

ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA I CIÈNCIES EXPERIMENTALS

MÀSTER EN EFICIÈNCIA ENERGÈTICA I SOSTENIBILITAT

**AUTOMATITZACIÓ DEL PROCEDIMENT DE DEPOSICIÓ
DE CAPES PRIMES DE MATERIALS PER A LA
PRODUCCIÓ D'HIDROGEN MITJANÇANT
FOTOHIDRÒLISI I PER A LA FABRICACIÓ DE
CÈL·LULES SOLARS**

Autor: Pablo Grajeda i Pérez

Director: Francisco Fabregat i Santiago

Castelló, novembre de 2014

AGRAÏMENTS

Fer un treball d'aquestes característiques sempre és llarg i complicat, i sense gent que t'ajude resulta complicat. Vull agrair al a meua família la paciència i l'ajuda, en especial a ma mare que sempre té un somriure per a dedicar-me. També als amics, per la comprensió pel temps que no els he pogut dedicar i els ànims continus.

A Francisco Fabregat i Rafael Sánchez, per proposar-me la idea d'aquest projecte, que ha sigut apassionant, i per creure en les idees presentades. I com no, a Jose Pedregosa, tot un suport continu sense l'ajuda del qual en el disseny gràfic i estètic, el projecte no lluiria igual.

RESUM

El ràpid augment de les aplicacions de materials recoberts amb capes nanomètriques ha provocat un ràpid desenvolupament en les tècniques de deposició. Entre la gran varietat de possibilitats per a realitzar capes primes, una de les tècniques que combina una bona qualitat d'acabat final amb un baix cost relatiu és la tècnica d'esprai pirolític (*spray pyrolysis* en anglès). En aquesta tècnica s'atomitza una dissolució del material del qual es vol fer la deposició sobre una superfície calenta, que provoca que es produïska l'adherència i creixement de la capa.

Aquesta tècnica s'utilitza en diverses línies d'investigació en el Grup de Dispositius Fotovoltaics i Optoelectrònics de la Universitat Jaume I. La gran limitació actual és que el procés es realitza manualment, mitjançant una pistola d'aire comprimit i mostra per mostra, fet que provoca una sèrie de problemes des del punt de vista de l'eficiència. Primerament es produeix una gran pèrdua de dissolució i aire comprimit, ja que el conus de la pistola és molt més gran que la mostra; així com energia elèctrica, ja que és necessari mantenir les mostres a 450°C durant la deposició i assecat. També implica una gran despesa de temps per part de l'investigador, ja que després de realitzar cada deposició cal esperar uns minuts per tal que es produïska la fixació de la capa. Per últim, de cara a la investigació pròpiament dita, la deposició manual no assegura que les capes siguin totalment uniformes, comparables i reproduïbles. Aquest últim fet depèn de l'experiència de l'investigador en la tècnica i implica diferències en les mostres.

Atès que s'espera que les investigacions en aquest camp tinguin una llarga durada i és d'esperar que hi haja en un futur noves línies d'investigació relacionades amb la tecnologia de nanocapes, es justifica el disseny d'un automatisme com el que proposa aquest treball i que haurà de complir els següents objectius:

- Reducció del material (quantitat de dissolució) emprat en el procés de deposició.
- Reducció de l'aire comprimit gastat en l'execució.
- Reducció del consum d'energia elèctrica en el procés.
- Optimització del temps de l'investigador.
- Augment de la velocitat de creació de mostres.
- Harmonització de la grossària de les capes depositades i augment de la repetibilitat de la tècnica.
- Flexibilitat d'operació (possibilitat de variar paràmetres).

La solució presentada respon a una màquina automàtica d'atomització que es basa un broquet polvoritzador que atomitza dissolució en forma de feix pla. Per tal que es pugui aplicar sobre mostres grans, el broquet va instal·lat en un pont mòbil de moviment rectilini accionat per motor, que recorre les platines on es depositarà la dissolució. Un sistema pneumàtic controlat electrònicament alimenta el broquet d'aire a pressió i dissolució per al correcte funcionament.

L'estructura es realitza mitjançant peces amb flexibilitat constructiva, per tal la seua geometria pugui ser adaptada si canvien les condicions d'operació. El control se soluciona mitjançant l'electrònica basada en Arduino combinada amb LabView, de forma que l'investigador pugui canviar fàcilment els paràmetres d'operació.

RESUMEN

El rápido aumento de las aplicaciones de materiales recubiertos con capas nanométricas ha provocado un rápido desarrollo en las técnicas de deposición. Entre la gran variedad de posibilidades para realizar capas delgadas, una de las técnicas que combina una buena calidad de acabado final con un bajo coste relativo es la técnica de espray pirolítico (*spray pyrolysis* en inglés). En esta técnica se atomiza una disolución del material del que se quiere hacer la deposición sobre una superficie caliente, que provoca que se produzca la adherencia y crecimiento de la capa.

Esta técnica se utiliza en varias líneas de investigación en el Grupo de Dispositivos Fotovoltaicos y Optoelectrónicos de la Universidad Jaume I. La gran limitación actual es que el proceso se realiza manualmente, mediante una pistola de aire comprimido y muestra por muestra, lo que provoca una serie de problemas desde el punto de vista de la eficiencia. Primeramente se produce una gran pérdida de disolución y aire comprimido, ya que el cono de la pistola es mucho mayor que la muestra; así como energía eléctrica, ya que es necesario mantener las muestras a 450°C durante la deposición y secado. También implica un gran gasto de tiempo por parte del investigador, ya que después de realizar cada deposición hay que esperar unos minutos para que se produzca la fijación de la capa. Por último, de cara a la investigación propiamente dicha, la deposición manual no asegura que las capas sean totalmente uniformes, comparables y reproducibles. Este último hecho depende de la experiencia del investigador en la técnica e implica diferencias en las muestras.

Dado que se espera que las investigaciones en este campo tengan una larga duración y es de esperar que haya en un futuro nuevas líneas de investigación relacionadas con la tecnología de nanocapas, se justifica el diseño de un automatismo como el que propone este trabajo y que deberá cumplir los siguientes objetivos:

- Reducción del material (cantidad de disolución) empleado en el proceso de deposición.
- Reducción del aire comprimido gastado en la ejecución.
- Reducción del consumo de energía eléctrica en el proceso.
- Optimización del tiempo del investigador.
- Aumento de la velocidad de creación de muestras.
- Armonización del espesor de las capas depositadas y aumento de la repetitividad de la técnica.
- Flexibilidad de operación (posibilidad de variar parámetros).

La solución presentada responde a una máquina automática de atomización que se basa en una boquilla pulverizadora que atomiza disolución en forma de haz plano. Para que se pueda aplicar sobre muestras grandes, la boquilla se instala en un puente móvil de movimiento rectilíneo accionado por motor, que recorre las pletinas donde se depositará la disolución. Un sistema neumático controlado electrónicamente alimenta la boquilla de aire a presión y disolución para el correcto funcionamiento.

La estructura se realiza mediante piezas con flexibilidad constructiva, para su geometría pueda ser adaptada si cambian las condiciones de operación. El control se soluciona mediante la electrónica basada en Arduino combinada con LabView, de forma que el investigador pueda cambiar fácilmente los parámetros de operación.

ÍNDIX DE TAULES

Taula 1: Exponent "n" per als diferents tipus de broquets polvoritzadors de l'empresa <i>Spraying Systems Co.</i>	4
Taula 2: Efecte de la pressió, capacitat i tipus de patró d'esprai en la grandària de gota per als broquets de <i>Spray Systems Co.</i>	6
Taula 3: Tipus de gota en funció de la grandària.	7
Taula 4: Valor de K en funció de les unitats emprades	7
Taula 5: Ordre de fases per a un motor de dues bobines. L'angle de pas serà de 90°, amb un semipas de 45° quan es magnetitzen les dues bobines.	8
Taula 6: Funcions d'interès en el present projecte.....	18
Taula 7: Requeriments tècnics de disseny de l'automatisme.....	23
Figura 23 i taula 8: Característiques de la combinació d'aspersió SUJF1. La combinació està formada pel broquet de líquid J2850 i el broquet d'aire J73420.....	32
Taula 9: Distàncies necessàries per a una cobertura de 160 i 240 mm a diverses pressions	33
Taula 10 i figura 24: Cos del broquet JAU compact i característiques.....	33
Taula 11: Característiques de les vàlvules utilitzades en el procés. Totes dues són de la marca <i>Spray Systems.</i>	34
Taula 12: Característiques del motor 42BYG.....	36
Taula 13: Càlcul del pes que arrossegarà el motor.....	37
Taula 14: Velocitats del mecanisme per a diferents temps d'atomització.....	39
Taula 15 i figura 31: Font d'alimentació. Característiques de disseny.....	40
Taula 16: Paràmetres de control del cicle	43
Taula 17: Full d'operacions en cicle unidireccional	44
Taula 18: Full d'operacions en cicle bidireccional.....	45
Taula 19: Full d'operacions en cicle de neteja, mode amb temps predeterminat.	46
Taula 20: Full d'operacions en cicle de neteja, mode de temps infinit.....	46
Taula 21: Explicació del funcionament dels elements de la columna esquerra del panells de control (opcions de control i de configuració)	53
Taula 22: Explicació del funcionament dels elements de la columna dreta del panells de control (dades, indicadors, encesa i apagat de la màquina)	54
Taula 23: Seccions de codi d'interès del mode en espera.....	59
Taula 24: Seccions de codi d'interès del mode bidireccional.....	60
Taula 25: Seccions de codi d'interès del mode unidireccional i de neteja.....	61
Taula 26: Pressupost per unitats funcionals. Tots els preus estan indicats en euros i inclouen IVA.....	69
Taula 27: Pressupost per empreses comercialitzadores. Tots els preus estan indicats en euros i inclouen IVA.....	72
Taula 28: Característiques del transistor BD135	74
Taula 29: Resistències comercials, amb una tolerància del 10% o 5%.....	76

ÍNDIX DE FIGURES

Figura 1: Canvis i transformacions en les gotes atomitzades durant el transport en funció de la temperatura del substrat (esquerra) i de la grandària inicial de la gota (dreta).....	2
Figura 2: Temperatura en funció de la distància a la placa calefactada, per a diferents valors de temperatura	3
Figura 3: Feix cònic de polvorització (esquerra) i exemples de tipus de patrons d'esprai....	5
Figura 4: Triangle rectangle	5
Figura 5: Representació de la pèrdua de cobertura de l'esprai respecte de la teòrica.....	6
Figura 6: Mostra gràfica de la magnetització de l'estator i la posició del rotor conforme realitza una revolució (números 1-8 corresponents a la taula 5).....	9
Figura 7: Esquema de funcionament d'un motor pas a pas de reluctància variable	9
Figura 8: Exemples de motors de reluctància variable amb diferent combinació de pols a l'estator i el rotor. Esquerra, motor de tres fases amb 6 pols a l'estator i 4 al rotor. Centre, motor de quatre fases 8 pols a l'estator i 6 al rotor. Dreta, motor de 3 fases amb 12 pols a l'estator i 8 pols al rotor.....	10
Figura 9: Il·lustració de la solució adoptada en els motors de reluctància per a reduir l'angle de pas: la divisió en dents dels pols i el rotor.....	11
Figura 10: Motor híbrid (esquerra) i rotor d'un motor híbrid pas a pas, distribució de la polarització (dreta).....	11
Figura 11: Vista detallada del rotor (esquerra) i de l'estator d'un motor pas a pas híbrid.	12
Figura 12: Esquema de funcionament del motor pas a pas híbrid.....	12
Figura 13: Motor pas a pas híbrid de 2 fases.....	13
Figura 14: Parts de la placa Arduino.....	14
Figura 15: Exemple de programa bàsic en Arduino, sense instruccions per al preprocessador. Totes les funcions que apareixen es poden trobar en el següent apartat.	18
Figura 16: Exemple de panell frontal (esquerra) i diagrama de blocs (dreta), corresponents a diferents projectes.....	19
Figura 17: Vista general de la solució constructiva de màquina (sense sistema motor ni sistema d'atomització).....	27
Figura 18: Placa calefactora vitroceràmica escollida (model PV 300). Característiques tècniques	28
Figura 19: Perfils i elements <i>Makeblock</i> . Amb aquestes peces és senzill modificar l'estructura i reconstruir la màquina.....	29
Figura 20: Detalls constructius del pont mòbil.	30
Figura 21: Esquema del sistema pneumàtic.....	31
Figura 22: Esquema de muntatge de les connexions del sistema hidràulic i pneumàtic.....	32
Figura 23 i taula 8: Característiques de la combinació d'aspersió SUJF1. La combinació està formada pel broquet de líquid J2850 i el broquet d'aire J73420.....	32
Taula 10 i figura 24: Cos del broquet JAU compact i característiques.....	33
Figura 25: Dimensions de l'element de fixació del cos de broquet	34
Figura 26: Esquema bàsic del sistema de moviment del carro (vista lateral de la màquina)	35
Figura 27: Geometria bàsica de la corretja i la roda de transmissió	35
Figura 28: Parell motor del motor 42BYG en funció de la velocitat	36

Figura 29: Esquema orientatiu de muntatge del pont mòbil amb el motor, el carro i els engranatges. En el cas final del projecte els rail són de menor llargària i el carro és de diferent construcció.....	36
Figura 30: Placa base Meduino (esquerra) i controladora de motors pas a pas Microstep (dreta).....	39
Taula 15 i figura 31: Font d'alimentació. Característiques de disseny.....	40
Figura 32: Final de carrera utilitzat (de rodet).	40
Figura 33: Esquema de connexió elèctric de la instal·lació. En el pin 13 de la placa s'utilitza un LED, però com que està integrat en la mateixa placa no cal fer connexions.	41
Figura 34: Situació de les planxes de metacrilat de protecció. Les fletxes apunten a la cara interior de dos costats de l'estructura. En les dues cares restants es faria la mateixa col·locació.	42
Figura 35: Panell de control de la màquina en Labview.....	52
Figura 36: Fonts de variabilitat en la deposició de dissolució.	65
Figura 37: Transistors de la sèrie BD135/137/139	73
Figura 38: Model tèrmic transistor	74
Figura 39: Potència dissipada en funció de la temperatura (esquerra). Àrea de seguretat de funcionament (dreta).....	75
Figura 40: Guany en funció del corrent de col·lector (esquerra). Voltatge base-emissor en funció del corrent de col·lector (dreta)	75

ÍNDEX

AGRAÏMENTS	i
RESUM	ii
RESUMEN	iii
ÍNDIX DE TAULES	iv
ÍNDIX DE FIGURES	v
ÍNDIX	vii
1. INTRODUCCIÓ	1
1.1. Motivació i context del projecte	1
1.2. Objectiu del projecte	2
1.3. Organització de la memòria	2
2. FONAMENTS TEÒRICS	1
2.1. tècnica de deposició de capes primes per piròlisis de solució atomitzada	1
2.1.1. Introducció	1
2.1.2. La deposició pirolítica mitjançant polvorització.	2
Atomització de la dissolució precursora	2
Transport de les gotes a través de l'aerosol	2
Descomposició de la dissolució precursora	3
2.2. Sistema d'atomització	4
2.2.1. Cabal	4
2.2.2. Cobertura	5
2.2.3. Grandària de gota	6
Impacte sobre la superfície	7
2.3. Motors pas a pas	7
2.3.1. Tipus de motors i principi de funcionament	7
D'imant permanent	8
De reluctància variable	9
Híbrids	11
2.4. Arduino	14
2.4.1. Descripció de la placa	14
Alimentació	15
Pins d'alimentació	15
Entrades i eixides	15
2.4.2. El llenguatge de programació d'Arduino	15
Variables:	15
Sintaxis bàsica	16
Estructures de control	16
Funcions	17
Estructura general del programa	17
2.4.3. Funcions d'interès en l'aplicació considerada	18

2.5. Labview	19
2.5.1. Panell frontal	19
2.5.2. Diagrama de blocs	20
3. PROCEDIMENT DE DISSENY	21
3.1. Procés actual	21
3.2. Requeriments de l'automatisme	22
3.2.1. Requeriments de disseny	22
Funcionament altament automàtic	22
Repetibilitat	22
Eficiència	22
Uniformitat	22
Flexibilitat	22
Senzillesa i control d'errors	22
3.3. Requeriments tècnics	23
3.4. Procediment de disseny	23
Fase 1: Tria de placa calefactada	23
Fase 2: Tria del sistema atomitzador	23
Fase 3: Determinació del moviment relatiu	24
Fase 4: Selecció dels elements de control	24
Fase 5: Dimensionament de l'estructura	24
Fase 6: Desenvolupament del programa de control	24
Fase 6: Selecció dels components de les instal·lacions	25
Fase 7: Proteccions i carcassa	25
4. DESCRIPCIÓ DE LA SOLUCIÓ ADOPTADA	27
4.1. Descripció general	27
4.2. Descripció detallada de cada secció i selecció d'elements	28
4.2.1. Placa calefactora	28
4.2.2. Estructura	29
4.2.3. Pont mòbil	30
4.2.4. Sistema atomitzador	31
4.2.5. Sistema motor	35
4.2.6. Sistema electrònic de control	39
4.2.7. Proteccions	42
4.3. Paràmetres de control del cicle	43
4.4. Descripció dels cicles d'operació	43
4.4.1. Cicle d'operació en mode unidireccional	44
4.4.2. Cicle d'operació en mode bidireccional	45
4.4.3. Cicle d'operació en mode de neteja	46
Mode amb temps predeterminat	46
Mode amb temps infinit	46

5. PROGRAMA DE CONTROL	47
5.1.1. Programa de control en llenguatge Arduino	47
5.1.2. Programa de control en Labview	51
Funcionalitat: opcions de control (columna esquerra)	53
Dades, indicadors i control d'execució (columna dreta)	54
Descripció general del diagrama de blocs	55
Descripció d'algunes seccions d'interès del diagrama de blocs	59
6. RESULTATS	63
6.1.1. Funcionament altament automàtic	63
6.1.2. Repetibilitat	63
6.1.3. Eficiència	64
6.1.4. Uniformitat	65
6.1.5. Flexibilitat	65
6.1.6. Senzillesa i control d'errors	66
6.1.7. Valoració global	66
7. PRESSUPOST	67
7.1.1. Pressupost per unitats funcionals	67
7.1.2. Pressupost per empreses comercialitzadores	70
ANNEX I: CÀLCULS ELECTRÒNICS	73
Selecció del circuit amplificador	73
Càlcul del transistor	73
Càlcul de la resistència de protecció per als transistors	75
ANNEX II: PLÀNOLS	77
Plànols de les peces utilitzades de <i>Makeblock</i>	77
Plànols constructius de l'estructura	85

1. Introducció

1.1. MOTIVACIÓ I CONTEXT DEL PROJECTE

La investigació sobre noves tecnologies comporta una fase experimental on els procediments d'execució són fonamentalment artesanals i amb poca eficiència en l'ús de materials i energia. En eixa fase l'atenció se centra sobre el producte final i no tant sobre l'optimització dels recursos emprats en el procés. No obstant això, quan les investigacions es plantegen a llarg termini fins i tot en la fase d'investigació pot ser necessari el desenvolupament d'instal·lacions i maquinària millorada, especialment quan aquesta és flexible i pot ser aplicada a futurs requeriments.

Actualment la Universitat Jaume I té dues línies d'investigació en el Grup de Dispositius Fotovoltaics i Optoelectrònics que precisen de l'aplicació de capes primes sobre mostres. Per una banda, s'estudia una tècnica de fotohidròlisi que permet, submergida en aigua, la generació d'hidrogen a partir de la llum. Aquest procés rep el nom de fotosíntesi artificial i precisa de l'aplicació de nanocapes d'hematites (Fe_2O_3) sobre les mostres d'estudi. Per altra, s'estan estudiant la producció d'energia a base cèl·lules solars basades perovskita, que precisa de la deposició sobre les mostres d'estudi de diòxid de titani (TiO_2). Cada mostra és una platina de vidre de 15x15 mm.

El ràpid augment de les aplicacions de materials recoberts amb capes nanomètriques ha provocat un ràpid desenvolupament en les tècniques de deposició. Entre la gran varietat de possibilitats per a realitzar capes primes, una de les tècniques que combina una bona qualitat d'acabat final amb un baix cost relatiu és la tècnica d'esprai pirolític (*spray pyrolysis* en anglès). En aquesta tècnica s'atomitza una dissolució del material del qual es vol fer la deposició sobre una superfície calenta, que provoca que es produïska l'adherència i creixement de la capa.

La gran limitació actual és que el procés es realitza manualment, mitjançant una pistola d'aire comprimit i mostra per mostra, fet que provoca una sèrie de problemes des del punt de vista de l'eficiència. Primerament es produeix una gran pèrdua de dissolució i aire comprimit, ja que el conus de la pistola és molt més gran que la mostra; així com energia elèctrica, ja que és necessari mantenir les mostres a 450°C durant la deposició i assecat. També implica una gran despesa de temps per part de l'investigador, ja que després de realitzar cada deposició cal esperar uns minuts per tal que es produïska la fixació de la capa. Per últim, de cara a la investigació pròpiament dita, la deposició manual no assegura que les capes siguin totalment uniformes, comparables i reproduïbles. Aquest últim fet depèn de l'experiència de l'investigador en la tècnica i implica diferències en les mostres.

Aquestes limitacions justifiquen la recerca d'un canvi en la forma d'efectuar el procés actual, per al qual serà necessari implementar una automatització.

1.2. OBJECTIU DEL PROJECTE

En el present treball es desenvolupa una màquina per tal d'optimitzar el procés de deposició de capes primes actual. En particular, s'automatitzarà aquest procés i es desenvoluparà una maquinària capaç de complir els següents objectius:

- Reducció del material (quantitat de dissolució) emprat en el procés de deposició.
- Reducció de l'aire comprimit gastat en l'execució.
- Reducció del consum d'energia elèctrica en el procés.
- Optimització del temps de l'investigador.
- Augment de la velocitat de creació de mostres.
- Harmonització de la grossària de les capes depositades i augment de la reproduïbilitat de la tècnica.
- Flexibilitat d'operació (possibilitat de variar paràmetres).

Així, amb aquest projecte s'espera optimitzar els recursos de l'UJI en processos actuals i futurs de deposició de capes primes.

1.3. ORGANITZACIÓ DE LA MEMÒRIA

La memòria d'aquest treball es troba estructurada de la següent forma:

- En el punt 2 estan explicats els fonaments teòrics que seran necessaris per a la correcta comprensió dels elements que s'han dissenyat.
- En el punt 3 s'explica el procediment que s'ha utilitzat per a arribar a la solució adoptada. Des de l'estudi del procés actual i les limitacions que té, passant pels requisits de disseny i acabant pel procés temporal de disseny.
- El punt 4 és clau en el projecte i presenta la solució adoptada per al cas estudiat. Primerament es fa una descripció general i després s'aprofundeix en els diferents elements que componen la màquina. Per últim es descriuen els paràmetres de d'operació i els cicles de control dissenyats.
- En el punt 5 s'expliquen els programes de control dissenyats per a la maquinària. Primerament es dona un programa en llenguatge escrit Arduino, i després un programa fet en Labview que té més possibilitats de control i ofereix un entorn més senzill a l'usuari.
- El punt 6 és una exposició dels resultats obtinguts amb el disseny i una valoració dels objectius complits amb la solució adoptada.
- Per últim es dona un pressupost del projecte en el punt 7.

Fora de la numeració es donen una sèrie d'annexos que expliquen alguns càlculs efectuats i plànols de construcció.

2. Fonaments teòrics

Es presenten en aquest punt els fonaments teòrics que seran necessaris per a la correcta comprensió dels elements que s'han dissenyat

2.1. TÈCNICA DE DEPOSICIÓ DE CAPES PRIMES PER PIRÒLISIS DE SOLUCIÓ ATOMITZADA

2.1.1. Introducció

Cada volta són més les necessitats de productes amb capes primes, fet que ha desenvolupat en pocs anys un ventall de tecnologies encaminades a la fabricació d'aquestes capes. Fonamentalment, l'avanç correspon a la necessitat d'incorporar nous productes i dispositius aplicables a les indústries òptiques i electròniques, que ha anat molt lligat a la capacitat tecnològica de produir capes primes. A banda, s'ha avançat en el coneixement de la física i química de les pel·lícules, superfícies, interfases i microestructures, i també en instrumentació analítica.

Les tecnologies de deposició són bàsicament físiques o químiques, i tenen un gran ventall que podem classificar:

Mètodes físics

- Evaporació (reactiva, al buit, per feixos d'electrons...).
- Epitàxia de feixos moleculars (MBE, per les sigles en anglès *Molecular Beam Epitaxy*).

Mètodes fisicoquímics

- Polvorització catòdica (*Sputtering* de díode, reactiu, magnètic, de polarització...)
- Processos tèrmics de formació (polimerització, oxidació...)
- Processos de plasma (multimagnètic, ablació, MIBERS, ECR...)

Mètodes químics en fase gasosa

- Deposició química en fase vapor (CVD, MOCVD, APCVD...)
- Epitàxia en fase vapor (VPE, per les sigles en anglès *Vapour Phase Epitaxy*).
- Implantació iònica.

Mètodes químics en fase líquida

- Electrodeposició (anodització, per desplaçament, per reducció...).
- Epitàxia en fase líquida (LPE, per les sigles en anglès *Liquid Phase Epitaxy*).
- Tècniques mecàniques (immersió, centrifugació, polvorització...)

De totes aquestes tècniques, la utilitzada per al procés és una tècnica mecànica de polvorització. En particular rep el nom de deposició pirolítica mitjançant polvorització (*spraying pyrolysis*).

2.1.2. La deposició pirolítica mitjançant polvorització.

El mètode emprat en aquest cas és senzill conceptualment i es basa en la piròlisi d'una dissolució polvoritzada en gota de mínima grandària (atomització).

Els avantatges que presenta aquesta tècnica respecte d'altres similars són:

- Baix cost.
- Senzillesa constructiva i de control.
- És possible el recobriment de geometries complexes.
- No són necessàries temperatures excessivament altes (entre 250°C i 500°C en general).
- Les capes obtingudes són de gran qualitat i relativament uniformes.

Aquestes característiques el fan un procediment interessant per a aquelles aplicacions en què és practicable. Bàsicament té les següents etapes:

1. Atomització de la dissolució precursora.
2. Transport de les gotes a través de l'aerosol.
3. Descomposició de la dissolució precursora i inici i creixement de la pel·lícula.

Analitzarem amb més deteniment aquestes tres etapes.

