

Treball de Fi de Grau

## GRAU EN ENGINYERIA EN TECNOLOGIES INDUSTRIALS

### Disseny del sistema de control d'una màquina automàtica per a soldar dolles

MEMÒRIA

**Autor:**

**Director:**

**Convocatòria:**

SALCEDO BOSCH, MARTÍ  
GRIÑO CUBERO, ROBERTO  
gener 2015



Escola Tècnica Superior  
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



## Resum

L'objectiu d'aquest projecte és la selecció i disseny dels sistemes motors, actuadors i controladors per completar el disseny d'una màquina de soldar, proporcionada per l'empresa Oliva Torras. Aquesta màquina ha d'automatitzar un procés de soldadura que actualment és manual.

Es desenvolupen les següents parts de la màquina:

- Sistema que acciona el gir d'una taula, on van col·locades les peces a soldar.
- Sistema automàtic que permet el moviment de la pistola de soldadura fins al punt d'unió entre peces a soldar.
- Selecció dels controladors d'aquests dos sistemes.

Per a dissenyar el sistema que acciona el gir de la taula, se'n fa un estudi cinemàtic i dinàmic. Es busca el motor més adequat i el seu controlador, i es comprova que el seus rangs de funcionament s'ajusten als requeriments mitjançant càlculs analítics i simulacions numèriques.

Per a moure la pistola de soldadura es dissenya un sistema de dos eixos que permeti moure-la en un pla. Es fa una cerca d'elements estàndards en el mercat per a simplificar aquesta tasca. Finalment per a accionar aquest sistema de dos eixos, es necessita també un estudi cinemàtic i dinàmic, buscar el motor més adequat i el seu controlador, fent servir els mateixos mètodes que per al sistema que acciona el gir de la taula.

Un cop dissenyats aquests sistemes, es modifica l'estructura de la màquina per a poder-los-hi incorporar.

El resultat és un sistema automàtic, conformat per un conjunt de components que es poden trobar al mercat i de components dissenyats a mida òptims per a complir les funcions requerides.

Com a reflexió final s'observa la dificultat en la selecció òptima d'un motor per accionar un sistema mecànic i la complexitat de simular numèricament el seu comportament.

També s'observa que el nivell de profunditat en el que es pot arribar a l'hora de dissenyar un sistema pot ser molt elevat, per tant, s'ha de saber fins a quin punt es suficient arribar per aconseguir un bon resultat.



# Sumari

<b>RESUM</b>	<b>1</b>
<b>SUMARI</b>	<b>3</b>
<b>1. GLOSSARI</b>	<b>7</b>
<b>2. PREFACI</b>	<b>9</b>
2.1. Origen del projecte .....	9
2.2. Motivació .....	9
2.3. Requeriments previs .....	9
<b>3. INTRODUCCIÓ</b>	<b>11</b>
3.1. Antecedents .....	11
3.2. Objectius del projecte .....	13
3.3. Abast del projecte .....	13
3.4. Càlculs del projecte .....	14
<b>4. SISTEMA MOTOR-REDUCTOR-TAULA</b>	<b>15</b>
4.1. Situació inicial .....	15
4.2. Definició dels requeriments .....	15
4.3. Càlculs .....	15
4.3.1. Rang de velocitats i acceleracions .....	15
4.3.2. Precisió obtinguda amb l'acceleració fixada .....	16
4.3.3. Cicle de treball estàndard .....	18
4.3.4. Moments d'inèrcia .....	20
4.3.4.1. Moment d'inèrcia de l'adapter .....	21
4.3.4.2. Moment d'inèrcia dels elements de la màquina solidaris a l'adapter ...	22
4.3.5. Parells .....	22
4.3.5.1. Parell de fregament .....	23
4.3.5.2. Parell de pic .....	24
4.3.5.3. Parell nominal .....	25
4.4. Selecció del sistema motor .....	25
4.4.1. Selecció del reductor .....	26
4.4.2. Selecció del motor .....	27
4.5. Selecció del sistema de control .....	30
4.5.1. Selecció del sensor de posició .....	30

4.5.2.	Selecció del controlador o drive .....	31
4.6.	Modelat matemàtic i simulació del motor.....	33
4.7.	Modificacions mecàniques.....	39
<b>5.</b>	<b>SISTEMA PISTOLA DE SOLDADURA .....</b>	<b>41</b>
5.1.	Situació inicial .....	41
5.2.	Definició dels requeriments.....	41
5.3.	Disseny cinemàtic del sistema.....	41
5.3.1.	Recorregut dels dos eixos.....	41
5.3.2.	Rang de velocitats i acceleracions .....	42
5.3.2.1.	Eix vertical.....	42
5.3.2.2.	Eix horitzontal.....	43
5.3.3.	Cicle de treball estàndard .....	44
5.3.3.1.	Eix vertical.....	44
5.3.3.2.	Eix horitzontal.....	46
5.4.	Selecció dels actuadors lineals i càlculs dinàmics.....	48
5.4.1.	Selecció del mòdul vertical.....	50
5.4.1.1.	Velocitat màxima.....	50
5.4.1.2.	Força màxima en la direcció de l'eix.....	50
5.4.1.3.	Carregues i moments.....	51
5.4.1.4.	Mòdul escollit .....	52
5.4.2.	Selecció del mòdul horitzontal .....	54
5.4.2.1.	Velocitat màxima.....	54
5.4.2.2.	Força màxima en la direcció de l'eix.....	54
5.4.2.3.	Carregues i moments.....	55
5.4.2.4.	Mòdul escollit .....	57
5.5.	Selecció del sistema motor .....	58
5.6.	Selecció del sistema de control .....	61
5.6.1.	Selecció dels finals de carrera .....	61
5.6.2.	Selecció del sensor de posició.....	61
5.6.3.	Selecció del controlador o drive .....	62
5.7.	Modelat matemàtic i simulació del motor.....	63
5.7.1.	Modelat i simulació del motor vertical .....	63
5.7.2.	Modelat i simulació del motor horitzontal .....	70
5.8.	Disseny i modificacions mecàniques .....	75

5.8.1.	Subjecció de la pistola de soldadura al carro vertical.....	76
5.8.2.	Sistema de fixació entre els dos mòduls .....	76
5.8.3.	Sistema d'acoblament entre els motors i els eixos dels mòduls.....	76
5.8.4.	Sistema de fixació del mòdul horitzontal a la taula de la màquina .....	77
<b>6.</b>	<b>SISTEMA PNEUMÀTIC .....</b>	<b>79</b>
6.1.	Situació inicial.....	79
6.2.	Accionament.....	79
<b>7.</b>	<b>DISPOSITIU DE CONTROL GLOBAL .....</b>	<b>81</b>
7.1.	Selecció del controlador global.....	81
7.2.	Interfície d'usuari .....	82
<b>8.</b>	<b>PLANIFICACIÓ I VALORACIÓ ECONÒMICA .....</b>	<b>83</b>
8.1.	Planificació .....	83
8.2.	Valoració econòmica .....	85
<b>9.</b>	<b>IMPACTE AMBIENTAL .....</b>	<b>87</b>
9.1.	Materials.....	87
9.2.	Funcionament.....	88
<b>CONCLUSIONS .....</b>		<b>89</b>
	Vies futures de desenvolupament .....	89
<b>AGRAÏMENTS .....</b>		<b>91</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>		<b>92</b>
	Referències bibliogràfiques.....	92
	Bibliografia complementaria.....	93



## 1. Glossari

**Adapter** – Peça que forma part dels conjunts de muntatge destinats a la conversió dels vehicles en vehicles refrigerats. Consta de dues parts soldades entre si, una xapa i una dolla.

**Dolla** – Peça cilíndrica buida en el seu interior.

**Drive** – Aparell que controla el comportament d'un motor.

**Encoder** - Dispositiu electromecànic usat per convertir la posició angular d'un eix a un codi digital.





## **2. Prefaci**

### **2.1. Origen del projecte**

El projecte parteix de la col·laboració amb l'empresa Oliva Torras per completar el disseny d'una màquina per a soldar unes peces anomenades "Adapters" que formen part d'uns conjunts de peces que permeten la conversió de vehicles de càrrega normals a refrigerats.

Es vol continuar amb la tasca del disseny d'aquesta màquina partint d'un projecte previ en el que s'ha elaborat la part mecànica. Es volen dissenyar tots els sistemes d'actuadors que faran que la màquina funcioni amb els seus corresponents controladors.

### **2.2. Motivació**

L'empresa té la intenció d'automatitzar el procés de fabricació que actualment es fa manualment i amb personal especialitzat. Es vol augmentar la velocitat i reduir la especialització dels operaris.

### **2.3. Requeriments previs**

La continuació del disseny de la màquina s'ha de basar en el treball desenvolupat fins ara. S'ha d'aconseguir que la màquina sigui més ràpida que el procés de soldadura manual, ha de ser flexible, per a poder-se adaptar a tots els models de peces que ha de fabricar, i no ha de ser difícil d'utilitzar, per prescindir de personal especialitzat.



### 3. Introducció

#### 3.1. Antecedents

L'empresa Oliva Torras S.A, en la seva divisió de metalls, fabrica tot tipus de productes per molts sectors del transport i la indústria en general. Uns d'aquests productes són uns conjunts de peces que permeten convertir vehicles de càrrega normals en refrigerats. Aquests conjunts subministren les peces necessàries per poder instal·lar un compressor addicional a l'interior dels vehicles i així poder fer funcionar el circuit de refrigeració. Unes de les peces que s'inclouen en aquests conjunts de muntatge són les anomenades "Adapters", que consisteixen bàsicament en una dolla soldada a una xapa.

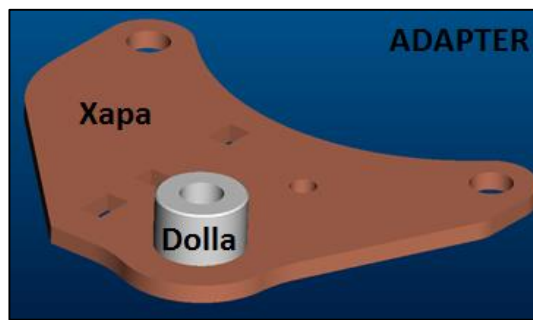


Figura 3.1. Exemple d'adapter

Les mides i la soldadura entre dolla i xapa dels adapters són diferents per a cada tipus de vehicle que es vol habilitar per a la refrigeració, cosa que fa que hi hagi més d'un miler de variants tenint en compte el nombre de models de vehicles pels quals es fan conjunts de peces. Normalment de cadascuna d'aquestes variants se'n fan sèries molt curtes en funció de la demanda. Tot això porta a una situació en la que hi ha una gran variabilitat de models a fabricar i es necessiten molt poques unitats de cada model. Aquesta situació fa que el procés de fabricació sigui manual i es faci amb un operari soldador especialitzat.

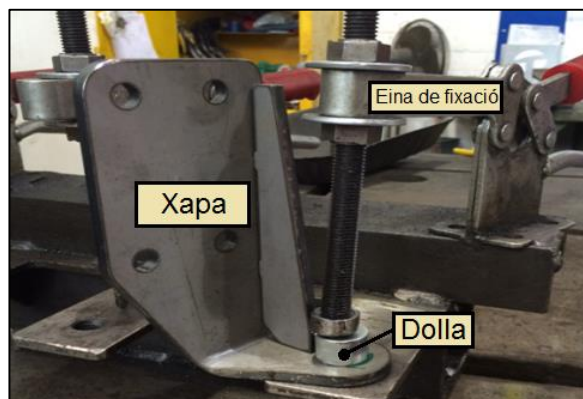


Figura 3.2 Fixació de l'adapter per a la soldadura manual.

Per aquest motiu a l'empresa es va decidir automatitzar el procés, per augmentar la velocitat de la producció i no haver de requerir personal tan especialitzat. Al necessitar una fabricació molt flexible a causa de la gran varietat de peces, es va decidir dissenyar una màquina



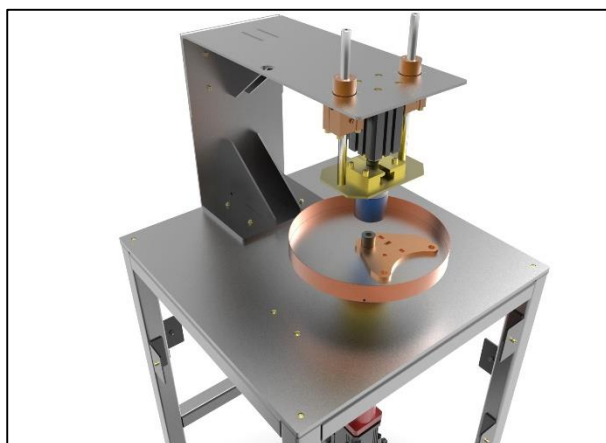
*Figura 3.3 Disseny inicial*

universal que servis per a la majoria dels adapters. El disseny d'aquesta màquina es va començar i es va arribar a deixar la part mecànica pràcticament completa i amb una preselecció d'un dels actuadors necessaris pel seu funcionament. La situació actual del disseny de la màquina i a partir del qual s'ha partit per fer aquest projecte és el que es pot veure a la Figura 3.3 i a la Figura 3.4.

El funcionament de la màquina és el següent: Primer es col·loca l'adapter en aquest plat giratori, que es pot observar en la Figura 3.3 i Figura 3.4, de manera que la dolla quedi concèntrica amb l'eix de gir del plat. Un cop col·locat, l'estructura que té a sobre baixa per l'acció d'un cilindre pneumàtic per així pressionar la dolla contra la xapa fent que no puguin rotar una respecte de l'altra. A continuació s'apropa la pistola de soldadura fins al perímetre de contacte entre la dolla i la xapa. Finalment es fa girar el plat i s'activa la pistola de soldadura cosa que fa que es soldi el perímetre de contacte deixant l'adapter acabat.

La màquina encara no està acabada. Falten components i part del disseny per a poder dur a terme el procés de soldadura.

Aquest projecte continuarà amb el procés de disseny de la màquina per automatitzar la fabricació dels adapters.



*Figura 3.4 Disseny inicial*

## 3.2. Objectius del projecte

L'objectiu principal d'aquest projecte és la selecció i disseny dels sistemes motors, actuadors i controladors de la màquina de soldar adapters.

Per a complir aquest objectiu principal s'hauran de complir els següents objectius concrets:

- Redissenyar el sistema que acciona el gir de la taula de soldadura tenint en compte els requeriments de velocitats de soldadura.
- Dissenyar els components d'un sistema automàtic que permeti el moviment de la pistola de soldadura fins al punt d'unió entre la xapa i la dolla.
- Seleccionar els controladors dels actuadors dels sistemes.
- Complir els requeriments de duració del procés de soldadura definits per l'empresa.

Com a objectius secundaris del projecte en els quals no s'ha aprofundit tant com en els anteriors es té:

- Seleccionar els components que permetin el funcionament del sistema pneumàtic de fixació.
- Seleccionar i dissenyar el dispositiu de control global de tota la màquina.

## 3.3. Abast del projecte

En aquest projecte es deixa totalment definida la selecció del sistema motor per a la taula giratòria i la selecció del seu controlador.

També es deixa totalment definit el disseny i la selecció dels components del sistema mecànic que permetrà el moviment de la pistola de soldadura, així com la selecció dels motors que l'actuaran i els seus respectius controladors.

A part d'això, es deixa orientat el sistema de control global de la màquina i el sistema de control del pistó pneumàtic.

En aquest projecte, no es realitza el disseny del sistema elèctric de la màquina ni es fa la programació dels components electrònics, així com tampoc es defineix el sistema de comunicació entre ells.

A més, tampoc es construeix la màquina ni se'n fa un seguiment de la construcció.

### 3.4. Càlculs del projecte

Per a fer tots els càlculs que es trobaran en aquest projecte s'han dissenyat unes fulles de càlcul dinàmiques que es poden trobar a l'Annex A. Aquestes fulles han facilitat molt la selecció dels components de la màquina, ja que han permès refer tots els càlculs de manera automàtica només canviant-ne els paràmetres.

## 4. Sistema motor-reductor-taula

### 4.1. Situació inicial

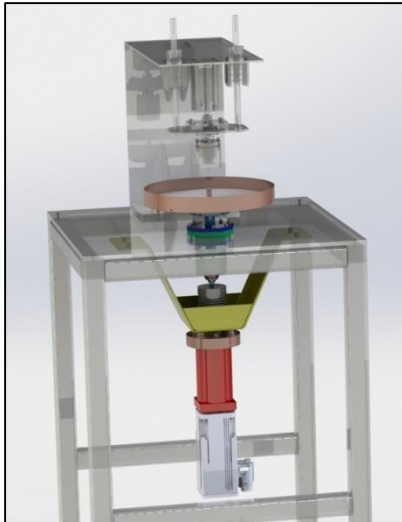


Figura 4.1 Sistema original

Es parteix d'un sistema motor-reductor-taula giratòria ja definit en el projecte original [1]. Després d'una revisió dels càlculs i d'una recerca d'un drive pel motor es veu que la selecció del motor es pot millorar i ajustar millor a les necessitats de la màquina.

S'havia escollit un motor de la marca Mavilor, model Brushless BLS-70, amb un reductor de la marca Apex Dynamics, model PE-070/2.

Es decideix calcular i escollir de nou el reductor i el motor, cosa que comporta modificacions estructurals en el disseny original de la màquina.

### 4.2. Definició dels requeriments

El sistema motor-reductor ha de permetre soldar els components de l'adapter (la xapa amb la dolla) tenint en compte que hi ha una velocitat lineal de soldadura fixada, que hi ha diferents mides de dolla i diferents tipus de soldadura ja que no sempre es vol soldar tot el perímetre de la unió. Tot això tenint en compte que es vol que el sistema automàtic sigui més ràpid que el sistema actual que és manual.

Per tant, el motor-reductor ha de poder fer girar la taula a les velocitats de soldadura, a unes velocitats més ràpides per canviar ràpidament el posicionament de la peça i ha de poder oferir un parell que permeti accelerar el conjunt de la taula i l'adapter a aquestes velocitats i mantenir-les. També ha de ser capaç de treballar contínuament en el temps fent cicles de soldadura sense sobreescalfar-se.

### 4.3. Càlculs

#### 4.3.1. Rang de velocitats i acceleracions

Els càlculs parteixen de la velocitat de soldadura que ve fixada. La velocitat lineal de soldadura òptima per a una correcta unió entre els components és de 35 cm/min, o sigui 0,006 m/s.



Amb aquesta velocitat tenint en compte el radi extern més petit ( $r_{\min} = 3,25 \text{ mm}$ ) i el radi extern més gran ( $r_{\max} = 25 \text{ mm}$ ) dels models de dolla es calcula la velocitat angular màxima i mínima a la que haurà de girar el plat en el moment de la soldadura com es pot veure a l'Equació 4.1.

$\omega_{smax} = \frac{V_{sold.}}{r_{min}} = \frac{0,006 \text{ m/s}}{0,00325 \text{ m}} = 1,85 \text{ rad/s}$	$\omega_{smin} = \frac{V_{sold.}}{r_{max}} = \frac{0,006 \text{ m/s}}{0,02500 \text{ m}} = 0,24 \text{ rad/s}$
--	--

Equació 4.1 Velocitats de soldadura

Un cop definits els rangs de velocitats de soldadures es defineix una velocitat que permeti fer moviments ràpids de canvi de posició de l'adapter, ja que no sempre es vol soldar tot el perímetre de la unió entre la dolla i la xapa.

Es defineix com a objectiu fer una volta completa de l'adapter en un segon, tenint en compte l'acceleració i la frenada. Definint una acceleració i frenada iguals de  $\alpha_{\max} = 70 \text{ rad/s}^2$ , un temps total d'un segon i un recorregut total d'una volta, s'obté una velocitat angular constant de  $\omega_{\max} = 6,979 \text{ rad/s}$  i el següent perfil de velocitats.

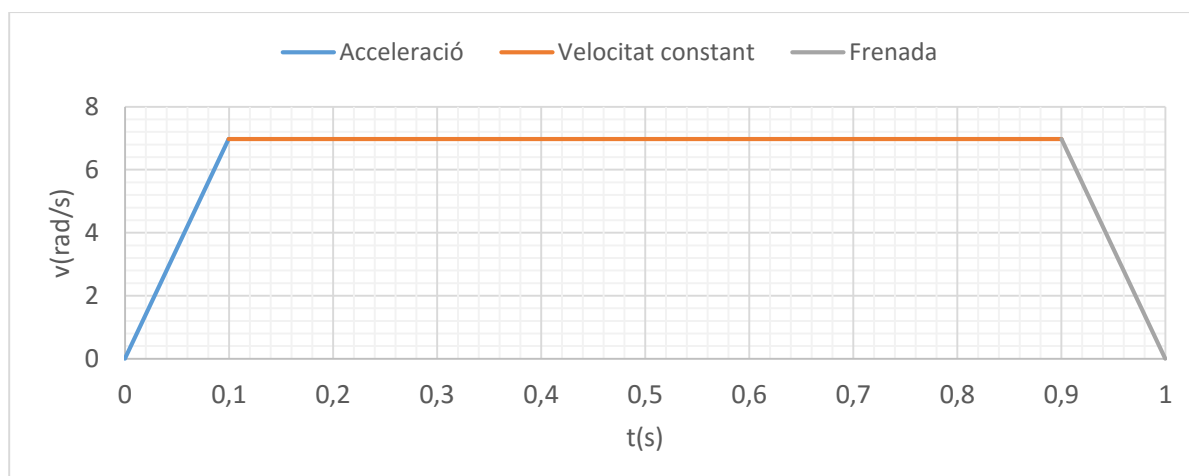


Figura 4.2 Perfil de velocitats de moviment de la taula giratòria

	Temps	Recorregut		Velocitat màxima		Accel. màxima
	s	deg	rad	rad/s	rpm	rad/s <sup>2</sup>
Acceleració	0,10	19,93	0,348	-	-	70,00
V. Constant	0,80	320,13	5,587	6,98	66,64	0,00
Frenada	0,10	19,93	0,348	-	-	-70,00

Taula 4.1 Taula resum del perfil de velocitats.

### 4.3.2. Precisió obtinguda amb l'acceleració fixada

Amb l'acceleració angular màxima de  $\alpha_{\max} = 70 \text{ rad/s}^2$  fixada, es calcula el mínim recorregut que pot fer la dolla en el seu perímetre des de que comença a girar fins que gira a la velocitat de soldadura.

Amb l'Equació 4.2 es pot calcular aquesta distància en funció del radi de la dolla.

$$d(r) = \frac{1}{2} \frac{V_{Soldadura}^2}{\alpha_{max} r} [m]$$

Equació 4.2 Recorregut respecte el radi de la dolla

Com es pot observar l'Equació 4.2 presenta una forma hiperbòlica, cosa que indica que en el cas del radi de la dolla més gran el perímetre recorregut per arribar a la velocitat de soldadura amb la màxima acceleració serà el més petit. També indica que en el cas del radi de la dolla més petit el perímetre recorregut per arribar a la velocitat de soldadura amb la màxima acceleració serà el més gran.

A continuació la Figura 4.3 mostra la relació entre aquestes dues variables per a tots els radis de dolla compresos entre el més petit ( $r = 3,25 \text{ mm}$ ) i el més gran ( $r = 25 \text{ mm}$ ).

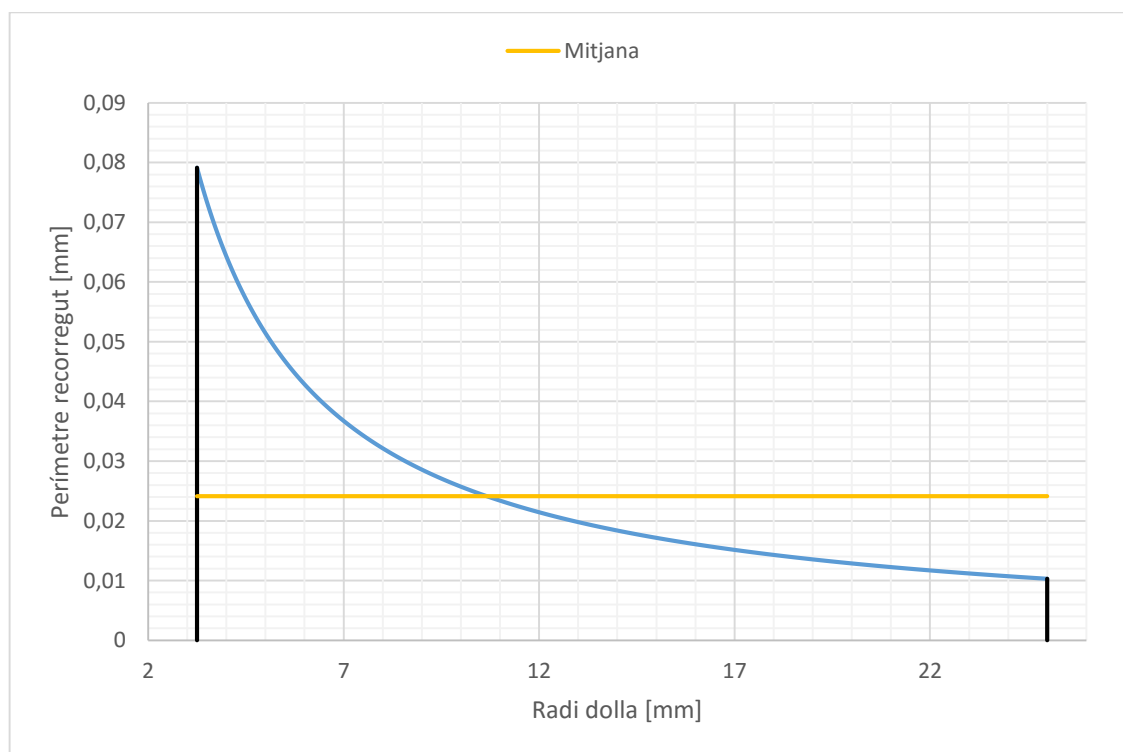


Figura 4.3 Relació entre el radi de la dolla i el perímetre recorregut.

La següent taula mostra el valor mitjà del perímetre recorregut i els valors en els casos extrems, o sigui, en el cas del radi de la dolla més gran i el més petit.

	Perímetre recorregut
$r_{min}$	0,079 mm
$r_{max}$	0,010 mm
Mitjana	0,024 mm

Taula 4.2 Perímetre recorregut

Amb aquests resultats s'observa que amb l'acceleració màxima seleccionada de  $\alpha_{\max} = 70$  rad/s<sup>2</sup> es podrà tenir sempre una precisió de soldadura de més de  $d = 0,079$  mm per a tots els tipus d'adapter, ja que és la distància mínima que s'ha de recórrer per poder començar a soldar.

Al no haver definit una precisió concreta en els requeriments de la soldadura, aquesta precisió, que s'obté, es considera suficient i vàlida completament els temps, les velocitats i les acceleracions escollides en els moviments de la taula giratòria.

### 4.3.3. Cicle de treball estàndard

Una vegada determinades i validades les velocitats i acceleracions a les que podrà girar la taula es dissenya un cicle de treball estàndard per a poder estudiar el comportament del motor que l'accionarà en treball continu.

Es busca fer un cicle de soldadura que sigui representatiu de tots els cicles de soldadura diferents que hi ha. Es decideix dividir el perímetre de la dolla en sis parts i soldar-ne tres, ja que no sempre es solda tot el contorn de la unió entre la dolla i la xapa. Per tant, dels 360° totals només se'n solden tres trossos de 60° fent un total de 180° soldats. La següent figura mostra una imatge esquemàtica de quines parts es solden i quines no.

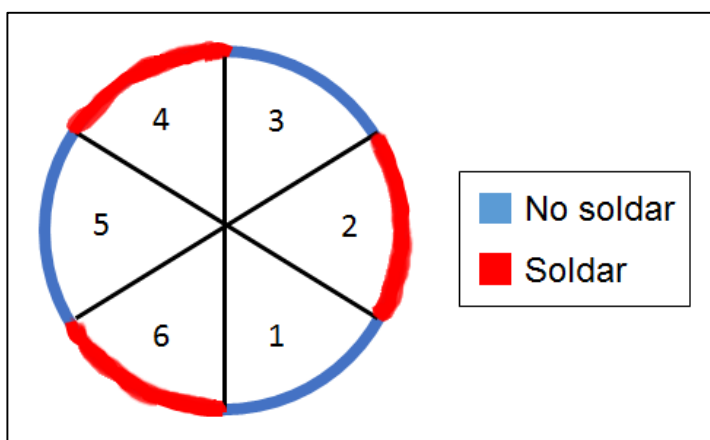


Figura 4.4 Zones per soldar

També s'agafa la velocitat de soldadura de la dolla de radi més petit, ja que comporta la velocitat angular de soldadura més gran, i així es contempla el pitjor dels casos. Per tant, la velocitat de soldadura de les tres parts definides anteriorment queda determinada a  $\omega_{\max} = 1,85$  rad/s.

D'aquesta manera el cicle de treball estàndard queda dividit en sis parts, en tres de les quals es fa girar l'adapter a la velocitat de soldadura i en les altres tres parts es fa girar l'adapter ràpidament fins a arribar al següent tram de soldadura.

En els moviments entre soldadures es decideix moure l'adapter amb la màxima acceleració ( $\alpha_{\max} = 70 \text{ rad/s}^2$ ) els primers  $20^\circ$ , en els següents  $20^\circ$  anar a velocitat constant i en els últims  $20^\circ$  frenar amb la mateixa acceleració que els primers  $20^\circ$  però negativa.

Pel que fa al moviment de la soldadura es vol una precisió d'almenys  $3^\circ$ , això vol dir que es vol que s'arribi a la velocitat de soldadura com a màxim havent recorregut  $3^\circ$ . A diferència de l'apartat anterior (4.3.1) en el que s'havia definit l'acceleració angular i el recorregut, i es calculava la velocitat, en aquest cas es calcula l'acceleració tenint el recorregut i la velocitat definits. Per tant, al voler arribar a una velocitat de soldadura d'  $1,85 \text{ rad/s}$  en un recorregut de  $3^\circ$  s'obté una acceleració de  $32,55 \text{ rad/s}^2$ .

