots els seus components de la plantilla actual i la de fa uns anys. En particular a Pepe Sitges i Jordi Targa, pel seu suport, la seva ajuda i la seva atenció més que exquisida que he rebut tant personalment com professionalment. Sense ells i la oportunitat que em van brindar de poder formar part d'aquest equip, mai hauria pogut fer realitat aquest projecte. La meva vinculació al món laboral dins de l'enginyeria va ser gràcies a aquesta oportunitat de treballar a Sinerges que m'ha obert altres portes al llarg d'aquest temps i m'ha format com a professional. Moltes gràcies.

Agrair a la meva família, la Carme, el Joaquim, la Laura i el Guillem la paciència que han tingut durant tots aquests anys, les imprescindibles correccions de la memòria i sobretot, sobretot, per donar-me la oportunitat d'estudiar una carrera com aquesta.

Gràcies pares, sense vosaltres no ho hauria aconseguit.

## BIBLIOGRAFIA

### Referències bibliogràfiques

- [1] ITEM Industrietechnik GmbH. *Sistema de construcción modular MB 8. Catálogo general*. 2014.
- [2] SINERGES TECMON, S.A.. *Técnicas de manipulación y montaje flexible*.  
[<http://www.sinerges.com>, març 2014].
- [3] ITEM Industrietechnik GmbH. *Sistema de construcción modular MB*.  
[<http://www.item24.es>, març 2014].
- [4] OMRON. *Automatización industrial. Catálogo de productos. Sistemas de control. Software. Programación. Cx-One. La programación y depuración del PLC*.  
[[http://industrial.omron.es/es/products/catalogue/automation\\_systems/software/programming/cx-one/cx-programmer.html](http://industrial.omron.es/es/products/catalogue/automation_systems/software/programming/cx-one/cx-programmer.html), abril 2014].
- [5] OMRON. *Automatización industrial. Catálogo de productos. Sistemas de control. Software. Configuración. Cx-One. Configuración gráfica de redes*.  
[[http://industrial.omron.es/es/products/catalogue/automation\\_systems/software/configuration/cx-one/network\\_configurator.html](http://industrial.omron.es/es/products/catalogue/automation_systems/software/configuration/cx-one/network_configurator.html), abril 2014].
- [6] LENZE. *Descargas de software. Engineering tools*.  
[<http://www.lenze.com/application-knowledge-base/artikel/201200418/1/>, abril 2014].
- [7] ELTE s.r.l. *Products*.  
[[http://www.elvesrl.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=64&Itemid=90&language=en](http://www.elvesrl.com/index.php?option=com_content&view=article&id=64&Itemid=90&language=en), febrer 2014].
- [8] LENZE. *L-force catalogue. Inverters*. 2013, p. 4.5-4, p. 4.5-5, p. 4.5-22, p. 4.5-23, p. 4.8-5, p. 4.8-20, p. 4.8-21,
- [9] IAI Industrieroboter GmbH. *Products. Robocylinder*. 2014.  
[<http://www.intelligentactuator.com/robo-cylinders>, desembre 2013].