Atomització de la dissolució precursora

Aquesta fase es realitza, normalment, amb tècniques ultrasòniques, electrostàtiques o d'aire a pressió. Aquesta última resulta la de més facilitat per a la producció, i és la que resulta d'interès per al present projecte. En l'atomització per aire a pressió, s'utilitza la pressió de l'aire d'alimentació per tal de provocar un corrent d'alta velocitat que trenca la unitat del fluid de la dissolució. Es genera així un aerosol format de fines partícules líquides que es projecta cap a la superfície.

Les característiques específiques del procés d'atomització seran vistes en l'apartat 2.2.

Transport de les gotes a través de l'aerosol

Una volta atomitzada la dissolució, viatge a través de l'ambient. La velocitat inicial està fixada per l'atomitzador, i s'intenta que el major nombre possible de gotes arriben a la superfície a cobrir. No obstant això, de camí les partícules pateixen canvis. En la Figura 1 podem observar dits canvis.

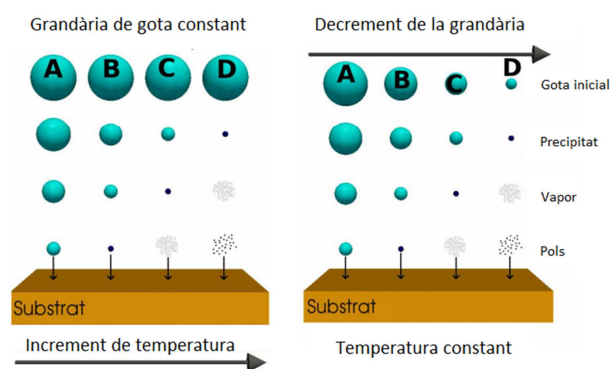


Figura 1: Canvis i transformacions en les gotes atomitzades durant el transport en funció de la temperatura del substrat (esquerra) i de la grandària inicial de la gota (dreta).

Durant el trajecte cap a la superfície, les gotes estan sotmeses a 4 forces, que corresponen a:

- *Força gravitatòria*: espenta a les partícules cap a baix. Aquesta força només depèn de la massa.
- *Força electrostàtica*: Només és aplicable en els sistemes d'esprai pirolític que estan sotmesos a un camp elèctric, on pot ser la força dominant de transport. No és el cas de l'atomització per aire a pressió estudiada en aquest treball.
- *Força de Stokes*: És la força de fricció entre l'aire i la superfície de les partícules. Depèn bàsicament de la grandària de la gota i la velocitat. Com més gran siga la gota i major la velocitat, major serà aquesta força de fregament, segons:

$$F_s = 6 \cdot \pi \cdot \eta_a \cdot r \cdot (v_g - v_a) \left(1 + \frac{3}{8} Re\right)$$

On η_a és la viscositat de l'aire, v_g és la velocitat de la gota, v_a és la velocitat de l'aire i Re és el número de Reynolds.

- *Força termoforesca*: És una força que provoca la reducció significativa de la velocitat de les gotes quan s'aproximen a la superfície calfada. Aquesta força depèn del gradient tèrmic en l'ambient de transport i, per tant, els efectes de difusió de calor per convecció influeixen en el valor. A partir de 5 o 7 mm des de la superfície calfada el valor no és significatiu (veure Figura 2), ja que el gradient és insignificant, però a partir d'eixe moment comença a dominar sobre la gravetat. L'equació d'aquesta força és:

$$F_t = \frac{3\pi \cdot \eta_a^2 r}{\rho_a} \cdot \frac{3\kappa_a}{2\kappa_a + \kappa_g} \cdot \frac{\nabla(T_a)}{T_a}$$

On η_a , ρ_a , κ_a i T_a són la viscositat, la densitat, la conductivitat tèrmica i la temperatura de l'aire respectivament; i κ_g és la conductivitat tèrmica de la gota. Aquesta equació és vàlida per radis de gota molt superiors a la grandària de la molècula.

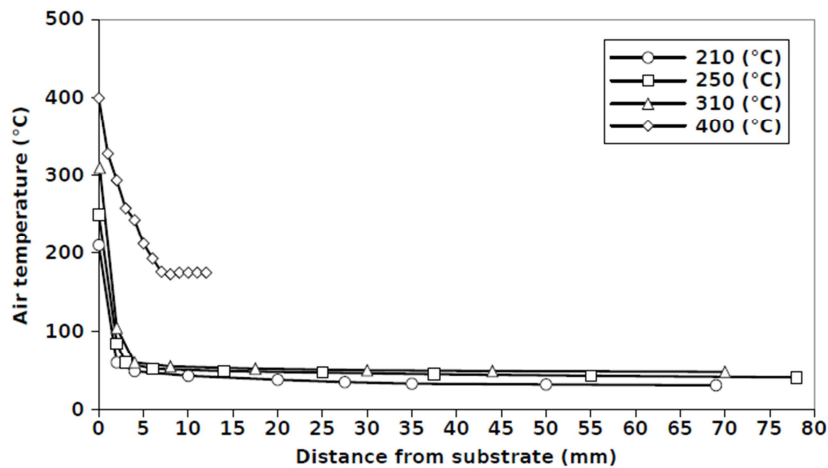


Figura 2: Temperatura en funció de la distància a la placa calefactada, per a diferents valors de temperatura.

Descomposició de la dissolució precursora

Com hem pogut observar en l'apartat del transport, les gotes pateixen uns canvis durant el trajecte cap a la superfície. Quan l'ambient del procés provoca que es produísca l'evaporació abans d'arribar al substrat, es produirà una precipitat ràpidament. En el

moment en què el precipitat es troba en la proximitat de la superfície, és convertit en un estat de vapor on es produeix una reacció heterogènia amb els següents passos:

- Les molècules de reactant es difonen per la superfície.
- Es produeix l'adsorció d'algunes de les esmentades molècules
- Es produeix una difusió superficial i una reacció química, de forma que s'incorpora el reactant a l'entramat preexistent.
- Desorció i difusió de les molècules des de la superfície.

És una reacció que s'assembla molt a la deposició química en fase de vapor (CVD), que produeix una capa d'alta qualitat i una gran probabilitat d'adherència de les partícules.

2.2. SISTEMA D'ATOMITZACIÓ

Atomitzar un líquid és trencar-lo en xicotetes gotes

2.2.1. Cabal

La relació entre pressió i cabal per a un broquet determinat, ve donada per comparació amb una situació coneguda com:

$$\frac{Q_1}{Q_2} \approx \frac{(P_1)^n}{(P_2)^n}$$

On Q és el cabal, P la pressió d'alimentació i n depèn de les característiques del broquet. En particular, per als broquets del fabricant *Spraying Systems*:

Tipus de broquet	Exponent "n"
- De conus buit (tots)	
- De conus sòlid sense deflector d'entre 15° i 30° d'angle de feix	
- De conus de feix pla (tots)	0,50
- De raig sòlid (tots)	
- En espiral (tots)	
- Accessoris i conduccions	
- De conus sòlid (tipus estàndard, quadrat, ovalat i de gran capacitat)	0,46
- De conus sòlid (de gran amplitud i quadrat de gran amplitud)	0,44

Taula 1: Exponent "n" per als diferents tipus de broquets polvoritzadors de l'empresa *Spraying Systems Co.*

Si el líquid atomitzat no és aigua, cal fer una correcció en el cabal en base a la seua densitat relativa, de la següent forma:

$$Q_2 = \frac{Q_2(\text{aigua})}{\sqrt{\rho_r}}$$

2.2.2. Cobertura

Els broquets atomitzadors fan diferents tipus de patrons d'esprai en funció de l'aplicació. El més comú és el de feix cònic normal, però són nombroses les possibilitats.

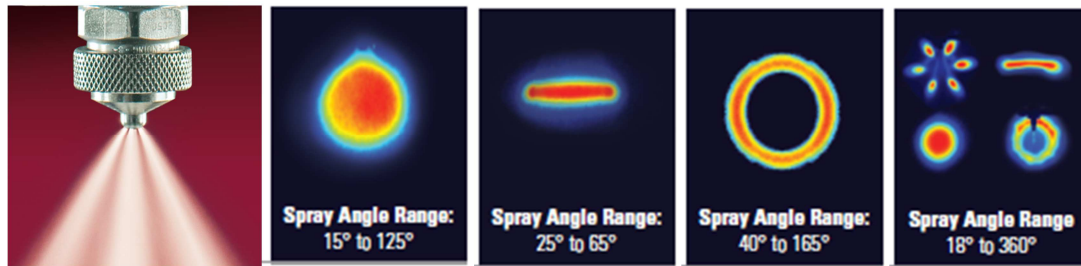


Figura 3: Feix cònic de pulverització (esquerra) i exemples de tipus de patrons d'esprai

No obstant això, tots coincideixen en realitzar els patrons a partir d'un feix de forma triangular en projecció vertical, tal com es pot veure en la Figura 3.

Aleshores, el càlcul de la cobertura del feix és un senzill càlcul trigonomètric, que és pot fer de la següent forma:

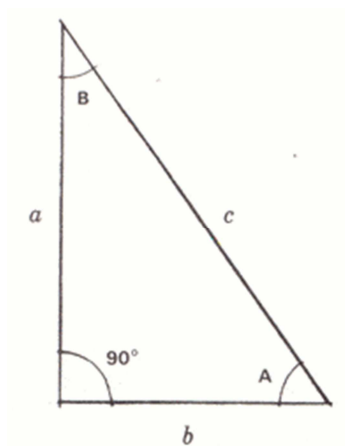


Figura 4: Triangle rectangle

$$\tan \beta = \frac{b}{a} \rightarrow b = a \cdot \tan \beta$$

I com b és la meitat del feix, β és la meitat de l'angle de feix i a la distància vertical :

$$Cobertura = 2 \cdot distància \cdot \tan\left(\frac{Angle \text{ del feix}}{2}\right)$$

En realitat, el feix no és totalment triangular, i es deforma conforme s'allunya del focus atomitzador i perd velocitat. Així presenta una desviació en el triangle teòric i com a conseqüència, una pèrdua de cobertura front al feix teòric.

Aquest efecte només té importància en cas que la distància siga elevada, i no cal considerar-lo en la majoria d'aplicacions. En cas que s'haja de treballar en eixes distàncies, cal fer un estudi abans.

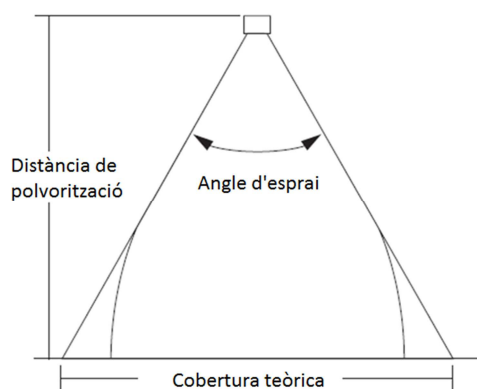


Figura 5: Representació de la pèrdua de cobertura de l'esprai respecte de la teòrica.

2.2.3. Grandària de gota

La grandària de got fa referència a la grandària de les gotes que es troben en el patró de l'esprai. Quan s'atomitza, no totes les gotes tenen la mateixa grandària i ens trobem una distribució. Eixa distribució depèn del patró d'esprai. En tot cas, els broquets atomitzadors tenen una grandària i distribució similar.

No és l'únic factor que influeix en la grandària de gota. La pressió d'impulsió i l'angle de feix afecten a la grandària. Com més baixa és la pressió, major és la grandària de gota i viceversa. Quant a l'angle del feix, com major siga la cobertura que assoleix l'esprai, major serà la grandària de les gotes. Podem veure un quadre dels efectes combinats en la Taula 2.

Patró d'esprai	10 psi (0,7 bar)			40 psi (2,8 bar)			100 psi (7 bar)		
	Capacitat gpm	Capacitat lpm	VMD µm	Capacitat gpm	Capacitat lpm	VMD µm	Capacitat gpm	Capacitat lpm	VMD µm
Atomització d'aire	0,005	0,02	20	0,008	0,03	15	12	45	400
	0,02	0,08	100	0,8	30	200			
Esprai fi	0,22	0,83	375	0,03	0,1	110	0,05	0,2	110
				0,43	1,6	330	0,69	2,6	290
Conus buit	0,05	0,19	360	0,10	0,38	300	0,16	0,61	200
	12	45	3400	24	91	1900	38	144	1260
Feix pla	0,05	0,19	260	0,10	0,38	220	0,16	0,61	190
	5	18,9	4300	10	38	2500	15,8	60	1400
Conus sòlid	0,10	0,38	1140	0,19	0,72	850	0,30	1,1	500
	12	45	4300	23	87	2800	35	132	1720

Taula 2: Efecte de la pressió, capacitat i tipus de patró d'esprai en la grandària de gota per als broquets de *Spray Systems Co.*

La grandària del diàmetre mitja del volum (VMD, per les sigles en anglés Volume Median Diameter) que apareix en la taula, fa referència a la mida del diàmetre de gota mitjà en massa o volum. És a dir, un 50% de gotes tindran una grandària superior i un 50% inferior a eixe diàmetre.

Quant a l'aspecte visual de les diferents grandàries, podem classificar-ho així:

Tipus	Boira	Pluja lleugera	Pluja moderada	Pluja intensa
Rang	10-100 µm	100-500 µm	500-1000 µm	1000-5000 µm
Grandària	Molt xicoteta	Xicoteta	Mitjana	Gran

Taula 3: Tipus de gota en funció de la grandària.

Tenint en compte la tecnologia per a la qual s'utilitzarà la maquinària, la grandària de gota és interessant que siga com més reduïda millor. Això permetrà major igualtat en les capes i un millor acabat superficial.

Impacte sobre la superfície

És una mesura de la força d'impacte que es realitza sobre la superfície on es polvoritza per un determinat patró d'esprai i a una distància donada (I). Aquesta força dependrà del cabal (Q) i de la pressió d'expulsió del líquid (P), segons:

$$I = K \cdot Q \cdot \sqrt{P}$$

On K és una constant, que té els següents valors en funció de les unitats:

I	lbs.(f)	kg(f)	Newtons	Newtons
K	0,0526	0,024	0,24	0,745
Q	gpm	Lpm	Lpm	Lpm
P	psi	kg/cm ²	bar	MPa

Taula 4: Valor de K en funció de les unitats emprades

Cal remarcar que en aquest model no s'ha tingut en compte la grandària de la gota ni altres característiques que també influeixen. No obstant això, és suficient en la majoria dels casos l'aproximació d'aquest model per a calcular la força d'impacte.

2.3. MOTORS PAS A PAS

El motor pas a pas és un dispositiu electromecànic sense escombretes de moviment giratori, que converteix una sèrie d'impulsos elèctrics en desplaçaments angulars discrets. D'aquesta forma és capaç de dividir una rotació sencera en un gran nombre de passos i resulta molt útil en sistemes de posicionament, ja que són capaços d'executar amb molta exactitud un moviment d'una llargària determinada. Aquests motors no es poden connectar directament a una font d'alimentació i sempre és necessari un controlador per tal de fer-los funcionar.

2.3.1. Tipus de motors i principi de funcionament

Els motors pas a pas no són una tecnologia única, i es troben diversos tipus amb característiques constructives i prestacions diferents. En aquest punt estudiarem breument els tipus i característiques de motors pas a pas.

D'imant permanent

Tenen el nucli compost per un imant permanent de perfil arrodonit. L'estator està format per bobines, que quan s'exciten provoquen l'alineació de l'imant amb el camp magnètic creat. El canvi cíclic del camp generat per les bobines provoca el moviment.

Introduïm ací el funcionament d'un motor pas a pas de dues bobines i rotor d'imant permanent, que és el model més senzill. Bàsicament, el control del moviment consisteix en canviar la magnetització de les bobines de l'estator mitjançant un controlador

Analitzant breument el mecanisme de funcionament:

- Pas 1: Si en principi s'imanta una de les bobines i l'altra no, el rotor es queda alineat amb la imantada .
- Pas 2 (semipas): Si ara imantem la segona bobina en el sentit de gir que vulguem (en aquest cas horari), l'imant del rotor es veu obligat a quedar-se entre les dues bobines, efectuant una rotació de 45°.
- Pas 3: Ara l'únic que cal fer és desimantar la primera bobina i aleshores el rotor efectuarà un altre moviment de 45°.
- A partir d'eixe moment la seqüència es repeteix contínuament de manera anàloga.

Podem agrupar els moviments i passos que farà el motor al cap d'una rotació sencera, per tal d'entendre millor el funcionament (Taula 5 i Figura 6)

Número	Tipus	Bobina A		Bobina B	
		Terminal 1	Terminal 2	Terminal 3	Terminal 4
1	Pas	+Vcc	-Vcc		
2	Semipas	+Vcc	-Vcc	+Vcc	-Vcc
3	Pas			+Vcc	-Vcc
4	Semipas	-Vcc	+Vcc	+Vcc	-Vcc
5	Pas	-Vcc	+Vcc		
6	Semipas	-Vcc	+Vcc	-Vcc	+Vcc
7	Pas			-Vcc	+Vcc
8	Semipas	+Vcc	-Vcc	-Vcc	+Vcc

Taula 5: Ordre de fases per a un motor de dues bobines. L'angle de pas serà de 90°, amb un semipas de 45° quan es magnetitzen les dues bobines.

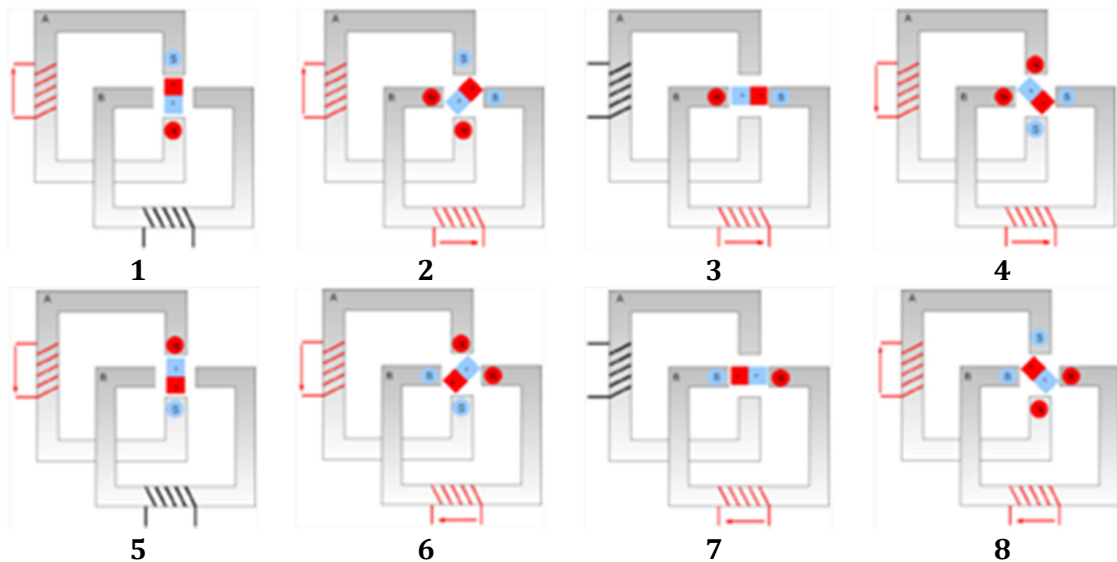


Figura 6: Mostra gràfica de la magnetització de l'estator i la posició del rotor conforme realitza una revolució (números 1-8 corresponents a la Taula 5).

El motor estudiat tindria un pas angular de 90° i un semipas de 45° . Si s'afegeixen bobines, es pot reduir l'angle dels passos, però això té un límit constructiu, a banda que augmenta la dificultat de controls. Si es desitja un angle de pas acurat, és millor recórrer a altres tipologies constructives.

De reluctància variable

Aquest motor no utilitza imants permanents, sinó un rotor d'acer dolç i perfil dentat. Normalment es fabrica a partir de làmines ferromagnètiques no imantades, amb fenedures en forma de dents, que seran els pols del rotor. El principi de funcionament és que quan s'excita l'estator, el flux que es genera circula pel rotor i aquest es menega per tal de buscar la posició de menor reluctància. A causa de la desalineació entre les dents del rotor i l'estator, una canvi programat en l'excitació de les bobines de l'estator provoca la rotació.

La següent figura mostra el funcionament esquemàtic d'aquest tipus de motor

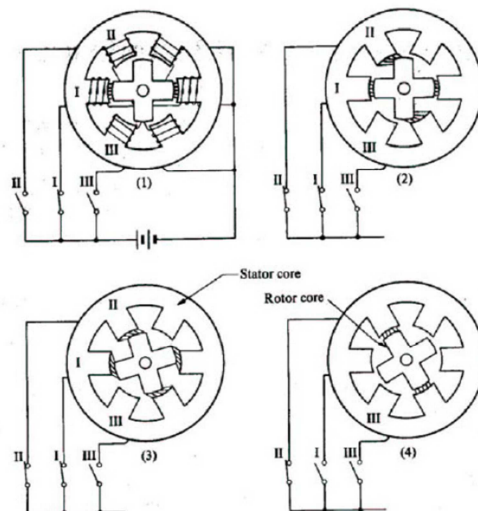


Figura 7: Esquema de funcionament d'un motor pas a pas de reluctància variable

En un primer moment es troben excitada només la bobina I, i el rotor alinea les dents de forma que minimitza la reluctància (travessat). Si ara s'encén la bobina II, el rotor es troba alineat respecte a la bobina I però molt desalineat respecte de la II. D'aquesta forma, s'inicia un moviment de rotació que finalment deixa les dents del rotor a mig camí entre les dues bobines.

En eixe moment es talla el corrent a la bobina I i el rotor continua girant per alinear-se amb el nou camp magnètic, que provoca que novament el rotor estiga desalineat amb el camp magnètic.

Continuant la seqüència d'igual forma amb les tres bobines, es produeix el moviment de rotació.

L'angle de pas depén del nombre de pols en el rotor i de fases en l'estator, de la següent forma:

$$\text{Angle de pas} = \frac{360}{n_f \cdot p_r}$$

On n_f i p_r són el nombre de fases en l'estator i de pols en el rotor, respectivament. El nombre de fases es calcula dividint el nombre de pols de l'estator entre el nombre de pols del rotor que queden alineats amb els de l'estator en una posició estable. Per exemple, en la Figura 8, observem que en els dos primers casos, queden 2 pols alineats, i el nombre de fases serien $6/2 = 3$ i $8/2 = 4$, respectivament. En el tercer cas, pel contrari, s'alineen 4 pols alhora i per tant el nombre de fases és $12/4 = 3$. Així, modificant la quantitat de pols i de fases, podem jugar amb l'angle de pas.

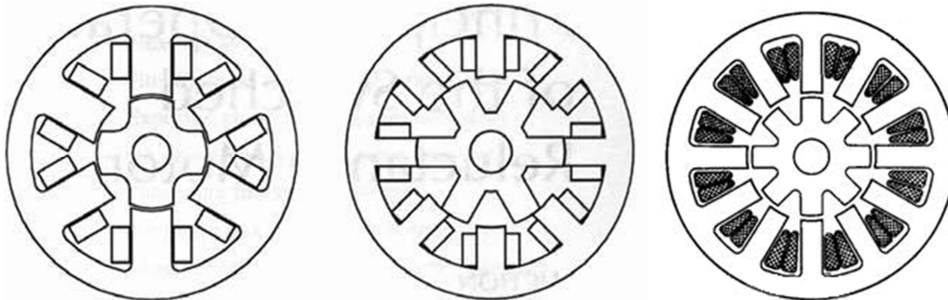


Figura 8: Exemples de motors de reluctància variable amb diferent combinació de pols a l'estator i el rotor. Esquerra, motor de tres fases amb 6 pols a l'estator i 4 al rotor. Centre, motor de quatre fases 8 pols a l'estator i 6 al rotor. Dreta, motor de 3 fases amb 12 pols a l'estator i 8 pols al rotor.

No obstant això, si el que es vol són angles molt xicotets, la millor solució és dentar el rotor de forma pronunciada mantenint el mateix nombre de fases. Per tal que es pugui alinear correctament el rotor amb les fases, caldrà ranurar els pols en diverses dents, de forma que es pugui produir la confrontació amb els pols del rotor.

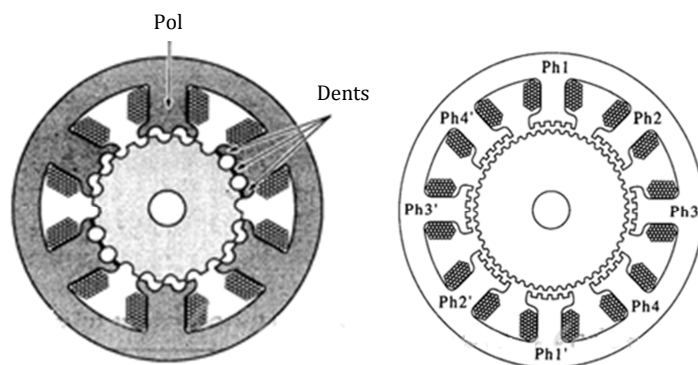


Figura 9: Il·lustració de la solució adoptada en els motors de reluctància per a reduir l'angle de pas: la divisió en dents dels pols i el rotor.

Amb aquests tipus de motor podem aconseguir un nombre de passos molt elevat i per tant un angle de pas reduït. A banda, com que no tenen imant permanent en el rotor (que presenta dificultats constructives per a elements xicotets), poden construir-se de grandària molt menuda.

Híbrids

Aquest tipus de motor és una mena de mescla entre els dos anteriors. El rotor està format per dues peces dentades de pols separats per un magnet permanent magnetitzat. Com podem observar en la Figura 10Figura 7, es produeix una imantació longitudinal a l'eix, de forma que cada part separada del rotor alberga un pol de l'imant. Les dents de cada part estan separades entre si la meitat d'una, com es pot observar en la Figura 11.

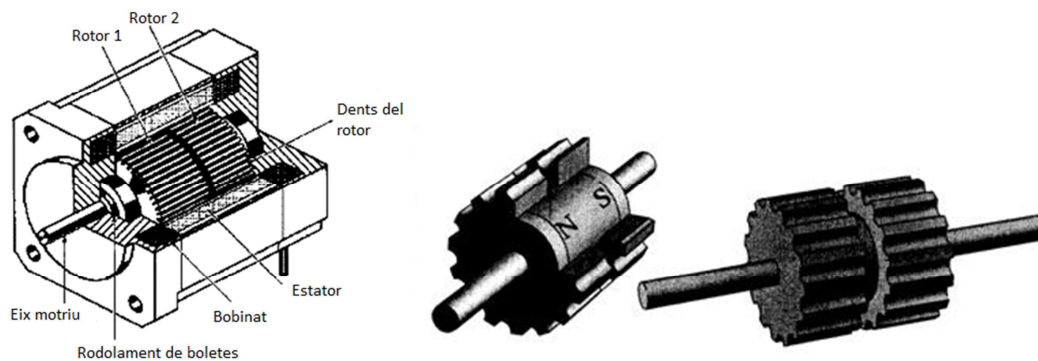


Figura 10: Motor híbrid (esquerra) i rotor d'un motor híbrid pas a pas, distribució de la polarització (dreta).