Aleshores, el moviment de soldadura queda definit de la següent forma: en els primers  $3^\circ$  l'adapter s'accelera amb  $32,55 \text{ rad/s}^2$ , els següents  $54^\circ$  es fa girar a una velocitat de soldadura constant d'  $1,85 \text{ rad/s}$  i els últims  $3^\circ$  es frena amb la mateixa acceleració que el principi però negativa.

Per últim, es decideix deixar un període de repòs entre moviment i soldadura de  $0,1 \text{ s}$  bàsicament per facilitar la coordinació amb el sistema de la pistola de soldadura que s'explicarà en el capítol 5.

La següent taula mostra els valors del moviment de la taula dels primers  $120^\circ$ , ja que aquests valors es repeteixen fins als  $360^\circ$ .

		Temps	Recorregut		Velocitat		Accel.
		s	deg	rad	rad/s	rpm	rad/s <sup>2</sup>
Mov.	Acceleració	0,10	20,00	0,349	-	-	70,00
	V. Constant	0,05	20,00	0,349	6,99	66,76	0
	Frenada	0,10	20,00	0,349	-	-	-70,00
Repòs	Aturada	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sold.	Acceleració	0,06	3,00	0,052	-	-	32,55
	V. Constant	0,51	54,00	0,942	1,85	17,629	0
	Frenada	0,06	3,00	0,052	-	-	-32,55
Repòs	Aturada	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Taula 4.3 Valors del moviment de la taula giratòria els primers  $120^\circ$  de recorregut.

A continuació, la Figura 4.5 mostra el cicle de treball estàndard completament definit en el qual es pot apreciar els tres canvis ràpids de posició i les tres parts de soldadura. La figura mostra tant el perfil de velocitats com el perfil del recorregut.

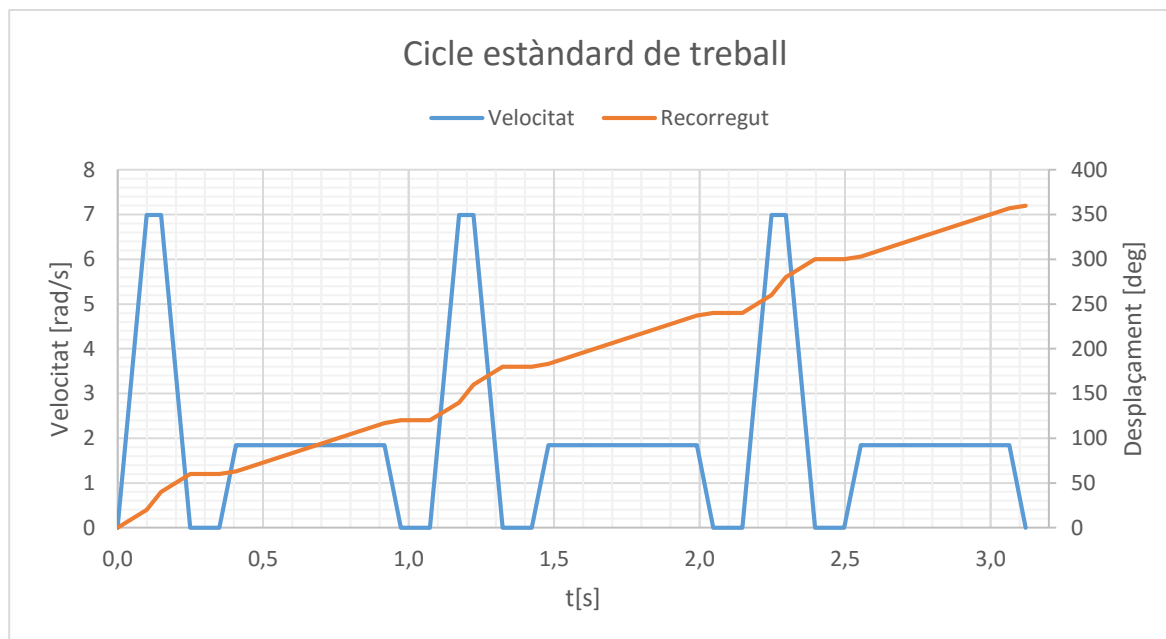


Figura 4.5 Cicle de treball estàndard

Cal dir que en la figura es veu que els trams dels recorregut són tots lineals, cosa que a la realitat òbviament no es així, ja que en els casos en els que hi ha acceleració el recorregut presenta perfils parabòlics. Això es deu a que tant el perfil de les velocitats com el perfil del recorregut s'han traçat a partir de la unió dels punts finals de cadascun dels moviments, per tant, en aquesta figura el perfil del recorregut és només orientatiu.

Amb el perfil de velocitats s'obté la mitjana quadràtica (RMS: Root Mean Square) de la velocitat, que posteriorment es farà servir per a la selecció del sistema motor. L'Equació 4.3 mostra com es calcula tenint en compte la velocitat en cada tram.

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N t_i X_i}{t_{total}}}$$

Equació 4.3 Mitjana quadràtica

S'obté una mitjana quadràtica de la velocitat de  $\omega_{nominal} = 2,541$  rad/s

#### 4.3.4. Moments d'inèrcia

Un cop definides la màxima acceleració i velocitat a les que podrà girar la taula i també un cop definit un cicle de treball estàndard, només falta el càlcul dels moments d'inèrcia dels components que s'hauran de fer moure per així poder passar ja al càlcul dels parells que finalment permetran la selecció del sistema motor.

Els elements mòbils a tenir en compte són bàsicament quatre, l'adapter que es vol soldar, les peces de la màquina que giren solidaries a l'adapter, el reductor i finalment el rotor del motor.

#### 4.3.4.1. Moment d'inèrcia de l'adapter

Pel càlcul del moment d'inèrcia de l'adapter es té en compte el pitjor dels casos, es a dir, un adapter en el qual la dolla te les màximes dimensions i una xapa amb el màxim gruix i amb un radi màxim igual al de la taula giratòria. D'aquesta manera el càlcul del moment d'inèrcia de l'adapter queda simplificat amb la suma del moment d'inèrcia d'un cilindre buit amb un cilindre, tal i com es pot veure a la Figura 4.6.

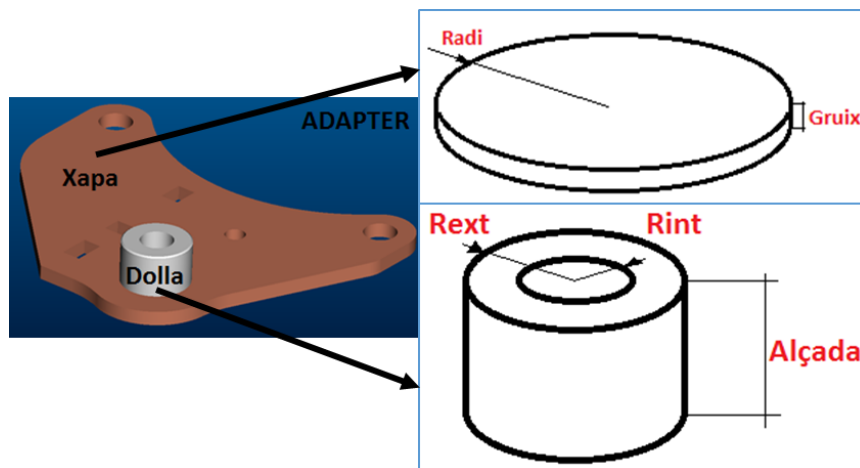


Figura 4.6 Simplificació de la forma pel càlcul del moment d'inèrcia

Pel càlcul de la massa, es té en compte el tipus d'acer amb el que es fabriquen els adapters, que és el model UNE F1120 el qual té una densitat aproximadament de 8000 kg/m<sup>3</sup>.

Tenint en compte aquesta simplificació de la forma, aquesta densitat, les dades de la Taula 4.4 i l'Equació 4.4 es pot calcular el valor total del moment d'inèrcia de l'adapter.

Dolla	Radi exterior màxim	0,02500 m
	Radi interior mínim	0,00325 m
	Massa	0,77212 Kg
Xapa	Radi màxim	0,12500 m
	Massa	3,92699 Kg

Taula 4.4 Dades adapter

$$I_{adapter} = I_{dolla} + I_{xapa} = \frac{1}{2} m_{dolla} (r_{ext}^2 + r_{int}^2) + \frac{1}{2} m_{xapa} r_{max. xapa}^2 \quad [kgm^2]$$

Equació 4.4 Càlcul del moment d'inèrcia de l'adapter

S'obté el següent moment d'inèrcia.

$$I_{adapter} = \frac{1}{2} 0,77212 (0,02500^2 + 0,00325^2) + \frac{1}{2} 3,92699 \cdot 0,12500^2 = 0,03092 \text{ Kg}m^2$$

#### 4.3.4.2. Moment d'inèrcia dels elements de la màquina solidaris a l'adapter

Una vegada s'ha calculat el moment d'inèrcia de l'adapter es calcula el moment d'inèrcia dels elements que hi giren solidaris. Aquests elements son: tot un seguit de peces de la màquina, els components del reductor i el rotor del motor.

El moment d'inèrcia de les peces de la màquina que giren solidaries amb l'adapter es calcula mitjançant el software d'expressió gràfica amb el que s'han dissenyat, menys l'acoblament metàl·lic que és comprat i el seu moment d'inèrcia ve tabulat en les especificacions de la peça.

La Figura 4.7 i la Taula 4.5 mostra les peces de la màquina solidaries a l'adapter amb les seves referències, els seus corresponents moment d'inèrcia i la suma total.

Protector soldadura (00400-00982)	0,00249154 Kg·m <sup>2</sup>
Taula giratòria (00400-00979)	0,01788000 Kg·m <sup>2</sup>
Suport taula giratòria (00400-00980)	0,00005673 Kg·m <sup>2</sup>
Eix motor (00400-00981)	0,00048093 Kg·m <sup>2</sup>
Tapeta (00400-00973)	0,00004199 Kg·m <sup>2</sup>
Boixa (00400-00972)	0,00016728 Kg·m <sup>2</sup>
Acoblament metàl·lic (MKM7)	0,00001400 Kg·m <sup>2</sup>
Total	0,02113247 Kg·m <sup>2</sup>

Taula 4.5 Moment d'inèrcia de les peces de la màquina

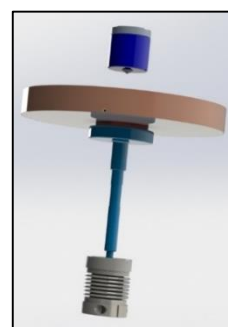


Figura 4.7 Peces giratòries

Pel que fa als moments d'inèrcia del reductor i del rotor del motor també s'obtenen en les seves respectives fitxes tècniques. Els valors d'aquests moments d'inèrcia es poden veure a la Taula 4.6. Cal dir que aquests moments d'inèrcia s'han afegit a posteriori en els càlculs dels parells ja que es desconeixien abans de fer la primera selecció del motor i el reductor

Moment d'inèrcia reductor	0,00000007 Kg·m <sup>2</sup>
Moment d'inèrcia rotor	0,00000359 Kg·m <sup>2</sup>

Taula 4.6 Moment d'inèrcia del reductor i el motor

Les fitxes tècniques amb els moments d'inèrcia dels acoblaments i del motor es poden trobar a l'Annex B.

#### 4.3.5. Parells

Un cop conegudes les velocitats i acceleracions de treball i els moments d'inèrcia de tots els components ja es poden calcular els parells necessaris per a fer girar l'adapter. Abans però es calculen els parells produïts pel fregament en els rodaments que aguanten les peces giratòries.

#### 4.3.5.1. Parell de fregament

Com mostra la Figura 4.8 Rodaments hi ha un total de tres rodaments de la marca SKF de dos tipus diferents a la màquina, els quals fan que el conjunt de peces que han de girar solidaries a l'adapter ho puguin fer.

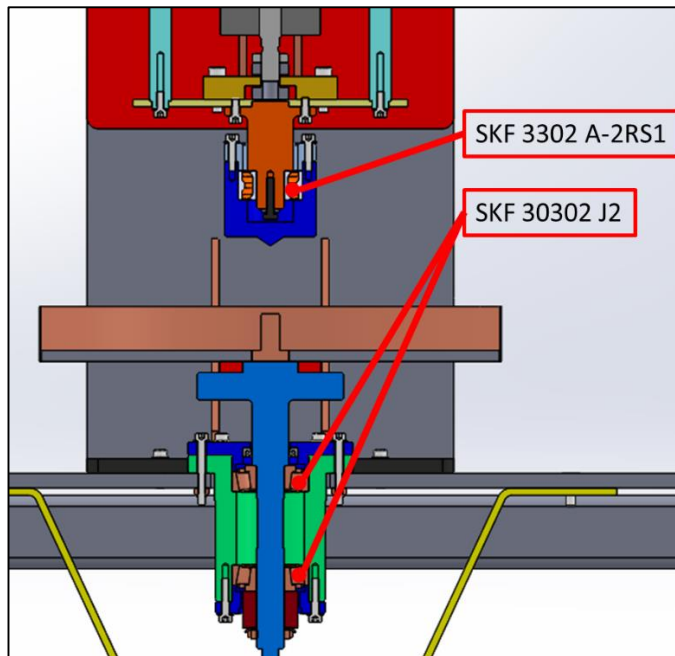


Figura 4.8 Rodaments

Pel càlcul del fregament que es produeix en el coixinet superior (SKF 3302 A-2RS1) es té en compte que no ha de suportar cap força radial, que la força axial que ha de suportar és l'aplicada pel pistó pneumàtic i que gira a la màxima de les velocitats per així treballar en el pitjor dels casos. La Taula 4.7 mostra totes les característiques que defineixen el comportament del rodament.

Força radial	0 N
Força axial	1131 N
Velocitat angular	7 rad/s
Temperatura de treball	40 °C
Tipus de lubricant	Greix
Viscositat del lubricant a 40°C	115 mm <sup>2</sup> /s

Taula 4.7 Paràmetres rodament superior

Mitjançant el programa de càlcul que ofereix l'empresa SKF [2] a la seva pàgina web i introduint-hi els paràmetres de la Taula 4.7 s'obté un fregament màxim de 0,0571 Nm.

Pel càlcul del fregament en els rodaments inferiors (SKF 30302 J2) es té en compte que no ha de suportar tampoc cap força radial, que la força axial que ha de suportar es la aplicada pel pistó pneumàtic més el pes dels components i que gira també a la màxima de les velocitats



per així treballar en el pitjor dels casos. La Taula 4.8 mostra totes les característiques que defineixen el comportament del rodament.

Força radial		0 N
Força axial	Força èmbol	1131 N
	Pes adapter	38 N
	Pes components giratoris	33 N
	Total	1202N
Velocitat angular		7 rad/s
Temperatura de treball		40 °C
Tipus de lubricant		Greix
Viscositat del lubricant a 40°C		115 mm <sup>2</sup> /s

Taula 4.8 Paràmetres rodaments inferiors

En el moment de fer els càlculs pels coixinets inferiors es decideix suposar que els dos coixinets es reparteixen la força axial de manera equitativa cosa que fa que a l'hora d'introduir els paràmetres al programa s'introdueixi la meitat de la força axial total que es pot veure a la Taula 4.8. Un cop introduïts els paràmetres al programa s'obté que el fregament per a cadascun dels rodaments inferiors és de 0,0981 Nm.

Finalment la Taula 4.9 mostra el total resultant del fregament produït pels tres rodaments que té la màquina.

Rodament superior (SKF 3302 A-2RS1)	0,0571 Nm
Rodament inferior 1 (SKF 30302 J2)	0,0981 Nm
Rodament inferior 2 (SKF 30302 J2)	0,0981 Nm
Total	0,2535 Nm

Taula 4.9 Fregament total dels rodaments

#### 4.3.5.2. Parell de pic

El parell màxim que haurà d'oferir el sistema motor es produeix quan es vol accelerar amb la màxima acceleració ( $\alpha_{\max} = 70 \text{ rad/s}^2$ ) l'adapter i el conjunt de peces que giren solidaries a aquest, tenint en compte el fregament que es produeix en els rodaments.

L'Equació 4.5 descriu com es calcula el parell tenint en compte el fregament en els rodaments.

$$\Gamma_{\text{eix taula}} = (I_{\text{adapter}} + I_{\text{conjunt giratori}}) \cdot \alpha + \Gamma_{\text{fregament}} \text{ [Nm]}$$

Equació 4.5 Càlcul del parell de pic

Amb el moment d'inèrcia de l'adapter definit a l'apartat 4.3.4.1, amb el moment d'inèrcia del conjunt de peces que giren definit a la Taula 4.5 i amb el fregament total definit a la Taula 4.9 s'obté el següent parell de pic.

$$\Gamma_{\text{pic}} = (0,03092 + 0,02113) \cdot 70 + 0,2535 = 3,9 \text{ Nm}$$

#### 4.3.5.3. Parell nominal

El parell nominal, que determina el parell en el que el sistema motor ha de poder treballar de manera contínua, es calcula a partir del cicle de treball estàndard definit en l'apartat 4.3.3.

Amb l'Equació 4.5 es calculen els parells en cadascun dels trams del cicle de treball estàndard tenint en compte l'acceleració de cada tram i el freq constant produït pels coixinets. Un cop s'obtenen tots els parells se'n calcula la mitjana quadràtica amb l'Equació 4.3 tenint en compte els temps de cada tram i el temps total.

Finalment s'obté un parell nominal  $\Gamma_{nominal} = 1,7 \text{ Nm}$ .

### 4.4. Selecció del sistema motor

Per poder seleccionar un sistema motor que s'adapti a les necessitats de la màquina, aquest sistema ha de complir els requeriments de la Taula 4.10 en la que es recull un resum dels resultats obtinguts en els apartats anteriors.

Parell de pic	3,90 Nm
Parell nominal	1,71 Nm
Velocitat màxima	6,98 rad/s
Velocitat nominal	2,54 rad/s

*Taula 4.10 Requeriments del sistema motor*

Després de fer una mínima cerca de models de motors compatibles amb aquestes característiques es veu que la velocitat angular màxima requerida és molt baixa (6.98 rad/s) i que normalment els motors elèctrics tenen unes velocitats nominals d'entre 200 i 500 rad/s. Tenint en compte això es decideix afegir un reductor entre l'eix de la taula giratòria i el motor.

Inicialment es vol que el motor sigui AC sense escombretes, però en acabar una cerca més exhaustiva entre diferents marques de fabricants de motors elèctrics (com ara Mavilor, Yaskawa, Rexroth i Maxon [3]) es veu que per als models més petits AC de les seves gammes no hi ha una possibilitat d'afegir un reductor o que el model més petit AC que tenen és massa potent per a les necessitats de la màquina.

Finalment es decideix seleccionar un motor de DC, que encara que necessiti més manteniment pel desgast de les escombretes i que possiblement tingui una vida útil més curta que un motor AC la diferència de preu ho compensa. Es decideix seleccionar un motor DC de la marca Maxon, ja que aquesta empresa ven sistemes integrats amb el motor, el reductor, els sensors i el drive de control del motor. L'empresa Maxon també garanteix una llarga vida útil dels motors DC.

La Figura 4.9 és un esquema orientatiu del sistema motor utilitzat i que pot servir d'ajuda per entendre els pròxims apartats.

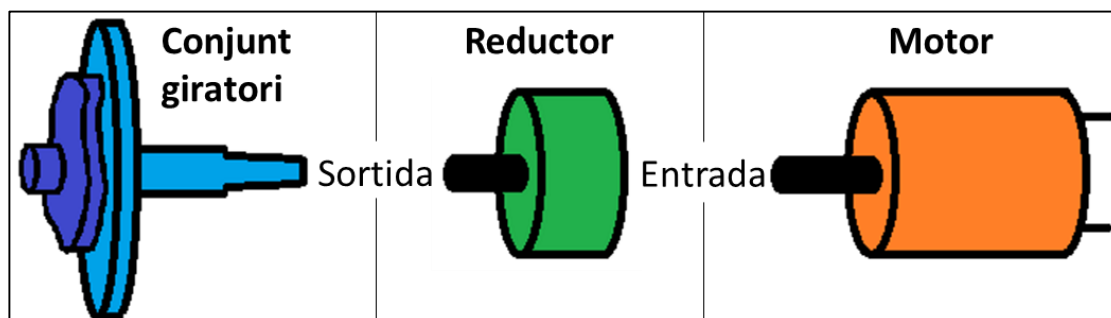


Figura 4.9 Esquema del sistema motor

#### 4.4.1. Selecció del reductor

Pel que fa a la selecció del reductor es tenen en compte igualment els requeriments definits en la Taula 4.10 amb l'única diferència d'aplicar un coeficient de seguretat d'1,2 als requeriments de parell. Aquesta variació es pot observar a la Taula 4.11 que mostra els requeriments tenint en compte aquest coeficient de seguretat.

Parell de pic	4,68 Nm
Parell nominal	2,04 Nm
Velocitat màxima a la sortida	6,98 rad/s
Velocitat nominal a la sortida	2,54 rad/s

Taula 4.11 Requeriments del reductor

Partint d'aquests valors es busca un reductor que s'adapti a les necessitats de la màquina.

Finalment es decideix escollir el reductor planetari Maxon 166166. El resum de les característiques d'aquest reductor es pot veure a la Taula 4.12. Per a veure la fitxa tècnica detallada del reductor es pot consultar l'Annex B.

Relació de reducció	79:1
Màxim parell admissible breument	6,5 Nm
Màxim parell en continu	4,5 Nm
Màxim rendiment	70 %
Moment d'inèrcia	$7 \cdot 10^{-8}$ Kgm <sup>2</sup>
Velocitat màxima a l'entrada	628 rad/s

Taula 4.12 Especificacions del reductor



Figura 4.10 Reductor planetari

Com es pot observar el parell de pic i el parell nominal admesos pel reductor superen els requeriments necessaris ( $6,5 \text{ Nm} > 4,68 \text{ Nm}$  i  $4,5 \text{ Nm} > 2,04 \text{ Nm}$ ).

Sabent que la velocitat màxima a la sortida és de 6,98 rad/s i que la relació de reducció es de 79:1, amb l'Equació 4.6 es pot calcular la velocitat màxima a la sortida del reductor.

$$\omega_{entrada} = \omega_{sortida} \cdot i_{reductor} \text{ [rad/s]}$$

Equació 4.6 Velocitat a l'entrada

$$\omega_{max.entrada} = 6,98 \cdot 79 = 551,340 \text{ rad/s}$$

Aquesta velocitat màxima a l'entrada és inferior a la velocitat màxima que pot suportar el reductor.

Per tant, es pren la selecció com a vàlida.

#### 4.4.2. Selecció del motor

Una vegada seleccionat el reductor ja es poden calcular els requeriments que necessita complir el motor.

Es necessita que el motor pugui oferir el parell de pic per generar la màxima acceleració i també es necessita que pugui treballar de manera continua en el temps amb el parell nominal.

$$\Gamma_{motor} = \mu_{seg} \cdot \left( \frac{(I_{adapter} + I_{conj.gir.}) \alpha_{sort.} + \Gamma_{frec}}{i_{reductor} \eta_{reductor}} + (I_{reductor} + I_{rotor}) \alpha_{entrada} \right) \text{ [Nm]}$$

Equació 4.7 Parell del motor

Amb l'Equació 4.7 es calcula el parell de pic necessari amb un coeficient de seguretat d'1,2.

$$\Gamma_{pic} = 1,2 \left( \frac{(0,03092 + 0,02113) 70 + 0,2535}{79 \cdot 0,7} + (7 \cdot 10^{-8} + 3,59 \cdot 10^{-6}) \cdot 5530 \right) = 0,109 \text{ Nm}$$

Cal dir que, per a fer la primera selecció del motor el seu moment d'inèrcia no s'ha tingut en compte, ja que no se sabia quin motor es faria servir. Un cop triat el motor s'han refet els càlculs tenint en compte el seu moment d'inèrcia per així confirmar la selecció.

També es calcula el parell nominal a partir del cicle de treball estàndard definit a l'apartat 4.3.35.3.3. Amb l'Equació 4.7 es calculen els parells de cada tram, se'n fa la mitjana quadràtica amb l'Equació 4.3 i s'obté el parell nominal que haurà de fer el motor.

A continuació, amb l'Equació 4.6 es calcula la velocitat màxima i la velocitat nominal a les que ha de poder treballar el motor. La velocitat màxima ja s'ha calculat a l'apartat anterior, per tant només es calcula la velocitat nominal.

$$\omega_{max.motor} = 551,340 \text{ rad/s}; \omega_{nominal motor} = 2,54 \cdot 79 = 200,742 \text{ rad/s}$$

La Taula 4.13 mostra tots junts els requisits que haurà de tenir el motor, separant els dos punts de treball, el nominal i el de pic.

	Pic	Nominal
Parell	0,109 Nm	0,048 Nm
Velocitat	551,340 rad/s	200,742 rad/s
Potència	60,021 W	9,697 W

Taula 4.13 Requisits motor

Seguint els requeriments de la Taula 4.13 i mirant els models compatibles amb el reductor seleccionat es busca un motor.

Finalment s'escull el motor de corrent continua amb escombretes de grafit Maxon 268213, la Taula 4.14 en mostra les principals característiques. Per a veure la fitxa tècnica detallada del motor es pot consultar l'Annex B.

Potència nominal	60 W
Tensió nominal	18 V
Velocitat en buit	900 rad/s
Corrent en buit	0,213 A
Velocitat nominal	828 rad/s
Parell nominal	0,0755 Nm
Corrent nominal	4 A
Parell en parada	1 Nm
Corrent en parada	50,3 A
Màxim rendiment	87 %
T. màx. als bobinats	125 °C

Taula 4.14 Especificacions del motor



Figura 4.11 Motor DC Maxon

Les especificacions d'aquest motor poden complir els requeriments, ja que el parell nominal és superior al requerit ( $0,0755 \text{ Nm} > 0,037 \text{ Nm}$ ), la velocitat màxima requerida és inferior a la velocitat en buit del motor, fins i tot inferior a la nominal ( $828 \text{ rad/s} > 551 \text{ rad/s}$ ) i que el parell en parada és molt superior al parell de pic necessari ( $1 \text{ Nm} \gg 0,085 \text{ Nm}$ ).

Per acabar de confirmar la selecció del motor, es representen els dos punts de treball del motor, en el gràfic de rangs de funcionament del motor. Aquests rangs vénen definits conjuntament per la corba de Parell-Velocitat, la corba de Parell-Corrent i l'àrea de treball nominal. La Figura 4.12 mostra aquestes corbes. Cal dir que les rectes representades en la figura a la realitat no son exactament rectes totalment però aquesta aproximació és prou bona per a la selecció del motor.

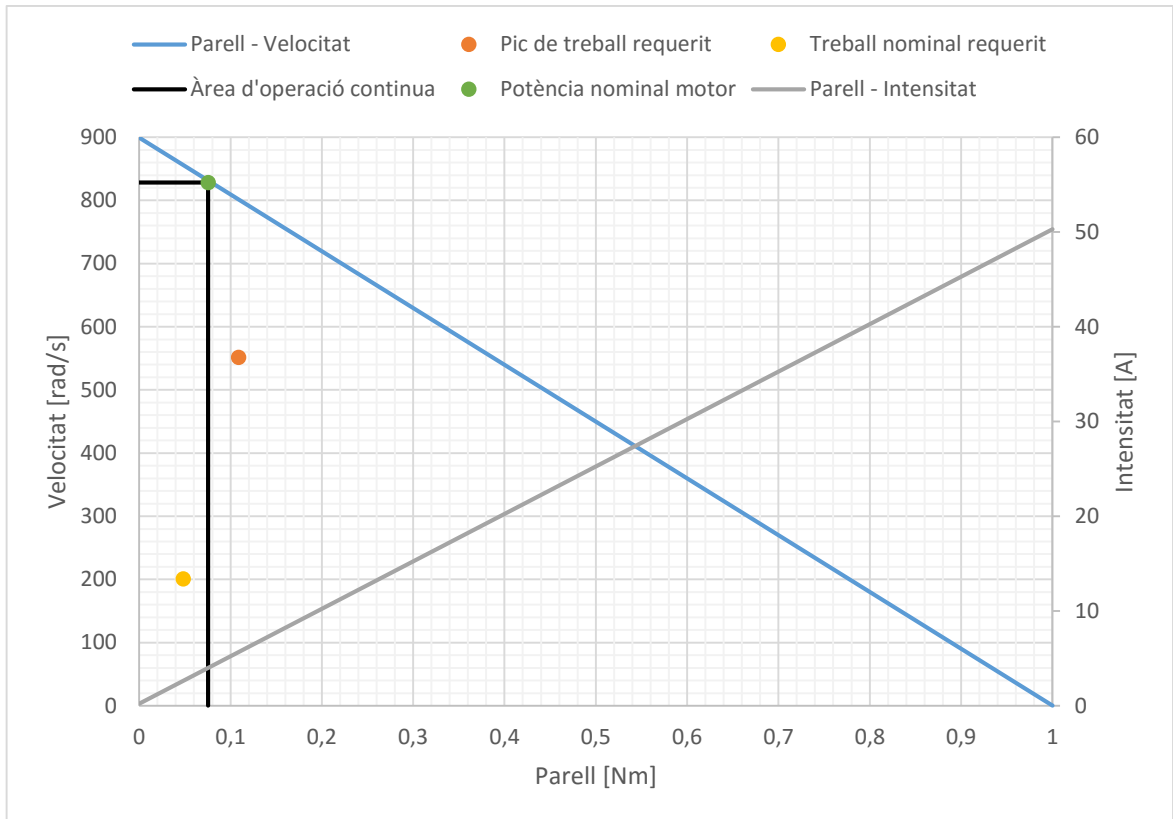


Figura 4.12 Corbes parell-velocitat i parell-corrent

La recta blava (Parell-Velocitat) marca el límit del que pot oferir el motor, és a dir, en cap cas el motor podrà treballar en cap punt superior a aquesta línia.