- [10] IAI Industrieroboter GmbH. *RoboCylinder RCP4 Series. PowerCon PCON-CA*. 2014, p. 13-14, p. 41-42.
- [11] OMRON. *Automatización industrial. Catálogo de productos. Sistemas de control. Autómatas programables*. 2014.
- [[http://industrial.omron.es/es/products/catalogue/automation\\_systems/programmable\\_logic\\_controllers/modular\\_plc\\_series/cj2m/default.html](http://industrial.omron.es/es/products/catalogue/automation_systems/programmable_logic_controllers/modular_plc_series/cj2m/default.html), abril 2014].
- [12] FESTO. *Cilindros normalizados DNC, ISO 15552*. 2014, p. 8-14.
- [13] LENZE. *L-force catalogue. Motors*. 2013, p. 5.2-6, p.5.2-17, p.5.2-20, p.5.2-27.
- [14] LENZE. *L-force catalogue. Gearboxes*. 2013, p. 6.8-5, p.6.8-28, p.6.8-34, p.6.8-42, p.6.8-43.
- [15] FESTO. *Cilindros compactos ADVU/AEVU*. 2014, p. 10-14.
- [16] FESTO. *Elemento de fijación lineal y giratorio CLR*. 2014, p. 2, 4-14.
- [17] DORMER. *Productos*. 2014
- [<http://www.dormertools.com/es-es/products/pages/ProductDetails.aspx?psf=A101&psfid=DORA101>, abril 2014]
- [18] PEPPERL+FUCHS. *Hoja de datos. Cortina óptica de seguridad*. 2012.
- [[http://files.pepperl-fuchs.com/selector\\_files/navi/productInfo/edb/199731\\_spa.pdf](http://files.pepperl-fuchs.com/selector_files/navi/productInfo/edb/199731_spa.pdf), abril 2014]
- [19] OMRON. *Automatización industrial. Catálogo de productos. Sistemas de control. Interfaces hombre-máquina. HMI & control*. 2014.
- [[http://industrial.omron.es/es/products/catalogue/automation\\_systems/hmi/hmi\\_and\\_control/default.html](http://industrial.omron.es/es/products/catalogue/automation_systems/hmi/hmi_and_control/default.html), abril 2014]
- [20] FESTO. *Válvulas universales CPE*. 2014, p. 41.
- [21] SIEMENS AG. *SIMATIC. Catálogo ST 50*. 2013, p. 5/4 - 5/9.



[[http://www.automation.siemens.com/salesmaterial-as/catalog/es/simatic\\_st70\\_complete\\_spanish\\_2013.pdf](http://www.automation.siemens.com/salesmaterial-as/catalog/es/simatic_st70_complete_spanish_2013.pdf), abril 2014]

- [22] SCNEIDER-ELECTRIC. *Logic controller. Modicon M258*. 2012, p. 3, p. 10.

[[http://download.schneider-electric.com/files?p\\_File\\_Id=28871202&p\\_File\\_Name=DIA6ED2100402-EN\\_V2.0.pdf](http://download.schneider-electric.com/files?p_File_Id=28871202&p_File_Name=DIA6ED2100402-EN_V2.0.pdf), abril 2014]

- [23] LENZE. *Inverter Drives 8400 TopLine C. Manual Reference*. 2013, p. 916.

[[http://download.lenze.com/TD/E84AVTCx\\_\\_8400%20TopLine%20C\\_\\_v5-0\\_\\_EN.pdf](http://download.lenze.com/TD/E84AVTCx__8400%20TopLine%20C__v5-0__EN.pdf), abril 2014]

- [24] IAI. *Power CON. PCON-CA/CFA Controller. Instruction manual*. 2012, p. 177.

[<http://www.intelligentactuator.com/pdf/controller-manuals/PCON-CA%28ME0289-5A%29.pdf>, abril 2014]

- [25] GENERALITAT DE CATALUNYA. DEPARTAMENT D'EMPRESA I OCUPACIÓ. *Impost de societats*. 2012, p. 7.

[[http://inicia.gencat.cat/inicia/images/cat/Impost%20de%20societats\\_CAT%20ok\\_tcm124-80393.pdf](http://inicia.gencat.cat/inicia/images/cat/Impost%20de%20societats_CAT%20ok_tcm124-80393.pdf), abril 2014]

- [26] BOVE-AG, S.L.. *Plásticos mecanizables*. 2014.

[[http://www.plasticos-mecanizables.com/plasticos\\_polietileno\\_uhmw.html](http://www.plasticos-mecanizables.com/plasticos_polietileno_uhmw.html), abril 2014]

### Bibliografia complementària

BARRIENTOS, A., PEÑÍN, L. F., BALAGUER, C., ARACIL, R. *Fundamentos de robótica*. Madrid, McGraw-Hill, 2a edició.

CARDONA, S., JORDI, L. *Magnituds i unitats*. 2003.

KATSUHIKO OGATA. *Ingeniería de control moderna*. Madrid, Pearson Educación, S. A., 2003.