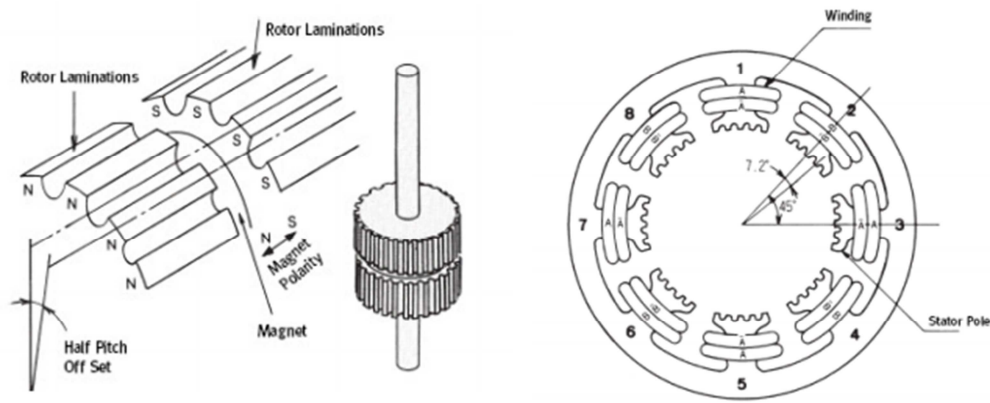


Figura 11: Vista detallada del rotor (esquerra) i de l'estator d'un motor pas a pas híbrid

El funcionament és el següent:

En el pas 1 s'exciten les bobines imparells, pol nord (N) a les bobines 1 i 5, i pol sud (S) en les bobines 3 i 7; i el rotor s'alinea amb el camp. Després en el pas 2 s'exciten les bobines parells, pols N les 2 i 6, i pol S les 4 i 8; llavors el rotor buscant alinear els dents més propers als de l'estator (que ara són les de l'altra part del rotor) es desplaça un angle que correspon a un quart del pas de les dents. Després, en el pas 3, s'alimenten novament les bobines imparells, pol N a les bobines 3 i 7, i pol S en les bobines 1 i 5, el rotor es gira un altre quart de pas. Llavors es veu que quan es realitzin 5 passos es repeteixen els estats d'excitació de l'estator aconseguint una rotació del rotor corresponent al pas d'una dent. Llavors amb un nombre baix de bobines es poden obtenir passos molt menuts, assolint valors de fins a 0.9° per pas.

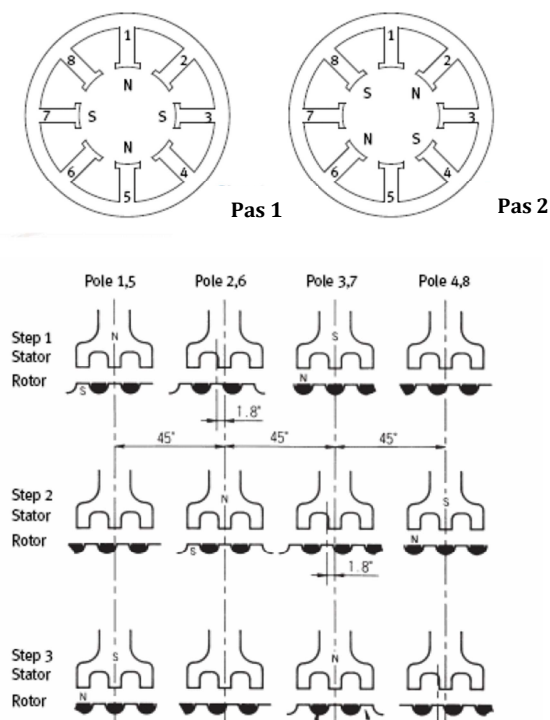


Figura 12: Esquema de funcionament del motor pas a pas híbrid.

Els motors pas a pas híbrids tenen dos bobinats en cada pol de l'estator, de forma que cada pol pugui fer-se sud o nord a voluntat, segons el sentit de circulació del corrent. Els bobinats diametralment oposats estan connectats en sèrie, per tant el nombre de fases en un motor híbrid serà:

$$n_f = \text{fases} = \frac{\text{pols}}{2}$$

L'angle de pas depèn del nombre de fases i el nombre de dents del rotor, segons la següent expressió:

$$\text{Angle pas} = \frac{\text{Espai entre les dents}}{2 \cdot n_f} = \frac{\frac{360}{n_d}}{2 \cdot n_f}$$

On n_d correspon al nombre de dents de què disposa el rotor.

Una de les combinacions més comunes és de 2 fases i 50 dents, que aplicant l'anterior fórmula dona un angle de $1,8^\circ$. Amb aquesta combinació, s'aconsegueix una bona resolució del motor (l'angle és bastant menut) amb simplicitat constructiva i, endemés, amb una bona facilitat per al controls. Motors d'entre 3 i 5 fases existeixen però són de menor ús, ja que conforme s'augmenta el nombre de fases el control es complica i en la majoria d'aplicacions no és necessari una resolució per pas tan acurada.

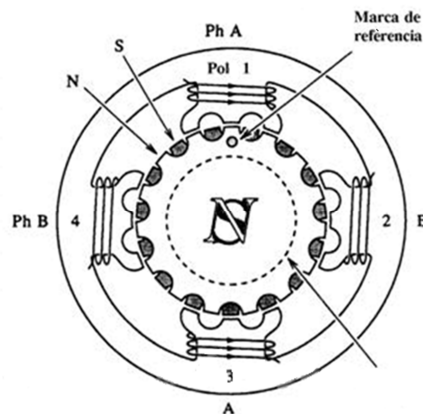


Figura 13: Motor pas a pas híbrid de 2 fases.

Aquest tipus de motor és de construcció senzilla i presenta unes característiques excel·lents de parell estàtic, dinàmic i estacionari; a banda que, com s'ha vist, tenen una gran resolució per pas. La raó per la qual tenen major parell que els altres models constructius de motors pas a pas és que en cada pas tots els bobinats o tots menys un són energitzats en cada pas del motor, fet que no ocorre en els altres tipus exposats.

En el present projecte utilitzarem un motor híbrid de 50 dents i dues fases, que és idoni per a la nostra aplicació en base a les raons abans exposades. L'angle de pas, també esmentat abans, serà de $1,8^\circ$

2.4. ARDUINO

Arduino és una plataforma de hardware lliure, basada en una placa que conté un microcontrolador i disposa d'entrades i eixides de control. La programació del controlador s'efectua mitjançant un codi obert (semblant al codi C) i es veu ajudat per un entorn de programació.

La placa Arduino està concebuda per a facilitar la construcció d'automatismes, robots i, en general, projectes d'electrònica. A banda de la placa, s'ofereixen diferents tipus de sensors, actuadors i altres mòduls de connexió senzilla i directa als pins d'eixida de la placa (ja venen amb l'electrònica necessària), de forma que és senzill dotar al dispositiu de diferents característiques segons l'aplicació que es desitja. A banda, es disposa de extenses biblioteques de programació que faciliten en gran mesura el disseny del programa de control.

Hi ha diversos models de plaques Arduino, que difereixen en capacitat del controlador, nombre de pins, grandària i facilitat de muntatge. Per exemple, la placa Arduino mini i similars està concebuda per a realitzar controladors permanents, i totes les connexions s'han de realitzar per soldat. La més comuna, però, és la placa Arduino UNO i compatibles, que presenta un compromís entre capacitat, grandària i facilitat de muntatge.

2.4.1. Descripció de la placa

Aquesta placa, que serà la utilitzada al present projecte (realment serà una placa semblant 100% compatible), es mostra en la Figura 14.

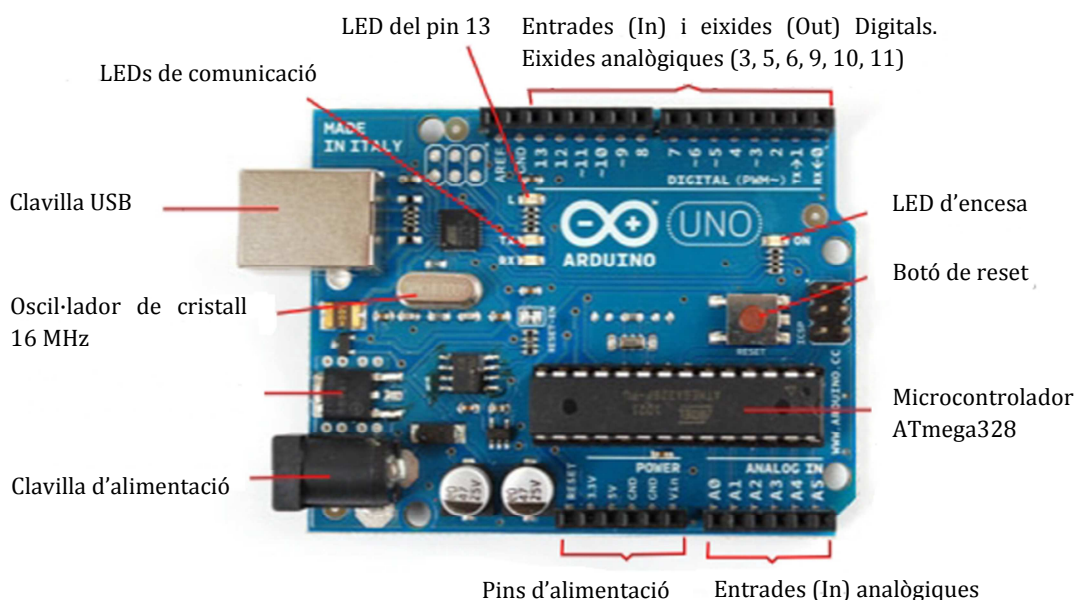


Figura 14: Parts de la placa Arduino

La placa disposa de diversos elements, com LED programable, LED indicador d'encés, botó de reset, oscil·lador... no és el propòsit d'aquesta secció entrar en detall de tots els elements, però sí es descriurà els principals, que tindran aplicació directa en el projecte:

Alimentació

L'alimentació de la placa és pot realitzar mitjançant la clavilla USB (5V) o mitjançant les clavilla d'alimentació, que hauran de tenir un voltatge d'entre 7 i 12V. Cal tenir en compte que si s'utilitza la clavilla USB, segons la font de connexió i la quantitat de mòduls connectat, la intensitat de corrent màxima podria ser insuficient per al circuit.

Pins d'alimentació

Els pins d'alimentació s'utilitzen per a connectar a la placa prototips de circuits, plaques de connexió o proves (en anglès *breadboard* o *protoboard*). Són eixides fixes, que no estan controlades pel programa. Tenim diverses:

- 3,3V Proporciona eixa tensió amb una intensitat màxima de 50mA.
- 5V Proporciona eixa tensió amb una intensitat màxima de 300mA.
- GND Presa de terra, que marca el nivell 0V de referència.
- Vin Proporciona el nivell de tensió al qual està alimentada la placa.

Entrades i eixides

Els pins d'entrada proporcionen informació en forma de senyal al microcontrolador, i els pins d'eixida transmeten la informació resultant de l'execució del programa en forma de senyals elèctriques també. La intensitat màxima de tots és de 40 mA i tenim:

Eixida i entrada digital: els valors d'eixida poden ser 0V (LOW) o 5V (HIGH), sense valors intermedis. En el cas de les entrades, s'interpreta una entrada d'entre 0V i 2V com LOW i entre 3 i 5V com HIGH.

Eixides analògiques. Els valors van des de 0V a 5V en un rang de precisió de 0 a 255 (8 bits) de valors intermedis. És important dir que el valor del voltatge fa referència a el valor mitjà en un període. En realitat aquestes eixides només donen 0V o 5V, però es poden controlar per tal que s'encenguin i s'apaguen ràpidament de forma que el valor mitjà siga inferior. És el que s'anomena control per modulació d'amplària de pols (PWM per les sigles en anglès de *pulse-width modulation*).

Entrades analògiques. Els valors van des de 0V a 5V, amb una precisió de recollida de valors intermedis d'entre 0 a 1023 (10 bits). S'utilitzen per a l'entrada de senyals analògics, normalment de sensors.

2.4.2. El llenguatge de programació d'Arduino

Com ja hem vist, el llenguatge de programació és gairebé C amb suport de funcionalitats de C++. Aquest apartat no pretén ser una explicació exhaustiva de les possibilitats de programació d'Arduino, sinó fer només repàs dels seus trets bàsics i les funcions que es necessitaran per a programar l'automatisme.

Variables:

Les variables són valors que Arduino pot emmagatzemar en la memòria, i que posteriorment es poden utilitzar, modificar o eliminar. Els tipus de variables més usals són:

- int: emmagatzema un nombre enter entre -32.769 i 32767 (2 bytes).

- long: emmagatzema un nombre enter molt llarg, entre -2147483648 i 2147483647 (4 bytes).
- float: emmagatzema un nombre decimal amb un rang entre $-3.4028235 \cdot 10^{38}$ i $3.4028235 \cdot 10^{38}$ (4 bytes).
- const: especifica que la variable definida no podrà ser canviada durant el programa, sent un sempre un valor constant. Podríem utilitzar-los per exemple per a declarar algunes constant matemàtiques, com π o e.

A banda, hi ha algunes constants ja definides en Arduino:

- HIGH / LOW: representen els nivells alt i baix de les senyals d'entrada i eixida. Els nivells alts són aquells de 3 volts o més, com s'ha vist adés.
- INPUT / OUTPUT: Fa referència a entrada o eixida de dades.
- false (fals): Senyal que representa el zero lògic. A diferència dels senyals HIGH / LOW, el seu nom s'escriu en lletra minúscula.
- true (vertader): Senyal la definició és més àmplia que la de false. Qualsevol nombre enter diferent de zero és "veritable", segons l'àlgebra de Boole, com en el cas de -200, -1 o 1. Si és zero, és "fals".

Quan és declara una variable, no és necessari posar-li el valor, sinó que aquest el pot rebre després. En tal cas, Arduino senzillament reserva eixe espai de memòria per tal que pugui ser utilitzat posteriorment. El que sí cal és assignar-li un nom quan es declara.

Altre punt important és el domini de les variables. Una variable declarada en el programa principal pot ser utilitzada i reconeguda en qualsevol moment. Tanmateix, una variable declarada dins d'una funció, desapareix una volta executada aquesta. Veurem les funcions en un apartat posterior.

Sintaxis bàsica

La sintaxis bàsica són les unitats bàsiques de programació i tenen multitud de funcions, com realitzar operacions matemàtiques bàsiques, agrupar dades, comentar, assignar valors, comparar números, etc. Presentem els que té el llenguatge emprat:

- Delimitadors: ;, {}
- Comentaris: //, /* */
Tot allò que estiga en comentari no és utilitzat pel programa.
- Capçaleres (s'utilitzen pel preprocessador): #define (provoca que una paraula siga substituïda per qualsevol valor al llarg del programa, una volta processat), #include (inclou un arxiu, normalment biblioteques de funcions)
- Operadors aritmètics: +, -, *, /, %
- Assignació: =
- Operadors de comparació: ==, !=, <, >, <=, >=
- Operadors Booleans: &&, ||, !
- Operadors d'accés a punters: *, &
- Operadors de bits: &, |, ^, ~, <<, >>
- Operadors compostos:
- Increment i decrement de variables: ++, --
- Assignació i operació: +=, -=, *=, /=, &=, |=

Estructures de control

- *Condicionals:*
if: Realitza les operacions delimitades una volta si es compleix la condició entre parèntesis.

if...else: La part de l'if és igual a l'anterior cas. En cas que la condició no es complisca, s'efectuen les operacions delimitades després d'else.

If...elseif: Si la condició if no es compleix, s'avalua la següent en les mateixes condicions que el primer if. Això és repeteix tantes vegades com elseif hi haja. Es pot incorporar un else al final també.

switch case: Permet triar entre diverses opcions d'execució en funció d'un valor en la condició inicial. És una versió simplificada d'un bucle if, elseif.

- *Bucles:*

while: És un bucle que s'executa en tant que es complisca la condició d'entrada. L'avaluació de la condició i la realització de les operacions delimitades es fan igual que en el cas de l'if, i la diferència és que while repeteix les instruccions indefinidament mentre la condició es complisca.

do... while: És igual que while llevat que les operacions delimitades del bucle es realitzaran la primera volta sempre, independentment que es complisca o no la condició del bucle.

for: S'utilitza per a repetir una sèrie d'instruccions un nombre determinat de vegades. És una estructura adaptada de les dues anteriors, específica atès la gran quantitat de vegades que s'utilitzen progressions en programació.

- *Bifurcacions i salts:*

break: provoca l'eixida d'un bucle o switch

continue: Força una nova iteració en el bucle, ignorant les sentències que quedaven per executar en el bucle actual.

return: Ix d'una funció retornant el valor de la variable considerada

goto: permet saltar a qualsevol part del programa

Funcions

Una funció és un conjunt de línies de codi que realitzen una tasca específica. Les funcions poden o no retornar un valor, i poden prendre paràmetres que modifiquin el seu funcionament. Són utilitzades per descompondre grans problemes en tasques simples i per implementar operacions que són comunament utilitzades durant un programa i d'aquesta manera reduir la quantitat de codi. A banda, poden realitzar-se llibreries de funcions per tal que puguen ser utilitzades en altres aplicacions posteriorment. Quan una funció és invocada se li passa el control a la mateixa, una vegada que aquesta va finalitzar amb la seva tasca el control és retornat al punt des del qual la funció va ser cridada.

Hi ha multitud de funcions preprogramades i desenvolupades en diferents llibreries temàtiques a l'abast del programador, i es poden generar infinites segons les necessitats de l'aplicació. Veurem només aquelles que s'utilitzaran posteriorment en el codi de programació de l'automatisme.

Estructura general del programa

Un programa d'Arduino normalment s'estructura en tres blocs.

En primer lloc entrarien les instruccions del preprocessador, on s'inclouen les biblioteques i arxius d'interès (ús de instruccions #include), es defineixen les funcions que es vulguen utilitzar i també les constants que es vulguen utilitzar com paràmetres (ús d'instruccions #define). Aquest bloc, tot i aparèixer normalment, no es troba en tots els programes, i no és necessari si no es vol fer ús de paràmetres fixos o funcions específiques.

Un segon bloc s'encarrega de la configuració inicial. Està delimitat per la funció `setup()`, que s'executa una única vegada. S'utilitza per a configurar els pins d'eixida i entrada, per a establir l'estat inicial de les eixides, configurar els motors... etc. Aquest bloc ha d'estar sempre en un programa, encara que estiga buit.

Per últim, la funció `loop()`, que s'executa en bucle, és el programa autèntic i el que realitzarà les ordres de control de la maquinària. Aquest programa rebrà senyals d'entrada i enviarà eixides, processarà la informació... el que siga necessari en cada aplicació.

```
void setup() { // Bloc de configuració
/* Estableix un pin digital (en aquest cas el 13) como eixida. Aquest pin tindria un LED, per
exemple, connectat (açò és un bloc de comentaris) */
pinMode(13, OUTPUT);
}

void loop() { // Bloc d'execució
digitalWrite(13, HIGH); // encén el LED
delay(1000); // espera un segon
digitalWrite(13, LOW); // apaga el LED
delay(1000); // espera un segon
}
```

Figura 15: Exemple de programa bàsic en Arduino, sense instruccions per al preprocessador. Totes les funcions que apareixen es poden trobar en el següent apartat.

2.4.3. Funcions d'interès en l'aplicació considerada

Arduino disposa d'una extensa biblioteca de funcions. Només veurem aquelles que tenen aplicació en aquest projecte.

Funció	Llibreria	Descripció
<i>Funcions de configuració</i>		
<code>pinMode(número de pin, OUTPUT/INPUT)</code>	General	Defineix un determinat pin com entrada (INPUT) o eixida (OUTPUT).
<code>nom_del_motor</code> motor(nombre de passos, pin 1, pin 2 [, pin 3, pin 4])	Stepper.h	Defineix el tipus de motor pas a pas a controlar. Els arguments són el nombre de passos per tal que assolisca una volta sencera i els pins de control del motor. Quan s'executa aquesta funció, s'assigna un nom al motor (<code>nom_del motor</code>)
<code>nom_del_motor.setSpeed(velocitat)</code>	Stepper.h	Defineix la velocitat en rpm del motor. Per a executar aquesta directriu haurem d'haver definit abans els passos per revolució (funció anterior). En aquest cas, <code>nom_del_motor</code> no assigna un nom al motor, sinó que és una dada que rep per tal de saber quin motor ha de configurar.
<i>Funcions d'execució</i>		
<code>digitalWrite(número de pin, HIGH o LOW)</code>	General	Posa una eixida en valor alt (HIGH a 5V) o baix (LOW a 0V).
<code>delay(temps)</code>	General	Para l'execució del programa un temps determinat en l'argument, en milisegons
<code>nom_del_motor.step(passos)</code>	Stepper.h	Avança el motor el número de passos determinat en l'argument. En funció de si el número és negatiu o positiu avançarà en una o altra direcció. La velocitat serà la definia en la funció <code>setSpeed</code> .

Taula 6: Funcions d'interès en el present projecte

2.5. LABVIEW

LabView (de l'anglès *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) és un sistema de desenvolupament amb entorn gràfic destinat a la creació d'aplicacions d'instrumental electrònic. Integra una sèrie de llibreries que poden comunicar amb instrumentació electrònica com GPIB, RS232 o RS485. També pot comunicar amb xarxes TCP/IP, targetes d'adquisició de dades i molts altres dispositius, entre els que es troba la placa Arduino que és l'objecte d'interès en aquest cas.

Els projectes realitzats amb aquest programa tenen la denominació VI (Virtual instruments), ja que tenen una aparença similar a la instrumentació real, però estan programats de forma similar als llenguatges de programació usuals.

No és la intenció d'aquest document ensenyar a utilitzar aquest programa, que té un gran ventall de possibilitats i opcions i, a banda, compta amb abundant documentació específica al respecte. L'objectiu d'aquest apartat és explicar l'estructura bàsica del programa per tal que es pugui interpretar el programa final realitzat.

Un programa en LabView té dues finestres diferenciades:

- Panell frontal.
- Diagrama de blocs.

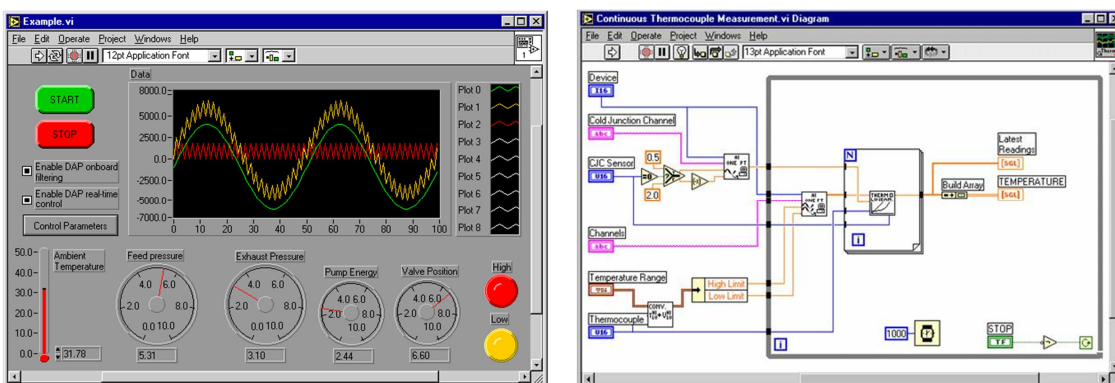


Figura 16: Exemple de panell frontal (esquerra) i diagrama de blocs (dreta), corresponents a diferents projectes.

2.5.1. Panell frontal

Aquesta finestra simula el panell de control de l'instrument físic. És la part d'ús per a l'usuari, que comptarà amb botons, palanques, indicadors de valor, gràfiques, etc. Aquest panell està pensat perquè una volta estiga realitzat el programa, l'ús de la instrumentació virtual siga senzilla.

La interacció amb l'usuari es fa mitjançant entrades i eixides:

- Controls: Són entrades al programa, i estan compostos pels botons, els requadres per a introduir valors, les palanques, rodes, polsadors, etc. L'usuari pot interactuar amb aquests elements i introduir informació al programa.

- Indicators: Són eixides del programa cap a l'usuari, i aporten informació a aquest al voltant de l'instrumental. Estan formats per gràfics, indicadors de valor, barres de valor, etc. L'usuari no pot afectar el valor i només actua de receptor de la informació.

No totes les eixides i entrades han d'estar contemplades en el panell de control. En aquest panell estaran totes les que vulguen ser controlades per l'usuari, siga perquè es vol conèixer els valors o perquè es vol interactuar (botons, polsadors, rodes i similars). No obstant això, es poden implementar entrades i eixides al programa que no estiguen contemplades al panell de control, i siguen gestionades directament i única pel diagrama de blocs.

El panell frontal és l'encarregat de controlar l'execució del programa, i disposa d'una barra d'eines per a encendre o apagar el maquinari.

2.5.2. Diagrama de blocs

Esta finestra conté el programa pròpiament dit. Totes les funcions, operacions, entrades, eixides, etc.; i la forma en què s'interrelacionen entre aquestes està contingut en aquesta finestra.

Tot element del panell frontal té una representació en el diagrama de blocs, amb les condicions de programació que hi caracteritzen. Ara bé, és important remarcar que no tots els elements del diagrama de blocs es troben en el panell de control. Molts són elements interns encarregats de transformar la informació per tal de donar el resultat adient a través dels elements d'eixida del programa.

L'execució dels diagrames de blocs del LabView es realitza de dreta a esquerra. Les operacions que pot realitzar el programa són moltes, incloent bucles, càlcul de funcions personalitzades, funcions booleanes, comparacions, comunicacions, adquisicions de dades... i es poden combinar a voluntat, sempre que cada operació estiga correctament relacionada amb la resta.

El flux d'informació es condueix mitjançant línies de connexió entre els diferents blocs.

3. Procediment de disseny

3.1. PROCÉS ACTUAL

Actualment, la deposició es realitza manualment, mitjançant una pistola de pintar a pressió i una placa calefactora. Les platines utilitzades, de 25x25 mm, es tracten una per una amb el següent procés:

1. Se selecciona la temperatura de la placa en 450°C i es deposita una platina de vidre.
2. Es produeix un temps d'espera fins que la placa i la platina està calenta.
3. Es carrega la pistola amb uns 40 mL de dissolució.
4. Es realitza la deposició de la capa de dissolució mitjançant l'ús de la pistola, realitzant un moviment circular ràpid, a uns 30 cm d'altura respecte a la platina.
5. Es produeix un temps d'espera d'entre 3 i 5 minuts, per tal d'assegurar la fixació de la capa.
6. Es repeteixen els passos 4 i 5 les vegades necessàries, segons la quantitat de capes que es vulguin imprimir sobre la platina.