L'àrea d'operació continua delimitada per les línies negres determina la zona en la que es pot treballar de manera continua sense cremar el motor. Si es treballa fora d'aquesta zona no pot ser per un període llarg de temps, ja que el motor es pot cremar.

Com es pot observar el punt vermell representa el pic de treball i queda per sota de la corba de parell-velocitat. Això vol dir que el motor podrà oferir aquest parell a aquesta velocitat i que podrà treballar en aquest punt en períodes breus de temps sense perjudicar el motor.

També es veu que el punt groc, que es el punt de treball nominal, queda dins de l'àrea d'operació continua. Per tant aquest motor podrà treballar en aquest punt durant llargs períodes de temps.

Després de fer aquest anàlisi es confirma definitivament que la selecció del motor és vàlida i que es podrà fer servir per les necessitats de la màquina.

## 4.5. Selecció del sistema de control

Un cop triat el motor es selecciona el sistema de control que farà que el motor treballi de la manera desitjada.

Aquest sistema de control ha de ser de posició, ja que es necessita poder dir a la màquina en quins punts del perímetre de la unió entre la dolla i la xapa es vol començar a soldar i en quins punts es vol parar.

Per tant, aquest sistema necessita principalment dos components: un controlador i un sensor de posició per a tancar el llaç de control.

### 4.5.1. Selecció del sensor de posició

Com es comenta a l'apartat 4.4 l'empresa Maxon ven sistemes integrats que també inclouen els sensors. Per tant, es busquen els sensors de posició compatibles amb el motor seleccionat. Surten cinc models de sensors compatibles amb el motor, tots amb el mateix preu i tots encoders incrementals digitals magneto resistius.

Aquest tipus d'encoders magneto resistius contenen un petit imant permanent multipolar col·locat a l'eix del motor. Al girar uns sensors capten les modificacions del flux magnètic i les envien ja tractades pels canals de comunicació.

Després de mirar els documents de l'empresa [4], es troben les principals característiques a tenir en compte a l'hora de seleccionar un sensor.

Aquestes característiques són les següents:

- El nombre de polsos per volta (ppv), que determinen la precisió de l'encoder.
- Si té o no canal índex, que és fa servir de punt de referència per determinar l'angle recorregut ja que els encoders no són absoluts.
- Si té o no controlador de línia, que evita que les interferències causin acumulació d'errors de posició.
- La màxima velocitat admesa.

Els cinc models compatibles amb el motor tenen canal índex, tenen controlador de línia i les seves velocitats són molt superiors a les que treballarà el motor. L'única diferència entre els cinc models és el nombre de polsos per volta (ppv). El nombre de polsos per volta va des de 256 ppv fins a 1024 ppv.

Després de continuar llegint la documentació de l'empresa és veu que els controladors van programats per defecte per anar amb sensors que generen 500 ppv i que la precisió que

generen 500 ppv és de  $0,18^\circ$  de volta de motor molt més gran que la precisió dels components mecànics del sistema de la màquina.

Polsos per volta	500
Controlador de línia	Sí
Màxima velocitat	2513 rad/s
Canal índex	Sí

Taula 4.15 Especificacions sensor

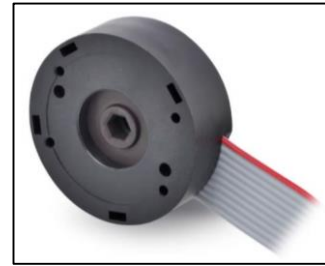


Figura 4.13 Encoder

Finalment coneixent aquests dos detalls es decideix seleccionar l'encoder magneto resistiu Maxon 228452, les dades del qual es poden veure a la Taula 4.15, ja que es considera suficient amb 500 ppv per les necessitats del projecte. Per a veure la fitxa tècnica detallada del sensor es pot consultar l'Annex B.

#### 4.5.2. Selecció del controlador o drive

Igual que en el cas del sensor, com que l'empresa ven sistemes integrats es busquen els models de controlador compatibles amb el sensor i el motor seleccionats.

Apareixen com a possibles opcions nou controladors diferents. Directament es descarten els que no ofereixen un control de posició, cosa que fa que les opcions es redueixin a cinc. Com que s'ha començat la cerca dels controladors tenint en compte el model del sensor i del motor escollits, les cinc opcions de controlador funcionen correctament amb el sensor escollit i treballen en un rang de tensions d'alimentació que inclouen les del motor.

El que és important per poder escollir entre les cinc opcions de controlador són principalment dues coses, que els rangs d'intensitat que pot oferir coincideixin amb els de treball del motor i que tingui un sistema de comunicació que s'adapti a les necessitats del projecte.

A partir de les especificacions del motor, que es poden trobar a l'Annex B, o a partir de la corba Parell-Corrent representada a la Figura 4.12 es poden obtenir les intensitats a les que treballarà el motor en els dos punts principals de treball.

Per generar el parell del pic de treball es necessitarà una intensitat de 5,68 A i per a generar el parell del punt de treball nominal es necessitarà una intensitat de 2,64 A. És a dir, es necessita que el controlador pugui oferir una intensitat de 2,64 A durant llargs períodes de temps i també es necessita que el controlador pugui oferir momentàniament una intensitat de fins a 5,68 A.

Mirant les característiques dels cinc models de controlador es veu que n'hi ha un que no pot oferir aquests requisits d'intensitat i per tant es descarta fent que quedin quatre models possibles per a escollir.



D'entre els quatre models restants es mira quins sistemes de comunicació tenen i es veu que tots quatre tenen els mateixos sistemes de comunicació que són: RS232, USB 2.0 i CAN. A partir d'aquí ja que tots els models compleixen les especificacions requerides es fa servir un criteri de preu per escollir el controlador, finalment s'escull el model Maxon 367676 "EPOS2 24/5, control digital de posició, 5 A, 11 - 24 VDC". La Taula 4.16 en mostra un resum de les característiques. Per a veure la fitxa tècnica del controlador es pot consultar l'Annex B.

Potència límit del motor	120 W
Encoder incremental digital	Sí
Màxima tensió de treball	24 V
Màxima corrent de sortida	10 A
Màxima duració de la màxima corrent de sortida	1 s
Corrent de sortida en continu	5 A
Màxim rendiment	92 %

Taula 4.16 Especificacions controlador de posició



Figura 4.14 Controlador de posició

## 4.6. Modelat matemàtic i simulació del motor

Per a poder veure detalladament el comportament del motor i confirmar que funcionarà correctament amb el treball que se li exigirà es decideix modelar el comportament del sistema motor matemàticament i fer-ne una simulació.

Al saber que es un motor de corrent continua s'agafa el model matemàtic representat a la Figura 4.15.

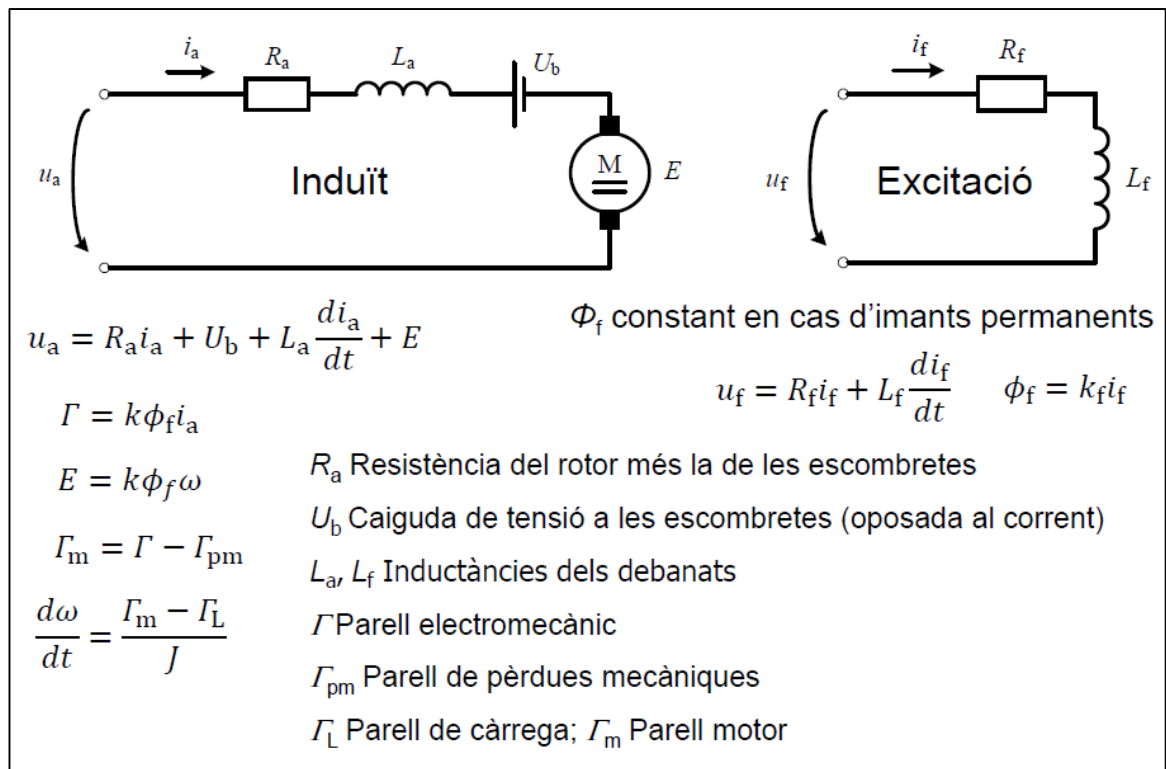


Figura 4.15 Model matemàtic motor DC [6]

Aquest model s'adapta i es simplifica per a les necessitats d'aquest projecte.

En primer lloc, en saber que el motor que s'ha seleccionat és d'imants permanents s'elimina la part del model que descriu l'excitació deixant  $\phi_f$  constant.

A continuació es veu que les especificacions del motor no donen el valor de la caiguda de tensió a les escobretes, per tant també s'elimina del model.

Després es canvia el parell de pèrdues mecàniques al motor per dues coses, s'afegeix un model de frec viscos que representa el fregament dels coixinets de la màquina i s'afegeix un coeficient del rendiment del motor.

Finalment, es treu del model el parell de càrrega ja que és zero en tots els casos.

Després de fer tot aquest seguit de modificacions el model emprat en el projecte queda definit en la Figura 4.16.

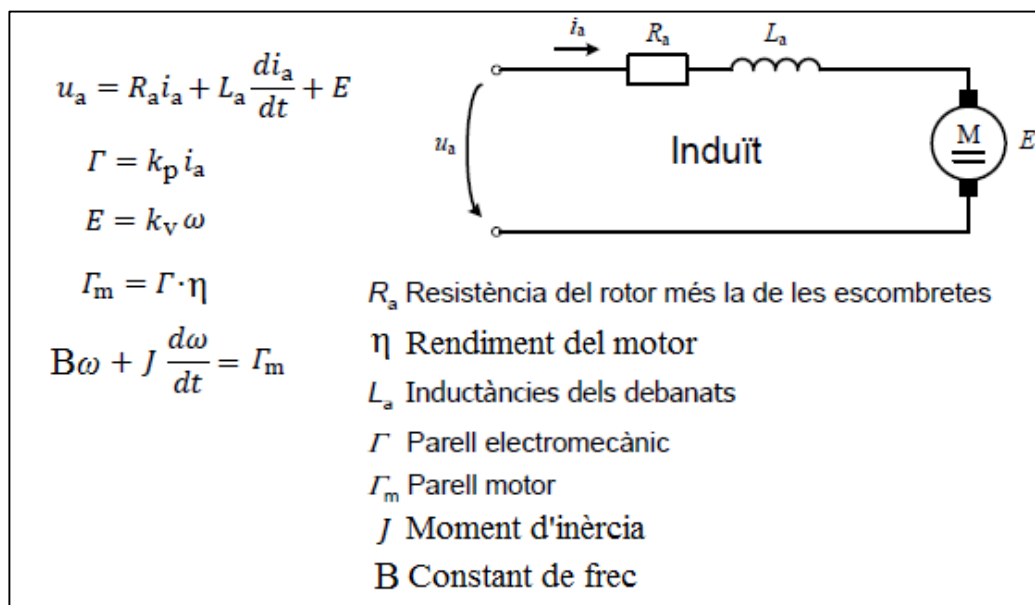


Figura 4.16 Model matemàtic utilitzat

Cal dir que la  $k_p$  i la  $k_v$  que es veuen al model són iguals, ja que en eliminar l'excitació es té una  $\phi_f$  constant. Es posen amb subíndexs diferents només perquè a les especificacions del motor seleccionat venen en caselles separades.

La Taula 4.17 mostra els valors de tots els components del model.

Resistència als terminals ( $R_a$ )	0,358 $\Omega$
Inductància als terminals ( $L_a$ )	0,00007 H
Constat de parell ( $k_p$ )	0,0199 Nm/A
Constat de velocitat ( $k_v$ )	0,0199 V/(rad/s)
Rendiment del motor ( $\eta$ )	0,87
Moment d'inèrcia al motor ( $J$ )	$1,87 \cdot 10^{-5}$ Kgm <sup>2</sup>
Constant de frec viscosos ( $B$ )	$9,98 \cdot 10^{-6}$ Nm/(rad/s)

Taula 4.17 Valors del model

Tots els valors d'aquesta taula, menys el moment d'inèrcia i la constant de frec viscosos, es troben a les especificacions del motor seleccionat, que es poden veure a l'Annex B.

Per al càlcul del moment d'inèrcia vist al motor es fa servir l'Equació 4.8 que té en compte tots els elements giratoris de la màquina. El coeficient de seguretat es d'1,2.

$$I_{al\ motor} = \mu_{seguretat} \left( \frac{(I_{adapter} + I_{conjunt\ giratòri})}{i_{reductor}^2 \eta_{reductor}} + I_{reductor} + I_{rotor} \right) [Kgm^2]$$

Equació 4.8 Moment d'inèrcia total al motor

Pel que fa al frec, a l'haver-se calculat quan la taula gira a la màxima velocitat, si es calcula vist al motor i es divideix entre la velocitat màxima en que gira aquest s'obté la pendent del model de frec viscos.

L'Equació 4.9 mostra com es calcula el frec vist al motor. Aplicant un coeficient de seguretat també d'1,2.

$$\Gamma_{frec\ al\ motor} = \mu_{seguretat} \left( \frac{\Gamma_{rodaments}}{i_{reductor} \eta_{reductor}} \right) [Nm]$$

Equació 4.9 Fregament vist al motor

Aquest frec vist al motor es de  $\Gamma_{frec\ al\ motor} = 0,0055\ Nm$ . Que si es divideix entre la velocitat màxima del motor (551 rad/s) s'obté un coeficient de  $B = 9,98 \cdot 10^{-6}\ Nm/(rad/s)$ .

A part de la simulació elèctrica i mecànica també es fa una simulació tèrmica que permeti veure la temperatura del motor després de llargs períodes de funcionament.

Aquesta simulació es basa en un model molt simplificat que s'obté a partir de les dades donades del motor. En les característiques del motor es troben dues dades de resistència tèrmica, una entre el bobinat i la carcassa del motor i una altra entre la carcassa del motor i l'ambient. També es troben les constants de temps que van lligades a aquestes resistències tèrmiques. La Taula 4.18 mostra aquests valors.

Resistència tèrmica (Carcassa-Ambient) (TR <sub>ha</sub> )	6 KW
Resistència tèrmica (Bobinat-Carcassa) (TR <sub>wh</sub> )	1,7 KW
Constant de temps (Carcassa-Ambient) (τ <sub>m</sub> )	593 s
Constant de temps (Bobinat-Carcassa) (τ <sub>w</sub> )	16.3 s

Taula 4.18 Dades tèrmiques

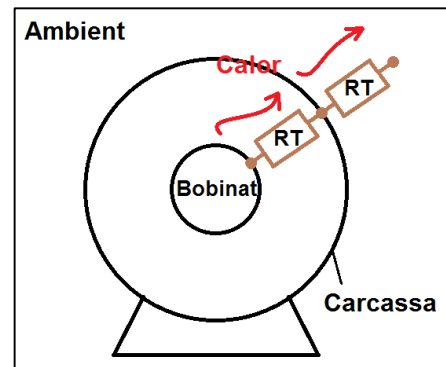


Figura 4.17 Esquema tèrmic

La Figura 4.17 mostra esquemàticament com és el model tèrmic que es fa servir a partir d'aquestes dades. El model són dos sistemes de primer ordre que tenen com a entrada la potència tèrmica generada per a l'efecte Joule en els bobinats del motor i com a sortida l'increment de temperatura que això representa. L'Equació 4.10 mostra els dos sistemes de primer ordre en el domini de Laplace.

$\frac{\Delta T_{Carcassa-Ambient}}{P} = \frac{6}{593s + 1}$	$\frac{\Delta T_{Bobinat-Carcassa}}{P} = \frac{1,7}{16,3s + 1}$
--	---

Equació 4.10 Sistemes tèrmics

Un cop definits tots el paràmetres es procedeix a fer la simulació amb el programa Simulink, vinculat al Matlab, que permet la simulació de sistemes.

La Figura 4.18 mostra l'esquema de blocs del sistema que conté la simulació elèctrica, mecànica i tèrmica.

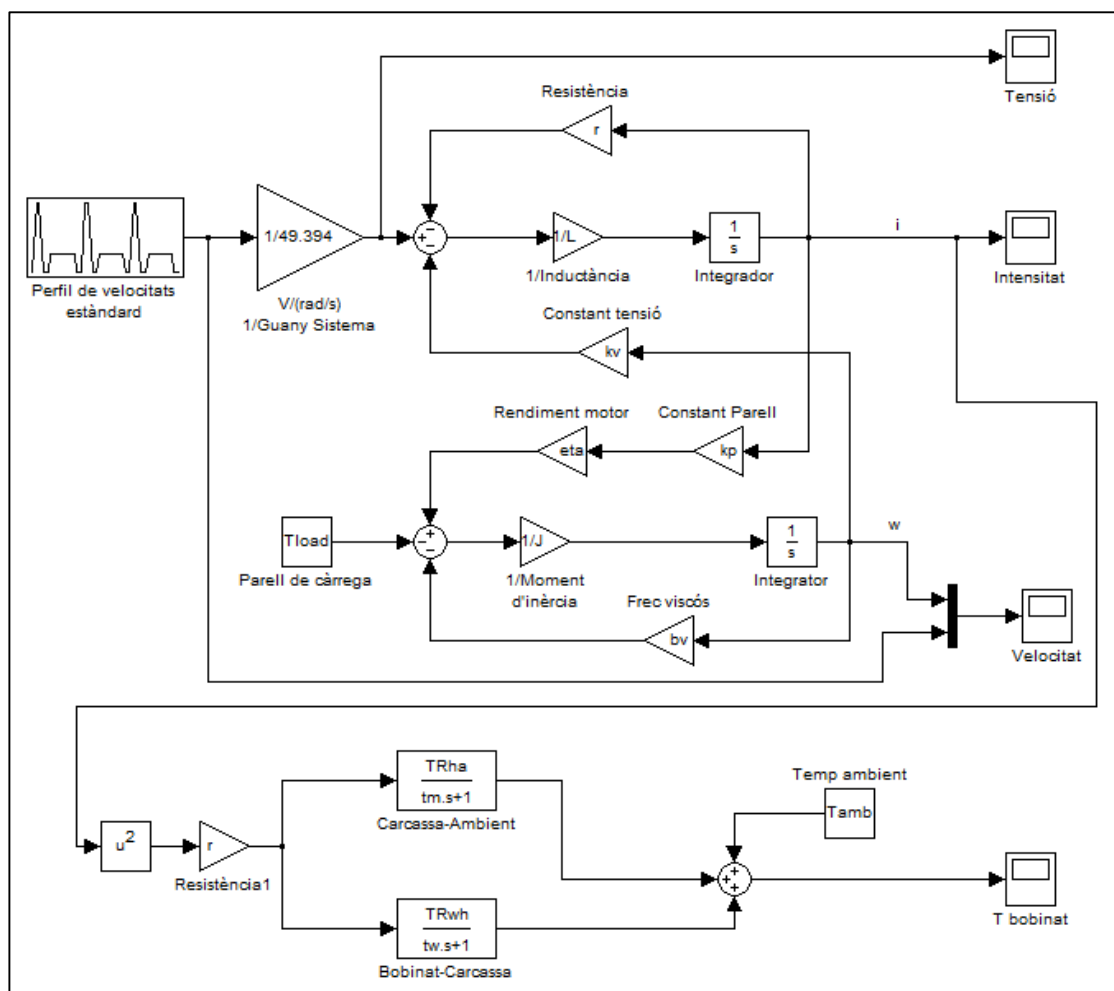


Figura 4.18 Esquema de blocs del sistema

Tots els blocs que es veuen contenen els valors descrits anteriorment, menys el bloc de temperatura ambient, el bloc de l'entrada del perfil de velocitats i el bloc de guany que hi ha just després de l'entrada.

La temperatura ambient que es defineix per a fer la simulació és de 35°C ja que aquesta màquina treballarà en un ambient industrial o hi ha altres màquines i pot ser que la temperatura ambient sigui alta.

El bloc de l'entrada descriu el perfils de velocitat estàndard definits a l'apartat 4.3.3 ja que el que es vol simular és el comportament del motor quan treballa durant llargs períodes de temps fent un cicle de treball estàndard que representi el que farà a la realitat.

Finalment el bloc del guany que es veu just després de l'entrada serveix per a convertir les velocitats angulars de l'entrada en valors de tensió a l'entrada del motor tenint en compte el guany del sistema per així poder obtenir a la sortida del sistema unes velocitats que almenys tinguin una magnitud igual a la que es vol que el motor treballi a la realitat. Això es fa així perquè com es pot observar la simulació es del comportament del motor en llaç obert sense cap tipus de controlador PID ja que es desconeixen els paràmetres exactes de control que té el controlador. Encara que l'entrada de tensió del motor no sigui exactament la que tindria a la realitat amb el controlador, un cop feta la simulació s'observa que els perfils de velocitat s'assemblen prou als desitjats i que amb el bloc de guany afegit al principi s'aconsegueix que les magnituds també siguin pràcticament les desitjades. Per tant, la simulació es considera prou vàlida per donar una idea de les tensions, intensitats i el comportament tèrmic del motor treballant en règim permanent.

La Figura 4.19 mostra la relació entre el perfil de velocitats desitjat i el perfil de velocitats obtingut en llaç obert per la simulació.

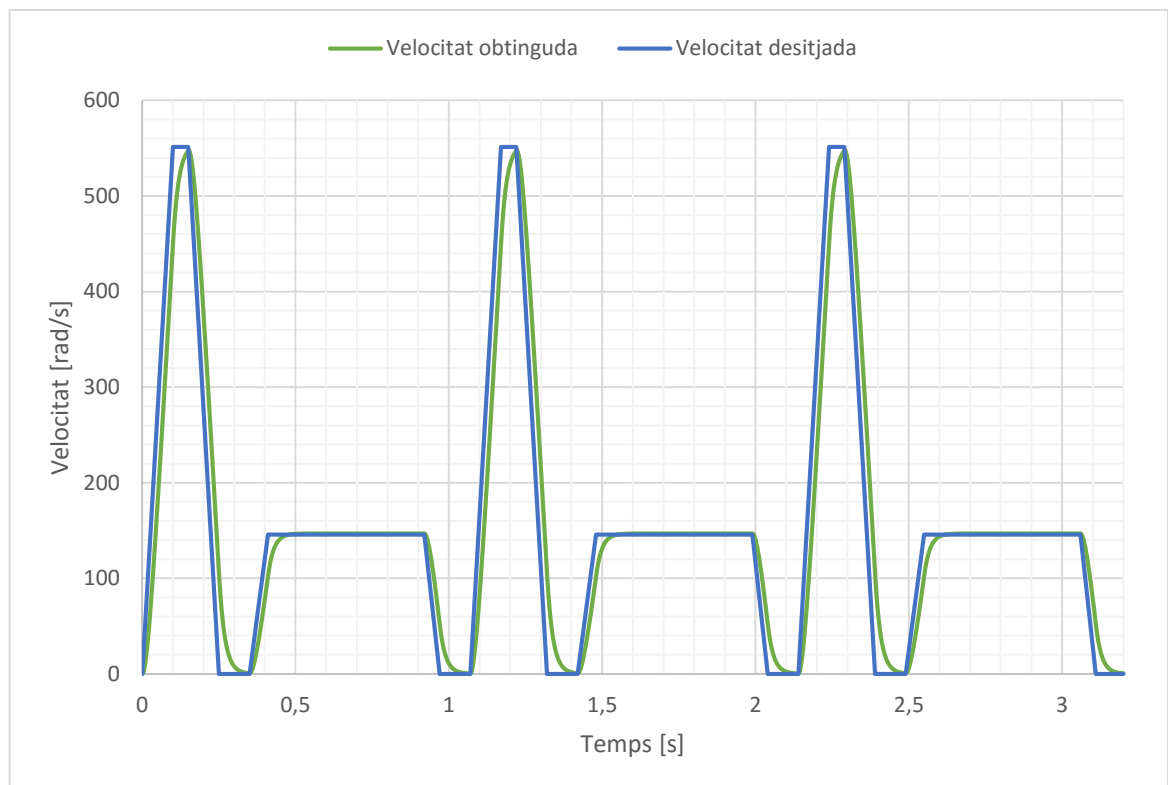


Figura 4.19 Perfils de velocitat

Un cop donada la simulació per vàlida ja es poden analitzar el valors de tensió, intensitat i temperatures del motor obtinguts.

La Figura 4.20 mostra el perfil de tensions obtinguts en la simulació.

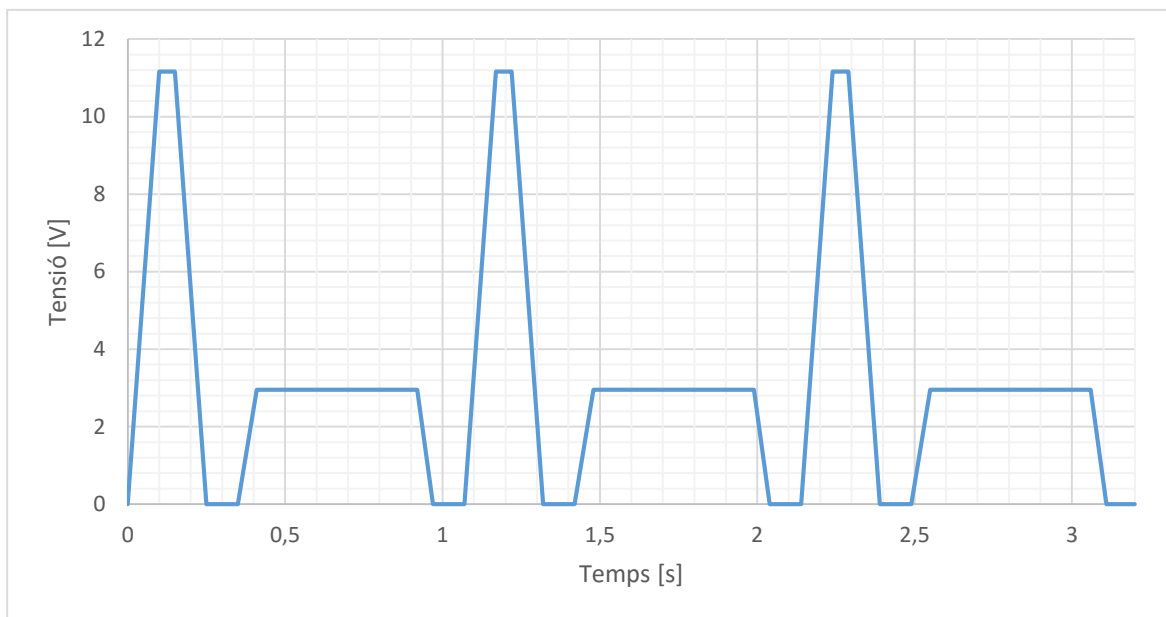


Figura 4.20 Perfil de tensions

Com es pot observar les tensions necessàries per a poder arribar a les velocitats necessàries per la màquina en cap moment les tensions màximes que pot oferir el controlador ( $11,2 \text{ V} < 24 \text{ V}$ ).

La Figura 4.21 mostra el perfil d'intensitats obtingut a la simulació.

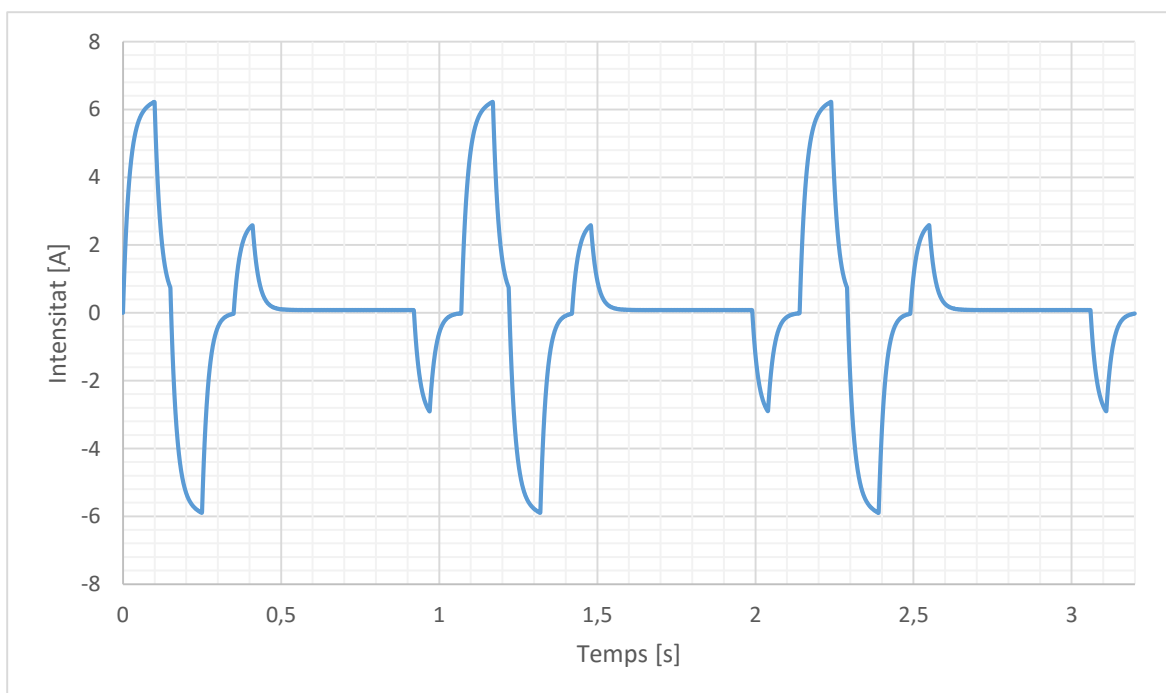


Figura 4.21 Perfil d'intensitats

Com es pot observar les intensitats obtingudes són molt semblants a les calculades a l'apartat 4.5.2 i tornen a confirmar que en cap cas es supera la màxima intensitat de 10 A que pot generar el controlador. També es pot veure que els períodes en els que es supera la intensitat nominal definida pel controlador són molt inferiors a un segon, que és el temps màxim permès durant el qual es pot estar superant la intensitat nominal.

Pel que fa a l'estudi tèrmic es fa una simulació prou llarga fins a que les temperatures s'estabilitzin.

La Figura 4.22 mostra el resultat de la simulació.

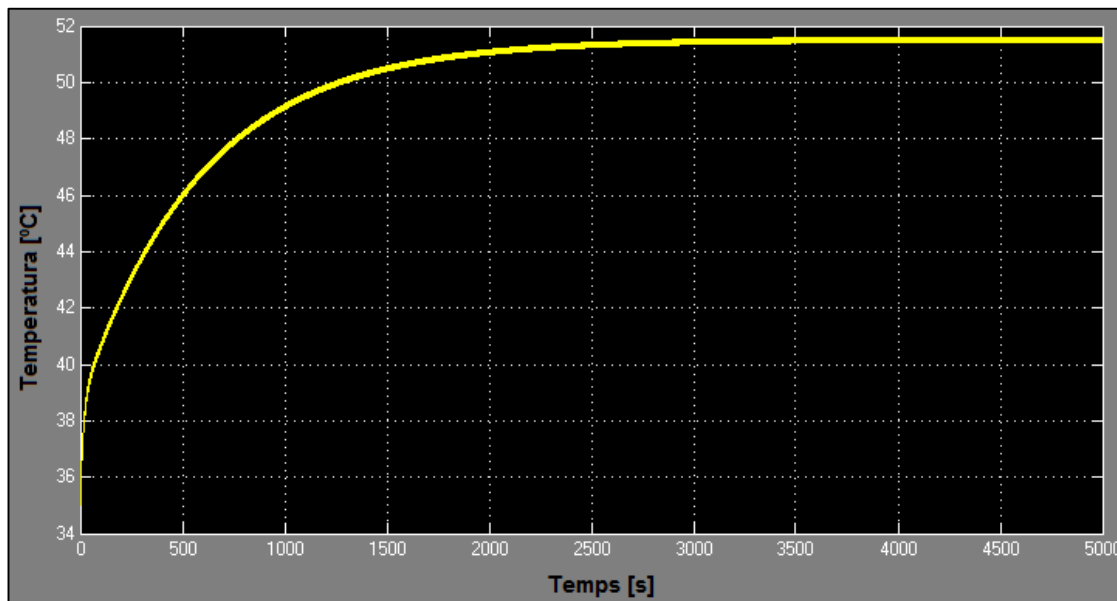


Figura 4.22 Temperatura del bobinat

Com es pot observar quan el sistema tèrmic arriba a l'estat estacionari la temperatura en els bobinats és d'uns 51,5 °C que és molt inferior al màxim permès (125 °C) per tant es torna a confirmar la correcta selecció del motor.

## 4.7. Modificacions mecàniques

A l'haver canviat el motor que hi havia originalment a la màquina és necessita modificar el disseny mecànic de l'acoblament entre la màquina i el motor. Al mateix temps s'aprofita per desplaçar tot el mecanisme de gir de la taula i el de subjecció de l'adapter a un costat per així fer espai pel mecanisme de la pistola de soldadura que s'afegirà posteriorment.

La Figura 4.24 mostra el disseny original de la màquina i la Figura 4.23 mostra com queda la màquina després de les modificacions mecàniques que s'apliquen al sistema del motor i després de desplaçar tot el mecanisme cap a un costat.



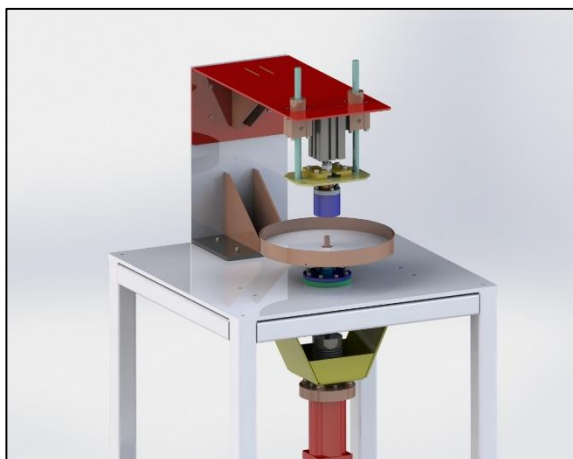


Figura 4.24 Disseny mecànic original

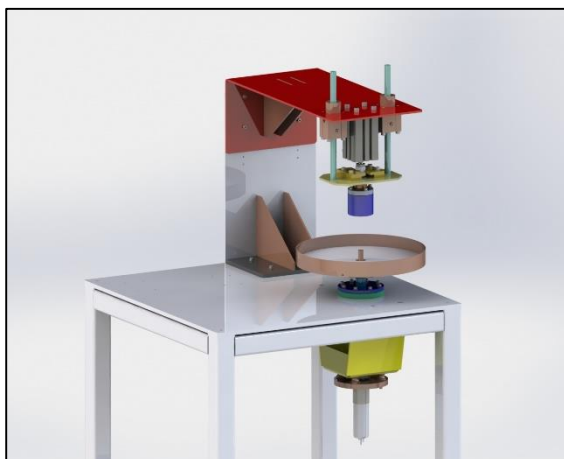


Figura 4.23 Disseny mecànic modificat

Per a der aquest canvi es modifiquen quatre peces del model original.

Es canvia l'acoblament per a eixos KM20 de la marca alemanya Jakob antriebstechnik per el model MKM7 de la mateixa marca, ja que l'original és massa gran i està pensat per a suportar parells molt més grans del necessaris. Es pot trobar la fitxa tècnica de l'acoblament MKM7 del disseny final a l'Annex B.

Es modifica la peça "Taula bancada" (Nº 00400-00958), que com diu el nom és la taula on van fixades totes les peces. Bàsicament el que es fa és desplaçar els forats on es fixen les peces cap al costat on es volen moure els components.

Es modifica la peça "Suport motor" (Nº 00400-00991), que és la peça groga que es veu per sota de la taula. Aquesta peça s'escurça per poder apropar més el motor a l'eix de la taula giratòria, ja que el motor és més petit i amb el disseny original no hi arribava. També s'amplia el diàmetre del forat per on passa l'eix del motor per que hi càpiga el nou acoblament. Finalment, com es pot observar es gira noranta graus respecte l'orientació original per així poder desplaçar els components de la màquina cap al costat.

Es modifica la peça "Disc suport" (Nº 00400-00992), que és el disc on es veu fixat el motor. Aquesta peça s'escurça perquè l'eix del motor sobresurti més per la part superior. També es modifiquen els diàmetres on es col·loquen els forats pels caragols que fixen el motor.

Els tres plànols amb les peces modificades es poden trobar a l'Annex C.

## 5. Sistema pistola de soldadura

### 5.1. Situació inicial

Es parteix des de zero ja que la màquina original no contempla cap tipus de mecanisme pel control i el moviment de la pistola de soldadura que haurà de soldar els components de l'adapter. Només se sap que s'ha guanyat espai a la taula de la màquina gracies a les modificacions mecàniques de l'apartat 4.7 i que la màquina de soldadura que s'utilitza actualment és el model TPS4000 de la marca FRONIUS i fa un tipus de soldadura MIG/MAG.

### 5.2. Definició dels requeriments

El sistema pistola de soldadura ha de poder permetre el moviment de la punta de la pistola de soldadura pel pla perpendicular a la taula de soldadura i pertanyent a l'eix de rotació del plat giratori. La pistola de soldadura sempre s'ha de mantenir a 45° de la xapa de l'adapter, ja que és l'angle òptim de soldadura. També, el sistema ha de poder apropar i allunyar la pistola al punt de soldadura, per així permetre fàcilment la col·locació i l'extracció de la peça, i per permetre el gir de la peça en les zones que aquesta s'ha de soldar o té algun obstacle que xocaria amb la pistola.

A l'haver-se de controlar els moviments en un pla es necessiten com a mínim dues coordenades de posició, una que determini l'altura de la pistola i una altra que determini la proximitat de la pistola a l'eix de rotació de la taula giratòria. Per tant, es necessitarà un mecanisme que controli el moviment de la pistola verticalment i un altre mecanisme que controli el moviment de la pistola horitzontalment. O sigui, es requerirà un sistema de dos eixos, un de vertical i un d'horitzontal.

Finalment el sistema ha de tenir unes velocitats prou altes per poder-se sincronitzar correctament amb els moviments ràpids de la taula de rotació.

### 5.3. Disseny cinemàtic del sistema

#### 5.3.1. Recorregut dels dos eixos

En primer lloc es necessita definir quin és el recorregut mínim que han de tenir els dos eixos per definir el límit de moviments de la pistola de soldadura.

Per l'eix vertical es decideix que tingui un recorregut de com a mínim l'alçada de l'adapter més alt, que és el que té la xapa més gruixuda (10 mm) i la dolla més alta (50 mm), fent un total de

60 mm de recorregut. A aquest recorregut se li afegeixi un marge de 40 mm per possibles imprevistos que puguin sortir en un futur. Per tant, el recorregut vertical queda en 100 mm.

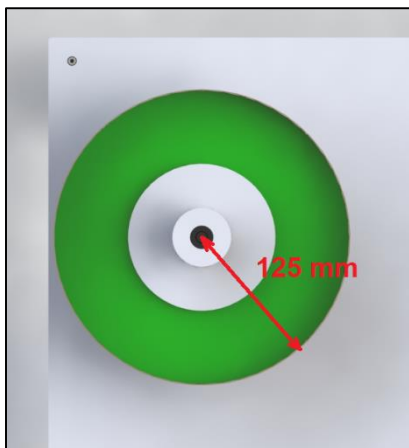


Figura 5.1 Radi del plat giratori

Per l'eix horitzontal es necessita que com a mínim la pistola de soldadura pugui anar des de l'exterior fins al centre del plat giratori. La Figura 5.1 mostra la vista superior de la màquina amb aquest recorregut representat.

Aquest recorregut de 125 mm és el radi del plat giratori i si se li afegeix un marge de 40 mm, com en el cas de l'eix vertical, queda finalment definit en 165 mm.

### 5.3.2. Rang de velocitats i acceleracions

Un cop definits els recorreguts de cadascun dels eixos es determinen les velocitats i acceleracions màximes a les que es mourà per a poder treballar al mateix ritme que la taula giratòria.

#### 5.3.2.1. Eix vertical

Partint del cicle de treball estàndard definit per a la taula giratòria a l'apartat 4.3.3 es vol que el recorregut de l'eix vertical es pugui fer en almenys un temps inferior al que triga la taula giratòria a iniciar la velocitat de soldadura. És a dir, es necessita un temps inferior a 0,35 s. Finalment es decideix no comptar el període de repòs de la taula giratòria i establir el temps en 0,25 s.

Un cop conegut el temps i el recorregut només cal determinar el perfil de velocitats del moviment, és a dir, l'acceleració, la velocitat constant i la frenada.

Al no necessitar una velocitat en concret es decideix fer un perfil de velocitats amb les pendents baixes per així no tenir unes acceleracions molt grans. La Taula 5.1 mostra els valors del perfil de velocitat i la Figura 5.2 en mostra el gràfic.

	Temps	Recorregut	Velocitat màxima	Acceleració màxima
	s	m	m/s	m/s <sup>2</sup>
Acceleració	0,10	0,033	-	6,667
V. Constant	0,05	0,033	0,667	0,00
Frenada	0,10	0,033	-	-6,667

Taula 5.1 Taula resum del perfil de velocitats verticals

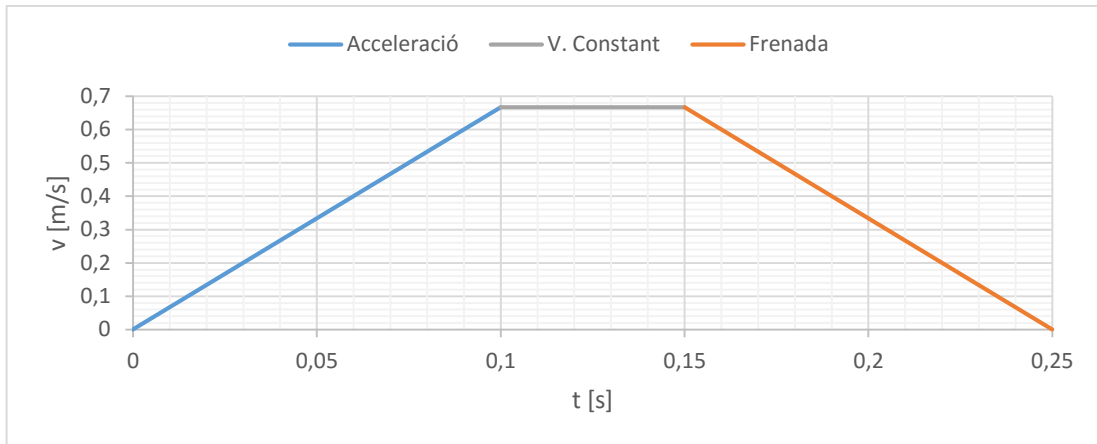


Figura 5.2 Perfil de velocitats eix vertical

### 5.3.2.2. Eix horitzontal

Igual que en l'apartat anterior també es vol que el recorregut de l'eix horitzontal es pugi fer en almenys un temps inferior a 0,35 s. Al ser un eix més llarg que el vertical és decideix que el temps també sigui més llarg que el de l'eix vertical. Finalment s'estableix un temps de 0,30 s per a l'eix horitzontal.

Igual que abans, un cop conegut el temps i el recorregut només cal determinar el perfil de velocitats del moviment.

Seguint els mateixos criteris que en l'apartat anterior, el perfil de velocitats que s'obté és el que ve determinat a la Taula 5.2 i es pot veure a la Figura 5.3.

	Temps	Recorregut	Velocitat	Acceleració
	s	m	m/s	m/s <sup>2</sup>
Acceleració	0,07	0,025	-	10,248
V. Constant	0,16	0,115	0,717	0,00
Frenada	0,07	0,025	-	-10,248

Taula 5.2 Taula resum del perfil de velocitats horitzontals

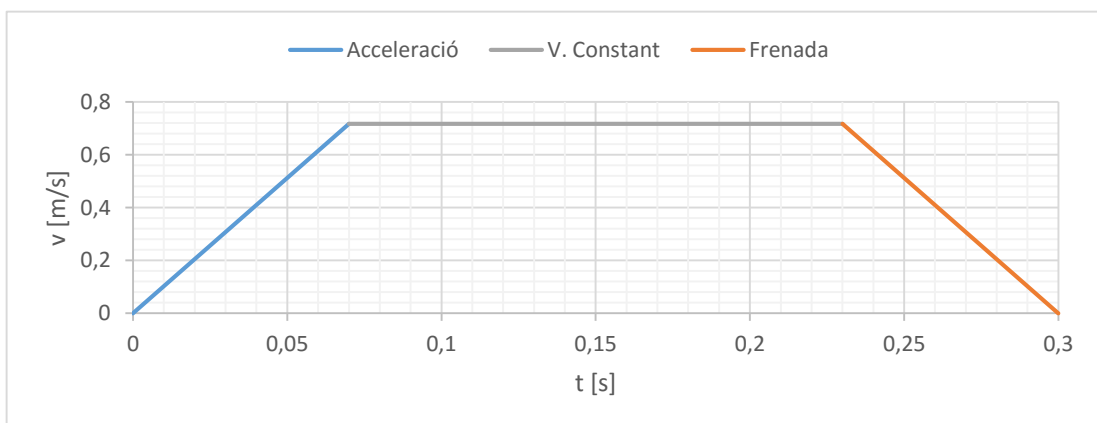


Figura 5.3 Perfil de velocitats eix horitzontal

### 5.3.3. Cicle de treball estàndard

Una vegada determinades les velocitats i acceleracions a les que es podran moure els dos eixos es determina un cicle de treball estàndard, igual que en el cas de la taula giratòria, per a poder fer un estudi posterior en treball continu.

#### 5.3.3.1. Eix vertical

Es determina un cicle estàndard coordinat amb el cicle estàndard de la taula giratòria. Es parteix de que la pistola de soldadura està al punt més alt del recorregut, o sigui més allunyat de la taula. A continuació es mou fins a l'altre punta del recorregut i es manté allà mentre que es fa la soldadura. Un cop s'acaba el període de soldadura s'allunya la pistola un terç del recorregut total mentre que la taula gira per a passar a la següent posició de soldadura i abans de que la taula hi arribi es torna a apropar per a poder realitzar la soldadura. Això es repeteix un cop fins que al final del cicle en el que la pistola es torna a allunyar fins al punt en el que s'ha començat el cicle.

La Taula 5.3 mostra els valors d'aquest moviment de l'eix vertical.

		Temps	Recorregut		Velocitat	Acceleració
		s	mm	m	m/s	m/s <sup>2</sup>
Baixada	Acceleració	0,100	-33,333	-0,033	-	-6,67
	V. Constant	0,050	-33,333	-0,033	-0,667	0
	Frenada	0,100	-33,333	-0,033	-	6,67
Soldadura	Aturada	0,748	0	0	0	0
Pujada	Acceleració	0,070	11,111	0,011	-	4,50
	V. Constant	0,035	11,111	0,011	0,316	0
	Frenada	0,070	11,111	0,011	-	-4,50
Espera	Aturada	0,050	0	0,000	0	0
Baixada	Acceleració	0,070	-11,111	-0,011	-	-4,50
	V. Constant	0,035	-11,111	-0,011	-0,316	0
	Frenada	0,070	-11,111	-0,011	-	4,50
Soldadura	Aturada	0,672	0	0	0	0
Pujada	Acceleració	0,070	11,111	0,011	-	4,50
	V. Constant	0,035	11,111	0,011	0,316	0
	Frenada	0,070	11,111	0,011	-	-4,50
Espera	Aturada	0,050	0	0	0	0
Baixada	Acceleració	0,070	-11,111	-0,011	-	-4,50
	V. Constant	0,035	-11,111	-0,011	-0,316	0
	Frenada	0,070	-11,111	-0,011	-	4,50
Soldadura	Aturada	0,740	0	0	0	0
Pujada	Acceleració	0,100	33,333	0,033	-	6,67
	V. Constant	0,050	33,333	0,033	0,667	0
	Frenada	0,100	33,333	0,033	-	-6,67

Taula 5.3 Valors del moviment estàndard de l'eix vertical

La Figura 5.4 mostra el gràfic d'aquest cicle de treball estàndard completament definit. A la figura s'hi pot veure tant el perfil de velocitats com el perfil del recorregut.

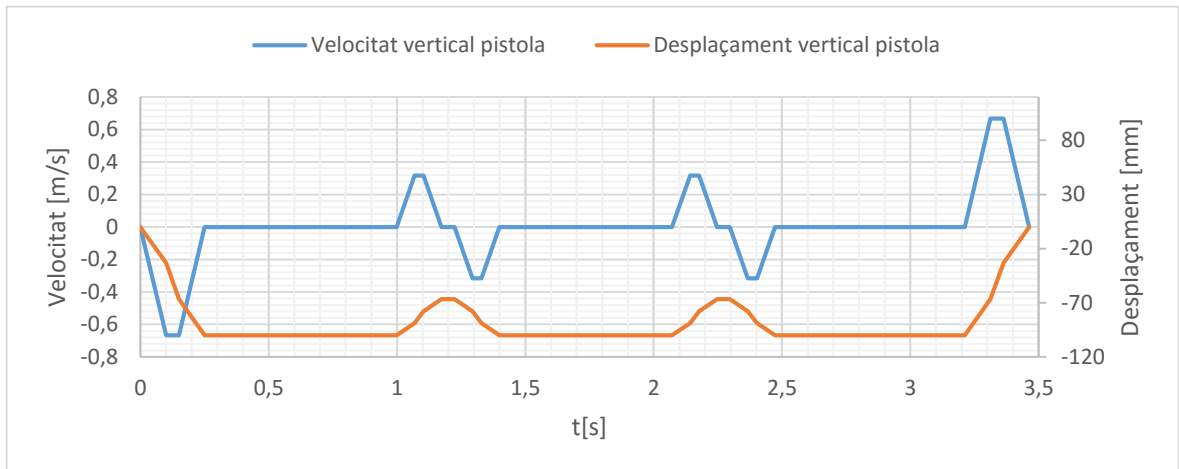


Figura 5.4 Cicle de treball estàndard de l'eix vertical

Igual que en l'apartat 4.3.3, cal dir que en la figura es veu que els trams dels recorregut són tots lineals, cosa que a la realitat òbviament no es així, ja que en els casos en els que hi ha acceleració el recorregut presenta perfils parabòlics. Això es deu a que tant el perfil de les velocitats com el perfil del recorregut s'han traçat a partir de la unió dels punts finals de cadascun dels moviments, per tant, en aquesta figura el perfil del recorregut és només orientatiu.

La Figura 5.5 mostra el cicle de treball estàndard de la taula giratòria solapat amb el de l'eix vertical, així es pot apreciar que estan ben coordinats.

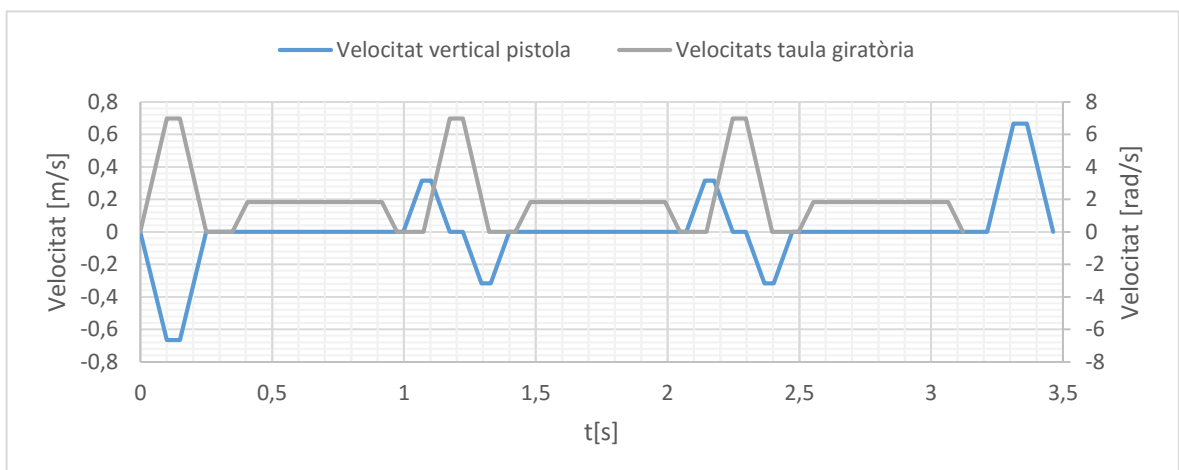


Figura 5.5 Coordinació de la taula giratòria amb l'eix vertical

A partir d'aquest cicle, igual que s'ha fet amb el de la taula giratòria, es calcula una mitjana quadràtica de les velocitats que es farà servir posteriorment. Mitjançant l'Equació 4.3 es calcula aquesta mitjana i s'obté un valor de  $V_{\text{nom. vertical}} = 0,184$  m/s.

### 5.3.3.2. Eix horitzontal

El cicle de treball estàndard de l'eix horitzontal es defineix seguint exactament els mateixos criteris que en l'eix vertical. També parteix del punt més allunyat, quan retrocedeix també ho fa en només un terç del seu recorregut total, també es coordina amb el moviment de la taula giratòria i també al final de tot torna a la posició inicial.

La Taula 5.4 mostra els valors d'aquest moviment de l'eix horitzontal.

		Temps		Recorregut		Velocitat m/s	Acceleració m/s <sup>2</sup>
		s	mm	m			
Apropar	Acceleració	0,070	25,109	0,025	-	10,25	
	V. Constant	0,160	114,783	0,115	0,717	0	
	Frenada	0,070	25,109	0,025	-	-10,25	
Soldadura	Aturada	0,700	0	0,000	0	0	
Allunyar	Acceleració	0,070	-18,330	-0,018	-	-7,50	
	V. Constant	0,035	-18,330	-0,018	-0,524	0	
	Frenada	0,070	-18,330	-0,018	-	7,50	
Espera	Aturada	0,050	0	0,000	0	0	
Apropar	Acceleració	0,070	18,330	0,018	-	7,50	
	V. Constant	0,035	18,330	0,018	0,524	0	
	Frenada	0,070	18,330	0,018	-	-7,50	
Soldadura	Aturada	0,670	0	0,000	0	0	
Allunyar	Acceleració	0,070	-18,330	-0,018	-	-7,50	
	V. Constant	0,035	-18,330	-0,018	-0,524	0	
	Frenada	0,070	-18,330	-0,018	-	7,50	
Espera	Aturada	0,050	0	0,000	0	0	
Apropar	Acceleració	0,070	18,330	0,018	-	7,50	
	V. Constant	0,035	18,330	0,018	0,524	0	
	Frenada	0,070	18,330	0,018	-	-7,50	
Soldadura	Aturada	0,700	0	0,000	0	0	
Allunyar	Acceleració	0,070	-25,109	-0,025	-	-10,25	
	V. Constant	0,160	-114,783	-0,115	-0,717	0	
	Frenada	0,070	-25,109	-0,025	-	10,25	

Taula 5.4 Valors del moviment estàndard de l'eix horitzontal

La Figura 5.6 mostra el gràfic d'aquest cicle de treball estàndard completament definit. A la figura s'hi pot veure tant el perfil de velocitats com el perfil del recorregut.

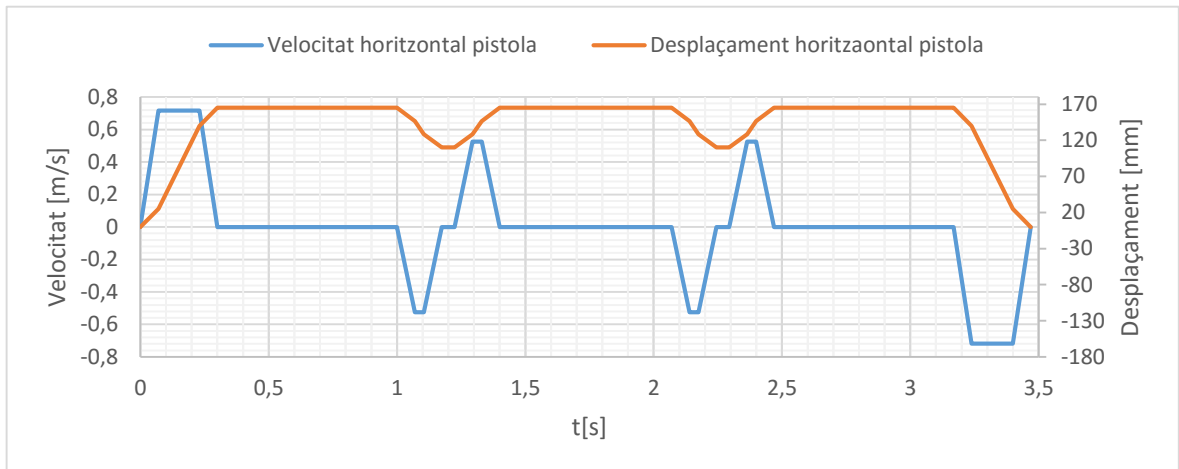


Figura 5.6 Cicle de treball estàndard de l'eix horitzontal

Igual que en els altres dos casos, cal dir que en la figura es veu que els trams dels recorregut són tots lineals, cosa que a la realitat òbviament no es així, ja que en els casos en els que hi ha acceleració el recorregut presenta perfils parabòlics. Això es deu a que tant el perfil de les velocitats com el perfil del recorregut s'han traçat a partir de la unió dels punts finals de cadascun dels moviments, per tant, en aquesta figura el perfil del recorregut és només orientatiu.

La Figura 5.7 mostra el cicle de treball estàndard de la taula giratòria solapat amb el de l'eix vertical, així es pot apreciar que estan ben coordinats.