El procés es realitza en una capa extractora de laboratori, per tal d'evitar contaminar l'ambient de dissolució. A banda, hi ha un muntatge de plaques de metacrilat al voltant de la placa calefactora per tal de protegir la taula, la maquinària i la resta d'elements. La placa calefactora es recobreix d'una capa de paper d'alumini per a protegir-la de la dissolució que se n'ix pels voltants de la platina utilitzada.

El procés actual té una sèrie de limitacions que cal remarcar:

- a. Requereix d'una persona durant tot el procés de realització d'una mostra.
- b. Aquesta persona ha de conèixer la tècnica de deposició, que és una habilitat manual. Aleshores es produeix una necessitat d'aprenentatge.
- c. Existeix un problema de reproduïbilitat, ja que és pràcticament impossible que dues persones la facen completament igual.
- d. La mateixa persona en moments diferents també produirà un resultat diferent, ja que la tècnica és realitzada a ull, tenint un problema de repetibilitat.
- e. El fet que siga a ull, també provoca que la deposició pugui ser major en uns punts que en uns altres, fet que provoca un problema de falta d'uniformitat de les mostres.
- f. Hi ha un problema d'ineficiència del procés. La placa actual és circular i això provoca que siga ineficient davant les platines quadrades utilitzades. El procés es realitza mostra per mostra.
- g. La tècnica de polvorització de feix cònic realitzada amb moviments circulars presenta un problema de desperdici de dissolució. La gran majoria de material queda fóra de la platina, i és depositada sobre el paper d'alumini que recobreix la placa calefactora.
- h. El fet que la inversió de temps per a la creació de mostres siga elevat, també provoca una major despesa elèctrica, ja que la placa calefactora roman encesa durant tot el procés de realització de cada platina.

Les platines que surten del procés de deposició són utilitzades en experimentació a l'UJI, i per tant és altament recomanable que tinguin la major qualitat possible. Així, l'existència de problemes tècnics i la necessitat d'optimitzar el consum del procés justifica la inversió en un procés d'automatisme de la tècnica de deposició.

3.2. REQUERIMENTS DE L'AUTOMATISME

3.2.1. Requeriments de disseny

Per tal que l'automatisme supere els problemes abans esmentats i siga una eina útil i còmoda per als usuaris, és necessari tenir en compte en la fase de disseny els següents paràmetres.

Funcionament altament automàtic

La màquina, una volta programada i correctament preparada, ha de realitzar un procés de deposició de forma automàtica, des del principi fins al final. L'investigador no ha de ser necessari en cap moment del procés una volta iniciat el cicle.

Repetibilitat

Cada volta que s'utilitze la màquina, ha de produir unes mostres quasi idèntiques, amb un baix marge de tolerància. En definitiva, davant una programació i una preparació determinada, el resultat ha de ser sempre altament similar.

Eficiència

Cada cicle ha de permetre la realització de més d'una mostra, de forma que el consum de temps s'optimitze, i per extensió, el consum elèctric.

Per altra banda, el feix del polvoritzador ha d'estar correctament controlat per tal que es reduïska tant com siga possible el consum de dissolució, i es deposite com menys possible sobre la placa calefactora.

Uniformitat

Les mostres creades mitjançant la màquina, han de ser tan uniformes com siga possible. La col·locació d'una mostra en un o altre punt de la zona de treball no ha d'influir en la grossària de la capa creada mitjançant la tècnica de deposició.

Flexibilitat

L'automatisme s'ha d'adaptar a diferents condicions i casos pràctics. Això implica que ha de ser possible variar els paràmetres del cicle, com el nombre de capes, la quantitat depositada per capa, el temps d'espera, etc.

Senzillesa i control d'errors

L'ús del programa de control ha de ser senzill i com més intuïtiu possible. Cal facilitar l'aprenentatge de l'ús de la màquina i que la realització de canvis en el cicle siga senzilla, per tal que puga ser utilitzada per qualsevol investigador sense una gran pèrdua de temps en l'aprenentatge. A banda, ha de ser possible reconèixer què ha passat si es produeixen errors.

Cal remarcar que la condició de reproduïbilitat de la màquina, que s'esmentava com a limitació del procés actual, no s'ha posat com a requeriment. Això és degut a què s'espera un increment de la productivitat molt gran amb una sola màquina. D'aquesta forma no serà necessària la construcció de més d'una i no és aplicable aquesta condició. En tot cas, com es veurà en els següents apartats, l'automatisme utilitzat és fàcilment construïble i és

senzill aconseguir reproduccions de la màquina pràcticament idèntiques, fet que asseguraria la reproduïbilitat davant diferents màquines.

3.3. REQUERIMENTS TÈCNICS

S'enumeren ací requeriments tècnics que no fan referència a característiques desitjades de la màquina sinó a condicions d'obligatori compliment

Concepte	Requeriment
Pressió màxima d'alimentació pneumàtica	Fins a 10 bar
Alimentació elèctrica	230 V alterna monofàsica
Possibilitat d'alimentar líquid a pressió	No
Corrosivitat i/o toxicitat de les dissolucions	Elements no corrosius de baixa toxicitat: resistència moderada
Dimensions màximes de la màquina	1 metre de profunditat, 1 metre d'alçada i 2 d'amplària (màxim donat per la campana extractora)
Temperatura d'operació	450°C
Grandària de la platina de treball	25x25 mm

Taula 7: Requeriments tècnics de disseny de l'automatisme

Per altra banda, hi haurà una sèrie de requeriments que sorgiran durant el procés de disseny a causa dels requeriments de compatibilitat entre els dispositius i peces. Aquests requeriments aniran sorgint conforme s'avance en el disseny. Aquesta procés s'estudiarà a banda.

3.4. PROCEDIMENT DE DISSENY

Fase 1: Tria de placa calefactada

El primer pas serà triar la el plat calefactor, ja que aquest serà un element amb el qual es tindrà poc marge de maniobra. La placa es comprarà com un dispositiu totalment fet, i no se n'efectuarà cap modificació. Això implica que la variabilitat vindrà limitada pels model del mercat. En tot cas, plantejarem els següents requeriments:

- Zona calefactada quadrada: La majoria de voltes, les plaques són circulars, però les platines que utilitzem són quadrades. L'ús d'una placa circular provocaria una pèrdua d'espai útil gran.
- Amplària mínima: Mínim seria 25x25 mm a causa de la grandària de la platina. En la pràctica, no obstant això, es cerca crear més d'una peça, per tant, la mida mínima haurà de ser un múltiple d'aquest.

Fase 2: Tria del sistema atomitzador

En aquesta fase s'ha de triar el broquet polvoritzador que s'utilitzarà per a realitzar el procés. Aquesta tria estarà afectada per la capacitat del sistema pneumàtic i per la grandària de la zona útil de la placa, triada adés.

Ahora, caldrà considerar que la forma i abast del feix de l'atomitzador serà clau a l'hora de triar la necessitat o no d'un sistema que provoqe un moviment relatiu entre el broquet i les platines. Si el broquet cobreix tota la zona desitjada, no caldrà un moviment relatiu, a menys que siga per tal d'assegurar condicions d'homogeneïtat al llarg de les platines. Un

broquet que siga incapaç de cobrir tota la zona, automàticament requerirà moviment relatiu.

Fase 3: Determinació del moviment relatiu

Aquesta fase, com hem vist, està molt relacionada amb l'anterior, i realment l'estudi és pràcticament conjunt. Es posa en un pas posterior perquè el factor més limitant serà la tria del broquet, ja que és el sistema fonamental del projecte. Endemés, provocar un moviment relatiu resulta més senzill en la majoria dels casos i té més flexibilitat en el disseny, a banda de més productes comercials fabricats al respecte.

Caldrà triar, en funció del broquet, quin és el moviment relatiu ideal (en general, serà triar entre moviment circular o lineal) per a assolir els objectius. Després estudiar el disseny d'un sistema de moviment que siga adient, amb mecanisme real que complisca els requeriments.

Fase 4: Selecció dels elements de control

Una volta amb tot el sistema bàsic triat, caldrà triar els elements necessaris per tal que funcione correctament. Tindrem dos tipus d'elements a triar:

- Vàlvules i elements pneumàtics: són els elements encarregats d'obrir i tancar el pas de l'aire comprimit i de la dissolució. Cal que puguen ser accionades pel controlador.
- Motor: Element encarregat de produir el moviment. Ha de ser d'un tipus que permeta el control precís atenent als requeriments de l'aplicació, i amb parell suficient per a manejar el conjunt.
- Controlador: El controlador serà l'element bàsic, encarregat de controlar el funcionament de sistema motor, les vàlvules de control. Cal que les possibilitats de programació siguen suficients de forma que la maquinària pugua realitzar totes les funcions desitjades.
- Electrònica auxiliar: Possiblement siguen necessaris elements de connexió, components electrònics, per tal d'adaptar les característiques del controlador a les necessitats dels actuadors (motor i vàlvules).
- Font d'alimentació: Serà l'element encarregat de donar energia a tot l'automatisme. S'ha de triar aleshores tenint en compte les característiques de la instal·lació i les necessitats de l'automatisme.

Fase 5: Dimensionament de l'estructura

En aquesta fase s'haurà de determinar amb detall l'estructura que tindrà la màquina. En el disseny, caldrà tenir en compte els següents aspectes:

- La placa afectarà molt la grandària de la placa a la grandària de l'estructura, en especial a les mides de la planta.
- Els broquets polvoritzadors requereixen d'una alçada mínima de polvorització, a banda que pot ser necessari una alçada addicional per a cobrir més camp. Això provocarà que l'estructura haja de tindre unes mides mínimes.
- Cal respectar les mides mínimes que permeten realitzar el moviment relatiu dissenyat (si cal), i qualsevol altre element mòbil i/o modificable dissenyat.

Fase 6: Desenvolupament del programa de control

Coneixent les dimensions de l'estructura, els requeriments del moviment, les necessitats del sistema atomitzador i les característiques dels distints elements pneumàtics i electrònics, es caldrà realitzar el programa de control, que permeti realitzar les

operacions necessàries per a efectuar la tasca. La programació es realitzarà en el llenguatge que requereisca el controlador.

Fase 6: Selecció dels components de les instal·lacions

En aquesta fase caldrà dimensionar els components de les instal·lacions elèctrica i pneumàtica-hidràulica. En particular caldran cables, tubs, racors, connectors, el dipòsit, bases de muntatge elèctric... en funció dels elements principals ja triats.

Fase 7: Proteccions i carcassa

L'últim pas serà protegir els diversos components, en especial els electrònics, de la polvorització de la màquina (i per tant el contacte amb les dissolucions) i de la manipulació humana que puga trencar els components o representar un risc potencial.

Les proteccions compliran:

- Facilitat de neteja (l'atomització tancarà ràpidament les proteccions).
- Preu baix o gran durabilitat. El contacte amb les dissolucions poden provocar la degradació del material si no és resistent a aquestes. No obstant això, pot ser interessant incorporar elements més barats, que al cap del temps puguen ser substituïts fàcilment.
- Transparència. És important per tal de poder controlar el procés des de fora.
- Resistència mecànica, per tal que suporti la manipulació i possibles impactes.

Les carcasses, fora de la zona de treball de la màquina, només caldrà que complisquen un compromís entre preu i resistència mecànica.

4. Descripció de la solució adoptada

4.1. DESCRIPCIÓ GENERAL

Realitzades les fases de disseny i selecció de components, la solució plantejada va ser un sistema de polvorització amb moviment relatiu entre el broquet i les platines. La placa és capaç de tenir diverses platines alhora, de forma que per operació no només es realitza una. L'automatisme és totalment autònom una volta iniciat el cicle, i realitza les operacions d'atomització i espera, així com totes les operacions auxiliars necessàries.

La màquina bàsicament és una placa calefactors introduïda en una estructura que suporta un pont mòbil accionat mitjançant un motor elèctric. Aquest pont mòbil està dotat d'un broquet polvoritzador de feix pla. Quan s'inicia una operació d'atomització, el broquet, mitjançant el pont, realitza un moviment d'escombratge rectilini mentre atomitza la dissolució. D'aquesta forma es realitza una capa de deposició uniforme al llarg de les mostres. Després espera el temps necessari perquè es fixe la capa abans de tornar a atomitzar. Açò es realitza tantes vegades com calga en base a les capes necessàries.

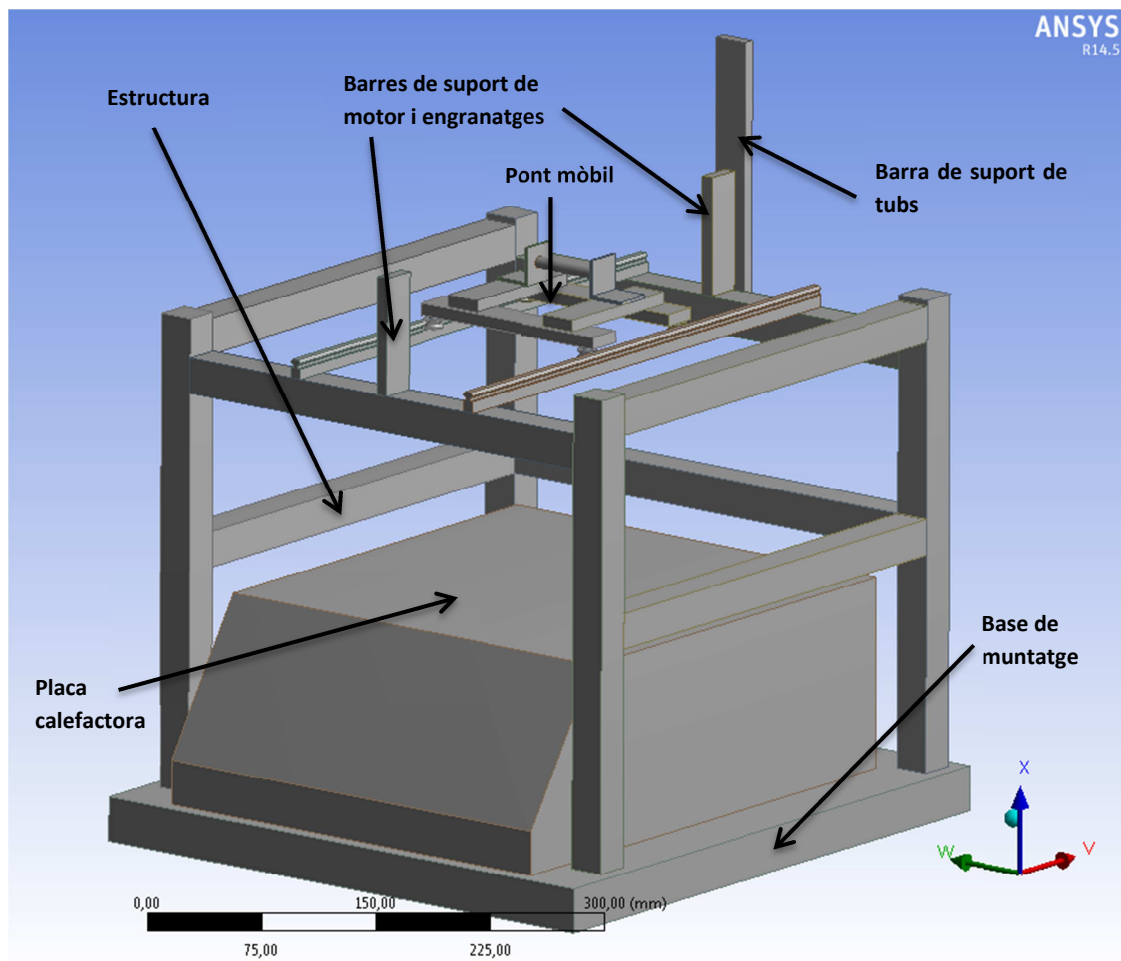


Figura 17: Vista general de la solució constructiva de màquina (sense sistema motor ni sistema d'atomització).

Les vàlvules que permeten obrir i tancar el mecanisme d'atomització estan controlades electrònicament així com el motor que maneja el pont mòbil. La programació de cada cicle es realitza per ordinador, i els paràmetres es poden variar. Fonamentalment es poden variar la velocitat, la carrera que fa el pont, el temps entre capes, el nombre de capes i el mode d'ús. Hi ha dos modes d'ús: el mode bidireccional, en el que la màquina atomitza tant quan viatja en un sentit del pont com quan viatja en l'altre; i el mode unidireccional, en el qual la màquina sempre atomitza en la mateixa direcció.

A banda, l'automatisme incorpora un mode de neteja. Aquesta funcionalitat s'inclou per a facilitar el treball de neteja a l'usuari. En aquest mode el broquet atomitza sense menjar-se del lloc d'eixida per tal de netejar el broquet, el dipòsit i les canalitzacions. A l'eixida aniran col·locats un embut i una canalització per tal que allò que siga polvoritzat en eixe lloc siga eliminat. Aquest mode es pot utilitzar durant un temps predeterminat o deixar en mode de temps infinit, on serà l'usuari qui decidisca en quin moment s'acaba la neteja.

4.2. DESCRIPCIÓ DETALLADA DE CADA SECCIÓ I SELECCIÓ D'ELEMENTS

4.2.1. Placa calefactora

La placa calefactora és una màquina que es comprarà com a producte final i s'utilitzarà tal qual, sense realitzar cap modificació ni muntatge. Tan sols es delimitarà correctament la col·locació en la base de muntatge (descrita en el següent apartat).

D'aquesta forma es facilita el canvi de placa tant si es fa malbé com si es considera que una altra realitzarà millor les funcions. A banda, permet extraure la placa per a utilitzar-la en altre lloc si és necessari.



Característica	Valor
Dimensions externes	mm 300 x 365 x 130
Zona calfada	mm 180 x 180
Capacitat de calfament	W 1500
Max Càrrega de pes	Kg 15
Temperatura de la placa	+600
Alimentació	V/HZ 230/50-60
Precisió de la placa	± 5
Classe de protecció	IP 42
Classe de seguretat	0
Pes	Kg 5

Figura 18: Placa calefactora vitroceràmica escollida (model PV 300). Característiques tècniques

La placa escollida té una zona per a depositar objectes de 300x300 mm. De tota manera, només un quadre situat al centre de 180x180 mm és la zona amb resistències baix i en la qual es garanteix la temperatura seleccionada. Amb eixe quadre, i coneixent les mides de les platines (25x25 mm) podem calcular la quantitat de platines que es podran atomitzar per polvorització:

$$n_{costat} = \frac{L_z}{L_p} = \frac{180}{25} = 7$$

$$n_{total} = n_{costat}^2 = 7 \cdot 7 = 49 \text{ platines}$$

On n_{costat} és el nombre de platines que caben per costat, i n_{total} és la quantitat de platines total que es poden tractar.

Aquestes 49 serien el nombre màxim de platines que es podrien fer alhora per operació, front a la platina única que actualment es pot.

4.2.2. Estructura

L'estructura estarà formada per una base de muntatge, de 400 x 410 mm, sobre la qual es munten quatre pilars de 320 mm d'alçada, col·locats en quadrat i separats 320 mm cadascun també. En el centre es col·locarà la placa calefactora.

Eixa estructura estarà reforçada amb tres bigues travesseres a mitjana altura i dues paral·leles situades dalt del tot. A mitjana altura no es reforça tot el perímetre (la part frontal no té travessera) per tal que es pugui introduir la placa calefactora sense problemes i es facilite la manipulació de platines al plat. Dalt, només es col·loquen dues perquè les bigues travesseres de suport del pont mòbil faran rígids els costats del quadre no coberts per les bigues de reforçament.

Totes els perfils i elements estructurals (també del pont mòbil i el sistema motor) estan realitzades mitjançant perfils de la marca *Makeblock*. Aquests perfils preperforats, i amb rosques mecanitzades, estan pensats per a ser de molta flexibilitat constructiva i fàcil muntatge. D'aquesta forma l'estructura adquireix una flexibilitat geomètrica gran, i es podria modificar davant un canvi en les necessitats. També resulta de més senzill muntatge, i no cal mecanitzar peces. Plànols de les peces de *Makeblock* utilitzades les podem trobar en l'annex II, així com dels muntatges estructurals.

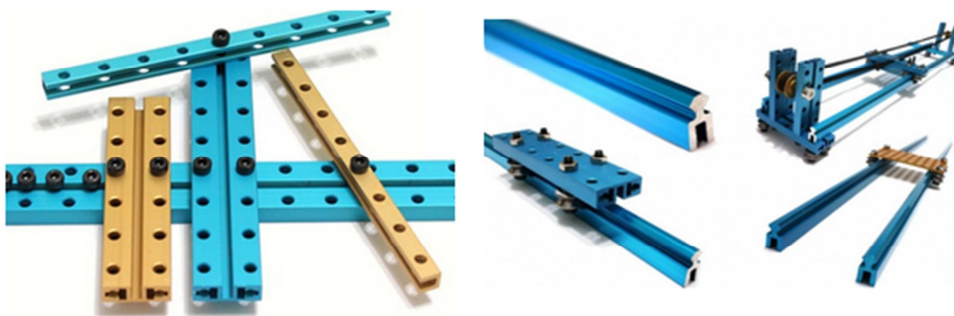


Figura 19: Perfils i elements *Makeblock*. Amb aquestes peces és senzill modificar l'estructura i reconstruir la màquina.

4.2.3. Pont mòbil

El sistema pont mòbil està conformat per l'estructura de suport i el pont mòbil com a tal. L'estructura de suport està formada per dues bigues travesseres que es fixen als pilars de suport mitjançant esquadres. Com s'ha comentat adés, aquestes bigues acaben de donar rigidesa a l'estructura. L'altura de fixació és absolutament lliure ja que els perfils utilitzats tenen una practicada una fenedura roscada al llarg de tot el perfil. Aquest fet serà important a l'hora de calibrar l'altura exacta que faça que el feix cobrisca tota la zona a tractar sense eixir-se'n pels costats. Aconseguirem així una pèrdua de dissolució molt baixa.

Sobre les bigues de suport se situen dos rails per a encarrilar el carro. També es fixen, mitjançant perfils, suports i engranatges, el motor, les politges i la corretja de transmissió.

El carro està format per quatre bigues que se situen fent un quadre, de forma que suporten les rodes, i unes esquadres que tenen fixat un eix circular. Sobre eixe eix se situarà el suport del broquet polvoritzador. A banda, dues plaques s'encarreguen de fixar la corretja de transmissió al pont, de forma que es pugui transmetre el moviment (el muntatge es veurà endavant).

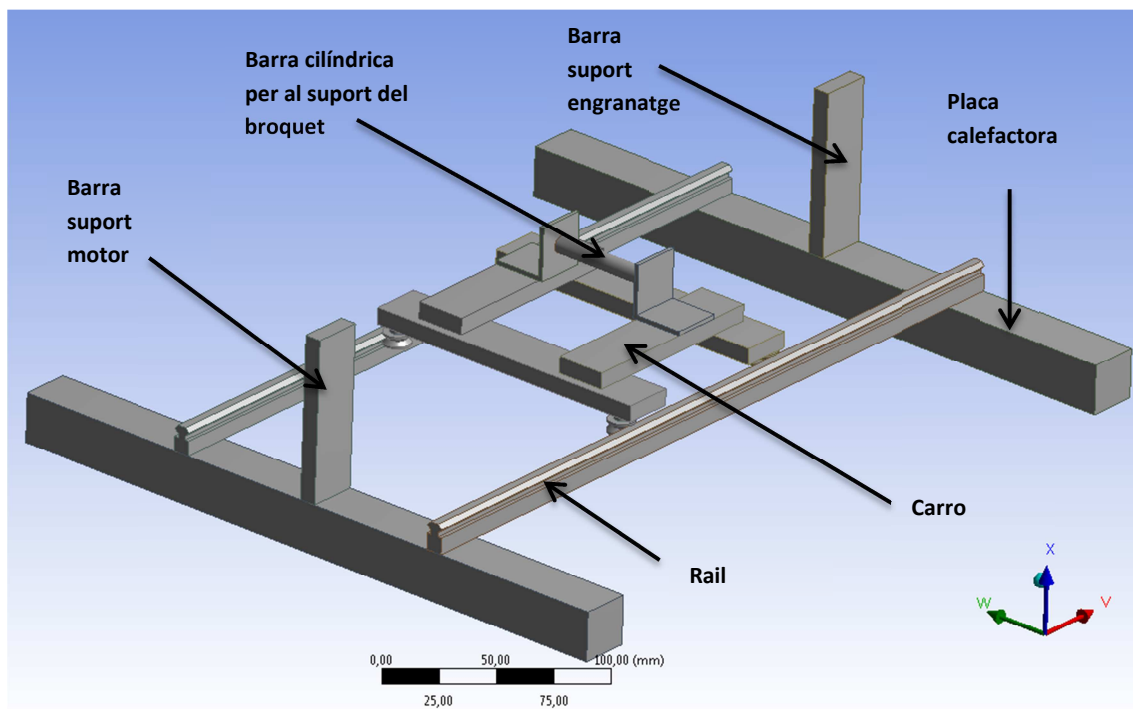


Figura 20: Detalls constructius del pont mòbil.

Atenent a la construcció del pont, podem calcular la longitud màxima de carrera:

$$L_{rail} = 320 \text{ mm}, \quad L_{pont} = 109 \text{ mm}$$

$$L_{carrera} = 320 - 109 = 211 \text{ mm}$$

Aquesta longitud és superior als 180 mm mínims (longitud de la zona calefactada) i per tant tindrem marge en l'operació

4.2.4. Sistema atomitzador

L'atomització de la dissolució es realitza mitjançant un sistema d'aire a pressió. En un dipòsit de xicoteta grandària es carrega la dissolució, que es condueix per la línia de líquid fins a un cos de broquet. El cos de broquet té, a banda de l'entrada de líquid, dues entrades d'aire a pressió. La primera és la d'alimentació amb la qual s'introdueix l'aire que atomitzarà el líquid (la dissolució). La segona és un cilindre pneumàtic que s'encarregarà de tallar el subministrament de líquid quan siga accionat.

En un costat del cos se situa el suport, que va enganxat a l'eix esmentat en el punt anterior. Baix se situa el broquet pulveritzador, que és la peça fonamental del conjunt i provocarà l'atomització.

L'aire a pressió que es condueix fins al cilindre i l'alimentació passa per dues vàlvules d'accionament elèctric a 12V_{cc}. La vàlvula que regula l'entrada d'alimentació és una 2/2 que pot tallar l'aire a voluntat. La del cilindre és una 3/2 amb un sistema de descompressió ràpida. La descompressió ràpida és necessària per a assegurar un tancament ràpid del cilindre quan es vulga tallar l'alimentació de líquid.