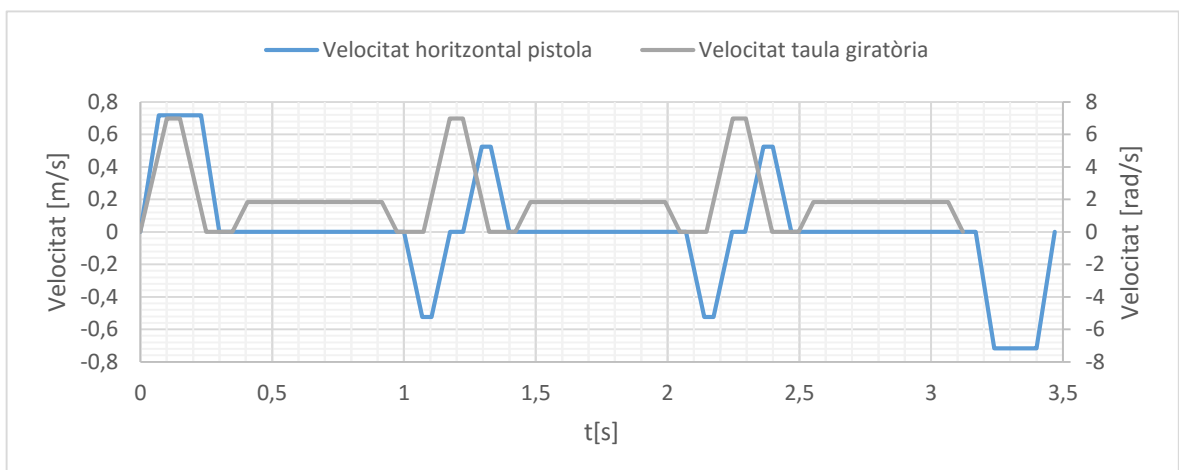


Figura 5.7 Coordinació de la taula giratòria amb l'eix horitzontal

A partir d'aquest cicle, igual que s'ha fet amb el de la taula giratòria i amb l'eix vertical, es calcula una mitja quadràtica de les velocitats que es farà servir posteriorment. Mitjançant l'Equació 4.3 es calcula aquesta mitjana i s'obté un valor de  $V_{\text{nominal horitzontal}} = 0,283 \text{ m/s}$ .



## 5.4. Selecció dels actuadors lineals i càlculs dinàmics

Després de comparar diferents sistemes de moviment lineal es decideix utilitzar uns mòduls com els que es poden veure a la Figura 5.9 que consisteixen en uns carros que es desplacen per unes guies i que poden ser accionats per corretges o per caragols sense fi.



Figura 5.9 Mòduls lineals

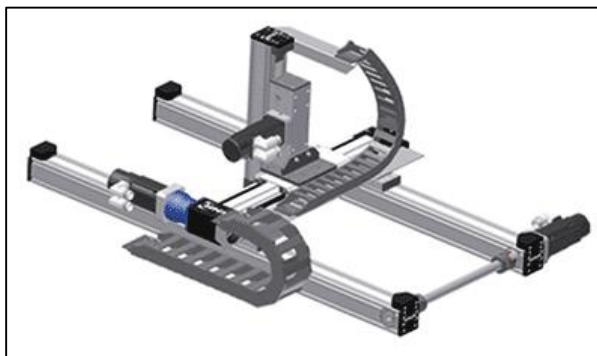


Figura 5.8 Sistema de múltiples eixos

S'escull aquest tipus de mòduls lineals per la facilitat amb la que es poden combinar per formar sistemes de múltiples eixos com el que es pot veure a la Figura 5.8. En el cas d'aquest projecte només cal connectar dos mòduls perpendicularment i ja es té el sistema de dos eixos.

Una vegada escollit el tipus de sistema lineal, es comença una cerca de diferents marques i es comparen els seus catàlegs per a veure quina empresa ofereix els productes que millor s'adapten a les necessitats de la màquina.

En primer moment es troba l'empresa UNIMOTION [6], que es dedica bàsicament a la fabricació de mòduls lineals amb els corresponents accessoris, però es descarta pels pocs detalls del catàleg i pel reduït banc d'elements CAD que ofereixen.

Finalment es decideix treballar amb l'empresa NTN-SNR [10], que té un catàleg molt més complet amb els productes molt ben detallats i ofereix els arxius CAD de cadascun dels seus productes, cosa que facilita molt el disseny.

Un cop revisats tots els productes que mostra el catàleg es busca la manera més simple per a construir un sistema de dos eixos que cobreixi les necessitats de la màquina. Finalment es decideix fixar la pistola de soldadura a l'eix vertical i fixar aquest eix a l'eix horitzontal, o sigui, que l'eix vertical sigui conduït per l'eix horitzontal.

La Figura 5.10 mostra un esquema representatiu de la proposta en el que també es pot veure el criteri de signes que es farà servir posteriorment per als càlculs.

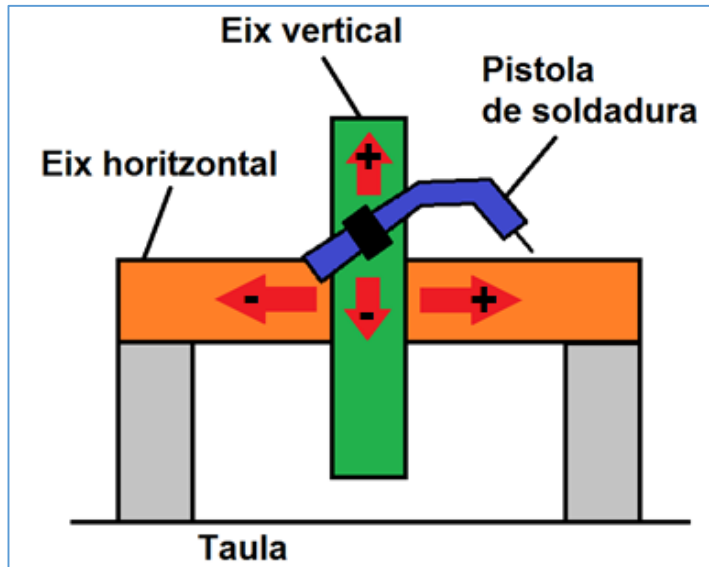


Figura 5.10 Esquema del sistema de dos eixos

Els paràmetres importants a tenir en compte a l'hora d'escollir el mòdul són:

- Que el carro es pugui moure a la velocitat màxima definida en l'apartat de càlculs cinemàtics (5.3.2.1).
- Que en la direcció de l'eix el mòdul pugui fer una força suficient d'arrossegament per a generar l'acceleració màxima definida en l'apartat de càlculs cinemàtics (5.3.2.1).
- Que el carro pugui suportar les càrregues i moments generats pel pes i el moviment dels components que s'hi fixen.

La Figura 5.11, obtinguda del catàleg de l'empresa SNR, mostra els moments i les càrregues a tenir en compte.

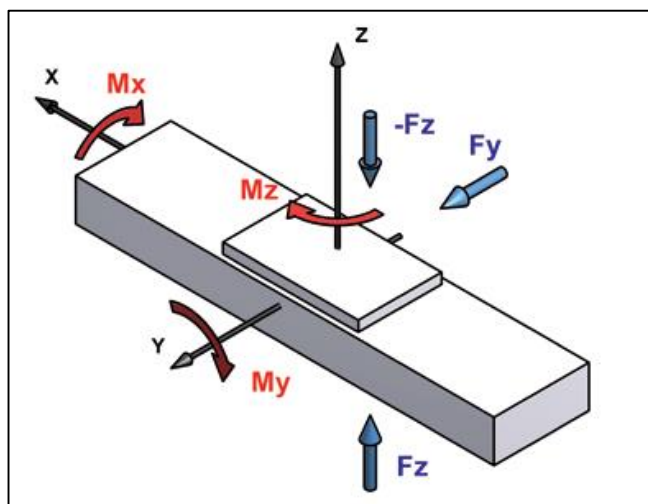


Figura 5.11 Càrregues i moments

### 5.4.1. Selecció del mòdul vertical

Primer es selecciona el mòdul de l'eix vertical, ja que es necessita saber-ne les característiques per a poder seleccionar l'eix horitzontal.

#### 5.4.1.1. Velocitat màxima

La velocitat màxima a la que es mou l'eix vertical ha estat definida a l'apartat 5.3.2.1 i és de  $v_{\text{max,vertical}} = 0,667 \text{ m/s}$ .

#### 5.4.1.2. Força màxima en la direcció de l'eix

Per a calcular la força d'arrossegament necessària en la direcció de l'eix, es necessita conèixer la massa que s'ha d'arrossegar.

En el cas de l'eix vertical els components a moure són la pistola de soldadura, l'adaptador que la fixa al carro del mòdul lineal i el carro del propi mòdul.

Al no saber exactament quina massa tindrà la pistola de soldadura, que finalment es farà servir, es decideix definir una massa màxima a partir de la que es faran els càlculs. Es defineix una massa màxima de  $m_{\text{pistola}} = 3 \text{ Kg}$ , que es considera suficient.

L'adaptador que fixarà la pistola al mòdul lineal és una peça que s'ha dissenyat per a aquest projecte i es descriu en detall a l'apartat 5.8.1. Aquesta peça té una massa de  $m_{\text{adaptador}} = 0,07 \text{ Kg}$ . Cal dir que per a fer la primera selecció del mòdul la massa d'aquesta peça no s'ha tingut en compte, ja que al no saber quin mòdul es faria servir encara no es podia dissenyar. Un cop triat un mòdul s'han refet els càlculs tenint en compte el pes d'aquesta peça per així confirmar la selecció.

La massa del carro del mòdul es troba en les característiques del mòdul definides en el catàleg. Igual que en el cas de l'adaptador per la pistola, al fer la primera selecció del mòdul la massa del carro no s'ha pogut tenir en compte, ja que no se sabia quin mòdul es faria servir. Un cop triat un mòdul s'han refet els càlculs tenint en compte el pes del carro per així confirmar la selecció. En el cas del mòdul vertical seleccionat la massa del carro és de  $m_{\text{carro}} = 0,4 \text{ kg}$ .

Amb les masses dels components i al saber que es volen accelerar a  $a_{\text{max,vertical}} = 6,667 \text{ m/s}^2$  tal i com s'ha determinat a l'apartat 5.3.2.1, es calcula la força màxima d'arrossegament que es necessita en la direcció de l'eix. El cas de màxima força, és quan es vol moure la pistola amb l'acceleració màxima cap amunt, és a dir, en contra de la força de la gravetat.

$$F_{\text{mòdul}} = m_{\text{total}} a_{\text{vertical}} + P_{\text{total}} = (m_{\text{pistola}} + m_{\text{adaptador}} + m_{\text{carro}})(a + g) [N]$$

Equació 5.1 Força en la direcció de l'eix

Mitjançant l'Equació 5.1 es calcula aquesta força:

$$F_{max.mòdul} = (3 + 0,07 + 0,4)(6,667 + 9,81) = 57,174 \text{ N}$$

### 5.4.1.3. Carregues i moments

Ara que ja es coneix la velocitat i la força en la direcció de l'eix només cal conèixer les càrregues i moments en els altres eixos que ha de suportar el mòdul lineal.

En aquest cas es tenen els moments i les càrregues de la Figura 5.12.

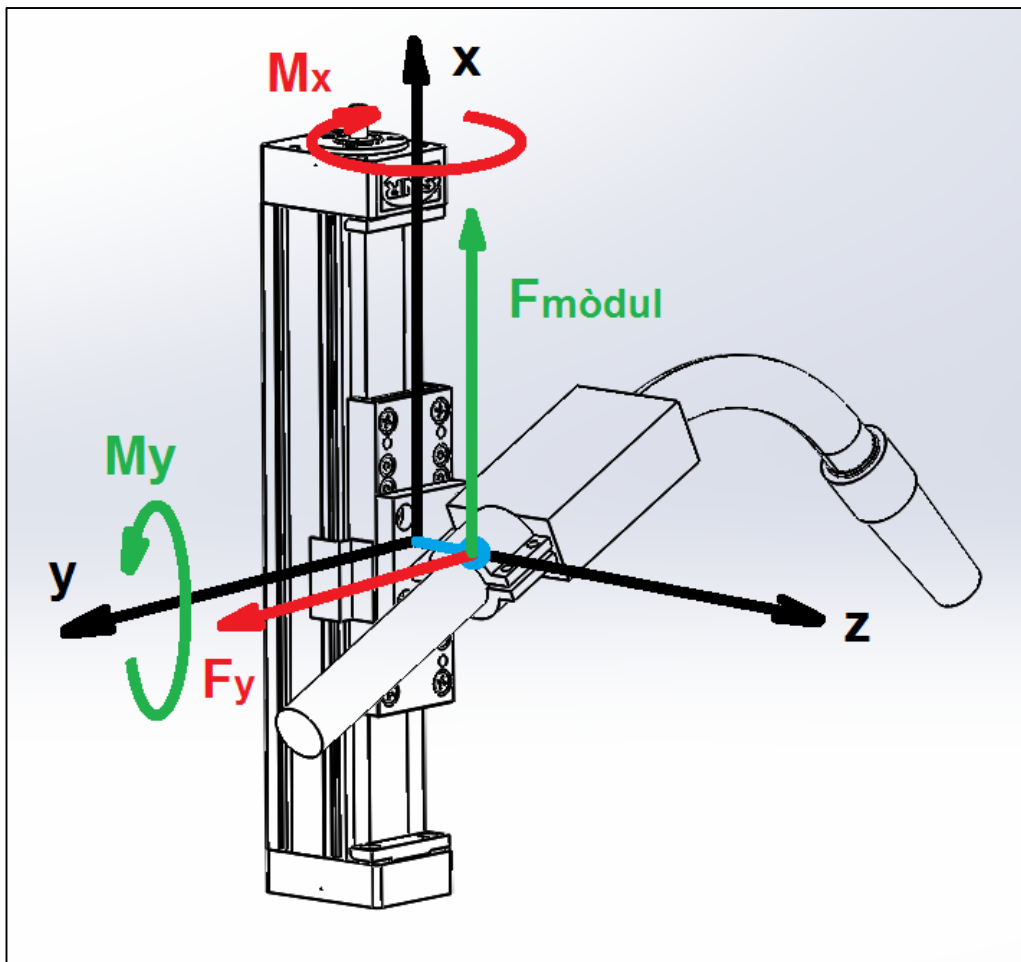


Figura 5.12 Moments i càrregues del mòdul vertical

$F_{mòdul}$  s'ha calculat a l'apartat anterior.

Per a calcular  $F_y$  només cal multiplicar el pes total a moure ( $m_{total} = 3,47 \text{ Kg}$ ) per l'acceleració màxima en la direcció horitzontal ( $a_{max.horitzontal} = 10,248 \text{ m/s}^2$ ) calculada a l'apartat 5.3.2.2. D'aquesta manera s'obté una  $F_y = 35,561 \text{ N}$ .

Directament es veu que  $F_z$  és zero.

Pel càlcul dels moments, el carro no es té en compte, ja que es troba a l'origen de coordenades, i es menyspreen els moments generats per l'adaptador, ja que té una massa molt petita respecte la pistola de soldadura. Per tant, només es tenen en compte els moments generats per la pistola de soldadura. També se suposa que tota la massa de la pistola està concentrada al centre de l'anell de l'adaptador que la fixa al carro, ja que el centre de masses de la pistola es troba pràcticament en aquest punt. La Figura 5.13 mostra aquest punt i la distància entre aquest punt i el carro.

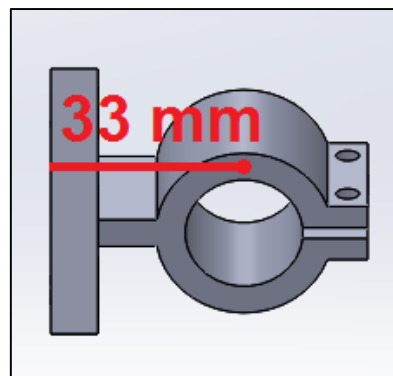


Figura 5.13 Distància pistola

El moment  $M_x$  es calcula amb l'Equació 5.2.

$$M_x = m_{pistola} a_{max.horizontal} d \text{ [Nm]}$$

Equació 5.2 Moment X

S'obté un moment  $M_x = 1,015 \text{ Nm}$ .

El moment  $M_y$  es calcula amb l'Equació 5.3.

$$M_y = (m_{pistola} a_{max.vertical} + P_{pistola}) d = m_{pistola} (a_{max.vertical} + g) d \text{ [Nm]}$$

Equació 5.3 Moment Y

S'obté un moment  $M_y = 1,631 \text{ Nm}$ .

El  $M_z$  és zero ja que es suposa que tota la massa de la pistola està al centre de l'anell de l'adaptador. A la realitat no és zero, però és un valor tan baix que es pot menysprear.

Totes les càrregues i moments calculats són dinàmics ja que varien en funció del moviment.

#### 5.4.1.4. Mòdul escollit

La Taula 5.5 mostra un resum dels requeriments a complir pel mòdul lineal.

Velocitat màxima		0,667 m/s
Força màxima en l'eix del moviment		57,174 N
Càrregues dinàmiques	Fy	35,561 N
	Fz	0 N
	-Fz	0 N
Moments dinàmics	Mx	1,015 Nm
	My	1,631 Nm
	Mz	0 Nm

Taula 5.5 Paràmetres requerits pel mòdul vertical

Després de consultar els models del catàleg es veu que amb el model més simple es compleixen els requeriments. Hi ha dos tipus d'aquest model, un accionat per una corretja dentada i l'altre accionat per un caragol sense fi. S'escull el model del caragol sense fi ja que quan la pistola de soldadura està en repòs s'aguanta sola per el mecanisme sense requerir despesa energètica.

El model seleccionat és AXC40S - S1210 i els seus paràmetres es poden veure a la taula Taula 5.6. Per a veure'n la fitxa tècnica detallada es pot consultar l'Annex B.

Velocitat màxima		1 m/s
Força màxima en l'eix del moviment		2500 N
Càrregues dinàmiques	Fy	660 N
	Fz	660 N
	-Fz	660 N
Moments dinàmics	Mx	4,5 Nm
	My	18 Nm
	Mz	18 Nm
Pas		10 mm/rev
Moment d'inèrcia de la transmissió (en funció de la longitud del mòdul)		$1,1 \cdot 10^{-5}$ Kgm <sup>2</sup> /m
Rendiment		98 %
Pes base (carro inclòs)		1,0 Kg
Pes per a cada 100 mm de carrera		0,3 Kg
Pes del carro		0,4 Kg
Parell de frec		0,3 Nm

Taula 5.6 Especificacions mòdul vertical

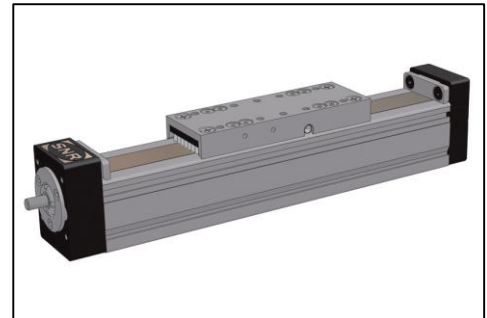


Figura 5.14 Mòdul vertical

Pel mòdul vertical es necessita un recorregut de 100 mm per tant el pes del mòdul serà el pes base (carro inclòs) més el pes per 100 mm de carrera,  $m_{\text{mòdul vertical}} = 1,3$  Kg.

La longitud total del mòdul vertical s'obté a partir de l'Equació 5.4 donada en les especificacions del producte.

$$L_{\text{mòdul}} = \text{Carrera} + 161 \text{ [mm]}$$

Equació 5.4 Longitud mòdul

$$L_{\text{mòdul vertical}} = 100 + 161 = 261 \text{ mm}$$

A partir d'aquesta longitud es calcula el moment d'inèrcia de la transmissió.

$$I_{\text{transmissió vertical}} = 1,1 \cdot 10^{-5} \cdot 0,261 = 2,871 \cdot 10^{-6} \text{ Kgm}^2$$

## 5.4.2. Selecció del mòdul horitzontal

### 5.4.2.1. Velocitat màxima

La velocitat màxima a la que es mou l'eix vertical ha estat definida a l'apartat 5.3.2.2 i és de  $v_{\text{max.horitzontal}} = 0,717 \text{ m/s}$ .

### 5.4.2.2. Força màxima en la direcció de l'eix

La massa dels components a moure es pot veure en la Taula 5.7.

Pistola de soldadura	3 Kg
Adaptador	0,07 Kg
Mòdul vertical	1,30 Kg
Motor (Inclòs adaptador)	1,22 Kg
Carro mòdul horitzontal	0,4 Kg
Total	5,99 Kg

Taula 5.7 Massa components eix horitzontal

Igual que en l'eix vertical, al fer la primera selecció del mòdul la massa del carro no s'ha pogut tenir en compte, ja que no se sabia quin mòdul es faria servir. Un cop triat un mòdul s'han refet els càlculs tenint en compte el pes del carro per així confirmar la selecció.

La massa del motor es determina a l'apartat 5.5 quan s'escull el motor per al mòdul vertical.

Un cop conegudes les masses de tots els components i al saber que es volen accelerar a  $a_{\text{max.horitzontal}} = 10,248 \text{ m/s}^2$  tal i com s'ha decidit a l'apartat 5.3.2.2, es calcula la força màxima d'arrossegament que es necessita en la direcció de l'eix.

$$F_{\text{mòdul}} = (m_{\text{pistola}} + m_{\text{adaptador}} + m_{\text{mòdul vertical}} + m_{\text{motor}} + m_{\text{carro h.}}) a \text{ [N]}$$

Equació 5.5 Força en la direcció de l'eix

Mitjançant l'Equació 5.5 es calcula aquesta força:

$$F_{\text{max.mòdul}} = (3 + 0,07 + 1,30 + 1,22 + 0,4) 10,248 = 61,386 \text{ N}$$

### 5.4.2.3. Carregues i moments

En el cas horitzontal es tenen els moments i les càrregues de la Figura 5.15.

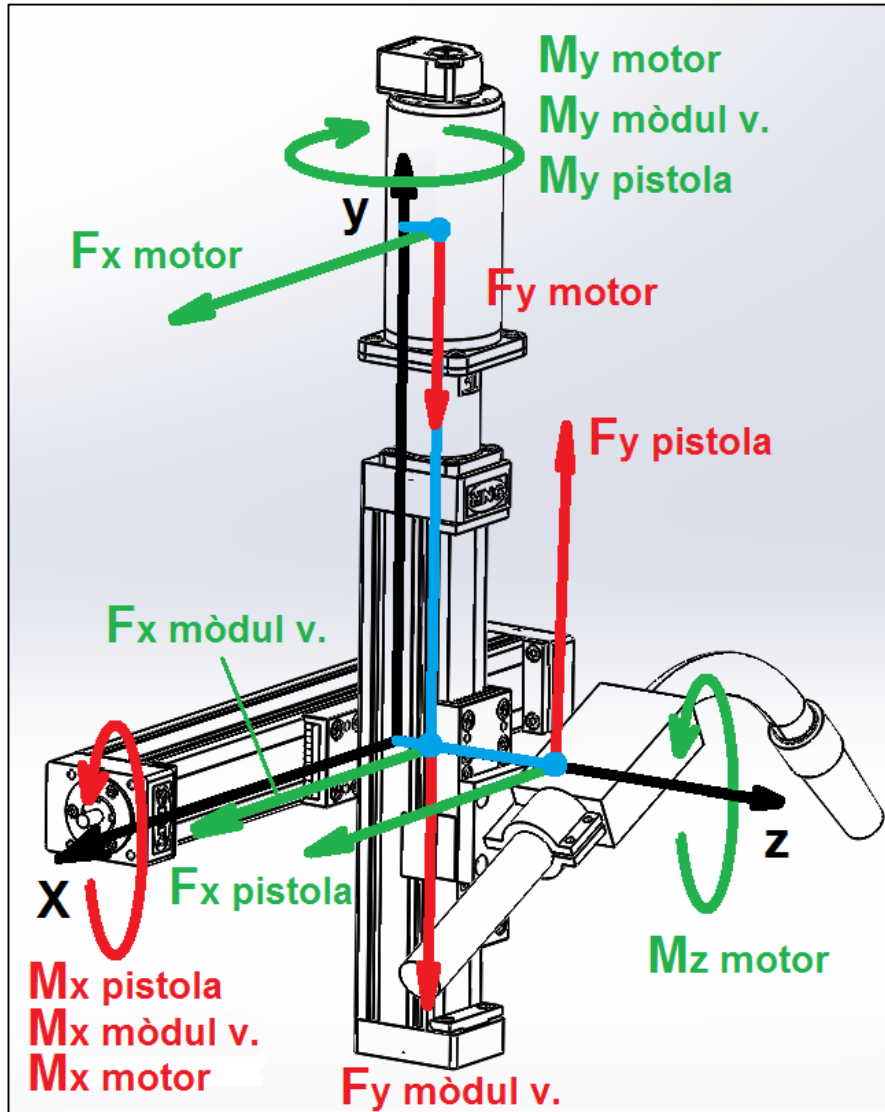


Figura 5.15 Moments i càrregues del mòdul horitzontal

Amb l'Equació 5.5 desglossada per a cadascuna de les masses s'obtenen les forces  $F_x$  de la Figura 5.15 que es poden veure a la Taula 5.8.

	Dinàmiques	Estàtiques
$F_x$ motor	12,503 N	-
$F_x$ mòdul vertical	13,322 N	-
$F_x$ pistola	30,744 N	-

Taula 5.8 Forces eix X

No es tenen en compte la massa de l'adaptador per a la pistola ni la massa del carro horitzontal, ja que no es faran servir pel càlcul de moments.



Els valors de la  $F_{y \text{ mòdul v.}}$  la  $F_{y \text{ motor}}$  es calculen multiplicant les seves respectives masses per l'acceleració de la gravetat. El valor de la  $F_{y \text{ pistola}}$  es calcula amb l'Equació 5.1 eliminant totes les masses menys la de la pistola de soldadura.

	Dinàmiques	Estàtiques
Fy motor	-	11,968 N
Fy mòdul vertical	-	12,753 N
Fy pistola	49,431 N	-
Total	49,431 N	24,721 N

Taula 5.9 Forces eix Y

Fz és zero.

Per simplificar el càlcul dels moments, només es tenen en compte la pistola de soldadura, el mòdul vertical i motor del mòdul vertical. Igual que a l'apartat anterior se suposa que tota la massa de la pistola està concentrada al centre de l'anell de l'adaptador que la fixa al carro.

El moment  $M_x$  es calcula amb l'Equació 5.6.

$$M_x = F_y d_z \text{ [Nm]}$$

Equació 5.6 Moment X

Els resultats es mostren a la Taula 5.10.

	Fy	Distància	Dinàmics	Estàtics
Mx motor	11,968 N	0,0284 m	-	0,340 Nm
Mx mòdul vertical	12,753 N	0,0284 m	-	0,362 Nm
Mx pistola	49,431 N	0,0860 m	4,251 Nm	-
Total	-	-	4,251 Nm	0,702 Nm

Taula 5.10 Moments eix X

El moment  $M_y$  es calcula amb l'Equació 5.7.

$$M_y = F_x d_z \text{ [Nm]}$$

Equació 5.7 Moment Y

Els resultats es mostren a la Taula 5.11.

	Fx	Distància	Dinàmics	Estàtics
My motor	12,503 N	0,0284 m	0,355 Nm	-
My mòdul vertical	13,322 N	0,0284 m	0,378 Nm	-
My pistola	30,744 N	0,0860 m	2,644 Nm	-
Total	-	-	3,377 Nm	-

Taula 5.11 Moments eix Y

El moment  $M_z$  es calcula amb l'Equació 5.8.

$$M_z = F_x d_y \text{ [Nm]}$$

Equació 5.8 Moment Z

Els resultats es mostren a la Taula 5.12.

	Fx	Distància	Dinàmics	Estàtics
Mz motor	12,503 N	0,370 m	4,626 Nm	-

Taula 5.12 Moments eix Z

#### 5.4.2.4. Mòdul escollit

La Taula 5.13 mostra un resum dels requeriments a complir pel mòdul lineal.

Velocitat màxima		0,717 m/s	
Força màxima en l'eix del moviment		61,386 N	
Càrregues	Dinàmiques	Fy	49,431 N
		Fz	0 N
		-Fz	0 N
	Estàtiques	Fy	24,721 N
		Fz	0 N
		-Fz	0 N
Moments	Dinàmics	Mx	4,251 Nm
		My	3,377 Nm
		Mz	4,626 Nm
	Estàtics	Mx	0,702 Nm
		My	0 Nm
		Mz	0 Nm

Taula 5.13 Paràmetres requerits pel mòdul horitzontal

Igual que en el mòdul vertical, després de consultar els models del catàleg es veu que amb el model més simple es compleixen els requeriments. En aquest cas també s'escull el model amb caragol sense fi.

Per tant, el model seleccionat és AXC40S - S1210, amb la única diferència que en aquest cas la carrera és de 165 mm. La Taula 5.6 en mostra les especificacions.

La longitud total del mòdul horitzontal s'obté igual que la del mòdul vertical a partir de l'Equació 5.4 donada en les especificacions del producte.

$$L_{\text{mòdul horitzontal}} = 165 + 161 = 326 \text{ mm}$$

A partir d'aquesta longitud es calcula el moment d'inèrcia de la transmissió.

$$I_{\text{transmissió horitzontal}} = 1,1 \cdot 10^{-5} \cdot 0,326 = 3,586 \cdot 10^{-6} \text{ Kgm}^2$$

## 5.5. Selecció del sistema motor

El sistema motor que mogui els carros ha de poder fer el parell necessari per a oferir les forces màximes de cada mòdul, aquestes forces s'han calculat en l'apartat 5.4.1.2 pel mòdul vertical i en l'apartat 5.4.2.2 pel mòdul horitzontal.

$$\Gamma_{sis.motor} = \mu_{seguretat} \left( \frac{F_{mòdul} \frac{Pas}{2\pi}}{\eta_{mòdul}} + \Gamma_{frec} + a_{carro} \frac{2\pi}{Pas} (I_{trans.} + I_{sis.motor}) \right) [Nm]$$

Equació 5.9 Parell al motor

Amb l'Equació 5.9 es calculen aquests parells màxims o de pic per a cadascun dels mòduls aplicant un coeficient de seguretat d'1,2.

$$\Gamma_{pic v.} = 1,2 \left( \frac{57,174 \frac{0,010}{2\pi}}{0,98} + 0,3 + a \frac{2\pi}{0,010} (2,871 \cdot 10^{-6} + 5,610 \cdot 10^{-5}) \right) = 0,768 Nm$$

$$\Gamma_{pic h.} = 1,2 \left( \frac{61,388 \frac{0,010}{2\pi}}{0,98} + 0,3 + a \frac{2\pi}{0,010} (3,586 \cdot 10^{-6} + 5,670 \cdot 10^{-5}) \right) = 0,946 Nm$$

Per a fer la primera selecció del sistema motor el seu moment d'inèrcia no s'ha tingut en compte, ja que no se sabia quin sistema motor es faria servir. Un cop triat el sistema motor s'han refet els càlculs tenint en compte el seu moment d'inèrcia per així confirmar la selecció.

També es calcula el parell nominal a partir del cicle de treball estàndard definit a l'apartat 5.3.3. Amb l'Equació 5.9 es calculen els parells de cada tram, tenint en compte que el frec sempre va en contra del moviment i que, en el cas del mòdul vertical, la força generada pel pes de la pistola és zero quan la velocitat és zero, ja que s'aguanta amb el mecanisme.

Amb el parell de tots els trams calculat, és calcula la mitjana quadràtica mitjançant l'Equació 4.3 i s'obté el parell nominal que haurà de fer el sistema motor.

La Taula 5.14 mostra els parells nominals per a cadascun dels eixos.

Parell nominal eix vertical	0,262 Nm
Parell nominal eix horitzontal	0,325 Nm

Taula 5.14 Parells nominals mòduls

Per a la selecció del motor també és important saber les velocitats a les es necessita que treballi. La Taula 5.15 mostra les velocitats màximes definides a l'apartat 5.3.2 i les velocitats nominals definides a l'apartat 5.3.3 per a cadascun dels eixos.

Velocitat màxima vertical	0,667 m/s
Velocitat màxima horitzontal	0,717 m/s
Velocitat nominal vertical	0,184 m/s
Velocitat nominal horitzontal	0,283 m/s

Taula 5.15 Velocitats lineals eixos

Amb els valors d'aquesta taula i l'Equació 5.10 es calculen les velocitats angulars a les que es necessita que pugui girar el sistema motor.

$$\omega_{sis.motor} = V_{lineal} \frac{2\pi}{Pas} \text{ [rad/s]}$$

Equació 5.10 Càlcul velocitat angular

$$\omega_{max.v} = 0,667 \frac{2\pi}{0,010} = 418,879 \text{ rad/s}; \omega_{max.h} = 0,717 \frac{2\pi}{0,010} = 450,750 \text{ rad/s}$$

$$\omega_{nom.v} = 0,184 \frac{2\pi}{0,010} = 115,494 \text{ rad/s}; \omega_{nom.h} = 0,283 \frac{2\pi}{0,010} = 177,739 \text{ rad/s}$$

A la Taula 5.16 es veu un resum dels requisits que es necessita que el sistema motor compleixi.

	Pic	Nominal
Parell eix vertical	0,768 Nm	0,262 Nm
Parell eix horitzontal	0,946 Nm	0,325 Nm
Velocitat angular mòdul vertical	418,879 rad/s	115,494 rad/s
Velocitat angular mòdul horitzontal	450,750 rad/s	177,739 rad/s
Potència mòdul vertical	321,633 W	30,259 W
Potència mòdul horitzontal	426,173 W	57,812 W

Taula 5.16 Requisits dels sistemes motors

Seguint els criteris del principi de l'apartat 4.4 es busquen dos sistemes motor entre els models que ofereix l'empresa MAXON que compleixin els requisits de cadascun dels eixos.

Com s'observa a la Taula 5.16 les velocitats angulars necessàries per al sistema motor són prou altes per no poder posar un reductor, ja que si se'n poses un serien massa altes.

Després de consultar diferents models de motor, s'escull el motor de corrent continua amb escombretes de grafit Maxon 370354 que s'ajusta a les necessitats dels dos eixos, per tant es farà servir el mateix motor pels dos casos.

La Taula 5.17 mostra un resum de les característiques d'aquest motor. Si es vol veure la fitxa tècnica detalla del motor es pot consultar a l'Annex B.

Potència nominal	200 W
Tensió nominal	24 V
Velocitat en buit	623 rad/s
Corrent en buit	0,236 A
Velocitat nominal	595 rad/s
Parell nominal	0,405 Nm
Corrent nominal	10,8 A
Parell en parada	8,92 Nm
Corrent en parada	232 A
Màxim rendiment	94 %
T. màx. als bobinats	125 °C



Figura 5.16 Motor mòduls lineals

Taula 5.17 Característiques motors mòduls

Com es pot observar, les velocitats màximes de treball són inferiors a la nominal del motor, també es veu que els parells nominals són inferiors al parell nominal del motor i que els parells màxims estan molt per sota del parell del motor en parada. Això valida la selecció del motor.

Per acabar de confirmar aquesta selecció, igual que s'ha fet a l'apartat 4.4.2 es representen els dos punts de treball de cada eix, que es poden veure a la Taula 5.16, en el gràfic del rang de treball del motor, que es pot veure a la Figura 5.17.

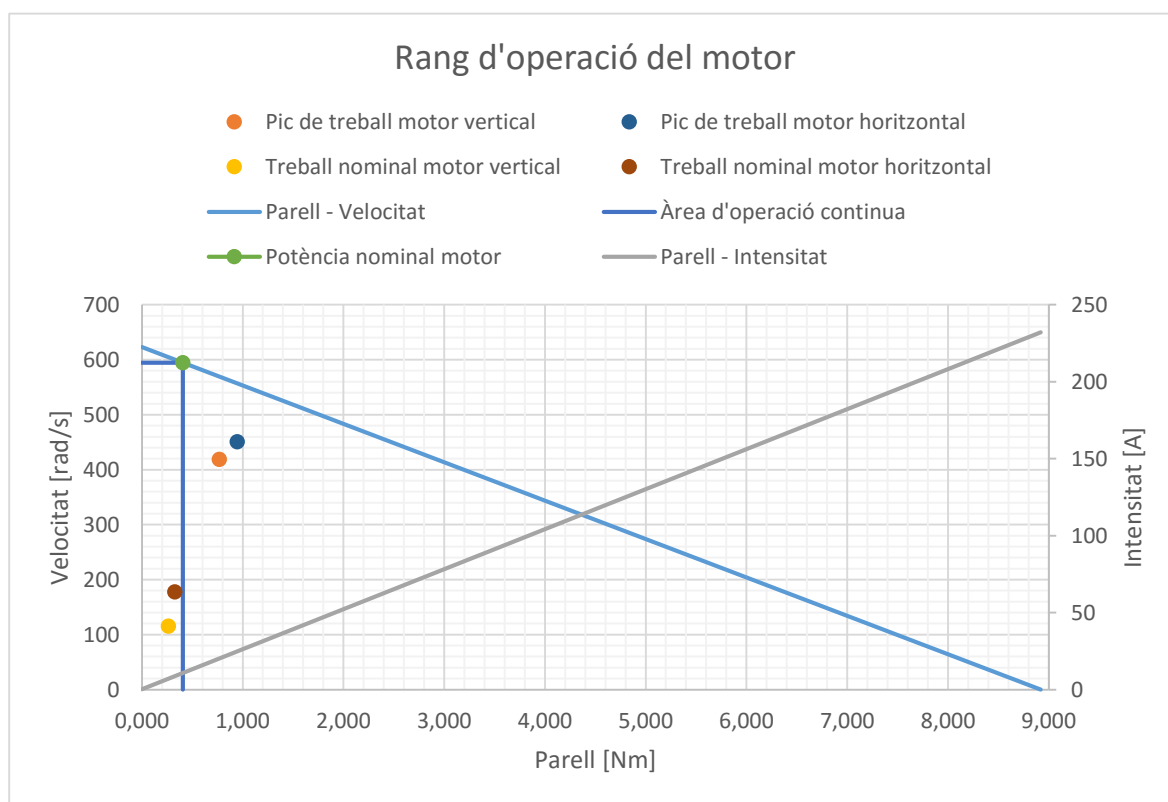


Figura 5.17 Rang d'operació motors pistola

Fent el mateix anàlisi que en l'apartat 4.4.2 es pot observar que els dos punts de treball nominal queden dins de l'àrea d'operació nominal. També s'observa que els punts de pic de treball es troben per sota de la corba de Parell – Velocitat. Per tant, es confirma la selecció d'aquests motors pels mòduls lineals.

## 5.6. Selecció del sistema de control

Igual que en el cas del motor de la taula giratòria es necessita un sistema de control de posició. A diferència del sistema de la taula giratòria, aquest sistema necessita tres components: un controlador, un sensor de posició per a tancar el llaç de control i uns finals de carrera en cadascun dels mòduls, per així poder posar les posicions a zero i no superar el recorregut màxim.

### 5.6.1. Selecció dels finals de carrera

Es selecciona l'única opció que ofereix l'empresa dels mòduls lineals, un sensor inductiu de proximitat que es col·loca als extrems de les guies del mòdul lineal.

Es tria el model PNP-NO (Normalment obert) amb les característiques de la Taula 5.18.

Tensió de treball (DC)	10-30 V
Intensitat màxima	100 mA
Precisió de la commutació	≤ 10% de la distància de commutació
Longitud del cable	5 m
Classe de protecció	IP67

Taula 5.18 Característiques sensor de proximitat

### 5.6.2. Selecció del sensor de posició

Tenint en compte els mateixos criteris de l'apartat, 4.5.1 es selecciona el sensor de posició per als motors dels dos mòduls lineals.

S'escull el mateix sensor per als dos motors, ja que són iguals i treballen mes o menys en les mateixes condicions.

Apareixen dues opcions disponibles per al motor seleccionat. De les dues opcions es decideix escollir l'únic sensor que té controlador de línia, ja que és necessari per al control de posició. Aquest sensor és l'encoder HEDL 5540 Maxon 110518, les dades del qual es poden veure a la Taula 5.19. Per a veure la fitxa tècnica detallada del sensor es pot consultar l'Annex B.

Polsos per volta	500
Controlador de línia	Sí
Màxima velocitat	1257 rad/s
Canal índex	Sí

Taula 5.19 Especificacions sensor



Figura 5.18 Sensor

### 5.6.3. Selecció del controlador o drive

Seguint els mateixos criteris que en l'apartat 4.5.2 es selecciona el controlador, amb la única diferència que en aquest cas es té en compte que el controlador tingui entrades per a connectar els finals de carrera escollits a l'apartat 5.6.1.

De les diferents opcions possibles de controladors de posició s'escullen els que poden oferir els valors d'intensitats en les que treballen els motors, mostrats a la Taula 5.20.

Intensitat pic de treball vertical	20,180 A
Intensitat pic de treball horitzontal	24,794 A
Intensitat treball nominal vertical	7,041 A
Intensitat treball nominal horitzontal	8,684 A

Taula 5.20 Intensitats dels punts de treball

Es troben dos controladors de posició compatibles amb aquests valors d'intensitats, que tenen els mateixos sistemes de comunicació (RS232, USB 2.0 i CAN) i que tenen entrades per als finals de carrera. Es decideix escollir el més econòmic dels dos models.

El controlador escollit es el model Maxon 375711 "EPOS2 70/10, control digital de posició, 10 A, 11 - 70 VDC". La Taula 5.21 en mostra un resum de les característiques. Per a veure la fitxa tècnica detallada del controlador es pot consultar l'Annex B.

Potència límit del motor	700 W
Encoder incremental digital	Sí
Màxima tensió de treball	70 V
Màxima corrent de sortida	25 A
Màxima duració de la màxima corrent de sortida	1 s
Corrent de sortida en continu	10 A
Màxim rendiment	94 %

Taula 5.21 Característiques controlador



Figura 5.19 Controlador

## 5.7. Modelat matemàtic i simulació del motor

Igual que amb el motor de la taula giratòria, per a poder veure detalladament el comportament dels motors i confirmar que funcionaran correctament, es decideix modelar el comportament del sistema motor matemàticament i fer-ne una simulació.

Al ser dos motors de corrent continua amb escombretes, les model matemàtic del que es parteix per a fer la seva simulació és el mateix que el del motor de la taula giratòria i que es pot veure a la Figura 4.15. També, les adaptacions que es fan d'aquest model són les mateixes, amb la única diferència que el frec es modela de manera diferent i que en el cas del mòdul vertical es modela el pes dels components a moure de manera especial. Aquestes dues diferències s'expliquen en detall en els següents apartats.

### 5.7.1. Modelat i simulació del motor vertical

Partint del model ja adaptat que es pot veure a la Figura 4.16, es treu la part referent al frec viscos i es canvia per un parell de frec constant generat en el mòdul lineal. Cal tenir en compte que el frec sempre ha d'anar en contra del moviment, i que ha de ser zero quan no hi hagi moviment, per tant, s'afegeix una funció signe, que depèn de la velocitat, davant del parell de frec.

S'ha d'afegir una altra modificació en aquest model. Al estar aquest mòdul en posició vertical, el pes de les masses fixades al carro, i el carro inclòs, genera un parell al caragol sense fi a favor del motor quan es vol baixar el carro i en contra del motor quan es vol pujar el carro. Aquest parell del pes és inferior al parell generat pel fregament en els mecanismes del mòdul lineal, per tant quan es desconnecta el motor i es deixa el mecanisme en repòs, el carro vertical amb la pistola de soldadura s'aguanta sol. O sigui, el pes només actua quan hi ha moviment. Per a poder modelar això, de moment s'afegeix un condicional en les equacions.



Després d'aquests canvis el model final és el que es pot veure a la Figura 5.20.

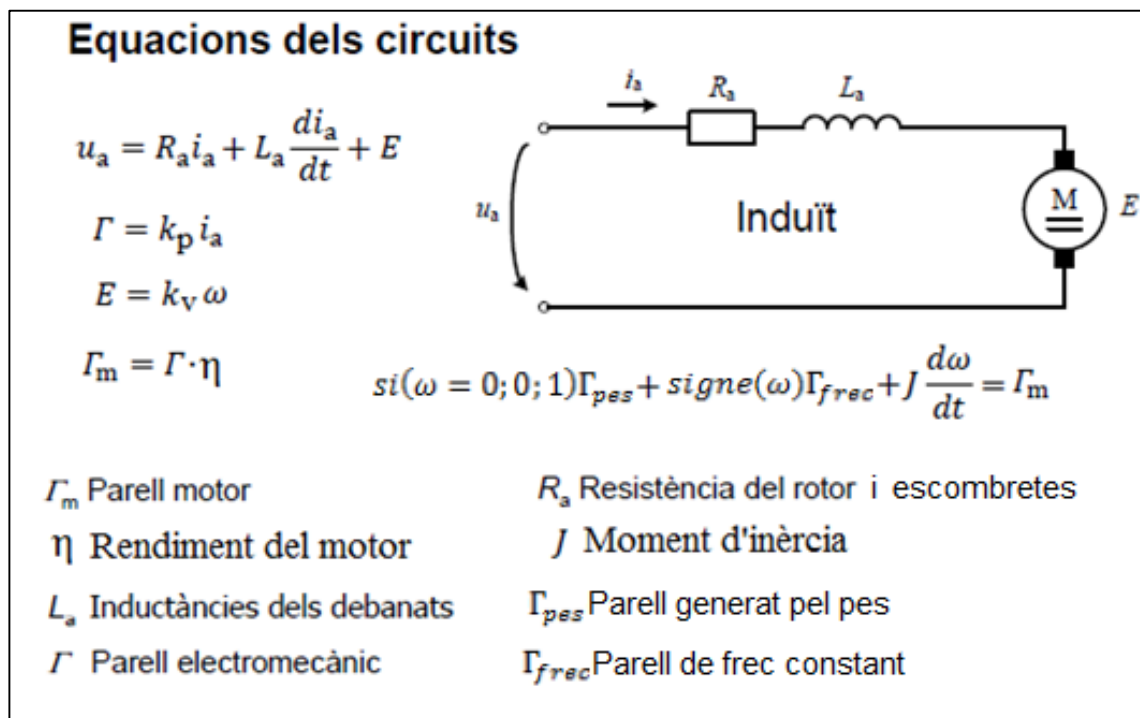


Figura 5.20 Model motor eix vertical

La Taula 5.22 mostra els valors de tots els components del model.

Resistència als terminals ( $R_a$ )	0,103 $\Omega$
Inductància als terminals ( $L_a$ )	0,000072 H
Constat de parell ( $k_p$ )	0,0385 Nm/A
Constat de velocitat ( $k_v$ )	0,0385 V/(rad/s)
Rendiment del motor ( $\eta$ )	0,94
Moment d'inèrcia al motor ( $J$ )	$8,153 \cdot 10^{-5}$ Kgm <sup>2</sup>
Parell de frec constant ( $\Gamma_{frec}$ )	0,36 Nm
Parell del pes ( $\Gamma_{pes}$ )	0,066 Nm

Taula 5.22 Dades simulació vertical

Tots els valors d'aquesta taula, menys el moment d'inèrcia, el parell del frec constant i el parell generat pel pes, es troben a les especificacions del motor seleccionat, que es poden veure a l'Annex B.

Per al càlcul del moment d'inèrcia vist al motor es fa servir l'Equació 5.11 que té en compte tots els elements mòbils del mecanisme. El coeficient de seguretat es d'1,2.

$$I_{motor} = \mu_{seguretat} \left( \frac{m_{tot} Pas^2}{4\pi^2 \eta_{mòdul}} + I_{sense\ fi} + I_{sis.motor} \right) [Kgm^2]$$

Equació 5.11 Moment d'inèrcia vist al motor

L'Equació 5.12 mostra com es calcula el frec constant vist al motor. Amb un coeficient de seguretat també d'1,2.

$$\Gamma_{frec\ constant} = \mu_{seguretat} \Gamma_{frec\ mòdul} [Nm]$$

Equació 5.12 Frec constant vist al motor

El parell de frec en el mòdul es  $\Gamma_{frec\ mòdul} = 0,3\ Nm$  i es pot trobar a les especificacions del mòdul lineal a l'Annex B.

L'Equació 5.13 mostra com calcular el parell generat pel pes vist al motor. Aplicant un coeficient de seguretat també d'1,2.

$$\Gamma_{pes} = \mu_{seguretat} \left( \frac{m_{tot} g Pas}{\eta_{mòdul} 2\pi} \right) [Nm]$$

Equació 5.13 Parell generat pel pes

La simulació tèrmica es fa de manera idèntica a la del motor de la taula giratòria. La Taula 5.23 mostra les dades tèrmiques pel motor de l'eix vertical.

Resistència tèrmica (Carcassa-Ambient) ( $TR_{ha}$ )	3,8 K/W
Resistència tèrmica (Bobinat-Carcassa) ( $TR_{wh}$ )	1,2 K/W
Constant de temps (Carcassa-Ambient) ( $\tau_m$ )	1370 s
Constant de temps (Bobinat-Carcassa) ( $\tau_w$ )	71,7 s

Taula 5.23 Dades tèrmiques

Un cop definits tots els paràmetres es procedeix a fer la simulació amb el programa Simulink, vinculat al Matlab, que permet la simulació de sistemes.

La Figura 5.21 mostra l'esquema de blocs del sistema que conté la simulació elèctrica, mecànica i tèrmica.

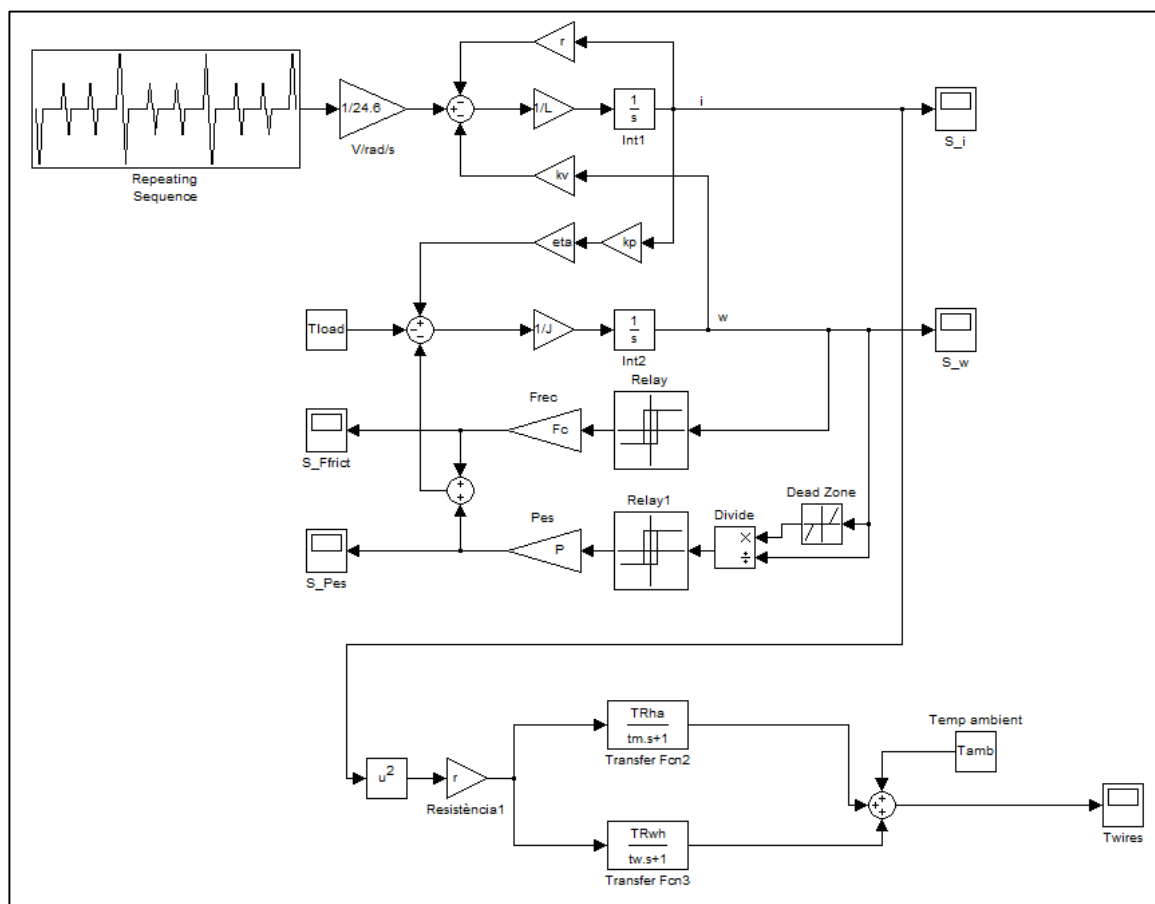


Figura 5.21 Esquema de blocs del sistema

Tots els blocs que es veuen contenen els valors descrits anteriorment, menys el bloc de temperatura ambient, el bloc de l'entrada del perfil de velocitats i el bloc de guany que hi ha just després de l'entrada.

La temperatura ambient que es defineix per a fer la simulació és de 35°C igual que en el cas del motor de la taula giratòria.

En aquest cas el bloc de l'entrada descriu el perfil de velocitat estàndard del mòdul vertical i el bloc del guany té la mateixa funció que la descrita pel motor de la taula giratòria.

Com es pot observar, la funció signe del freq constant es simula amb una histèresi ja que així s'amplia el marge en el que el programa considera que la velocitat es zero i s'aconsegueix que la simulació no vagi tan lenta com ho faria si es poses el bloc de la funció signe.

També es veu, que per a simular el parell generat pel pes, es fa servir un bloc de zona morta en la que la sortida es zero, després aquesta sortida es divideix entre l'entrada original i així

s'aconsegueix que quan la velocitat es zero, a continuació es passa per un bloc d'histèresi que converteix el senyal en u o zero.

La Figura 5.22 mostra la relació entre el perfil de velocitats desitjat i el perfil de velocitats obtingut en llaç obert per la simulació.

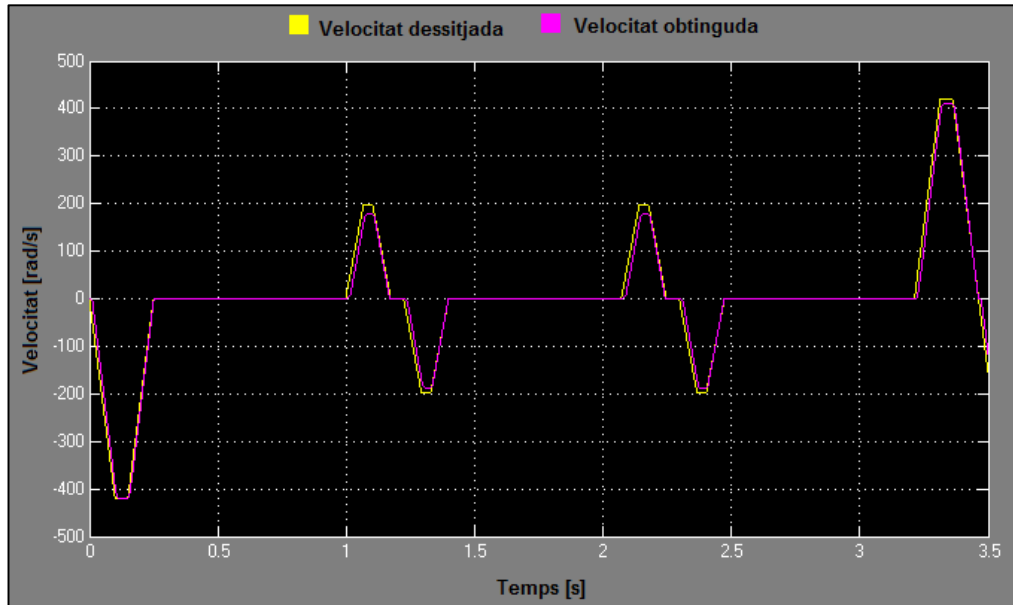


Figura 5.22 Velocitat desitjada respecte velocitat obtinguda

Un cop donada la simulació per vàlida ja es poden analitzar el valors de tensió, intensitat i temperatures del motor obtinguts.

La Figura 5.23 mostra el perfil de tensions obtinguts en la simulació.

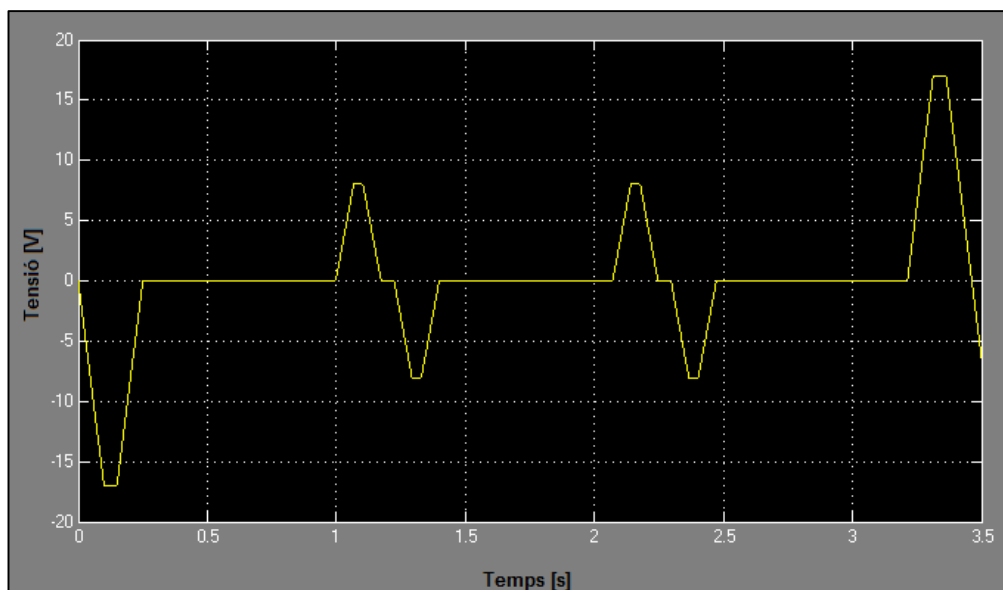


Figura 5.23 Perfil de tensions

Com es pot observar les tensions necessàries per a poder arribar a les velocitats necessàries per la màquina en cap moment les tensions màximes que pot oferir el controlador ( $17V < 70V$ ).

La Figura 5.24 mostra el perfil d'intensitats obtingut a la simulació.