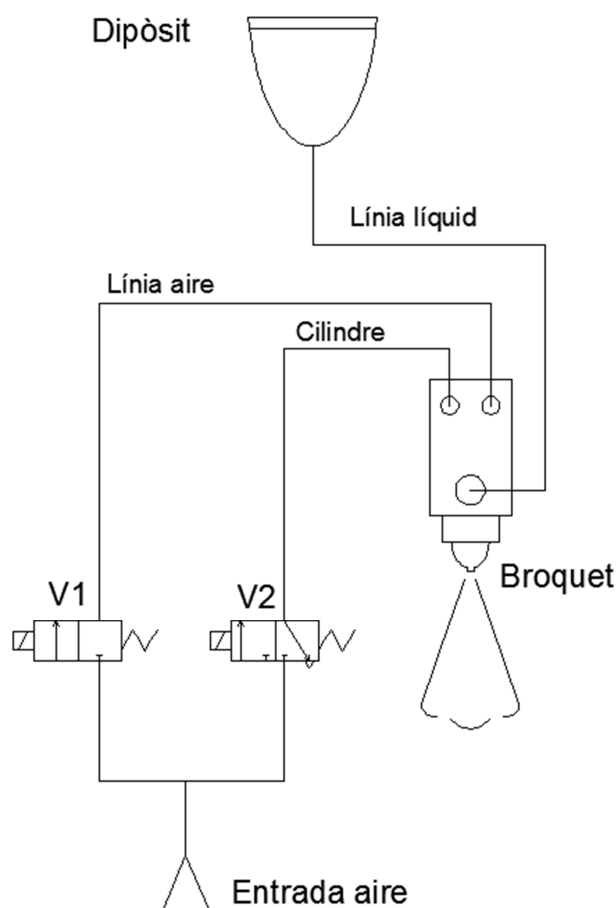


Figura 21: Esquema del sistema pneumàtic

El broquet, que estarà fixat a la barra cilíndrica del carro (més avant es mostra l'element de fixació), té instal·lat el dipòsit allí mateix i tots dos es mouen conjuntament. L'alimentació d'aire, però, arriba per tubs que es fixen a la barra de suport de tubs (veure

Figura 17), que és alta per tal que la flexió no obstaculitze el moviment. Un esquema de muntatge es pot veure en la Figura 22.

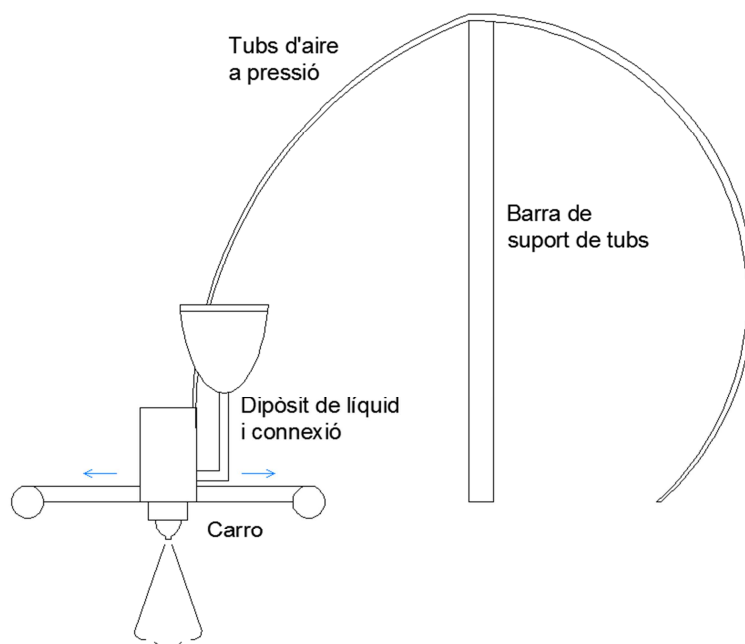
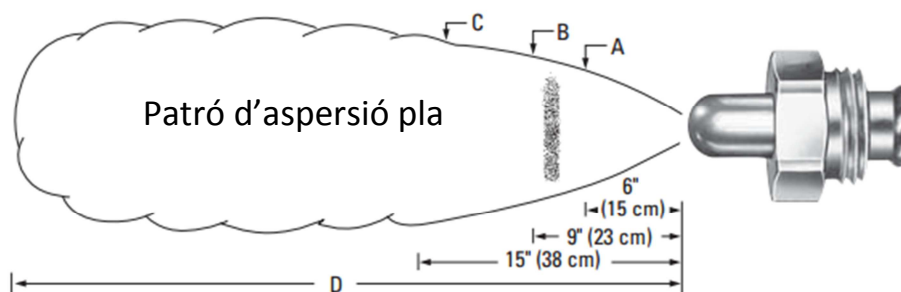


Figura 22: Esquema de muntatge de les connexions del sistema hidràulic i pneumàtic.

Quant al broquet triat de la casa *Spraying Systems*, té les següents característiques:



Combinació d'aspersió	Aire atomització		Capacitat del líquid (litres per hora)									Dimensions de l'aspersió amb una alçada de sífo de 20 cm				
	Pressió aire	Capacitat de l'aire (L/m)	Per gravetat			Altura de sífo (cm)						Aire	A (cm)	B (cm)	C (cm)	D (cm)
			45 (cm)	30	15	10	20	30	60	90						
SUJF1	0,70	28	1,3	1,2	1,1	1,0	,95	,83	,64	,49	,70	20	26	38	2,1	
	1,5	43	1,2	1,1	1,0	,90	,86	,78	,66	,54	1,5	21	29	38	2,1	
	2,0	50	,82	,76	,68	,57	,50	-	-	-	2,0	23	30	38	1,8	

Figura 23 i taula 8: Característiques de la combinació d'aspersió SUJF1. La combinació està formada pel broquet de líquid J2850 i el broquet d'aire J73420.

Tenint en compte que la longitud a cobrir és de 180 mm, i corresponent a la de la zona calfada, podem determinar l'alçada a la qual haurà d'estar col·locat el broquet respecte a la placa. Afegint 10 mm per costat per tal d'assegurar condicions d'homogeneïtat en les vores de la zona a tractar, tenim una longitud de cobertura de 200 mm.

Aquesta cobertura correspon a les condicions de pressió d'aire de 0,7 bar i 15 cm de distància, contemplades en la graella. En eixes condicions:

$$\text{Angle feix} = 2 \cdot \arctan\left(\frac{\text{Cobertura}}{2 \cdot \text{distància}}\right) = 2 \cdot \arctan\left(\frac{200}{2 \cdot 150}\right) = 67,38^\circ$$

Aquest angle no és constant, i depèn de la pressió. En particular, aquest seria l'angle mínim que tindria el feix. Per tal d'assegurar la capacitat de la màquina d'adaptar-se perfectament a distorsions respecte de les condicions teòriques d'ús, i dotar de flexibilitat a la màquina per si, per exemple, es canviara la placa o fóra necessari cobertura per a un nombre menor de platines, caldrà flexibilitzar l'altura a la qual puga estar instal·lat el pont mòbil. En particular, a partir dels 200 mm de cobertura considerats, donarem un marge de 40 mm per dalt i per baix, per tant:

$$\text{Cobertura} = [160, 240] \text{ mm}$$

La distància la podem calcular adaptant l'equació vista en els fonaments teòrics, apartat 2.2.2:

$$\text{Distància} = \frac{\text{Cobertura}}{2 \cdot \tan\left(\frac{\text{Angle del feix}}{2}\right)}$$

I podem agrupar els càlculs en una taula:

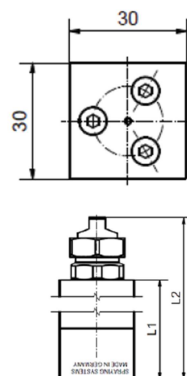
Pressió (bar)	Cobertura a 150 mm de distància	Angle feix (graus)	Distància per a cobertura de 160 mm (mm)	Distància per a cobertura de 240 mm (mm)
0,7	20	67,38	120	180
1,5	21	69,98	114	171
2	23	74,95	104	157

Taula 9: Distàncies necessàries per a una cobertura de 160 i 240 mm a diverses pressions

Prenent els casos més extrems, seria interessant que es poguera jugar a una distància del broquet d'entre 104 i 180 mm.

El broquet s'ha de col·locar sobre una cos que rep l'alimentació d'aire i líquid. Com les condicions d'espai són menudes, s'ha triat el model compacte (de la mateixa casa) JAU de la sèrie D55500. Aquest cos està preparat per a aplicacions automàtiques i disposa d'un cilindre que permet tancar l'entrada de líquid quan rep aire a pressió.

Paràmetre	Valor
Cabal a la màxima pressió de líquid	96 L/h
Pressió màxima	3 bar
Pressió màxima del cilindre	6 bar
Pressió màxima d'aire d'atomització	6 bar
Material	Acer 1.4404 (junta en Viton)
Cicles màxims d'operació	600 cicles per minut
Temperatura màxima de l'ambient	40°C
Pes	260 g
Dimensions	30x30x34; L1= 34; L2≈86 (mm)



Taula 10 i figura 24: Cos del broquet JAU compact i característiques.

Per a la subjecció a l'eix cilíndric del carro, s'utilitza un element de fixació a pressió (abraçadera), fet per la mateixa casa específicament per aquests cossos i de 60 grams de pes:

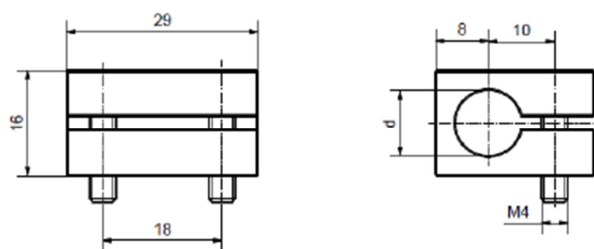
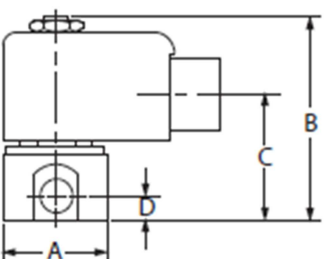
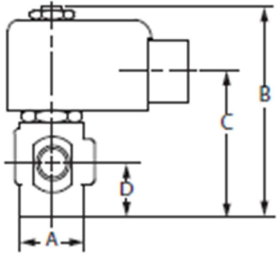


Figura 25: Dimensions de l'element de fixació del cos de broquet.

Altres elements importants de la instal·lació són les vàlvules de control. Les vàlvules de control hauran d'estar adaptades a les condicions d'operació. La vàlvula d'accionament del cilindre per a tancar l'entrada de líquid al broquet serà una 3/2 per tal de facilitar l'eixida de l'aire. La vàlvula d'admissió d'aire serà una 2/2. A banda cal tenir en compte les condicions de pressió, cabal, etc. S'han seleccionat dues que es presenten en la taula següent, també del mateix fabricant.

Paràmetre	Vàlvula 2 vies (mm)	Vàlvula 3 vies (mm)	Vàlvula 2 vies		Vàlvula 3 vies		
A	41,3	39,7					
B	73,8	95,2					
C	49,2	69,8					
D	8,7	28,6					
Tipus	Model	Accionament	Pressió màxima	Grandària orifici	Factor Cvt	Material del cos	Material del segell
2 vies	11438-20	Directe	4 bar	4,8 mm	0,50	Acer inoxidable	Viton
3 vies	11438-30	Directe	7 bar	2,4 mm	0,25/0,38	Bronze	Viton

Taula 11: Característiques de les vàlvules utilitzades en el procés. Totes dues són de la marca *Spray Systems*.

També, opcionalment es podrà incloure un filtre i un manòmetre, així com un regulador de pressió. Aquests elements es troben en la instal·lació de la universitat, per tant no seran imprescindibles. La selecció en aquest cas s'ha de fer per al cabal i la pressió, a l'igual que la resta d'elements d'instal·lació, com tubs i connectors, que no estan contemplats en aquesta secció.

4.2.5. Sistema motor

El sistema motor és senzill i es limita a un motor pas a pas situat en una de les bigues travesseres del pont mòbil, al qual se li fixa una roda de transmissió directament sobre l'eix (sense reducció prèvia). El moviment circular es transmet i es transforma en rectilini mitjançant una corretja dentada, que es recolza sobre la roda del motor i sobre una altra situada en la biga oposada del pont. En la biga oposada al motor, se situa un final de carrera. El carro sempre començarà els un cicle d'atimitzat des d'eixe punt (no vol dir amb això que estiga allí durant totes les capes). El final de carrera servirà per a saber si el carros es troba en el lloc adient a l'inici.

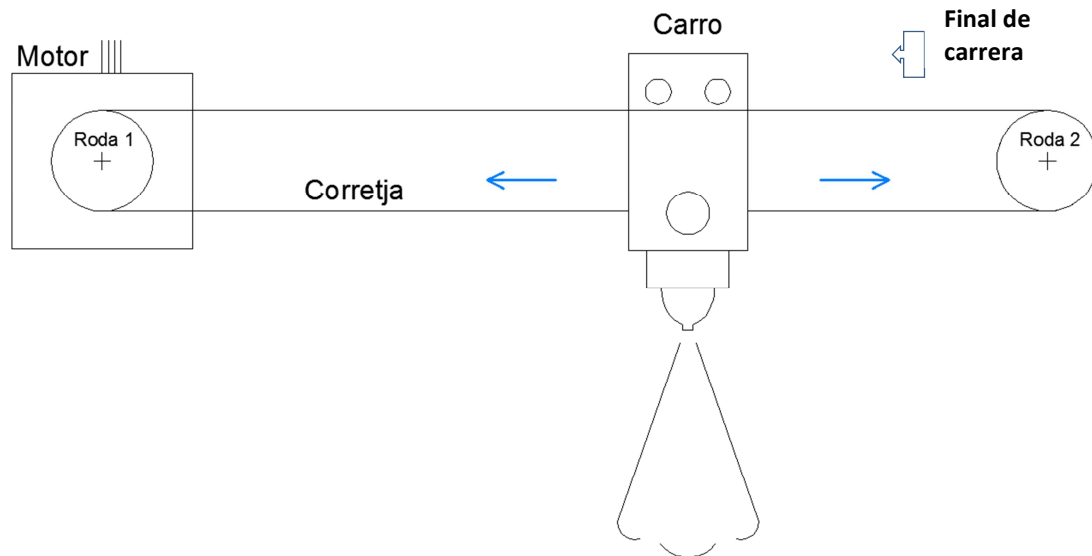


Figura 26: Esquema bàsic del sistema de moviment del carro (vista lateral de la màquina)

La corretja està fixada amb caragols al carro per dues plaques específiques. La corretja utilitzada és una dentada trapezoïdal amb un pas entre dents (pitch) de 2,032 mm i una amplària de 6,6 mm fabricada en neoprè. Cadascuna de les rodes, idèntiques de transmissió té 18 dents.

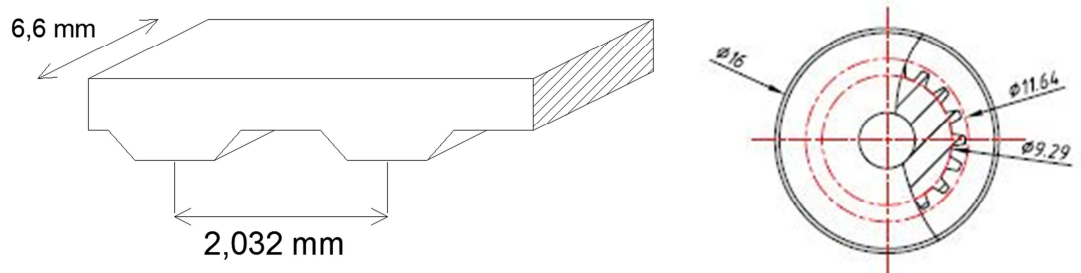


Figura 27: Geometria bàsica de la corretja i la roda de transmissió

Respecte del motor, és de tipus pas a pas híbrid, amb les següents característiques:

Característica	Magnitud	Unitat
Fases	2	-
Angle de pas	1,8 ±5 %	°
Voltatge	2,55	V
Corrent per fase	1,7	A
Resistència per fase	1,5 ±5 %	Ω
Inductància per fase	2,8 ±20 %	mH
Parell de manteniment (<i>holding torque</i>)	40	N·cm (mínim)
Parell en detenció (<i>detent torque</i>)	2,2	N·cm (màxim)
Classe d'aïllament	B	-
Lead Style	AWG26 UL1007	-

Taula 12: Característiques del motor 42BYG

Per altra banda, el parell motor en moviment el podem veure en la Figura 28:

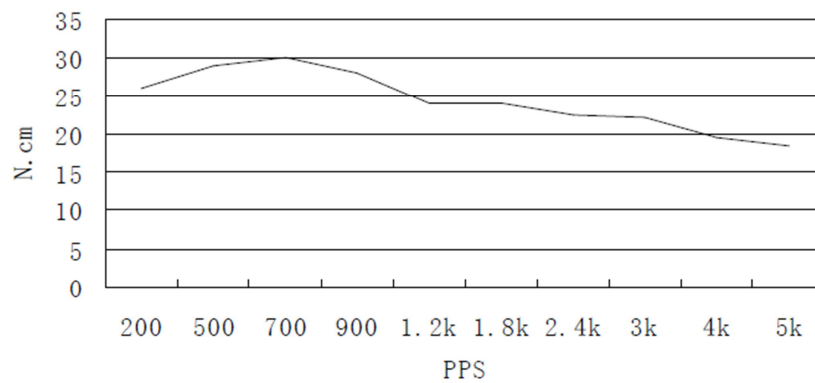


Figura 28: Parell motor del motor 42BYG en funció de la velocitat

En la Figura 29 es mostra de forma orientativa com es realitza el muntatge del conjunt sobre l'estructura i com s'interrelacionen les diferents parts del sistema motor:

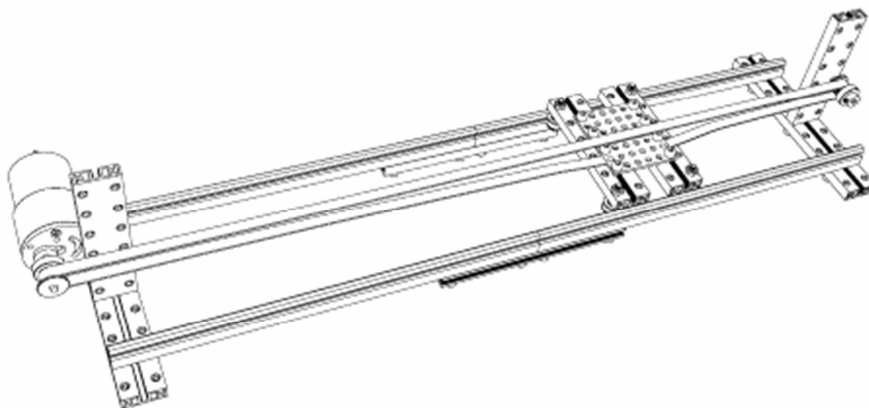


Figura 29: Esquema orientatiu de muntatge del pont mòbil amb el motor, el carro i els engranatges. En el cas final del projecte els rail són de menor llargària i el carro és de diferent construcció

Cal que el motor complisca amb el parell motor necessari per a manejar el conjunt. En aquest cas, serà sumar el pes dels elements estructurals i d'atomització del conjunt:

Element	Pes unitari (g)	Quantitat	Pes (g)
Broquet + cos	260	1	260
Pinça subjecció	60	1	60
Barra	20	1	20
Angles L1	10	2	20
Bigues 0824 144 mm	56	2	112
Bigues 0824 96 mm	36	2	72
Rodes-V	10	4	40
Connector corretges	10	2	20
Dipòsit	120	1	120
Dissolució	40	1	40
Total pes			764
Altres (10%)			76,4
Pes equivalent			840,4
Coeficient de seguretat 20% ->			
Pes càlcul			1008,48 g

Taula 13: Càlcul del pes que arrossegarà el motor

Aquest càlcul és conservador, i permetrà l'ús del mecanisme en condicions desfavorables.

Per al càlcul del parell motor, hauríem de calcular tant la força de fregament com el la força necessària per a produir l'acceleració i per a flexionar els tubs pneumàtics. No comptarem la força de fregament ja que en rodament és menyspreable comparativament.

Les condicions que imposarem per al funcionament ideal seran:

- Acceleració ràpida: a causa que el marge que tenim de carrera (la diferència entre la distància necessària per a efectuar l'atomització i la carrera màxima) és xicotet, necessitem assegurar que el règim permanent de velocitat l'assolisca ràpid. Així aconseguirem que el recorregut el faça a velocitat constant i les condicions d'atomització siguin les correctes. En particular, es demanarà que el motor arribe a la velocitat de règim en 0,1 s.
- Velocitat màxima: L'automatisme podrà programar la velocitat de carrera. Ara bé, conforme major és la velocitat, menor és el parell motor que es pot desenvolupar. En particular, es demanarà que en condicions de màxima velocitat, el motor recorregui la distància de treball (180 mm de zona calefactada+10mm d'amplada de feix, per tal d'assegurar que la deposició és totalment uniforme) en 1 s.

Així:

$$v_{carro} = \frac{carrera}{t_{carrera}} = \frac{0,190}{1} = 0,190 \text{ m/s}$$

$$a_{\text{carro}} = \frac{v_{\text{carro}}}{t_{\text{acceleració}}} = \frac{0,190}{0,1} = 1,9 \text{ m/s}^2$$

$$F_{\text{acceleració}} = m_{\text{carro}} \cdot a_{\text{carro}} = 1,008 \cdot 1,9 = 1,92 \text{ N}$$

Per altra banda, coneixem les característiques geomètriques de la corretja i l'engranatge del sistema motor:

Pas de la corretja = 2,032 mm

Nombre de dents de la roda dentada = 18

Circumferència = 2,032 · 18 = 36,576 mm

$$R = \frac{36,575}{2 \cdot \pi} = 5,82 \text{ mm}$$

$$M_{\text{motor}} = 1,92 \cdot 0,00582 = 0,01118 \text{ N} \cdot \text{m} = 1,118 \text{ N} \cdot \text{cm}$$

Per altra banda, 0,190 m/s de velocitat (190mm/s), impliquen una velocitat angular de:

$$\omega_{\text{motor}}(\text{rps}) = \frac{v_{\text{carro}}}{2 \cdot \pi \cdot R} = \frac{190}{2 \cdot \pi \cdot 5,82} = 5,2 \text{ rps (revolucions per segon)}$$

Tenint en compte que una revolució són 200 passos, atès l'angle de pas de 1,8°, la velocitat en passos per segon (PPS):

$$\omega_{\text{motor}}(\text{PPS}) = 5,2 \cdot 200 = 1039 \text{ PPS}$$

Podem observar el parell motor a eixa velocitat en la Figura 28 i ,com es pot veure, no hi ha cap problema amb el parell motor, i el motor podrà fer realitzar les tasques necessàries sense veure's afectat.

També és interessant conèixer la relació entre velocitat angular en rpm i velocitat lineal en mm/s, així com el temps d'atomització per capa, suposant 190 mm de carrera, per tal de fer-se una idea de les possibilitats d'operació.

Estes dades estaran relacionades de la següent forma:

$$\omega_{\text{motor}}(\text{rpm}) = \frac{\omega_{\text{motor}}(\text{PPS})}{200} \cdot 60$$

$$v_{\text{carro}} \left(\frac{\text{mm}}{\text{s}} \right) = \frac{\omega_{\text{motor}}(\text{rpm})}{60} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 5,82$$

$$t_a(\text{segons}) = \frac{L_{\text{carrera}}}{v_{\text{carro}}}$$

On t_a representa el temps d'atomització. La Taula 14 representa una mostra de velocitats expressades de diferent forma per a diversos temps d'atomització considerats.

temps d'atomització (segons) (1)	V_{carro} (mm/s)	ω_{motor} (rpm)	Passos per segon (PPS)
10	19	31,17	104
9	21,1	34,64	115
8	23,75	38,97	130
7	27,1	44,54	148
6	31,7	51,96	173
5	38	62,35	208
4	47,5	77,94	260
3	63,3	103,92	346
2	95	155,87	520
1	190	311,75	1039

(1) Per a una carrera de 190 mm de llargària

Taula 14: Velocitats del mecanisme per a diferents temps d'atomització.

4.2.6. Sistema electrònic de control

El sistema de control està basat en l'electrònica d'Arduino, i programat per ordinador. Una placa Meduino (100% compatible amb Arduino UNO) fa les funcions de placa base de la instal·lació. Aquesta placa es connecta a l'ordinador mitjançant USB i a la font d'alimentació.

A banda, la placa està connectada i controla amb connexió indirecta les vàlvules de control i el motor pas a pas. Es realitza així ja que tant el motor pas a pas com les vàlvules de control necessiten més intensitat de la que són capaços de proporcionar els pins d'eixida d'Arduino (només 40 mA).

La connexió del motor es realitza mitjançant un controlador comercial (Microstep), realitzat específicament per a aquests motors. Aquest controlador s'encarrega de transformar la informació del senyal de la placa en un senyal de potència. Tant la placa com el controlador són de la casa *Makeblock*.

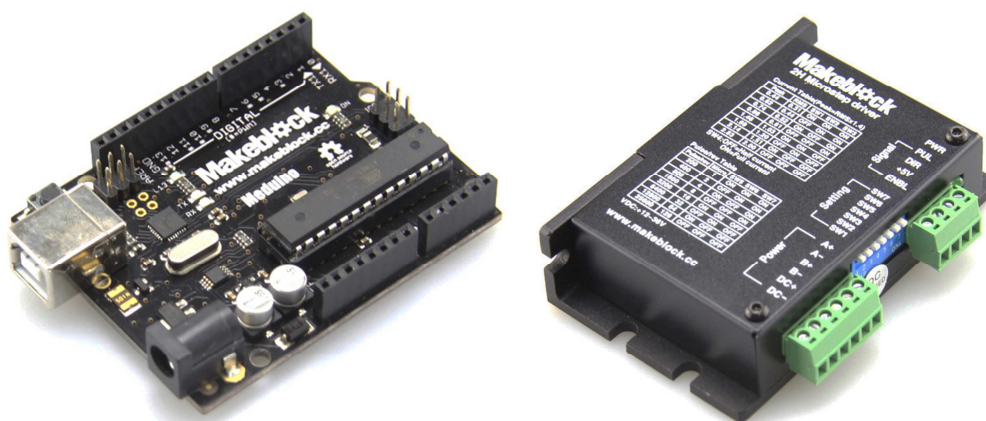


Figura 30: Placa base Meduino (esquerra) i controladora de motors pas a pas Microstep (dreta).