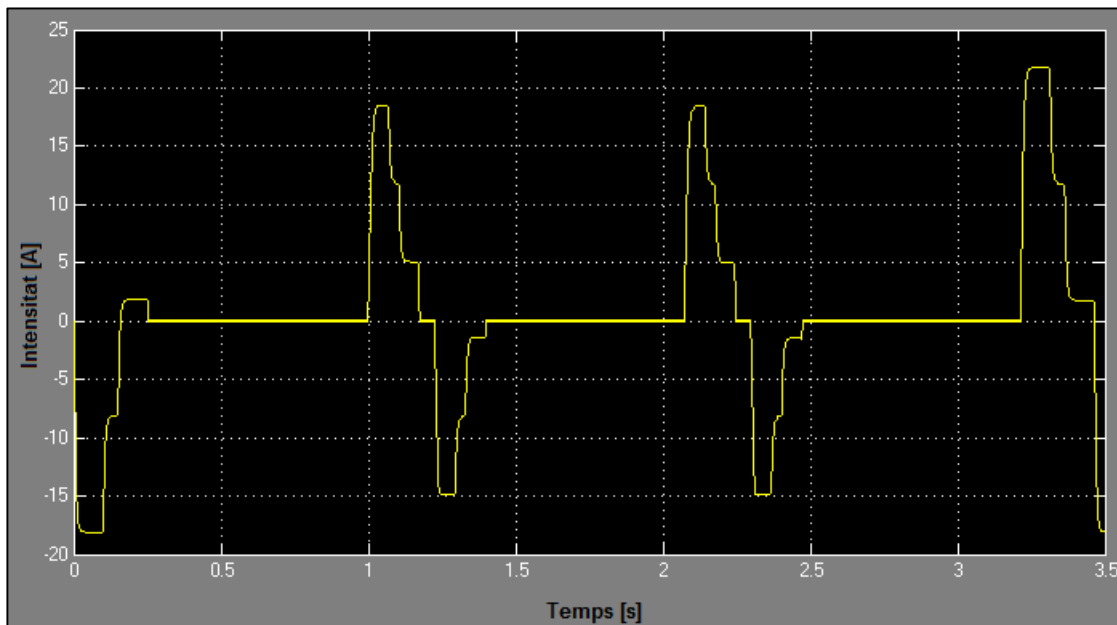


Figura 5.24 Perfil d'intensitats

Com es pot observar les intensitats obtingudes són molt semblants a les calculades a l'apartat 5.6.3 tot i tornen a confirmar que en cap cas es supera la màxima intensitat de 25 A que pot generar el controlador. També es pot veure que els períodes en els que es supera la intensitat nominal definida pel controlador són molt inferiors a un segon, que és el temps màxim permès durant el qual es pot estar superant la intensitat nominal.

Pel que fa a l'estudi tèrmic s'intenta simular el sistema complet durant un període de temps prou llarg per a veure l'estabilització de la temperatura. Desafortunadament, per culpa de limitacions de memòria de l'ordinador amb el que es fan les simulacions, no es pot simular tot el temps necessari sense que es pengi el programa.

Per tant es decideix fer la simulació tèrmica a part, aplicant una intensitat constant amb el valor de la intensitat nominal calculada a l'apartat 5.6.3.

La Figura 5.25 mostra el resultat de la simulació.

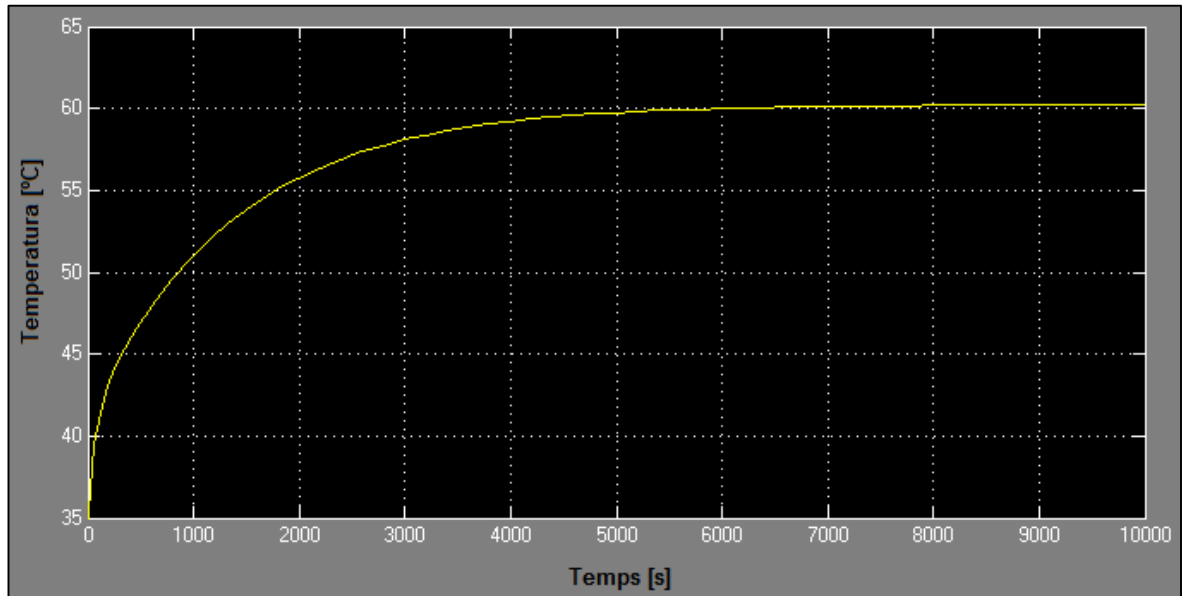


Figura 5.25 Temperatura

Com es pot observar quan el sistema tèrmic arriba a l'estat estacionari la temperatura en els bobinats és d'uns 60 °C que és molt inferior al màxim permès (125 °C) per tant es torna a confirmar la correcta selecció del motor.

### 5.7.2. Modelat i simulació del motor horitzontal

Igual que en el mòdul vertical, partint del model ja adaptat que es pot veure a la Figura 4.16, es treu la part referent al frec viscos i es canvia per un parell de frec constant generat en el mòdul lineal. Cal tenir en compte que el frec sempre ha d'anar en contra del moviment, i que ha de ser zero quan no hi hagi moviment, per tant, s'afegeix una funció signe, que depèn de la velocitat, davant del parell de frec.

En el cas del mòdul horitzontal no s'ha d'afegir res referent al pes, ja que aquest no afecta en la direcció de l'eix.

Després d'aquests canvis el model final és el que es pot veure a la Figura 5.26.

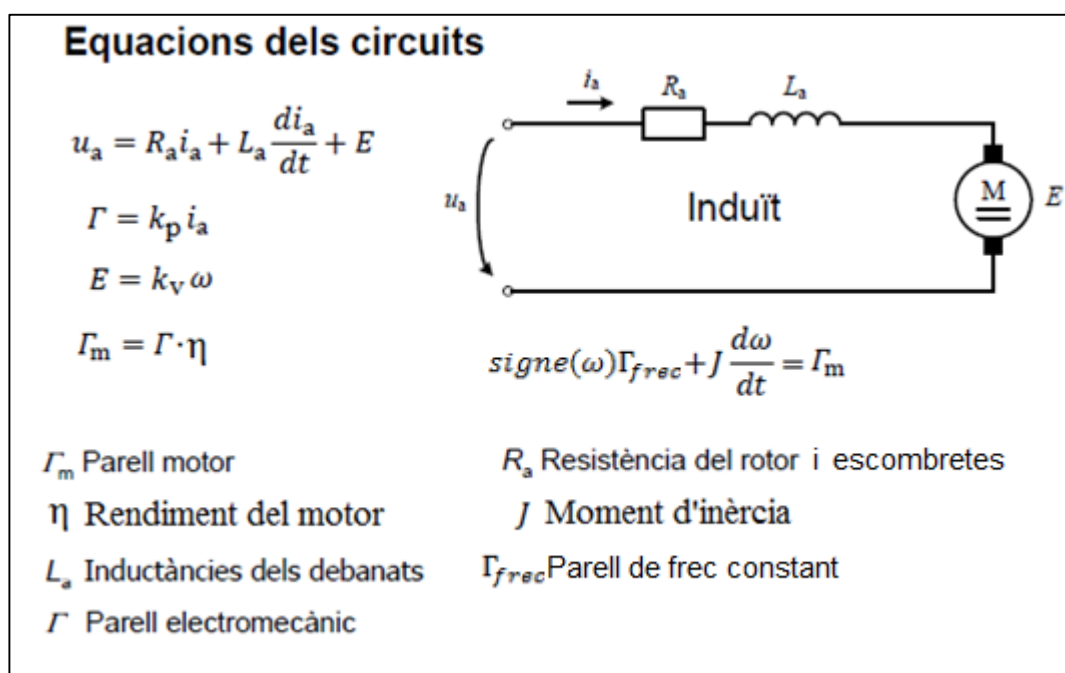


Figura 5.26 Model motor eix horitzontal

La Taula 5.24 mostra els valors de tots els components del model.

Resistència als terminals ( $R_a$ )	0,103 $\Omega$
Inductància als terminals ( $L_a$ )	0,000072 H
Constat de parell ( $k_p$ )	0,0385 Nm/A
Constat de velocitat ( $k_v$ )	0,0385 V/(rad/s)
Rendiment del motor ( $\eta$ )	0,94
Moment d'inèrcia al motor ( $J$ )	$9,092 \cdot 10^{-5}$ Kgm <sup>2</sup>
Parell de frec constant ( $\Gamma_{frec}$ )	0,36 Nm

Taula 5.24 Dades simulació horitzontal

Tots els valors d'aquesta taula, menys el moment d'inèrcia i el parell del frec constant, es troben a les especificacions del motor seleccionat, que es poden veure a l' Annex B.

Per al càlcul del moment d'inèrcia vist al motor es fa servir l'Equació 5.11 que és la mateixa que en el cas del motor vertical.

El valor del freq constant vist al motor es calcula de la mateixa manera que en l'eix vertical.

La simulació tèrmica també és la mateixa que la de l'eix vertical, amb les mateixes dades tèrmiques, que es mostren a la Taula 5.23, ja que és el mateix motor.

Un cop definits tots el paràmetres es procedeix a fer la simulació.

La Figura 5.27 mostra l'esquema de blocs del sistema que conté la simulació elèctrica, mecànica i tèrmica.

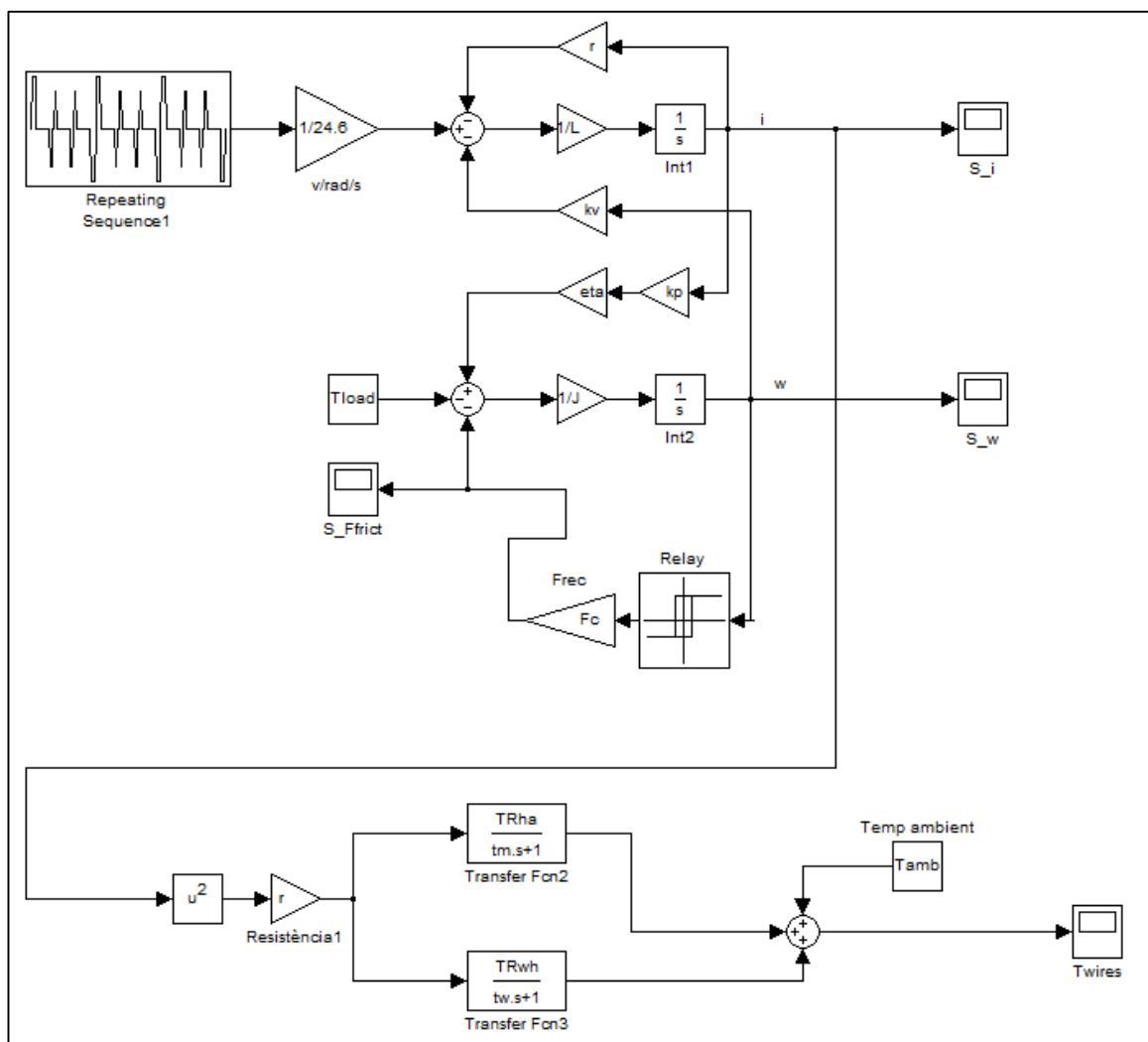


Figura 5.27 Esquema de blocs eix horitzontal

La temperatura ambient que es defineix per a fer la simulació és de 35°C igual que en el cas del motor del mòdul vertical.



En aquest cas el bloc de l'entrada descriu el perfil de velocitat estàndard del mòdul horitzontal i el bloc del guany té la mateixa funció que la descrita pel motor del mòdul vertical.

Com es pot observar, la funció signe del frec s'ha simulat igual que en el cas de l'eix vertical.

La Figura 5.28 mostra la relació entre el perfil de velocitats desitjat i el perfil de velocitats obtingut en llaç obert per la simulació.

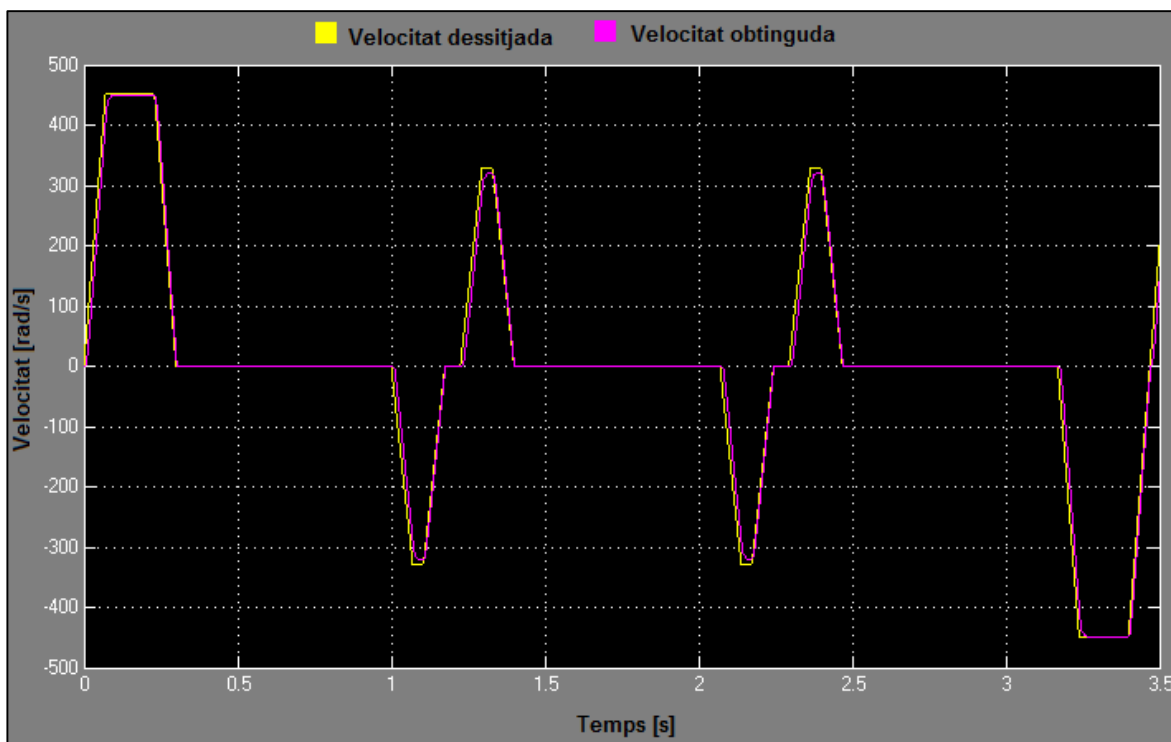


Figura 5.28 Velocitats desitjades respecte velocitats obtingudes

Un cop donada la simulació per vàlida ja es poden analitzar el valors de tensió, intensitat i temperatures del motor obtinguts.

La Figura 5.29 mostra el perfil de tensions obtinguts en la simulació.

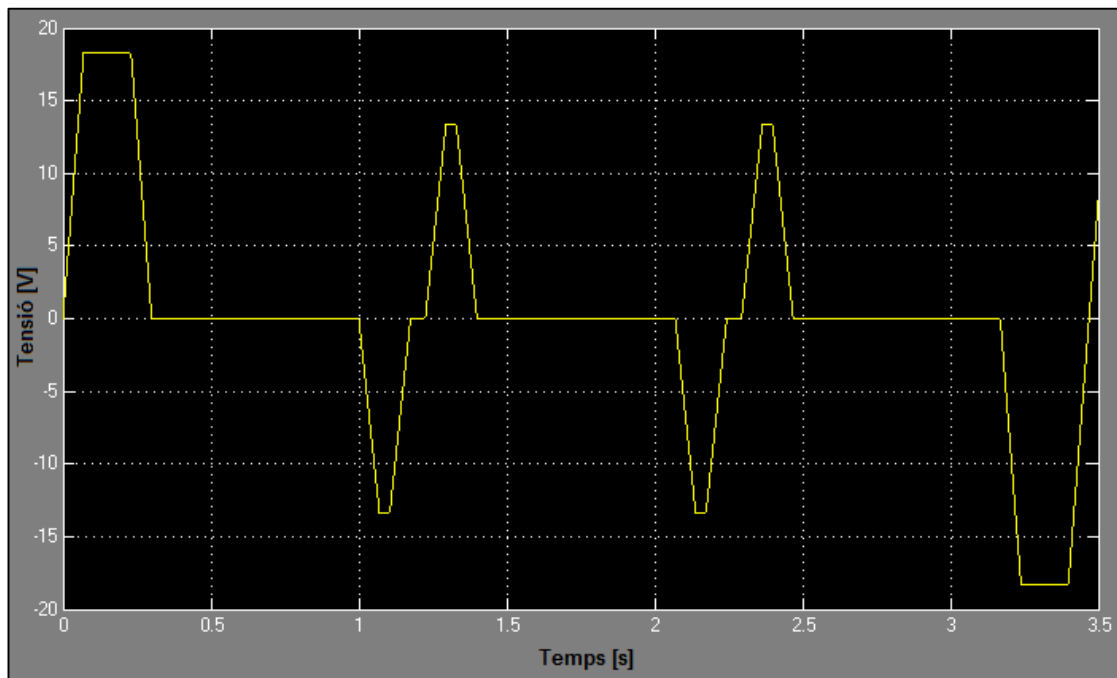


Figura 5.29 Perfil de tensions

Com es pot observar les tensions necessàries per a poder arribar a les velocitats necessàries per la màquina en cap moment les tensions màximes que pot oferir el controlador ( $18V < 70V$ ).

La Figura 5.30 mostra el perfil d'intensitats obtingut a la simulació.

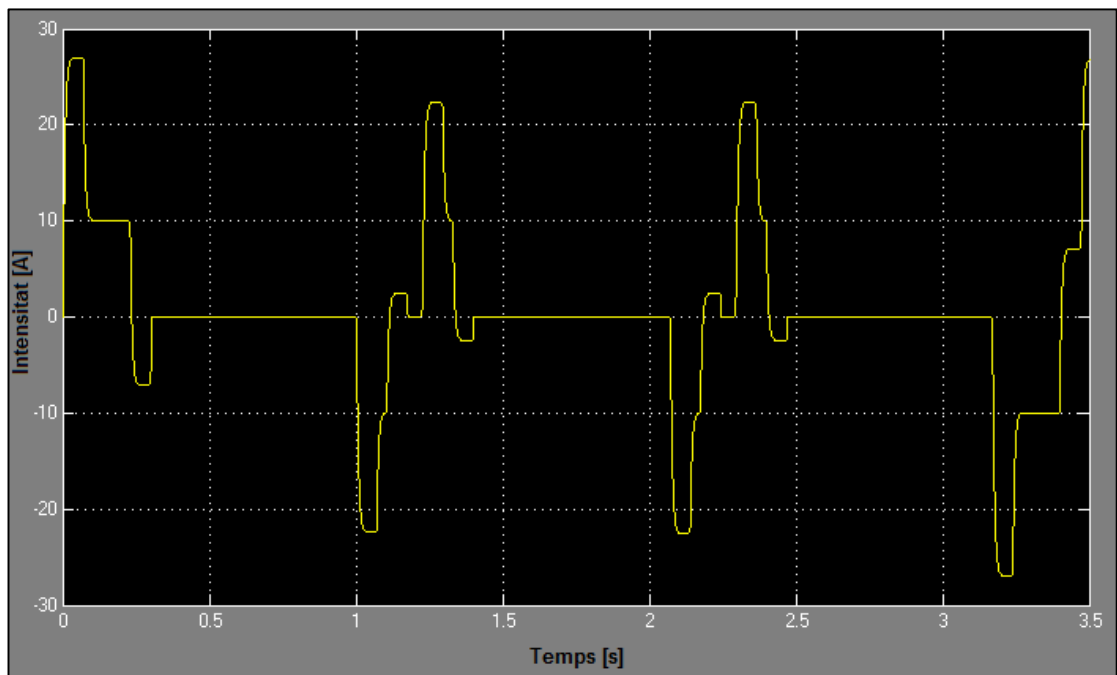


Figura 5.30 Perfil d'intensitats

Com es pot observar les intensitats obtingudes són molt semblants a les calculades a l'apartat 5.6.3 tot i que les superen una mica, uns 2 A. Això es creu que es deu al efectes de la integració en la simulació i de les discontinuïtats causades pel freq constant. No es consideren preocupants ja que s'ha tingut en tot moment un coeficient de seguretat de 20%, així que encara que realment els valors de la simulació siguin correctes, els valors reals seguirien estant per sota de 25 A, el màxim que pot oferir el controlador seleccionat. També es pot veure que els períodes en els que es supera la intensitat nominal definida pel controlador són molt inferiors a un segon, que és el temps màxim permès durant el qual es pot estar superant la intensitat nominal.

Pel que fa a l'estudi tèrmic, de la mateixa manera que passa en el mòdul vertical, per limitacions informàtiques no es pot fer la simulació completa.

Per tant, també es decideix fer la simulació tèrmica a part, aplicant una intensitat constant amb el valor de la intensitat nominal calculada a l'apartat 5.6.3.

La Figura 5.31 mostra el resultat de la simulació.

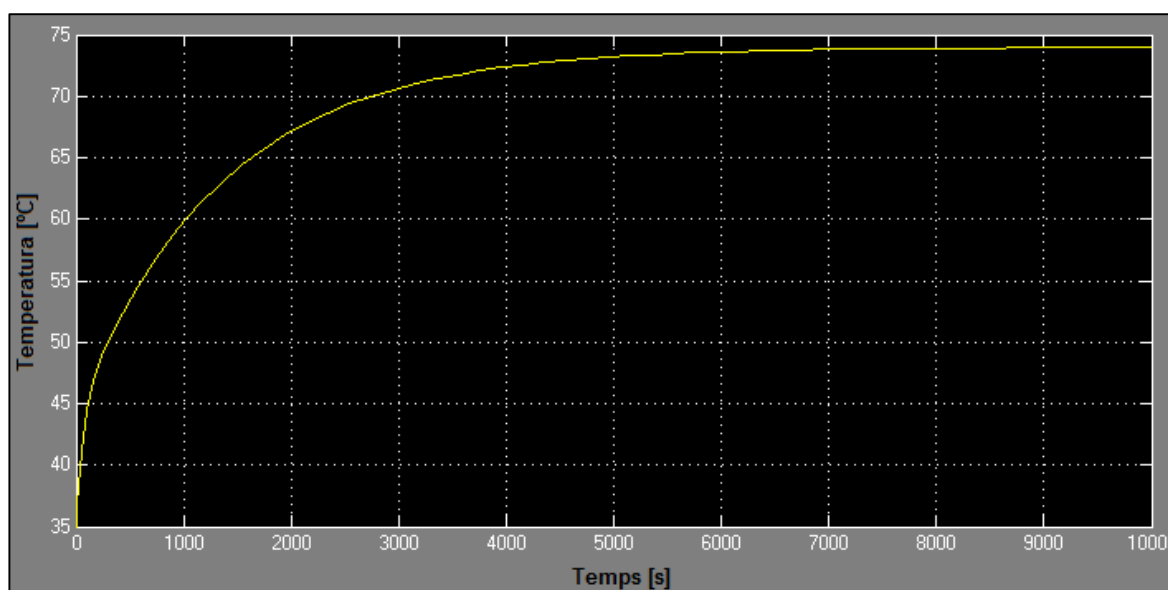


Figura 5.31 Temperatura

Com es pot observar quan el sistema tèrmic arriba a l'estat estacionari la temperatura en els bobinats és d'uns 74 °C que és molt inferior al màxim permès (125 °C) per tant es torna a confirmar la correcta selecció del motor.

## 5.8. Disseny i modificacions mecàniques

El disseny final del sistema de la pistola de soldadura queda com es veu a la Figura 5.32.

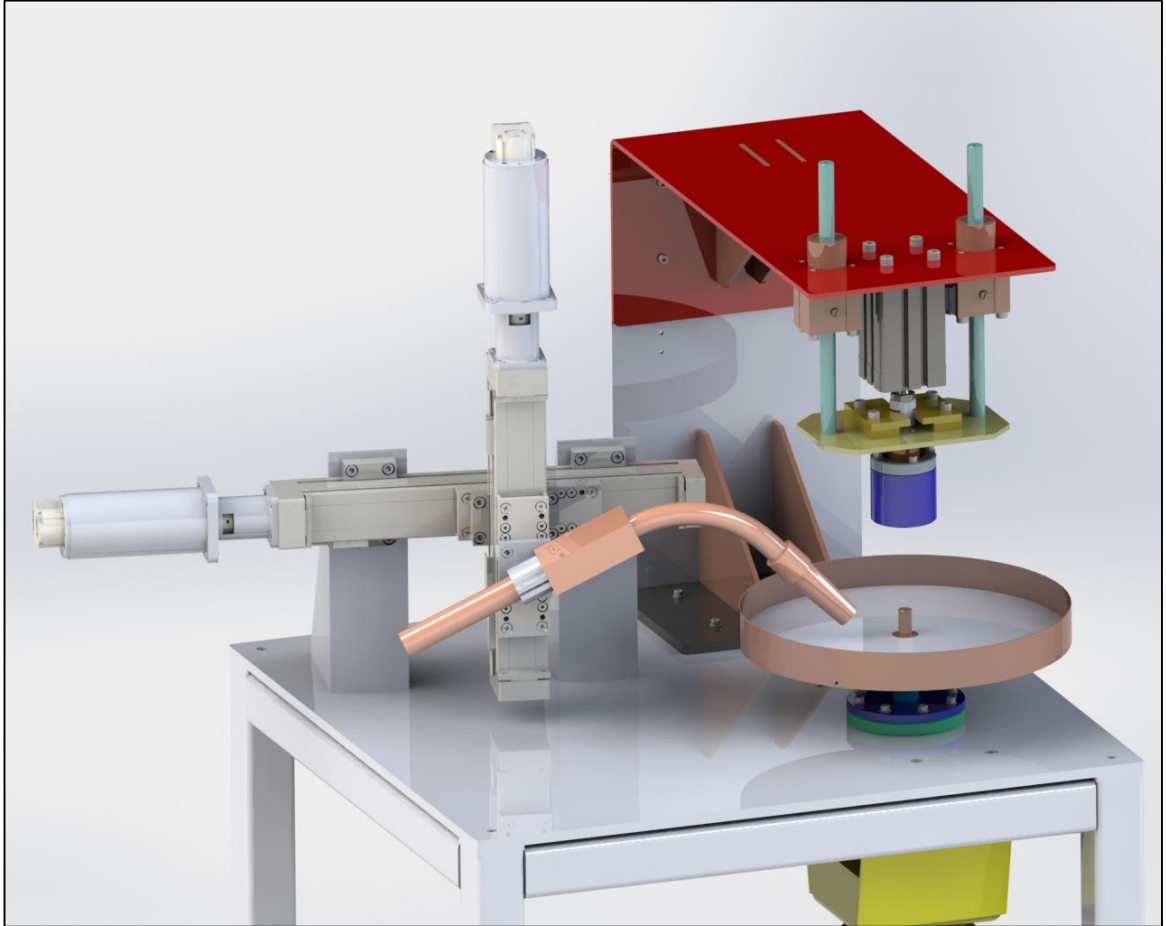


Figura 5.32 Sistema pistola de soldadura final

Per a poder muntar aquest sistema es necessita el següent:

- Dissenyar un sistema de subjecció de la pistola de soldadura al carro de l'eix vertical.
- Trobar un sistema per fixar el mòdul vertical en el carro del mòdul horitzontal.
- Dissenyar un sistema d'acoblament entre els motors i els eixos dels caragols sense fi dels mòduls.
- Dissenyar un sistema de fixació del mòdul horitzontal a la taula de la màquina.

### 5.8.1. Subjecció de la pistola de soldadura al carro vertical

Partint del disseny CAD de la pistola de soldadura, obtingut del projecte original, i de les mides del carro del mòdul vertical, es fa el disseny de l'adaptador que la subjectarà en aquest carro. Es vol que l'angle d'atac de la punta de la pistola quedi a 45° respecte la xapa de l'adapter, ja que és l'angle òptim per a la soldadura. I també, es decideix que la peça sigui d'alumini perquè no ha d'aguantar grans esforços i així és més lleugera.