La connexió de les vàlvules es realitza mitjançant dos transistors de potència (el càlcul dels quals es troba en l'annex I). Aquests actuen com a interruptor electrònic, de forma que quan reben un senyal pel cable connectat al pin d'Arduino, obrin el pas de corrent directament des de la font d'alimentació. D'aquesta forma amplifiquen el senyal. Dues resistències protegeixen cadascuna de les bases dels dos transistors emprats d'un corrent excessiu.

Tot el sistema està alimentat per una font d'alimentació de 12 V_{cc}.

Característica	Valor
Entrada	AC110 - 240V 50/60 Hz
Eixida	DC 12V 5A
Potència	60W
Proteccions	Sobrecàrrega/ sobretensió / curtcircuit
Material	Metall
Pes	13.68 oz / 388 octies
Color	Plata
Dimensió	(158 x 98 x 4) mm / 6.22 "x 3.85" x 1.57 "(L x W x H)



Taula 15 i figura 31: Font d'alimentació. Característiques de disseny.

L'esquema de connexió de tots els elements electrònics es pot veure en la Figura 33. Cal remarcar que tot i que s'utilitzarà un LED en el pin 13 que indicarà que la màquina està operant, aquest ve integrat en la placa, de forma que no cal fer cap connexió.

També s'incorpora el final de carrera, que com s'ha indicat abans, indicarà que el carro està col·locat en el lloc adient.



Figura 32: Final de carrera utilitzat (de rodet).

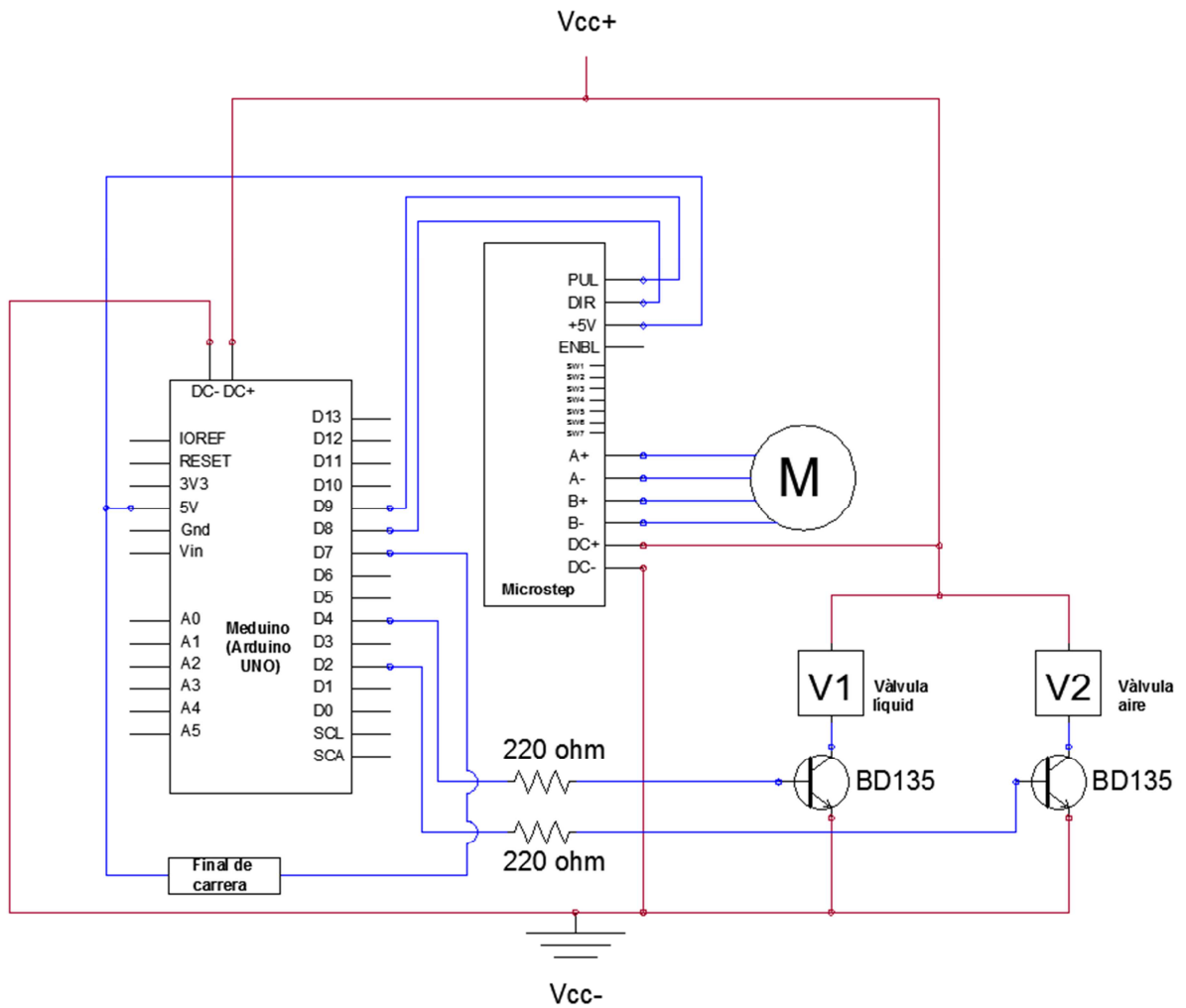


Figura 33: Esquema de connexió elèctric de la instal·lació. En el pin 13 de la placa s'utilitza un LED, però com que està integrat en la mateixa placa no cal fer connexions.

4.2.7. Proteccions

La protecció principal seran panells de metacrilat transparent de 5 mm d'espessor. Aquests es col·locaran en tot el perímetre interior de l'estructura (Figura 34). La funció és aïllar l'exterior de les dissolucions atomitzades i per tant, evitar la contaminació de l'ambient i possibles taques en l'exterior. La protecció davantera estarà proveïda de frontisses per tal de permetre l'obertura.

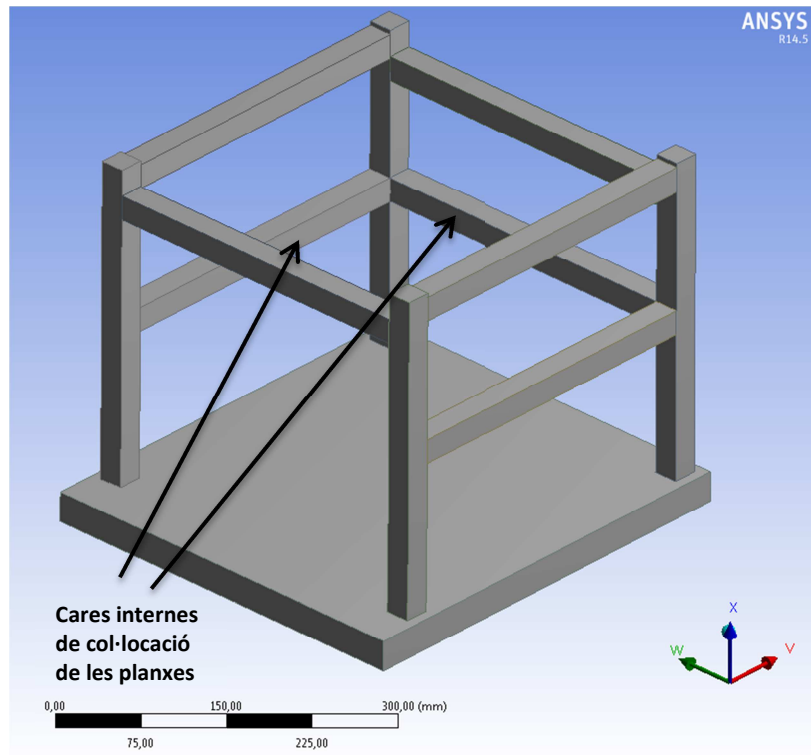


Figura 34: Situació de les planxes de metacrilat de protecció. Les fletxes apunten a la cara interior de dos costats de l'estructura. En les dues cares restants es faria la mateixa col·locació.

4.3. PARÀMETRES DE CONTROL DEL CICLE

El programa de control de la màquina podrà variar una sèrie de paràmetres per tal d'adaptar el cicle de la màquina als requeriments del procés que es vol realitzar. Dits paràmetres seran:

Paràmetre	Descripció
Mode	El mode permet triar el tipus d'operació del cicle. Tres modes són possibles: <ol style="list-style-type: none">Mode unidireccional: les passades es realitzen sempre en el mateix sentit. Després de cada passada el broquet torna al punt inicial.Mode bidireccional: les passades es realitzen en tots dos sentits. Després de cada passada el broquet roman en el lloc. La següent passada la realitza en sentit de tornada i així successivament.Mode de depuració. El broquet se situa en el punt de neteja (punt inicial) i atomitza sense moviment del pont. L'objectiu és netejar el dipòsit, els conductes i el broquet de dissolució.
Longitud total de desplaçament(L_t) *	La carrera total es defineix com el desplaçament total que efectua el pont mòbil en cada moviment. Inclou la precarrera (moviment previ a la carrera d'atomització que s'efectua amb la vàlvula d'aire encesa però la de líquid parat), la carrera d'atomització i la postcarrera (moviment posterior amb les mateixes característiques que la precarrera).
Longitud de carrera d'atomització (L_c)	La longitud que recorre el pont mòbil atomitzant dissolució sobre les platines.
Velocitat del carro (v_c)	Velocitat de desplaçament del pont mòbil mentre fa el recorregut
Nombre de capes (n_p)	Nombre de vegades que es realitza l'operació d'escombratge i deposició de dissolució en un cicle, que seran les passades que farà la el carro.
Temps entre capes (t_c)	Temps que la màquina roman parada entre cada passada.
Temps de purga (t_p)	Temps addicional després de cada passada en el qual es queda obert l'aire d'alimentació però el líquid parat. S'utilitza per a buidar de líquid el broquet i evitar el degoteig.
Temps inicial (t_i)	Temps que es deixa al principi del cicle per tal que la placa arriba a règim estacionari.
Temps de depuració (t_d)	Temps que dura l'operació de depuració del sistema.
Mode de neteja en temps infinit de depuració	En aquest submode, que depèn del mode de neteja, la màquina no atura l'operació de depuració fins que l'usuari no ho decideix.

*La longitud de precarrera i postcarrera és igual en tots dos casos, de forma que no hi hagen distorsions en l'operació d'atomitzat en el mode bidireccional, i igual a $L_{pc} = \frac{L_t - L_c}{2}$

Taula 16: Paràmetres de control del cicle

4.4. DESCRIPCIÓ DELS CICLES D'OPERACIÓ

El cicle triat, una volta iniciat, farà les operacions que estiguen programades, tenint en compte els valors introduïts per als paràmetres de control. Tal com s'ha explicat anteriorment, hi ha tres modes de funcionament. Cada mode té associat un cicle diferent, que són desenvolupats en aquest apartat.

4.4.1. Cicle d'operació en mode unidireccional

Fase del cicle	Número d'operació	Tipus d'operació	Descripció
Operacions prèvies manuals.	0.a	Preparació de la maquinària	Cal col·locar les platines sobre el plat, i protegir els zones no cobertes per les platines. Una volta realitzat el muntatge cal connectar el plat calefactor i seleccionar la temperatura desitjada per a l'operació (450°C per als objectius del present projecte). S'ompli el dipòsit de la dissolució necessària.
	0.b	Programació i encesa de la màquina	Es programen els paràmetres i s'acciona la màquina de forma manual.
Inici	1	Encesa de LED	S'encén el LED que indica que la màquina està treballant
	2	Espera	La màquina espera un temps inicial, per tal de deixar que la placa entre en règim tèrmic permanent.
Precarrera	3	Obertura de vàlvula - línia d'aire	S'obri l'aire d'atomització mitjançant la vàlvula elèctrica, però l'entrada de líquid roman tancada. D'aquesta forma, quan obrirem l'entrada de líquid, ja s'haurà aconseguit un règim permanent de l'aire.
	4	Moviment del carro - recorregut de precarrera	Se subministra corrent al motor per tal que s'inici el moviment d'escombratge del pont mòbil.
	5	Obertura de vàlvula - línia de líquid	Al final de la precarrera s'obri el cilindre que permet el pas de dissolució, gràcies a la vàlvula de control elèctrica. Comença l'atomització.
Carrera d'atomització	6	Moviment del carro - recorregut de carrera	Es recorre la zona calefactada mentre s'atomitza la dissolució.
Postcarrera	7	Tancament de vàlvula - línia de líquid	Acabada la carrera es tanca la vàlvula que acciona el cilindre d'alimentació de líquid. L'entrada d'aire d'atomització roman obert. D'aquesta forma es neteja el conducte de líquid i s'evita el degoteig del broquet una volta acabada l'atomització.
	8	Moviment del carro - recorregut de postcarrera	Realització del recorregut de la post carrera.
	9	Aturada del motor	Arribat al final del rail, el motor es para. Com que és motor pas a pas, el final del recorregut es realitza mitjançant programació i no s'utilitza un mecanisme de final de carrera.
	10	Espera	Si s'ha seleccionat un temps de purga addicional, el mecanisme continua el temps seleccionat amb l'admissió d'aire oberta i el motor parat.
	11	Tancament de vàlvula - línia d'aire	Es tanca l'admissió d'aire al broquet, de forma que la màquina queda en repòs.
Temps d'espera entre capes	12	Espera	La màquina roman en repòs el temps seleccionat.
Capess següents	13	Repetició d'operacions 3-12 en sentit invers	Es realitzen les operacions de precarrera, carrera, postcarrera i temps d'espera exactament igual, però en sentit invers de moviment. Esta operació es repeteix en tant que hi haja passades programades.
Operacions finals	14	Moviment del carro - recorregut total en retorn (condició: el carro es troba en la posició oposada a la d'inici. En cas contrari, saltar operació)	Després del temps d'espera de l'última capa, si el carro de la màquina es troba en la posició oposada a la inicial, realitza els recorreguts de precarrera, carrera i postcarrera en sentit de tornada amb la línia d'aire i la de líquid tancades.
	15	Apagat de LED	El LED d'operació s'apaga, indicant que la màquina ha acabat el cicle.

Taula 17: Full d'operacions en cicle unidireccional

4.4.2. Cicle d'operació en mode bidireccional

Fase del cicle	Número d'operació	Tipus d'operació	Descripció
Operacions prèvies manuals.	0.a	Preparació de la maquinària	Cal col·locar les platines sobre el plat, i protegir les zones no cobertes per les platines. Una volta realitzat el muntatge cal connectar el plat calefactor i seleccionar la temperatura desitjada per a l'operació (450 ^o C per als objectius del present projecte). S'ompli el dipòsit de la dissolució necessària.
	0.b	Programació i encesa de la màquina	Es programen els paràmetres i s'acciona la màquina de forma manual.
Inici	1	Encesa de LED	S'encén el LED que indica que la màquina està treballant
	2	Espera	La màquina espera un temps inicial, per tal de deixar que la placa entre en règim tèrmic permanent.
Precarrera	3	Obertura de vàlvula línia d'aire	S'obri l'aire d'atomització mitjançant la vàlvula elèctrica, però l'entrada de líquid roman tancada. D'aquesta forma, quan obrirem l'entrada de líquid, ja s'haurà aconseguit un règim permanent de l'aire.
	4	Moviment del carro recorregut de precarrera	Se subministra corrent al motor per tal que s'iniciï el moviment d'escombratge del pont mòbil.
	5	Obertura de vàlvula línia de líquid	Al final de la precarrera s'obri el cilindre que permet el pas de dissolució, gràcies a la vàlvula de control elèctrica. Comença l'atomització.
Carrera d'atomització	6	Moviment del carro recorregut de carrera	Es recorre la zona calefactada mentre s'atomitza la dissolució.
Postcarrera	7	Tancament de vàlvula línia de líquid	Acabada la carrera es tanca la vàlvula que acciona el cilindre d'alimentació de líquid. L'entrada d'aire d'atomització roman obert. D'aquesta forma es neteja el conducte de líquid i s'evita el degoteig del broquet una volta acabada l'atomització.
	8	Moviment del carro recorregut de postcarrera	Realització del recorregut de la post carrera.
	9	Aturada del motor	Arribat al final del rail, el motor es para. Com que és motor pas a pas, el final del recorregut es realitza mitjançant programació i no s'utilitza un mecanisme de final de carrera.
	10	Espera	Si s'ha seleccionat un temps de purga addicional, el mecanisme continua el temps seleccionat amb l'admissió d'aire oberta i el motor parat.
	11	Tancament de vàlvula línia d'aire	Es tanca l'admissió d'aire al broquet
	12	Moviment del carro recorregut total en retorn	El carro realitza els recorreguts de precarrera, carrera i postcarrera en sentit invers amb la línia d'aire i la de líquid tancades.
Temps d'espera entre capes	13	Espera	La màquina roman en repòs el temps seleccionat.
Capess següents	14	Repetició d'operacions 3-12	Es realitzen les operacions de precarrera, carrera, postcarrera i temps d'espera exactament igual. Esta operació es repeteix en tant que hi haja passades programades.
Operacions finals	15	Apagat de LED	El LED d'operació s'apaga, indicant que la màquina ha acabat el cicle.

Taula 18: Full d'operacions en cicle bidireccional

4.4.3. Cicle d'operació en mode de neteja

En el mode de neteja el carro no es maneja de lloc i senzillament s'atomitza un temps predeterminat o fins que l'usuari decideix parar. Per a l'ús del mode de neteja s'ha d'acoblar un embut amb un tub a la punt del broquet atomitzador, per tal d'eliminar el líquid que s'atomitza, i que no quede en la màquina.

Mode amb temps predeterminat

Fase del cicle	Número d'operació	Tipus d'operació	Descripció
Operacions prèvies manuals.	0	Programació i encesa de la màquina	Es programen els paràmetres i s'acciona la màquina de forma manual.
Inici	1	Encesa de LED	S'encén el LED que indica que la màquina està treballant
Neteja	3	Obertura de vàlvula línia d'aire	S'obri la línia d'aire
	4	Obertura de vàlvula línia de líquid	S'obri la línia de líquid, de forma que el broquet atomitza en posició de repòs
	5	Espera	La màquina roman en espera el temps programat (t_d)
Operacions finals	7	Tancament de vàlvula línia de líquid Espera	Es tanca l'admissió de líquid al broquet Es realitza el temps de purga per tal que el broquet quede buit de líquid.
	8	Tancament de vàlvula línia d'aire	Es tanca l'admissió d'aire al broquet
	9	Apagat de LED	El LED d'operació s'apaga, indicant que la màquina ha acabat el cicle.

Taula 19: Full d'operacions en cicle de neteja, mode amb temps predeterminat.

Mode amb temps infinit

Fase del cicle	Número d'operació	Tipus d'operació	Descripció
Operacions prèvies manuals.	0	Programació i encesa de la màquina	Es programen els paràmetres i s'acciona la màquina de forma manual.
Inici	1	Encesa de LED	S'encén el LED que indica que la màquina està treballant
Neteja	3	Obertura de vàlvula línia d'aire	S'obri la línia d'aire
	4	Obertura de vàlvula línia de líquid	S'obri la línia de líquid, de forma que el broquet atomitza en posició de repòs
	5	Espera	La màquina roman en espera de forma indeterminada
Operació manual	6	Interacció amb l'usuari	L'usuari indica a la màquina que acabe l'operació de neteja.
Operacions finals	7	Tancament de vàlvula línia de líquid Espera	Es tanca l'admissió de líquid al broquet Es realitza el temps de purga per tal que el broquet quede buit de líquid.
	9	Tancament de vàlvula línia d'aire	Es tanca l'admissió d'aire al broquet
	10	Apagat de LED	El LED d'operació s'apaga, indicant que la màquina ha acabat el cicle.

Taula 20: Full d'operacions en cicle de neteja, mode de temps infinit.

5. Programa de control

En aquesta secció s'inclourà el programa de control que governarà la màquina dissenyada. Hi ha dues formes de que execute l'operació: directament des del codi d'Arduino (llenguatge de programació escrit) o mitjançant l'eina Labview (instrumentació digital). En general, l'ús de la màquina, per comoditat, es farà per Labview, que ofereix un entorn gràfic amb més possibilitats d'interacció. El programa en llenguatge escrit s'inclou per ser més compatible i no necessitar d'un programari comercial.

5.1.1. Programa de control en llenguatge Arduino

Presentem el programa de control escrit directament en el llenguatge Arduino. En aquesta solució els paràmetres d'operació s'introdueixen canviant directament el codi. En particular, abans del programa de control pròpiament dit, hi ha un apartat de definicions. En aquesta secció estan com “#define” tots els paràmetres de control, amb una explicació de què és cadascun d'aquests per a facilitar la comprensió. S'utilitza la instrucció *define* per a facilitar el canvi dels valors i previndre errors: només s'han de canviar els valors de la secció inicial per a modificar els paràmetres, en cap cas s'ha de canviar les funcions dels programa de control.

El funcionament és senzill. Cal tindre el programa d'Arduino baixat i instal·lat en l'ordinador que vaja a fer de controlador. Una volta configurada la placa es modifiquen els “define” del codi que es desitgen, per tal d'adaptar el cicle, i s'executa.

Si hi ha diferents casos que es repeteixen sovint i on s'ha trobat una configuració òptima, el més còmode serà realitzar diferents còpies de l'arxiu amb els paràmetres modificats, de forma que es carregue cada volta el que siga d'interès.

Es presenta ací el codi, que compta amb comentaris detallats del funcionament de cada instrucció.

```

1  /* PROGRAMA DE CONTROL D'ATOM-UJI
2  Aquest programa pretén automatitzar el procés de deposició de capes
3  */
4
5  #include <Stepper.h>
6  /*Definició de connexions */
7  // <=== Pins dels motors ===>
8  #define MOTORPIN1 8
9  #define MOTORPIN2 9
10
11 // <=== Pin de la vàlvula d'aire ===>
12 #define VALVULA_A 2
13
14 // <=== Pin de l'alimentació de dissolució ===>
15 #define VALVULA_D 4
16
17 // <=== Pin del LED de funcionament ===>
18 #define LED 13
19
20 // <=== Pin del final de carrera ===>
21 #define FIN 7
22
23 // <=== Pin del boto d'inici ===>
24 #define INICI 12
25
26 /* <=== Nombre de passos per cada volta. No canviar si no es canvia el motor
27 ===>
28 Motor per a la configuració actual: 42BYG
29 PHASE : 2PHASE
30 STEP ANGLE : 1.8+-5%/STEP
31 VOLTAGE : 2.55V
32 CURRENT : 1.7A/PHASE
33 RESISRANCE : 1.5+-10%/PHASE
34 INDUCRANCE : 2.8+-20%mH/PHASE
35 HOLDING TORQUE : 40N.cm Min
36 DERENT TORQUE : 2.2N.cm Max
37 INSULATION CLASS : B
38 LEAD STYLE : AWG26 UL1007
39 ROTOR TORQUE : 54G.cm2*/
40 #define STEPS 200
41
42 /* <=== Definició de la velocitat del motor en revolucions per minut ===> */
43 #define VELOCITAT 200
44
45 /* <=== Definició del nombre de capes que tirarem ===> */
46 #define CAPES 4
47
48 /* <=== Definició de la longitud total que es desplaçarà el carro en cada
49 sentit ===> */
50 #define L_TOTAL 4000 // CALCULAR!!
51
52 /* <=== Definició de la longitud de la carrera que farà el carro ===> */
53 #define CARRERA 4000 // CALCULAR!!
54
55 /* <=== Definició del temps d'espera entre cada pas, una volta acabada la
56 polvorització ===> */
57 #define TCAPA 180000
58

```

```

59  /* <=== Definició del temps de neteja del broquet una volta acabada la
60  carrera (vàlvula d'aire encesa, però sense alimentació d'aigua) ===> */
61  #define TPURGA 1000 // CALCULAR!!
62
63  /* <=== Definició del temps inicial d'espera (per possibilitar el calfament
64  de la placa) ===> */
65  #define TINICIAL 0
66
67  /* <=== Definició del temps inicial d'espera (per possibilitar el calfament
68  de la placa) ==> */
69  #define TNETEJA 0
70
71  /* Definició del mode d'atomització:
72  0 - Indica que atomitzarà a l'anar i al tornar el carro. Després de cada
73  atomització reposa on ha acabat el moviment.
74  1 - Indica que atomitzarà només en una direcció, i tornarà des de cada
75  atomització a la posició inicial.
76  Altre valor - Indica que la màquina efectuarà el mode de neteja */
77  #define MODE 0
78
79
80  void setup()
81  {
82      pinMode(VALVULA_A, OUTPUT);
83      pinMode(VALVULA_D, OUTPUT);
84      pinMode(LED, OUTPUT);
85      pinMode(FIN, INPUT);
86      pinMode(INICI, INPUT);
87
88
89      /* Definició del nom del motor ("motor"). Configurem el nombre de CAPES
90  per volta i els pins de control, tot definit al principi*/
91      Stepper motor(STEPS, MOTORPIN1, MOTORPIN2);
92      //Configurem la velocitat del motor en revolucions per minut
93      motor.setSpeed(VELOCITAT);
94  }
95
96  void loop()
97  {
98      lpc = (L_TOTAL - CARRERA)/2; /* Càlcul de la longitud de precarrera i
99      postcarrera, en passos del motor */
100     int opcio = MODE;
101
102     while(digitalRead(FIN) == HIGH)
103     {
104         motor.step(-1);
105     }
106     if(digitalRead(ENCESA) == HIGH)
107     {
108         if(opcio == 0) // &&&&&& MODE BIDIRECCIONAL &&&&&&
109         {
110             // <== INICI CICLE ==>
111             delay(TINICIAL);
112             // Marquem que la màquina està treballant encenent el LED
113             digitalWrite(LED, HIGH);
114             /* Creem l'indicador del sentit, aquest anirà canviant en
115             cada carrera d'atomització */
116             int sentit = 1;
117

```

```

118     for(int x = 0; x < CAPES; x++)
119     {
120         // <== CARRERA ==>
121         /* Obrim la vàlvula d'admissió d'aire al broquet
122         polvoritzador */
123         digitalWrite(VALVULA_A, HIGH);
124         // Recorrem la precarrera
125         motor.step(sentit*lpc);
126         // Obrim la vàlvula d'admissió de dissolució
127         digitalWrite(VALVULA_D, HIGH);
128         // Recorrem la carrera d'atomització
129         motor.step(sentit*CARRERA);
130         // Tanquem la vàlvula d'admissió de la dissolució
131         digitalWrite(VALVULA_D, LOW);
132         // Recorrem la postcarrera
133         motor.step(sentit*lpc);
134
135         // <== PURGA ==>
136         //Si hem programat temps de purga
137         delay(TPURGA);
138         //Tanquem la vàlvula d'admissió d'aire
139         digitalWrite(VALVULA_A, LOW);
140
141         // <== TEMPS ENTRE CAPES ==>
142         /* Programem l'espera de temps entre CAPES, sempre
143         que no siga l'últim. Si és l'últim pas s'acaba la
144         funció. */
145         if(x < (CAPES-1))
146             delay(TCAPA);
147         else
148         {
149             /* <== CARRERA DE TORNADA ==> (només si
150             l'operació acaba en el costat del pont
151             contrari, equivalent carreres imparells)*/
152             if(CAPES & 0x01) /* Analitzem si el bit menys
153             significatiu és 1 o 0, per a saber si és parell o
154             imparell */
155                 motor.step(-(L_TOTAL));
156             }
157         // Canviem el sentit per a la propera atomització.
158         sentit *= -1;
159     }
160     }
161     else if(opcio == 1) // &&&&&& MODE UNIDIRECCIONAL &&&&&&
162     {
163         // <== INICI CICLE ==>
164         // Marquem que la màquina està treballant encenent el LED
165         digitalWrite(LED, HIGH);
166         /* Esperem el temps inicial per tal que es calfe la placa, si
167         l'hem programat */
168         delay(TINICIAL);
169
170         for(int x = 0; x < CAPES; x++)
171         {
172             // <== CARRERA D'ANADA ==>
173             // Obrim la vàlvula d'admissió d'aire al broquet polvoritzador
174             digitalWrite(VALVULA_A, HIGH);
175             // Recorrem la precarrera
176             motor.step(lpc);
177             // Obrim la vàlvula d'admissió de dissolució

```



```

177         digitalWrite(VALVULA_D, HIGH);
178         // Recorrem la carrera d'atomització
179         motor.step(CARRERA);
180         // Tanquem la vàlvula d'admissió de la dissolució
181         digitalWrite(VALVULA_D, LOW);
182         // Recorrem la postcarrera
183         motor.step(lpc);
184
185         // <== PURGA ==>
186         // Si hem programat temps de neteja, l'executem ara
187         delay(TPURGA);
188         //Tanquem la vàlvula d'admissió d'aire
189         digitalWrite(VALVULA_A, LOW);
190
191         // <== CARRERA DE TORNADA ==>
192         motor.step(-(L_TOTAL));
193
194         // <== TEMPS ENTRE CAPES ==>
195         /* Programem l'espera de temps entre CAPES, sempre que no siga
196         l'últim. Si és l'últim pas s'acaba la funció. */
197         if(x < (CAPES-1))
198             delay(TCAPA);
199     }
200 }
201
202 else // &&&&&& MODE NETEJA &&&&&&
203 {
204     // <== INICI CICLE ==>
205     // Marquem que la màquina està treballant encenent el LED
206     digitalWrite(LED, HIGH);
207     // Obrim la vàlvula d'admissió d'aire al broquet polvoritzador
208     digitalWrite(VALVULA_A, HIGH);
209     // Obrim la vàlvula d'admissió de dissolució
210     digitalWrite(VALVULA_D, HIGH);
211
212     // <== TEMPS DE NETEJA ==>
213     // Esperem el temps de neteja programat
214     delay(TNETEJA);
215
216     // <== FINAL ==>
217     // Tanquem la vàlvula d'admissió de la dissolució
218     digitalWrite(VALVULA_D, LOW);
219     // <== PURGA ==>
220     //Si hem programat temps de purga, l'executem ara
221     delay(TPURGA);
222     //Tanquem la vàlvula d'admissió d'aire
223     digitalWrite(VALVULA_A, LOW);
224 }
225 }
226 }

```

5.1.2. Programa de control en Labview

El programa de control en Labview està dotat de més opcions, facilitats i interacció amb l'usuari. Suporta tots els modes d'ús plantejats per a la màquina i dona informació d'interès a l'usuari. El panell de control (Figura 35) està estructurat en dues columnes.

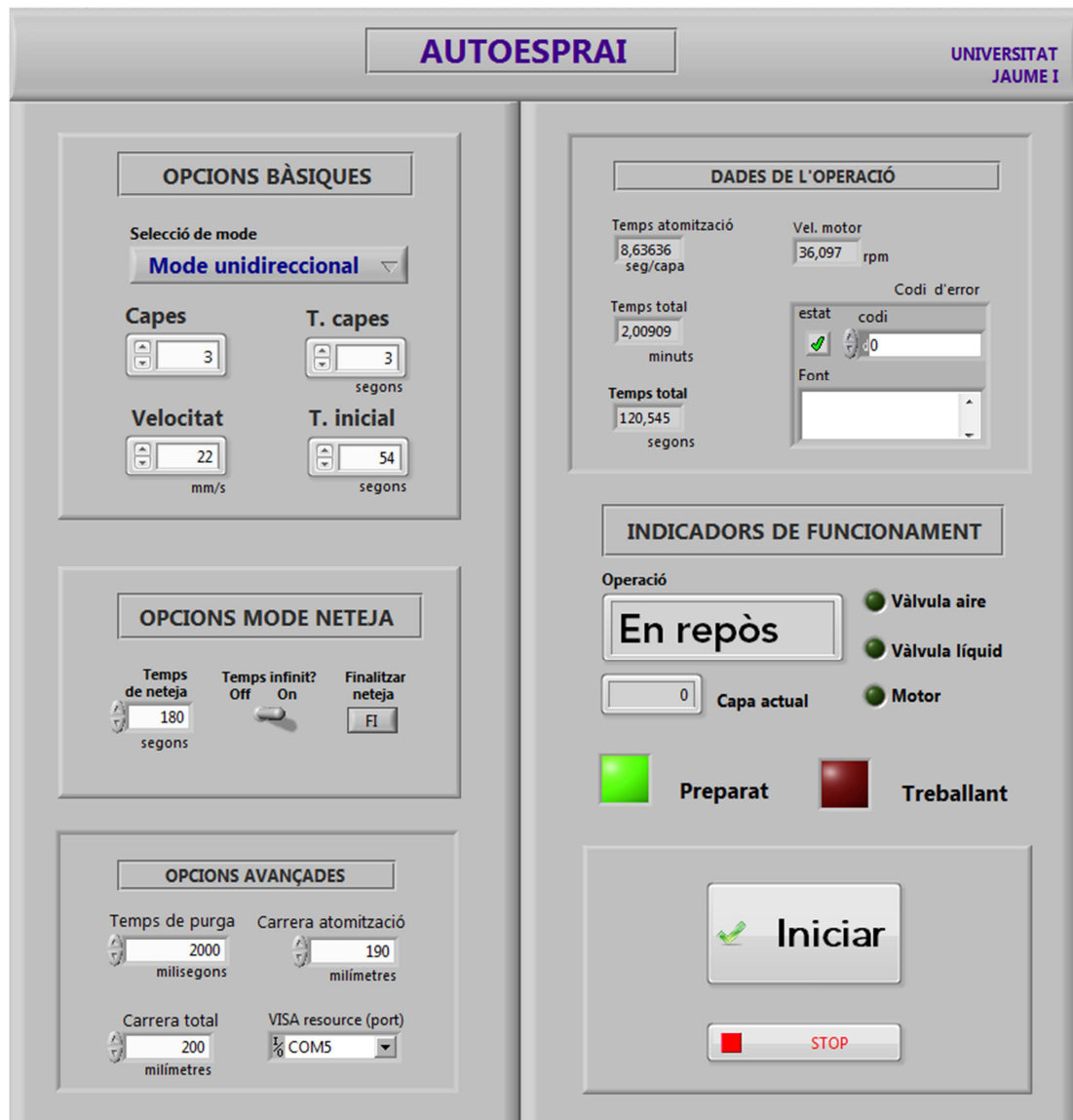


Figura 35: Panell de control de la màquina en Labview

El funcionament és senzill. Prèviament cal tenir el software d'Arduino instal·lat, així com un Labview 2009 o superior. Cal tenir instal·lat també el paquet *Labview interface for Arduino*. Es carrega aleshores el programa que prepara l'Arduino per a suportar Labview, i després de realitzar l'adequada configuració es podrà utilitzar (hi ha abundant bibliografia al voltant de com realitzar aquestes operacions).

Una volta obert l'arxiu que conté el programa, s'inicia el programa des de la consola de Labview. El programa entra en execució però no efectuarà cap cicle fins que no es polse el botó "Iniciar". Podem en aquest moment canviar les opcions de control i observar les dades d'operació. Una volta es prem el botó "Iniciar", el programa és automàtic fins que acaba el cicle. A continuació s'expliquen de forma detallada les funcionalitats del programa.

A continuació s'expliquen les opcions i funcionalitats del panell de control del programa. En el cas de les opcions de control, s'indica quan pertoca a quin paràmetre de control correspon de la secció 4.3.

Funcionalitat: opcions de control (columna esquerra)

Bloc	Element	Unitat	Explicació de l'element
Opcions bàsiques (paràmetres importants per al control del procés. A excepció de la selecció de mode, la resta d'opcions no són d'ús en el mode de neteja)	Selecció de mode		Aquesta és l'opció bàsica, corresponent al paràmetre mode. El mode permet triar el tipus d'operació del cicle. Tres modes són possibles: <ol style="list-style-type: none"> Mode unidireccional: les passades es realitzen sempre en el mateix sentit. Després de cada passada el broquet torna al punt inicial. Mode bidireccional: les passades es realitzen en tots dos sentits. Després de cada passada el broquet roman en el lloc. La següent passada la realitza en sentit de tornada i així successivament. Mode de depuració. El broquet se situa en el punt de neteja (punt inicial) i atomitza sense moviment del pont. L'objectiu és netejar el dipòsit, els conductes i el broquet de dissolució.
	Capes		Permet introduir el nombre de capes que atomitzarà la màquina. Es correspon amb el paràmetre "nombre de capes" (n_c)
	T. capes	segons	Permet introduir el temps que esperarà la màquina entre atomitzacions, per tal de deixar que es fixe la capa. Correspon al paràmetre "temps entre capes" (t_c).
	Velocitat	mm/s	Selecció de la velocitat d'avançament del carro. S'ha d'expressar en mil·límetres per segon i correspon al paràmetre "velocitat del carro" (v_c).
	T. inicial	segons	Permet introduir el temps en que esperarà la màquina abans de començar el cicle d'atomització, per tal de deixar que es fixe la capa
Opcions mode neteja (paràmetres d'importància per al control d'aquest mode. No són d'aplicació en la resta de modes)	Temps de neteja	segons	Permet triar el temps en segons que es depurarà el sistema en el mode de neteja. Per tal que faça ús d'aquest paràmetre la palanca de temps infinit ha d'estar en posició "off". Correspon al paràmetre "temps de depuració" (t_d)
	Temps infinit?		Interruptor per a la selecció del mode de neteja. Si està en posició "off", la màquina es netejarà el temps determinat en "Temps de neteja". Si està en posició "on" netejarà fins que l'usuari polse "finalitzar neteja".
	Finalitzar neteja		Botó que serveix per a parar el mode de neteja quan està operant en mode de temps infinit. Després de polsar el botó, la màquina roman 5 segons amb la vàlvula de líquid tancada i la d'aire oberta per a acabar de purgar el líquid abans d'acabar l'operació.
Opcions avançades (opcions que una volta configurada la màquina i sense haver-hi canvis al procés, no es recomana canviar)	Temps de purga	milisegons	Temps addicional després de cada passada (en milisegons) en el qual es queda obert l'aire d'alimentació però el líquid parat. S'utilitza per a buidar de líquid el broquet i evitar el degoteig. Correspon al paràmetre "temps de purga" (t_p).
	Carrera d'atomització	mil·límetre s	La longitud que recorre el pont mòbil atomitzant dissolució sobre les platines. Correspon al paràmetre "Longitud de carrera d'atomització" (L_c)
	Carrera total	mil·límetre s	La carrera total es defineix com el desplaçament total que efectua el pont mòbil en cada moviment. Inclou la precarrera (moviment previ a la carrera d'atomització que s'efectua amb la vàlvula d'aire encesa però la de líquid parat), la carrera d'atomització i la postcarrera (moviment posterior amb les mateixes característiques que la precarrera). Correspon al paràmetre "longitud total de desplaçament" (L_t).
	VISA resource (port)		Port de comunicació amb Arduino. En general serà un port "COM".

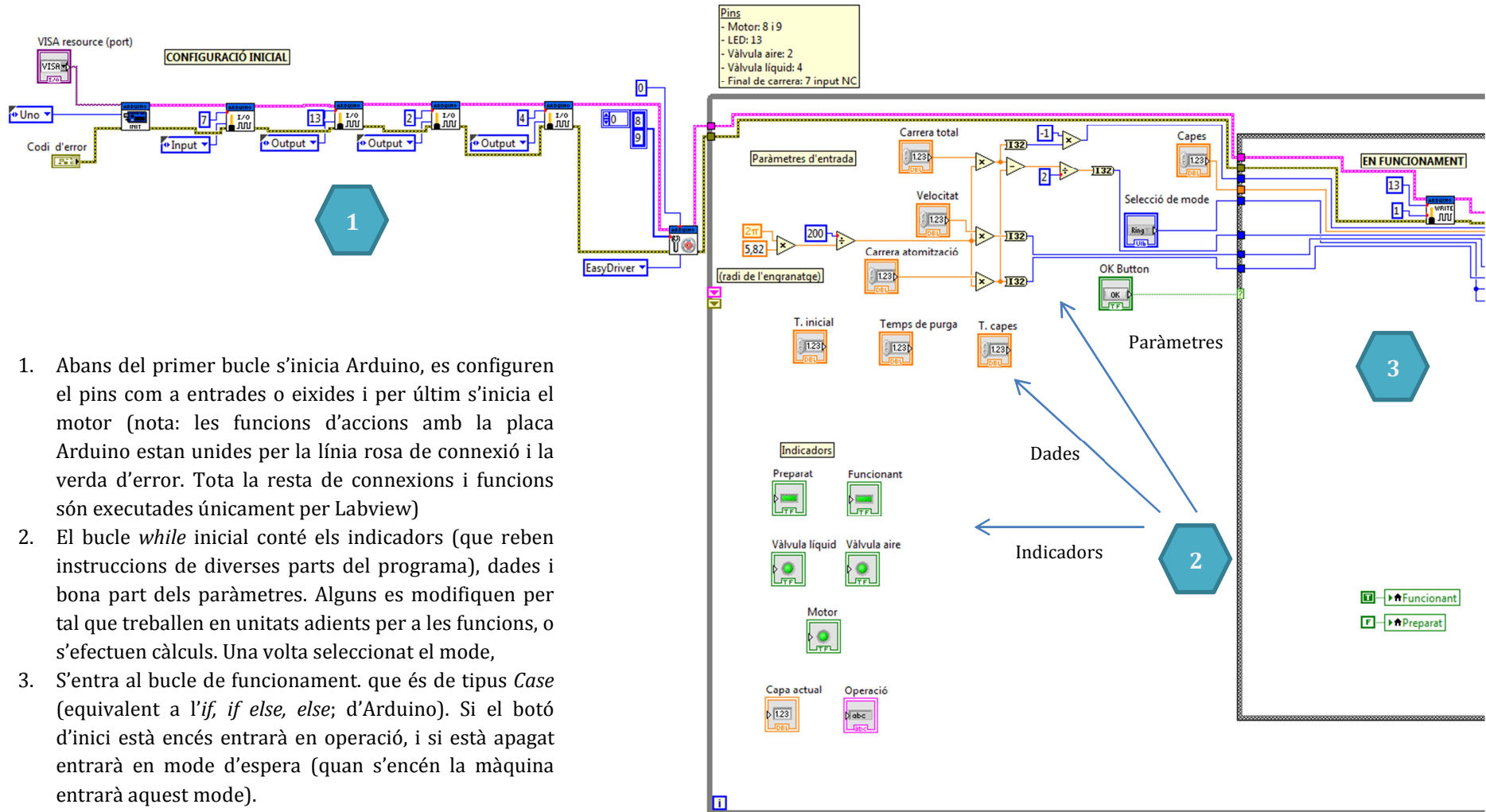
Taula 21: Explicació del funcionament dels elements de la columna esquerra del panells de control (opcions de control i de configuració)

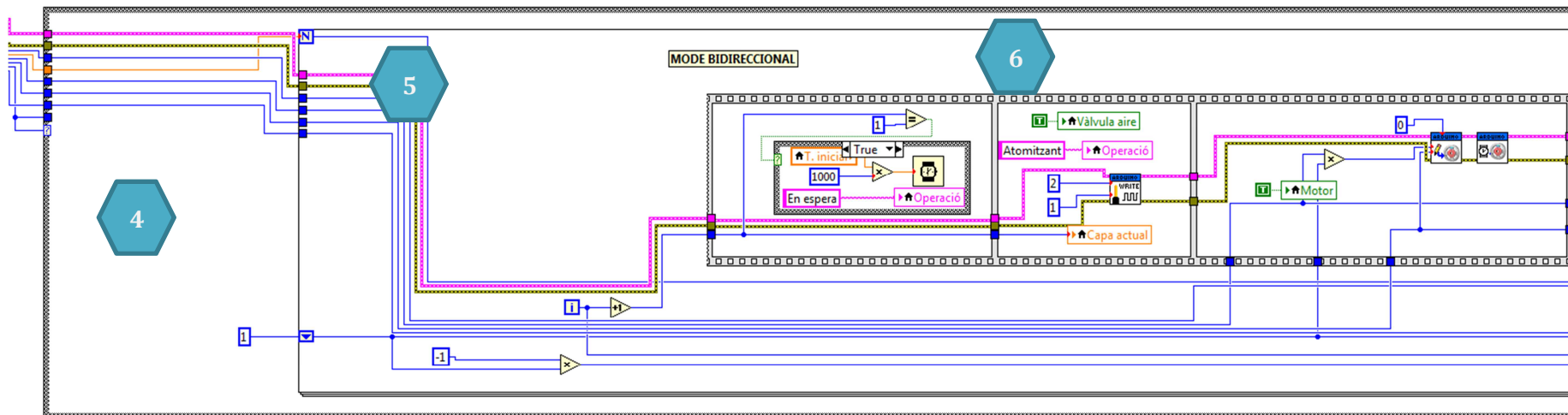
Dades, indicadors i control d'execució (columna dreta)

Bloc	Element	Unitat	Explicació de l'element
Dades de l'operació (Dades que es donen per a comoditat de l'usuari)	Temps d'atomització	segons	Proporciona el temps que estarà atomitzant el broquet per cada capa. És interessant per saber quanta dissolució s'està consumint i per extensió, la quantitat de material que s'està aportant a la capa.
	Vel. motor	Revolucions per minut (rpm)	Indica la velocitat del motor en rpm, la forma més usual d'expressar la velocitat angular.
	Temps total	minuts	Indica la durada total del cicle (incloent el temps inicial) amb les opcions seleccionades. És útil per tal que l'usuari sàpiga quan pot replegar les mostres i així programar altres activitats.
	Temps total	segons	És el mateix indicador que l'anterior però expressat en segons
	Codi d'error		Presenta si hi ha errors en execució i els descriu.
Indicadors de funcionament (Indicadors que il·lustren en cada moment què està funcionant o quin és l'estat de la màquina)	Operació		Dóna informació escrita de què fa la màquina en el moment present. Té els següents estats: <ul style="list-style-type: none"> - En repòs: Indica que la màquina està parada. - Atomitzant: Indica que s'està efectuant l'atomització. - En espera: Expressa que la màquina està en funcionament però en mode d'espera (siga per al temps entre capes o el temps inicial). - Finalitzant: Indicador que es posa després de l'última atomització i indica que s'està realitzant l'últim temps d'espera entre capes.
	Capa actual		Indica quina és la capa actual en què s'està treballant.
	Vàlvula aire		Pilot que si està encés indica que la vàlvula d'aire està en funcionament.
	Vàlvula líquid		Pilot que si està encés indica que la vàlvula de líquid està en funcionament.
	Motor		Pilot que si està encés indica que el motor està en funcionament.
	Preparat		Aquest pilot encés indica que la màquina està preparada per a iniciar una operació. Només es pot donar quan està en repòs.
	Treballat		Aquest pilot s'encén quan la màquina està treballant. No pot estar encés alhora que el pilot de "Treballat"
	Inici		Botó principal que inicia una operació programada. No s'ha de polsar abans que el pilot "Preparat" estiga encés.
	Stop		Botó que apaga la màquina. Si la màquina està treballant no la para fins que acaba un cicle. Per a una parada instantània cal tallar el programa des de Labview.

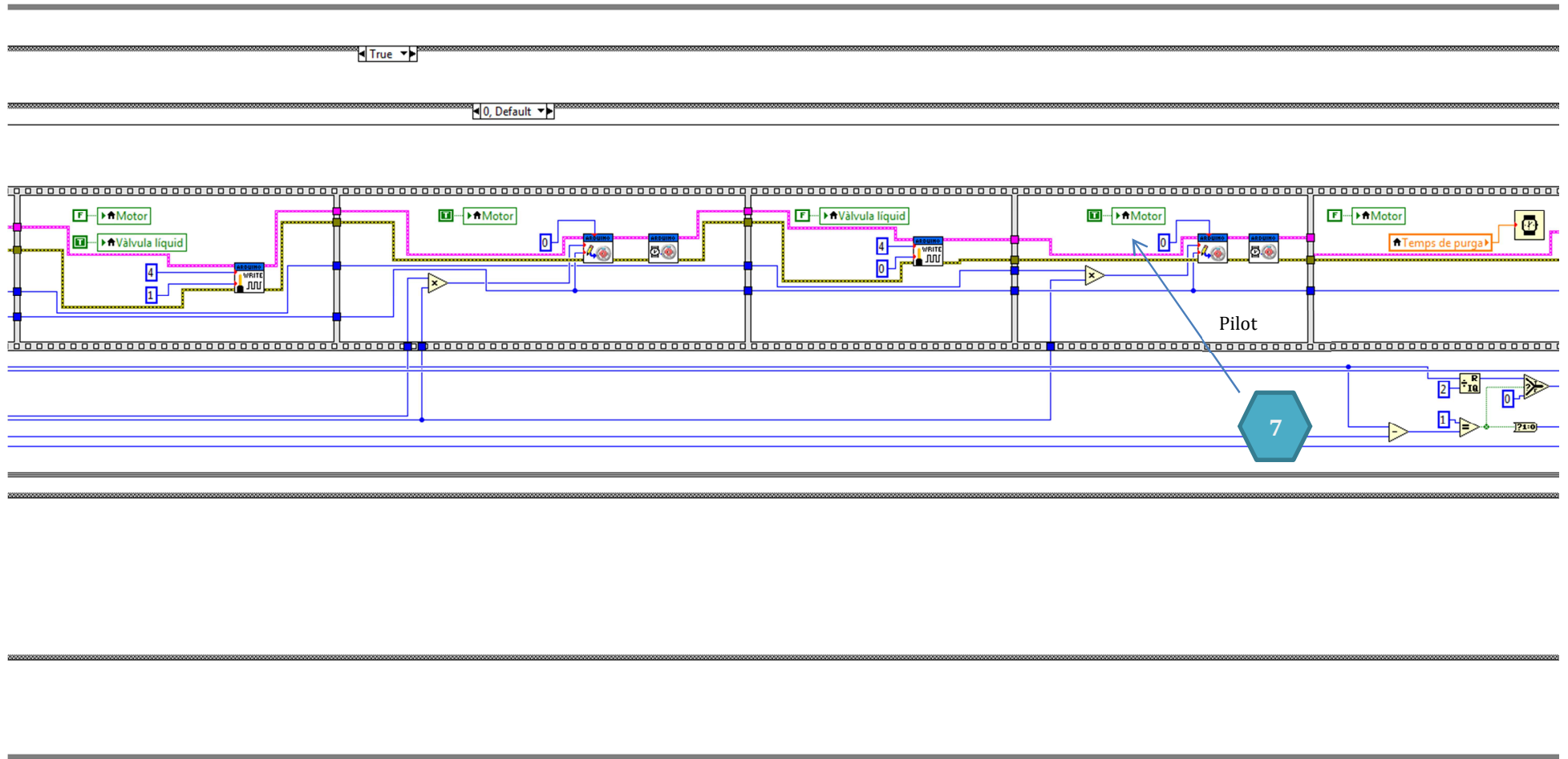
Taula 22: Explicació del funcionament dels elements de la columna dreta del panells de control (dades, indicadors, encesa i apagat de la màquina)

Descripció general del diagrama de blocs

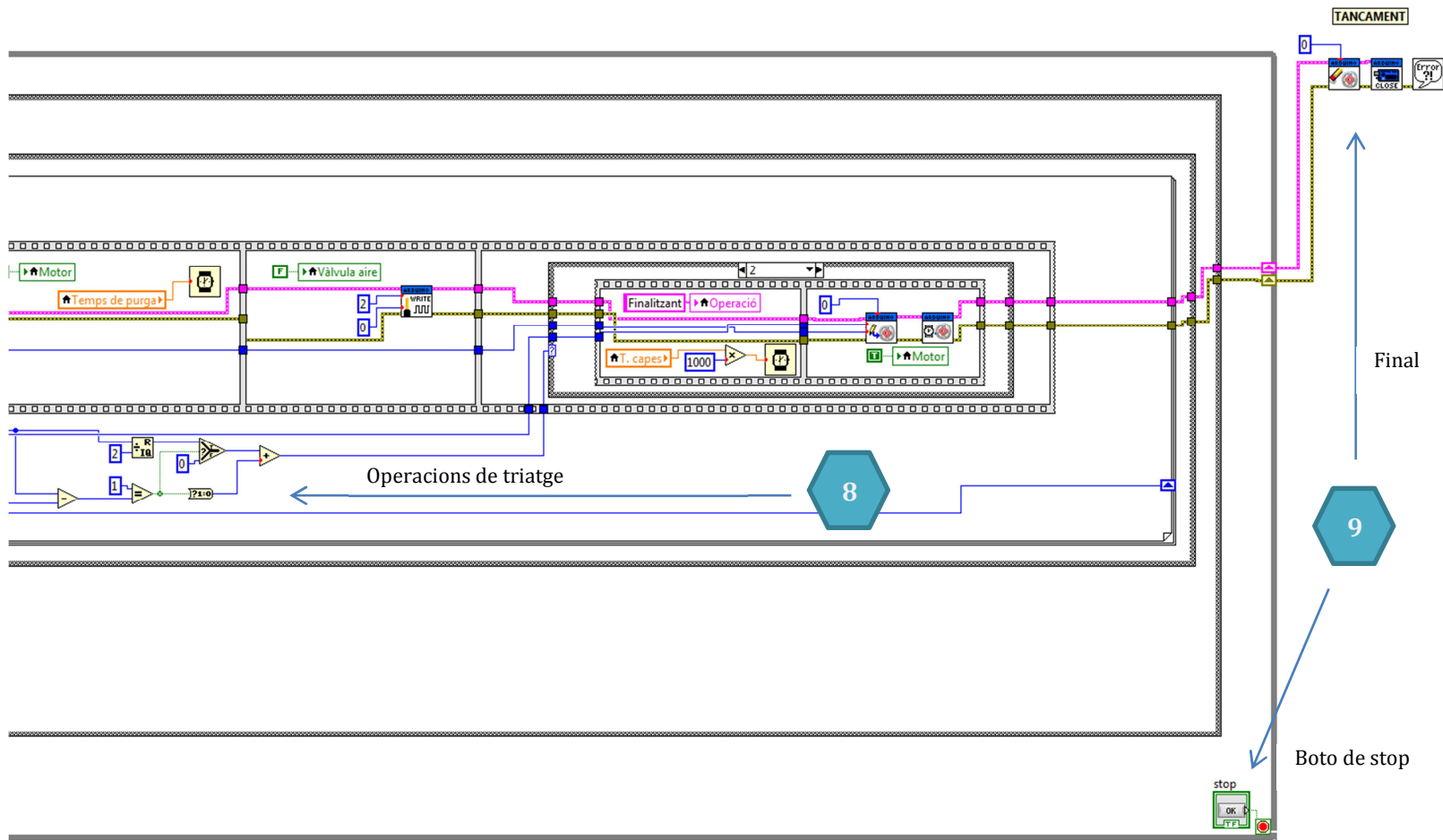




1. El bucle *case* ahora està subdividit de la següent forma: en mode espera no hi ha més casos, però en operació està dividit en 3 (mitjançant una estructura *case* també), corresponents als tres modes d'operació (bidireccional, unidireccional o de neteja). En la present imatge es mostra el bidireccional.
2. Els modes unidireccional i bidireccional estan governats per una bucle *for*, que s'executa tantes vegades com capes hi haja
3. Els diversos passos que fa la màquina estan compartimentats en una estructura *flat sequence*, que el que fa es executar les ordres seqüencialment.