Com es veu a la Figura 5.33 la peça consisteix bàsicament en un anell, en el que es fixa la pistola amb dos caragols. Aquest anell va soldat a una placa i aquesta placa es solda a una xapa que té els forats per fixar amb caragols la peça a la base del carro.

Per a veure més detalls de la peça se'n poden trobar els plànols a l'Annex C.

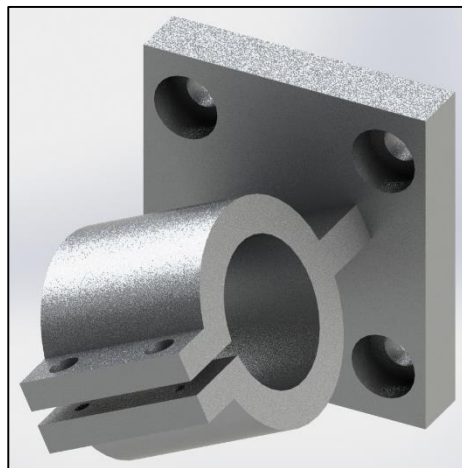


Figura 5.33 Adaptador pistola

### 5.8.2. Sistema de fixació entre els dos mòduls

Per a fixar el mòdul vertical en el carro del mòdul horitzontal es compra el "Kit de conexió directa AXC 40-40" que ven l'empresa del mòduls lineals expressament per a formar sistemes de múltiples eixos.

Aquest conjunt conté dues peces que es cargolen al carro del mòdul horitzontal i que agafen el mòdul vertical per les guies que té en el seu perfil.

Per a veure més detalls del conjunt se'n pot trobar la fitxa tècnica a l'Annex B.

### 5.8.3. Sistema d'acoblament entre els motors i els eixos dels mòduls

Per poder connectar l'eix del motor amb l'eix dels mòduls lineals es necessita un sistema que fixi l'estator del motor amb el mòdul lineal i un sistema que acobli els dos eixos.

Per a connectar els dos eixos es compra l'acoblament per a eixos MKP2, que és de la mateixa marca (Jakob antriebstechnik) que el comprat pel motor de la marca giratòria. Se'n pot trobar la fitxa tècnica a l'Annex B.

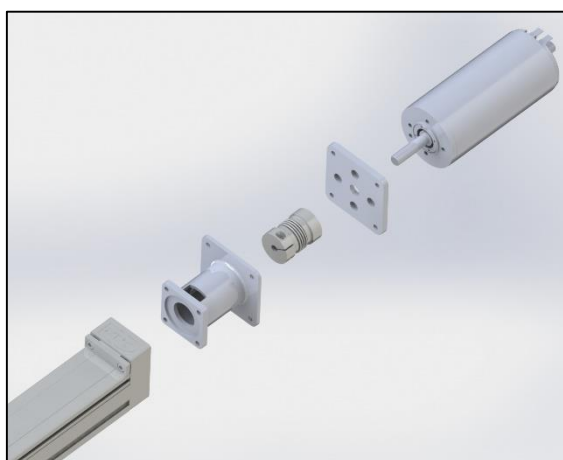


Figura 5.34 Acoblament motor

Per a fixar l'estator del motor al mòdul lineal es dissenyen dues peces d'alumini. La primera es fixa al motor i la segona al mòdul lineal, posteriorment es cargolen entre elles. La peça que es fixa al mòdul lineal té uns orificis per a poder cargolar l'acoblament MKP2 un cop estigui en el seu interior.

La figura Figura 5.34 mostra una vista explosionada de tot el sistema d'acoblament.

Per a veure més detalls d'aquestes peces se'n poden trobar els plànols a l'Annex C.

#### 5.8.4. Sistema de fixació del mòdul horitzontal a la taula de la màquina

Per a poder fixar el mòdul a la taula es dissenyen uns peus d'acer, com el que es pot veure a la Figura 5.35, que es cargolen a la taula de la màquina i que són prou alts perquè el mòdul vertical no toqui la taula de la màquina.

Per a veure més detalls d'aquests peus se'n poden trobar els plànols a l'Annex C.

Per a fixar el mòdul horitzontal a aquests peus es compren quatre unitats de "Placa de fijación - AXC 40" a l'empresa dels mòduls lineals. Aquestes peces permeten fixar el mòdul horitzontal a la part superior dels peus a través d'unes guies que té el mòdul lineal en el seu perfil.

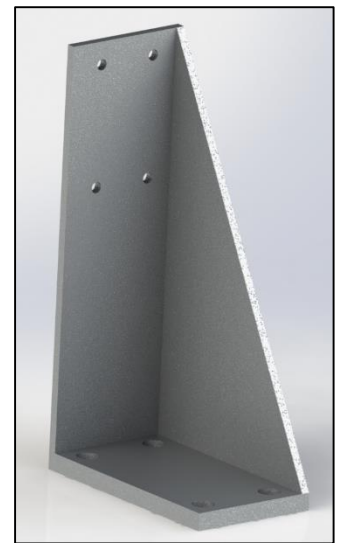


Figura 5.35 Peus

Se'n pot trobar la fitxa tècnica a l'Annex B.

Finalment per a poder fixar aquests peus es fan vuit orificis a la "Taula bancada" (Nº 00400-00958), que tal com diu el nom és la taula de la màquina.

Se'n poden trobar els plànols a l'Annex C.



## 6. Sistema pneumàtic

El sistema pneumàtic de la màquina serveix bàsicament per a subjectar la dolla amb la xapa mentre que aquestes dues giren i es solden amb la màquina.

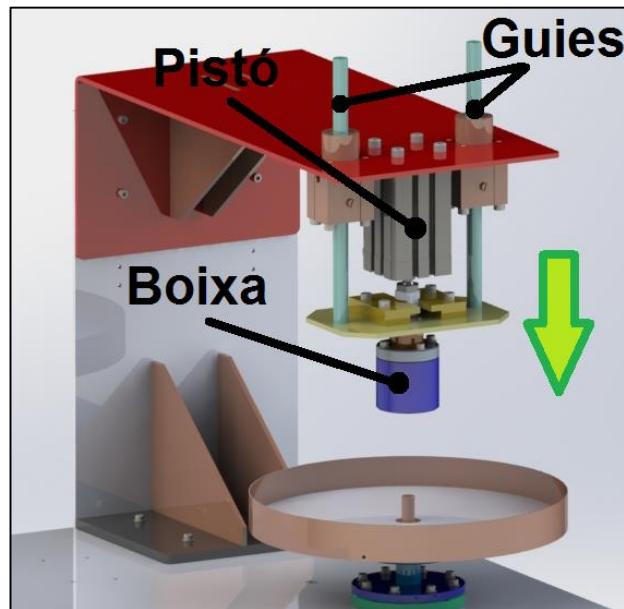


Figura 6.1 Sistema pneumàtic

Aquest sistema consisteix en un pistó pneumàtic que baixa una estructura a través d'unes guies cilíndriques, com es mostra a la Figura 6.1. Aquesta estructura té una peça (Boixa), a la part inferior, que té una punta amb forma cònica. Aquesta peça, que gira solidaria a l'adaptador, al baixar pressiona la dolla contra l'adaptador al mateix temps que la centra respecte l'eix de rotació.

### 6.1. Situació inicial

Es parteix del sistema pneumàtic pràcticament acabat, ja que es troba tot el mecanisme i l'estructura dissenyats. També ja s'ha seleccionat el pistó, que és un model de cilindre pneumàtic de doble efecte compacte ADN-40-50-A-P-A de la marca Festo. Per tant, només falta el sistema que permeti controlar l'accionament d'aquest cilindre.

### 6.2. Accionament

Per accionar el pistó pneumàtic es decideix utilitzar una electrovàlvula, ja que així es pot controlar el sistema pneumàtic elèctricament des de el controlador global de tots els sistemes de la màquina.



Tenint en compte que el cilindre pneumàtic es de doble efecte es selecciona una electrovàlvula 5/2 de la marca Festo, la mateixa que la del cilindre pneumàtic. S'escull el model MEBH-5/2-1/8-B (Nº d'article 173004), que és una vàlvula d'accionament elèctric amb recuperació mecànica a través d'una molla. Fitxa tècnica a l'Annex B.



Figura 6.2 Electrovàlvula

Es tria el model amb recuperació a través d'una molla ja que així es fa que només es necessiti donar tensió a la vàlvula quan es vulgui fer baixar el cilindre. Quan es vulgui fer pujar el cilindre només s'haurà de deixar de donar tensió i la vàlvula automàticament canviarà de posició i farà pujar el cilindre pneumàtic.

La Figura 6.3 mostra un esquema de com és el sistema pneumàtic amb aquest cilindre i amb aquesta vàlvula.

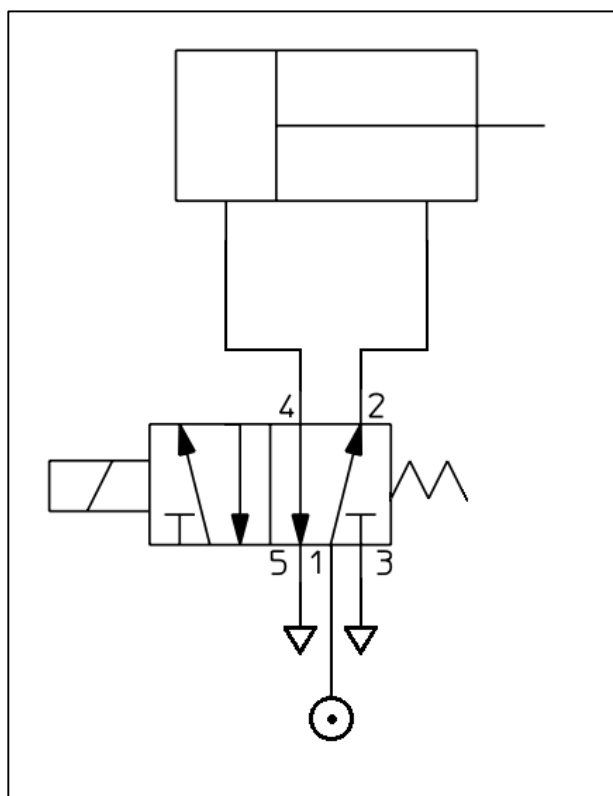


Figura 6.3 Circuit pneumàtic

## 7. Dispositiu de control global

### 7.1. Selecció del controlador global

Es necessita un sistema que pugui controlar tots els elements de la màquina, és a dir que controli el moviment dels mòduls lineals, el moviment de la taula giratòria, que activi i desactivi la pistola de soldadura i que pugui fer baixar o pujar el cilindre pneumàtic.

Per a poder controlar els motors es necessita un controlador global que es pugi comunicar amb cadascun dels controladors que té cada motor, per tant es necessita que el controlador global que s'esculli tingui un sistema de comunicació compatible amb el dels controladors dels motors.

Per a poder controlar el cilindre pneumàtic es necessita poder controlar si es dona o no tensió a l'electrovàlvula que el controla. De la mateixa manera, per activar la pistola de soldadura s'ha de poder donar tensió al commutador elèctric que l'activa. Per tant, encara que sigui a través d'un circuit intermedi, es necessita que el controlador global tingui sortides digitals.

A part de controlar el comportament dels elements de la màquina, el controlador també ha de poder comunicar-se amb l'operari que utilitza la màquina, perquè aquest pugui dir-li quin programa fer o quin model de peça es vol soldar. Per tant, en aquest controlador se li han de poder connectar perifèrics per crear una interfície d'usuari.

Després de fer una comparativa entre diferents models de sistemes, que serveixin per al control global de la màquina, es decideix escollir un microcontrolador, concretament l'Arduino Due.

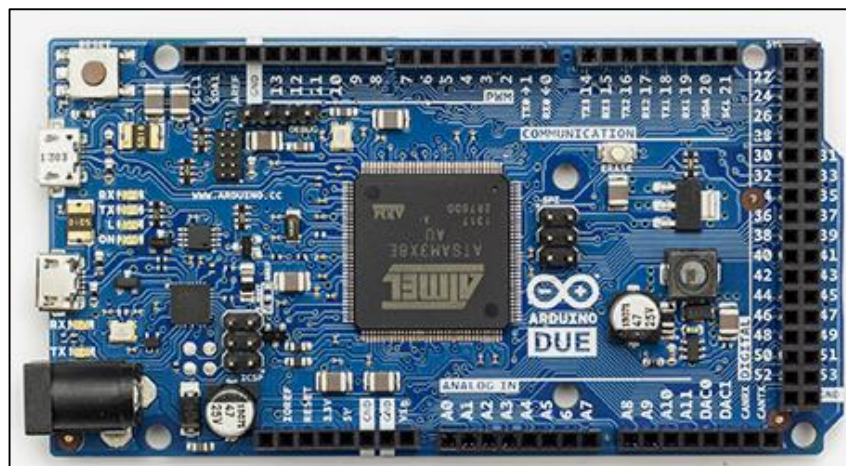


Figura 7.1 Microcontrolador Arduino Due

S'escull aquest microcontrolador, perquè s'ajusta molt bé als requeriments de control dels sistemes de la màquina. Té entrades digitals i analògiques que permetran el control de la pistola de soldadura i de l'electrovàlvula del sistema pneumàtic, també permetran la connexió de perifèrics per a la interfície d'usuari. Pel que fa a la comunicació amb els controladors dels motors, aquest microcontrolador té dos sistemes de comunicació (RS-232 i CAN) compatibles amb els que incorporen els controladors dels motors seleccionats. Encara que no fos un dels requeriments, cal dir que aquest controlador té un processador ARM Cortex-M3 permetria una velocitat de càlcul més ràpid que els altres models de la marca Arduino. A més, a part de complir els requeriments necessaris, aquest microcontrolador és de codi obert i és molt econòmic.

Si es volen consultar més detalls del microcontrolador seleccionat es poden trobar a [8].

## 7.2. Interfície d'usuari

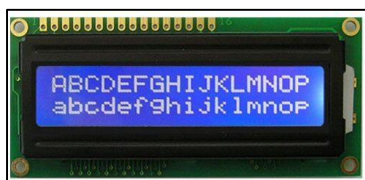


Figura 7.3 Pantalla LCD

Es vol que la interfície d'usuari sigui el més simple possible, ja que així es facilitarà l'ús de la màquina.

La idea és, que la màquina tingui una pantalla LCD i un teclat numèric, i que la memòria del

microcontrolador tingui els programes de soldadura de cadascun dels adapters. Llavors, seguint les instruccions que apareguin a la pantalla, es pugui marcar el codi de l'adapter que es vol soldar i començar el procés de soldadura.



Figura 7.2 Teclat numèric

## 8. Planificació i valoració econòmica

### 8.1. Planificació

Per a la planificació, es divideix el projecte en diferents fases, seguint els punts principals del treball.

La primera fase és el plantejament inicial del projecte. Aquesta fase és la que conté totes les activitats prèvies a començar el projecte en si. Inclou, una lectura i anàlisi del projecte original, el plantejament del projecte, la planificació del projecte i un seguit de reunions amb l'empresa.

La segona fase ja correspon a un dels punts principals del treball. És la fase en la que es fa el disseny del sistema motor-reductor-taula. Inclou, la definició dels requeriments previs que ha de tenir aquest sistema, la selecció dels seus elements, el seu modelat matemàtic i simulació, i finalment la part de modificacions mecàniques que són necessàries per a poder-lo implementar.

La tercera fase correspon amb l'altre gran part del treball, el disseny del sistema de la pistola de soldadura. Aquesta fase inclou, una definició dels requeriments previs que ha de tenir aquest sistema, la selecció dels mòduls lineals que el fan possible, la selecció dels seus motors, el seu modelat matemàtic i simulació, i finalment el disseny i les modificacions mecàniques que són necessàries per a poder-lo dur a terme.

La quarta fase correspon als objectius secundaris del treball, el disseny del sistema d'accionament pneumàtic i la selecció del controlador global de la màquina.

La cinquena, i última fase, correspon a tota la part de la redacció de la documentació del projecte, tot i que també inclou la valoració econòmica i l'estudi de l'impacte ambiental.

Seguint aquestes fases, es realitza un diagrama de Gantt, que es pot veure a la Taula 8.1, i que mostra com es reparteixen amb les seves corresponents activitats al llarg del temps en el que es realitza el projecte.

Nº	Activitat	Hores	Setembre			Octubre					Novembre					Desembre				Gener	
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
<b>Fase 1 Plantejament</b>																					
1.1	Reunions amb l'empresa	9	■	■	■																
1.2	Lectura i anàlisi del projecte original	2		■																	
1.3	Plantejament del projecte	3			■																
1.4	Planificació del projecte	3			■																
	<b>Subtotal</b>	<b>17</b>																			
<b>Fase 2 Sistema motor-reductor-taula</b>																					
2.1	Definició dels requeriments	3			■																
2.2	Selecció del sistema motor	20			■	■	■	■	■												
2.3	Modelat matemàtic i simulació	10						■	■												
2.4	Modificacions mecàniques	15							■	■											
	<b>Subtotal</b>	<b>48</b>																			
<b>Fase 3 Sistema pistola de soldadura</b>																					
3.1	Definició dels requeriments	3									■										
3.2	Selecció dels mòduls lineals	45									■	■	■	■	■	■					
3.3	Selecció del sistema motor	25													■	■					
3.4	Modelat matemàtic i simulació	20														■	■	■	■		
3.5	Disseny i modificacions mecàniques	15															■				
	<b>Subtotal</b>	<b>108</b>																			
<b>Fase 4 Accionament pneumàtic i sistema de control global</b>																					
4.1	Selecció de l'electrovàlvula pneumàtica	2																	■		
4.2	Proposta del sistema de control global	2																	■		
	<b>Subtotal</b>	<b>4</b>																			
<b>Fase 5 Documentació</b>																					
5.1	Valoració econòmica	3																	■		
5.2	Estudi de l'impacte ambiental	2																	■		
5.3	Redacció i confecció de la memòria	80																■	■		
	<b>Subtotal</b>	<b>105</b>																			
	<b>Total</b>	<b>282</b>																			

Taula 8.1 Diagrama de Gantt

## 8.2. Valoració econòmica

El pressupost d'aquest projecte es basa en el pressupost definit en el projecte original [1]. En el projecte original s'ha fet un pressupost del cost de la fabricació de la màquina fins al punt que havia estat dissenyada. A aquest pressupost se li resta el preu del sistema motor original que en aquest treball s'ha canviat, així s'obté només el cost de fabricar la part mecànica de la màquina, que inclou el cost de fabricació de totes les peces del projecte original i la mà d'obra per muntar la màquina. A partir d'aquí s'hi ha sumat el cost de tots els components que s'han escollit o dissenyat en aquest projecte, més el sou de l'enginyer que l'ha fet.

La Taula 8.2 mostra el pressupost final.

Projecte original			Total
Pressupost original			6.767,00 €
Sistema motor+reductor original			-1.559,00 €
<b>Total</b>			<b>5.208,00 €</b>

Materials		Unitats	Preu unitari	Total
Sistema pneumàtic	Electrovàlvula	1	500,00 €	500,00 €
Sistema motor taula giratòria	Reductor	1	165,09 €	165,09 €
	Motor	1	253,27 €	253,27 €
	Sensor	1	92,91 €	92,91 €
	Drive	1	475,18 €	475,18 €
	Acoblament	1	150,00 €	150,00 €
Sistema motor pistola de soldadura	Motor	2	428,00 €	856,00 €
	Sensor	2	108,36 €	216,72 €
	Drive	2	571,54 €	1.143,08 €
	Acoblament	2	150,00 €	300,00 €
Mòduls lineals	Mòdul vertical	1	380,00 €	380,00 €
	Mòdul horitzontal	1	380,00 €	380,00 €
	Finals de carrera	2	95,00 €	190,00 €
	Sistema de connexió	1	7,00 €	7,00 €
	Sistema de fixació	1	7,00 €	7,00 €
Peces dissenyades	Adaptador pistola	1	20,00 €	20,00 €
	Peus sistema pistola	2	15,00 €	30,00 €
	Adaptador motor-mòdul	2	50,00 €	100,00 €
<b>Total</b>				<b>5.266,25 €</b>

Honoraris enginyeria	Hores	Preu per hora	Total
<b>Total</b>	282	12,00 €	<b>3.384,00 €</b>

<b>TOTAL</b>	<b>13.858,25 €</b>
--------------	--------------------

Taula 8.2 Pressupost

Cal tenir en compte que el preu unitari dels components i de la mà d'obra és orientatiu i pot estar subjecte a variacions.



## 9. Impacte ambiental

L'impacte ambiental que pot causar la màquina dissenyada en aquest projecte, ja es va estudiar en el projecte original [1]. Per tant, en aquest apartat pràcticament es cita el text del projecte original amb algunes modificacions, simplificacions i ampliacions que es troben oportunes.

Aquest projecte intenta que la màquina pugi causar el mínim impacte ambiental possible durant el seu període de funcionament i posteriorment quan s'hagi de desballestar.

### 9.1. Materials

Les matèries primeres, de les que està formada la màquina, són reciclables i/o reutilitzables en gran majoria, ja que bona part de les peces són d'acer, de tal manera que en cas de desballestament, les peces es poden retornar al cicle de fabricació de l'acer. A més, cal tenir en compte que l'acer és un material resistent i que té llarga durabilitat.

En quant als motors i altres accessoris, en cas de que la màquina s'hagués de desmuntar, es podrien reutilitzar tots en altres màquines.

En quant a la pintura, en comptes d'utilitzar pintures de pols electrostàtica (amb cromat de plom, que és molt contaminant), s'utilitzarà pintura del tipus electroforesis, i dins d'aquest tipus, concretament la cataforesis, on la peça fa de càtode, (aplicant un voltatge la pintura es va enganxant a la peça). Per a la cataforesis es fa servir una pintura del tipus resina EPOXI, que està formada per un 80% d'aigua, un 18% de resina i pigment i només un 2% de dissolvents (fenoxi propanol i butil glicol). De tal manera que es pot considerar una pintura ecològica, ja que gairebé, no deixa residu (no té plom, només té una petita quantitat de dissolvent que en el procés de pintura es concentra en un dipòsit i que es porta a reciclar). També, suposa un estalvi pel que fa a la quantitat de pintura a utilitzar, ja que es pot graduar la quantitat de pintura que es vol a partir del voltatge aplicat, d'aquesta manera s'aprofita al màxim el producte.

A més, per tal d'allargar la vida de les peces es fa un tractament previ a les peces a pintar, anomenat fosfatat, que és una base de zinc microcristal·lí que proporciona una protecció anticorrosiva i fa que a la vegada la pintura s'agafi més bé a la peça.



## 9.2. Funcionament

La contaminació acústica i les vibracions que pot arribar a fer la màquina són pràcticament nul·les, a part de que si a això, s'hi afegeix que la màquina es situarà al taller on hi ha les punxonadores, es pot considerar que no generarà cap tipus de vibració o soroll apreciable per a les persones d'aquella zona, i per tant a cap zona de l'empresa.

L'impacte visual que de la màquina és petit, perquè la mateixa nau està plena de grans màquines com les punxonadores i els làsers, cosa que fa que no cridi gens l'atenció.

El consum elèctric nominal de la màquina, comptant el motor de la taula i els motors dels mòduls lineals, és d'aproximadament 100 W. Aquest consum, en comparació al de la resta de màquines que es troben a la fàbrica, és pràcticament menyspreable.

Per poder analitzar aquest consum d'una altra manera, es converteixen aquests 100 W en g/h de CO<sub>2</sub> generat pel consum elèctric d'aquesta màquina. Aquesta conversió es fa a través de les dades facilitades per la Oficina Catalana del Canvi Climàtic [9] i s'obté que per cada hora del funcionament de la màquina es generarien 26,7 g de CO<sub>2</sub>.

Si la màquina es fes funcionar de manera continua durant 8 h, una jornada de treball mitjana, s'obtindrien 214 g de CO<sub>2</sub> que només són una mica superiors al que genera de mitjana un vehicle de gasolina al recórrer un kilòmetre (178 g [10]), per tant, es pot dir que aquesta màquina no contamina excessivament.

## Conclusions

La conclusió principal del treball és que s'han complert els objectius inicialment definits satisfactòriament. S'han deixat completament definits els components que integren el sistema motor de la taula giratòria i se n'ha seleccionat un controlador. S'ha deixat definit el sistema mecànic que ha de moure la pistola de soldadura amb els reus respectius motors i controladors. S'han definit uns temps de treball molt baixos que permetran augmentar la velocitat de producció actual. I finalment s'han orientat el sistema de control global i el control del sistema pneumàtic.

A part d'aquesta conclusió principal, al llarg del treball s'han extret altres conclusions que també són importants:

- Seleccionar bé un motor per a un sistema mecànic presenta una gran dificultat, ja que s'ha d'analitzar i definir molt bé el treball que farà aquest sistema, cal marcar els seus límits de funcionament i estudiar com podrà treballar de manera continua en el temps.
- Simular sistemes dinàmics reals que presenten discontinuïtats és molt complex. S'han de saber trobar les seves limitacions, quin criteri seguir per interpretar els resultats i saber si els resultats obtinguts són vàlids o no.
- El nivell de detall i de profunditat al que es pot arribar a l'hora de dissenyar un sistema i estudiar-ne els components pot ser elevadíssim, es per això que s'ha de saber decidir fins a quin nivell es vol arribar perquè el disseny funcioni i al mateix temps surti rentable.
- És molt important adaptar-se als productes que hi ha al mercat quan es dissenya alguna cosa, ja que s'estalvia molt de volum de treball.

## Vies futures de desenvolupament

Per completar el projecte queden els següents temes pendents:

- Dissenyar el sistema de lectura de sensors.
- Programar els controladors dels motors i el controlador global.
- Dissenyar una interfície d'usuari per a poder fer funcionar la màquina.
- Dissenyar el sistema de comunicació entre els components de la màquina.
- Dissenyar la instal·lació elèctrica.
- Construir la màquina i fer-ne un seguiment.



## Agraïments

En primer lloc m'agradaria agrair a l'empresa Oliva Torras que m'hagi ofert la possibilitat de fer aquest projecte, concretament al Ferran Selga i al Ricard Homs.

També m'agradaria agrair al meu tutor del projecte, Robert Griñó, el seguiment que m'ha fet del projecte i els cops que m'ha ajudat quan m'he quedat encallat en algun punt.

Finalment, agrair a la meva família el suport que m'ha donat al llarg del projecte.

## Bibliografia

### Referències bibliogràfiques

- [1] BOIXADER, Dídac. *TFG: Màquina per a soldar Dolles*, Manresa: EPSEM. 2014.
- [2] SKF GROUP. *Bearing Calculator*,  
[<http://webtools3.skf.com/BearingCalc/selectProduct.action>, octubre de 2015]
- [3] MAXON MOTORS. *Gama de productes i botiga online*,  
[<http://www.maxonmotor.es>, d'octubre a desembre de 2015]
- [4] MAXON MOTORS. *Explicació de les dades dels sensors*,  
[[http://www.maxonmotor.es/medias/sys\\_master/root/8804422615070/SENSOREN-Das-wichtigste-ueber-SENSOREN-11-DE-EN-ES-030-031.pdf](http://www.maxonmotor.es/medias/sys_master/root/8804422615070/SENSOREN-Das-wichtigste-ueber-SENSOREN-11-DE-EN-ES-030-031.pdf), d'octubre a desembre de 2015]
- [5] UPC-ETSEIB, DEP . MÀQUINES ELECTRIQUES, *Diapositives de l'assignatura de màquines elèctriques*, Barcelona: ETSEIB 2013-2014.
- [6] UNIMOTION. *Gama de productes*,  
[<http://unimotion.eu/en/index/products/cid/29>, de novembre a desembre de 2015]
- [7] NTN-SNR. *Gama de productes*,  
[<http://www.ntn-snr.com/industry/es/es-es/index.cfm>, de novembre a desembre de 2015]
- [8] ARDUINO. *Especificacions de l'Arduino Due*,  
[<https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardDue>, gener de 2015]
- [9] GENERALITAT DE CATALUNYA, *Factor d'emissió associat a l'energia elèctrica: el mix elèctric*,  
[[http://canviclimatic.gencat.cat/ca/redueix\\_emissions/factors\\_demissio\\_associats\\_a\\_lenergia/](http://canviclimatic.gencat.cat/ca/redueix_emissions/factors_demissio_associats_a_lenergia/), gener de 2015]
- [10] GOBIERNO DE ESPAÑA, INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE LA ENERGIA. *Guía de vehículos turismo de venta en españa, con indicación de consumo y emisiones de CO<sub>2</sub>*. 12ª Edición Octubre, 2015.

## Bibliografia complementaria

- [1] MAXON MOTORS. Explicació de les dades dels controladors, [[http://www.maxonmotor.es/medias/sys\\_master/root/8804421632030/Steuerungen-Das-wichtigste-ueber-Steuerungen-11-DE-EN-ES-034-035.pdf](http://www.maxonmotor.es/medias/sys_master/root/8804421632030/Steuerungen-Das-wichtigste-ueber-Steuerungen-11-DE-EN-ES-034-035.pdf), d'octubre a desembre de 2015]
- [2] VILLÀ, RICARD. *Dinàmica de sistemes*. Barcelona: ETSEIB, Publicació número 248, curs 2012/2013.
- [3] OGATA, KATSUHIKO. *Ingeniería de control moderna*, Quarta edició, Madrid 2003.
- [4] TRACEPARTS INC. *Directori de components CAD*. [<http://www.tracepartsonline.net/>, d'octubre a desembre de 2015]
- [5] JAKOB ANTRIEBSTECHNIK, *Catàleg d'acoblements pels eixos dels motors*, [<http://www.jakobantriebstechnik.de/>, d'octubre a desembre de 2015]