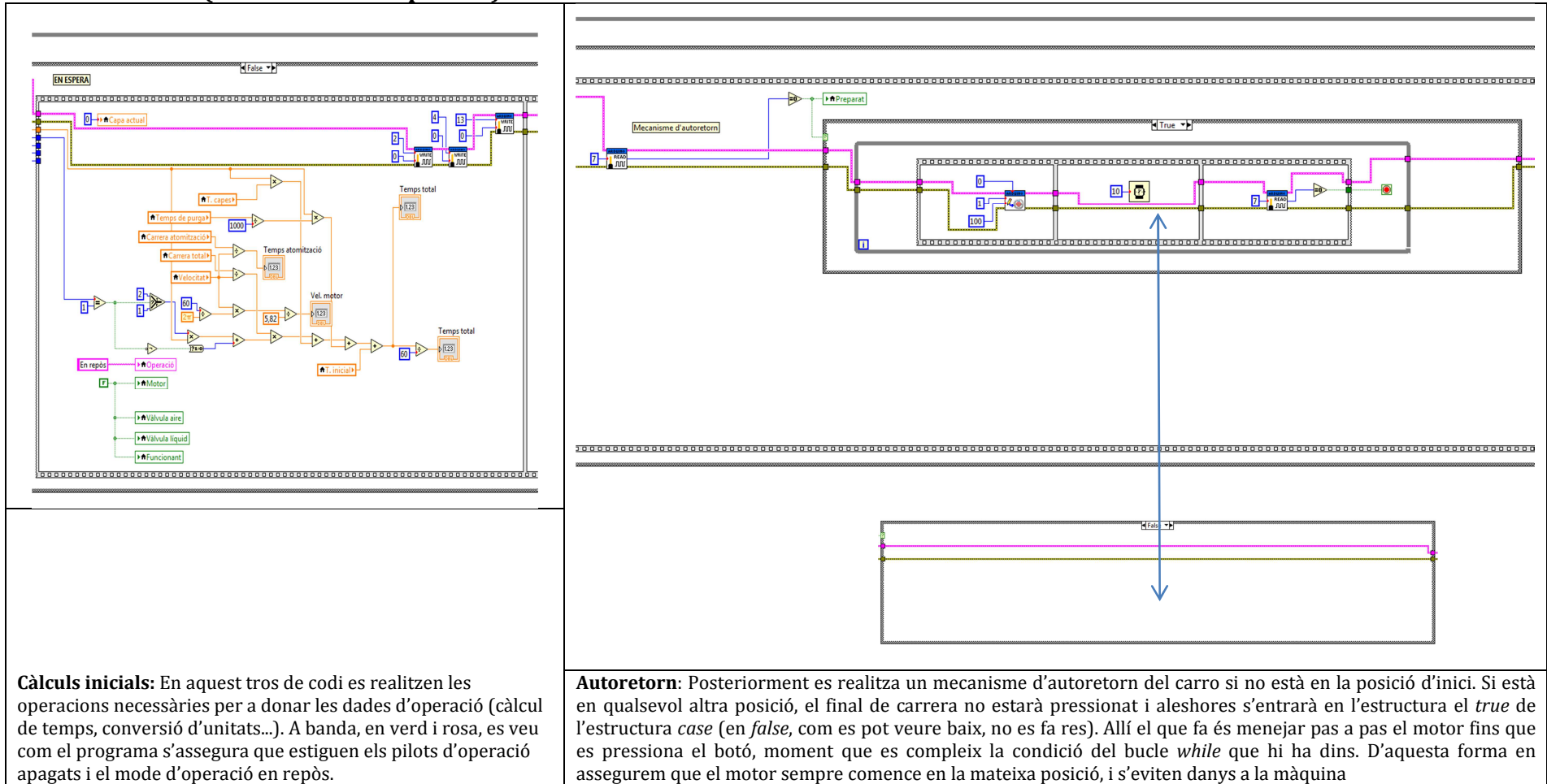
4. La seqüència d'encesa i apagat de motor, així com dels pins va succeint per *la flat sequence*. Els pilots de funcionament també s'encenen i s'apaguen. En la figura una fletxa mostra l'exemple del pilot del motor que s'encén en un quadre on s'ordena moviment al motor.



5. L'últim quadre s'executa després de cada operació d'atomitzat, disposa de les estructures adients i realitza les operacions necessàries per tal de saber si ha d'acabar o continuar operant. En cada cas executa les operacions necessàries (temps entre capes, canvi de pilots, retorn del carro...) segons el cas.
6. Per últim, fora del bucle es troben les operacions de tancament del motor i del sistema Arduino. També es pot observar en aquesta imatge el botó de stop, dins del bucle principal del programa.

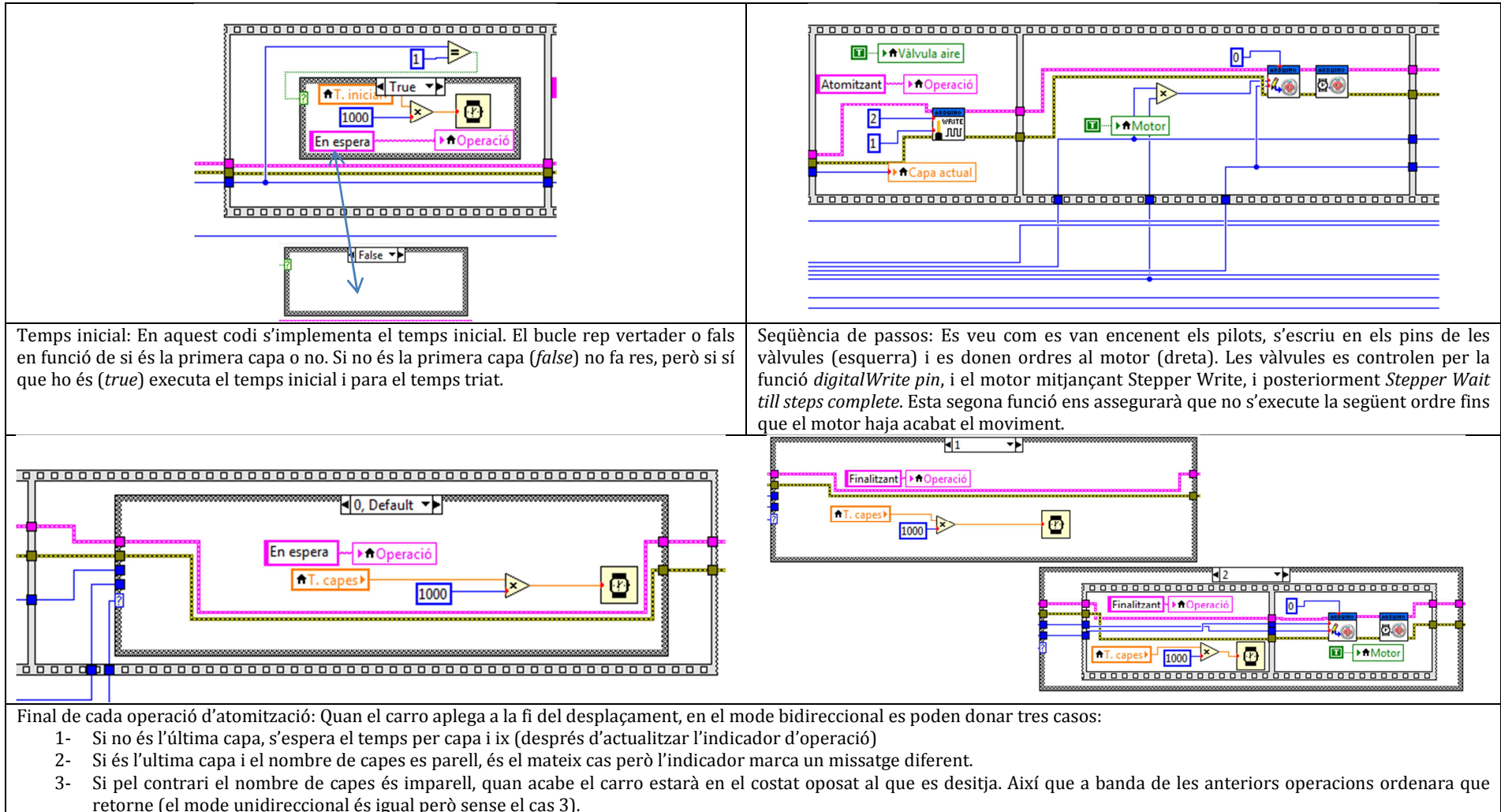
Descripció d'algunes seccions d'interès del diagrama de blocs

MODE D'ESPERA (botó d'inici sense prémer)



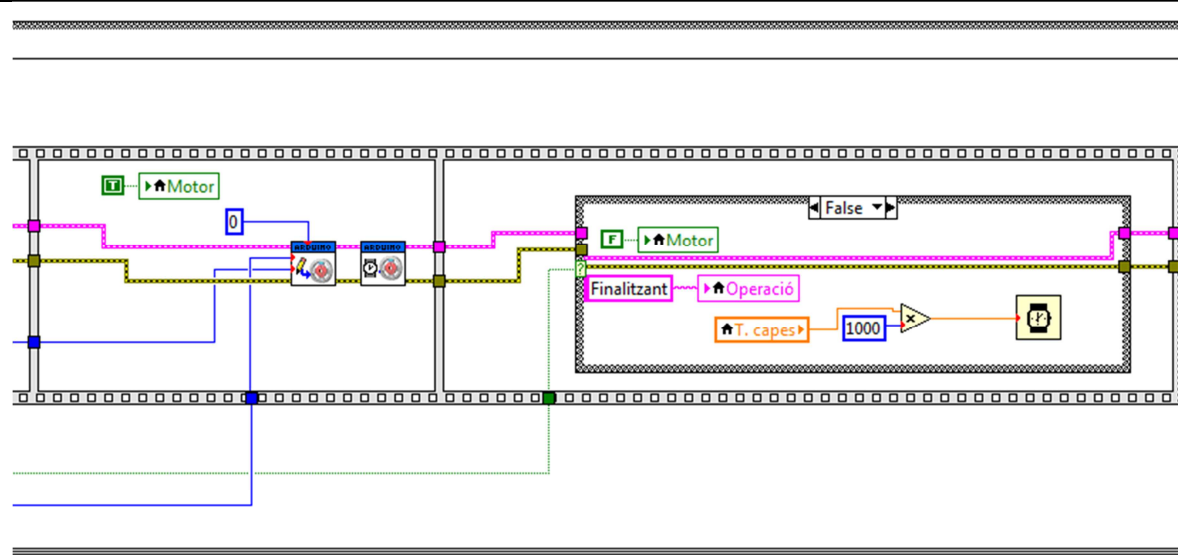
Taula 23: Seccions de codi d'interès del mode en espera

MODE BIDIRECCIONAL



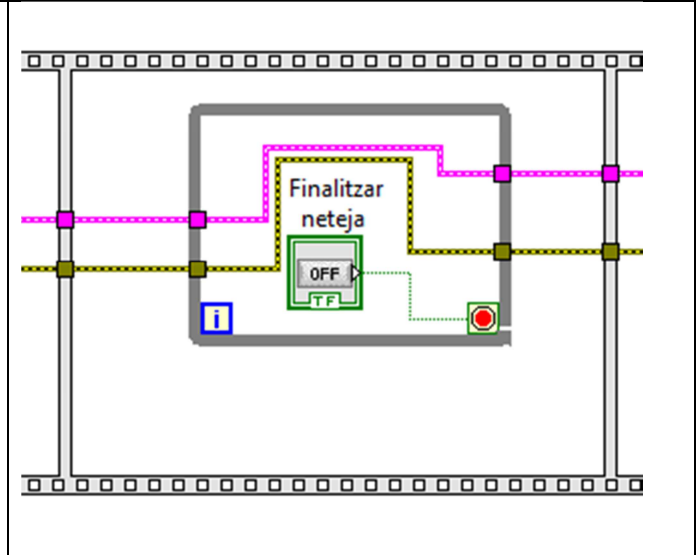
Taula 24: Seccions de codi d'interès del mode bidireccional.

MODE UNIDIRECCIONAL



Retorn de carro: La particularitat d'aquest mode és que sempre retorna el carro després d'una operació d'atomitzat. Aleshores la penúltima operació sempre té un retornament de carro, i en el final d'operació només tenim dues opcions (estructura *case* amb possibilitat de *true* o *false*).

MODE DE NETEJA (amb selecció de temps infinit)



Bucle infinit: En aquest mode, si es selecciona temps infinit; una volta s'hagen encés les vàlvules d'aire i líquid, el programa entra en un bucle infinit, del qual només es pot eixir prement el botó de final de neteja. Aquest botó provoca que es done la condició per a eixir del bucle

Taula 25: Seccions de codi d'interès del mode unidireccional i de neteja.

6. Resultats

En aquest projecte hem dissenyat una màquina amb una sèrie de requisits de disseny, especificats en la secció 3.2.1. Analitzarem en aquesta secció quin grau de compliment té cada requisit i quines conclusions es poden obtenir.

6.1.1. Funcionament altament automàtic

La màquina dissenyada una volta configurada, és totalment automàtica al llarg de tot el cicle. Fins i tot inclou la possibilitat d'implementar un temps d'inici retardat de forma que l'investigador no haja de perdre temps esperant que es calfe la placa. Els indicadors col·locats permeten conèixer en cada moment quin és l'estat de l'operació, de forma que no hi ha perill que l'usuari intervinga en un procés sense acabar per desconeixement.

S'han implementat dos modes d'atomització (bidireccional i unidireccional) per tal que es puguin investigar i trobar quin és el més adient per a cada aplicació. A banda, s'incorpora un mode de neteja automatitzat per tal que facilite aquesta operació.

També s'incorpora un mecanisme de seguretat a l'encesa de la màquina que detecta si el carro està col·locat en el lloc d'eixida, i si no és així força el retornament. Este últim punt tracta de prevenir danys a la màquina si hi ha un tall de corrent o s'apaga incorrectament la màquina, i es queda el carro a mig camí. Com que el motor és de tipus pas a pas, realitza el moviment autònomament sense rebre informació exterior, de forma que si estiguera mal col·locat el carro iniciaria el moviment des d'un punt a mig camí, xocaria amb el final del rail i realitzaria incorrectament l'atomitzat. S'ha decidit automatitzar el mecanisme de seguretat en lloc de fer només una advertència a l'usuari d'iniciar sempre l'operació amb el carro correctament col·locat.

Per altra banda, quan s'encén la màquina es realitzen uns càlculs de temps i velocitat que s'actualitzen automàticament quan es varien els paràmetres d'entrada. Això possibilita la configuració sense haver de fer càlculs externs.

L'únic punt que no està automatitzat és la comunicació amb el plat calefactor. Aquest és una màquina totalment independent i sense modificar. Així, cal encendre-la i configurar-la per separat. Es podria donar el cas que davant un oblit la màquina atomitzara sobre el plat fred, ja que no s'ha implementat un mecanisme que ho impedisca. En aquest sentit, s'ha valorat més mantenir el plat intacte, ja que és una eina de preu relativament alt, i s'ha considerat que la modificació no suposaria una millora significativa, ja que l'operació d'encesa i configuració de la placa és molt senzilla.

6.1.2. Repetibilitat

El motor pas a pas és de 200 passos per volta, amb un angle de pas de $1,8^\circ$, de forma que té un moviment molt precís. El moviment del pont mòbil s'efectua a través de rails i rodes amb una tolerància molt acurada, de forma que el moviment serà quasi idèntic en cada moviment.

Per altra banda, l'electrònica assegura un rapidesa d'execució i una obertura i tancament de vàlvules ràpid i precís, de forma que les operacions seran gairebé iguals per a una opció de configuració determinada.

El punt més feble és el broquet atomitzador, que es pot obstruir o sedimentar i canviar les condicions d'atomització. No obstant això, aquest fet es dona en qualsevol mecanisme d'aquest tipus, siga manual o automàtic. Per a pal·liar aquest fet, s'ha implementat un mode de neteja que assegure el correcte funcionament del broquet al llarg de la vida útil d'aquest.

6.1.3. Eficiència

Aquest és el punt bàsic respecte a l'eficiència energètica i la sostenibilitat, que és el nucli central de l'objectiu del projecte. En particular es tractava d'abaixar el consum dels productes (dissolucions), el consum d'energia elèctrica (fonamentalment el temps d'encesa de la placa) i el consum d'aire a pressió (que en última instància, redunda en un consum energètic menor per a la universitat). Aquests objectius estan assolits amb les següents millores:

1. **Creació simultània de platines.** Si recordem l'operació manual actual, s'apuntava que s'estava treballant mostra a mostra. És a dir, de cada operació només eixia una platina preparada. El present automatisme permet la creació simultània de 49 mostres (un quadrat de 7x7). Això significa una reducció del consum energètic i d'aire a pressió, només tenint en compte aquest punt, d'una magnitud 49 vegades inferior. És la millora més significativa de totes les que es presenten.
2. **Ajust i automatització dels temps d'operació.** Amb l'automatització s'han automatitzat el temps d'espera entre capes i el temps d'automatització. Això permetrà que una volta estiga estudiada i optimitzada la configuració per a cada operació; els temps siguen exactes, òptims i sempre els mateixos. Açò redundarà en un menor consum elèctric, ja que la placa estarà connectada menys temps.
3. **Exactitud en els consums.** Una volta optimitzat l'ús de la màquina, es coneixerà també el consum elèctric i d'aire per operació, així com de dissolució. Aquest últim és important, ja que permetrà preparar exactament la quantitat de dissolució necessària, optimitzant el consum.
4. **Optimització de la cobertura del feix de l'esprai.** Actualment per a obtenir un resultat uniforme en la polvorització, es realitza un moviment circular sobre la peça amb la pistola. El feix cònic per se és de cobertura molt superior a la grandària de la platina, i amb aquesta operació gran part de la dissolució queda fora de la platina, i té un aprofitament baix. A banda, un feix cònic provoca mal aprofitament tenint en compte que la platina és quadrada. El broquet de feix pla triat amb moviment d'escombratge permet crear una superfície d'atomització quadrada, en consonància amb la forma de les platines. A banda, la gran exactitud d'operació permet ajustar el feix de forma que només exedisca lleugerament la zona de tractament. Això provocarà una reducció molt significativa del consum de dissolució.
5. **Disminució dels errors en l'operació.** Un procés automàtic ben ajustat té menor índex d'error en la creació de mostres, de forma que el mer fet de ser automatitzat provocarà un menor consum de recursos (en aquest cas s'afegiria el consum en platines, ja que les defectuoses s'eliminen).

6. **Millora de l'ús de recursos humans.** La interacció de la màquina amb l'usuari, i per tant el temps que ha de dedicar la persona amb aquesta és mínim. Per tant, el personal investigador podrà dedicar més temps a tasques més productives i amb més valor de cara a una investigació.

6.1.4. Uniformitat

El disseny s'ha efectuat buscant que no hi haja variació en l'atomització al llarg del quadrat de 18x18 cm de tractament. Aquest no és el paràmetre més important des del punt de vista d'eficiència, però és el més important des del punt de vista de qualitat, i per tant element bàsic en investigació.

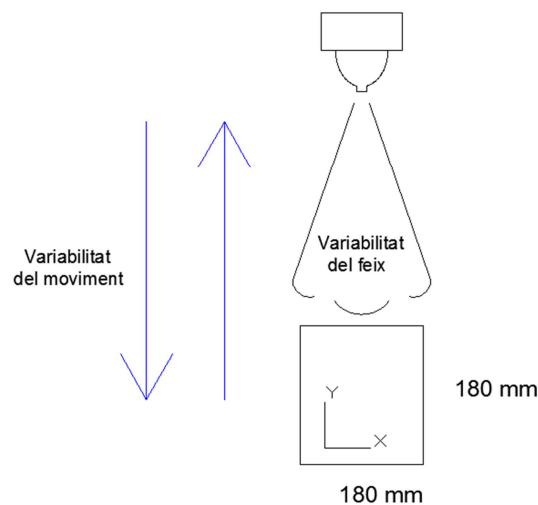


Figura 36: Fonts de variabilitat en la deposició de dissolució.

Si observem les dues fonts de variabilitat en la Figura 36, podem veure que al llarg de l'eix x la variabilitat de la deposició depèn de les característiques del feix, i al llarg de l'eix y depèn del moviment. És d'esperar, pel que s'ha dit abans, que la variabilitat al llarg de l'eix y siga molt baixa, ja que el moviment està molt controlat i és molt homogeni. La variabilitat del feix per altra banda depèn del broquet, que en principi ha de ser homogeni segons la informació proporcionada pel fabricant. A banda, el fet que siga feix pla també contribueix a una bona homogeneïtat, major que en el cas del feix cònic.

Per tant, s'espera que hi haja una bona uniformitat de la capa dipositada sobre les platines. No obstant això, cal remarcar que s'espera una major variabilitat sobre l'eix x que sobre l'eix y.

6.1.5. Flexibilitat

Com s'ha pogut observar en l'apartat del programa de control, el programa està dotat de multitud d'opcions per a variar el procés. Tots els paràmetres d'operació que s'havien posat com a objectius estan assolits pel programa. Així, variant els paràmetres es podrà adaptar el cicle a diferents situacions i necessitats.

A banda, els elements estructurals (peces *Makeblock*), estan dissenyats per a poder modificar el muntatge fàcilment i substituir unes peces per altres. Així, estem assolint una

flexibilitat geomètrica que permetrà adaptar la màquina si és necessari en altre moment, o dissenyar amb facilitat una màquina similar de geometria diferent.

6.1.6. Senzillesa i control d'errors

Tant el programa realitzat en codi Arduino com Labview són de senzill ús, una volta instal·lat el programari. No obstant això, el major esforç per a la comoditat de l'usuari s'han fet en Labview. El programa dissenyat incorpora multitud d'informació al voltant del procés (velocitat en rpm, temps d'operació, estat actual, pilots d'operació...) de forma que l'usuari pugui saber en cada moment quin és l'estat de la màquina. S'indica si està o no preparada per a operar i si està treballant, per tal d'evitar errors de manipulació.

La forma d'introduir les dades s'ha fet el més còmode possible i en unes unitats amigables amb l'investigador (s'ha evitat per exemple posar la velocitat en passos per segon, la distància en passos, el temps en milisegons quan són llargs...), i és el programa el que transforma les unitats.

S'ha tingut cura també en l'entorn visual i en agrupar les funcionalitats del panell de control per a una millor comprensió per part de l'usuari.

El control d'errors està implementat mitjançant les funcions pròpies d'Arduino, i es mostren en pantalla. A banda, la paralització accidental del programa provoca que els indicadors es quedin congelats. Així, l'usuari pot saber què estava fent la màquina i en quina fase es trobava de l'operació en el moment de la desconnexió

6.1.7. Valoració global

Atès que els objectius que es perseguien en el disseny han estat complits de forma satisfactòria, la màquina serà una eina útil que permetrà estalviar recursos a la universitat i reduirà el consum energètic i de material, fet que augmentarà la sostenibilitat de les operacions. El personal investigador també podrà dedicar-se a tasques més productives que la simple atomització manual. A banda, augmentarà la qualitat de les mostres obtingudes i, amb això, millorarà el rendiment de les investigacions.

7. Pressupost

En la present secció es presenta el pressupost per al present projecte. Està organitzat de dues maneres.

- Per unitats funcionals: S'ha dividit el projecte en les diferents unitats i sistemes que el componen, i s'ha calculat el projecte en base als materials necessaris per dur a terme cada unitat funcional. A banda, es presenta un capítol de despeses en recursos humans, que engloba el cost laboral de creació de tot el projecte.
- Per empreses comercialitzadores: És un pressupost que es presenta dividit en les diferents comercialitzadores proposades per a l'adquisició dels materials, després de realitzar un estudi de les diferents possibilitats i una selecció en la fase de disseny.

Així, el pressupost presentat presenta unes dades en base a la selecció de materials feta en la fase de disseny. La selecció no és vinculant, però qualsevol canvi que es faci s'ha de realitzar sobre la garantia que el nou material és totalment compatible amb la resta d'elements i amb les necessitats del projecte.

7.1.1. Pressupost per unitats funcionals

CAPÍTOL I: Estructura

Producte	Referència	Preu unitari	Quantitat	Preu total
Biga 2424 - 320mm	10901	8,95	9	80,55
Angle L1	61512	1,25	4	5
Biga 0824 - 192mm	10091	4,95	1	4,95
Biga 0824 - 64mm	10011	2,4	1	2,4
Placa 3x6	10201	1,25	1	1,25
Caragol hexagonal M4x35 (10ud)	70510	0,95	8	7,6
Caragol hexagonal M4x22 (25ud)	10523	1,5	1	1,5
Caragol hexagonal M4x14 (25ud)	10513	1,25	2	2,5
Caragol hexagonal M4x8 (25ud)	10503	0,95	4	3,8
Caragol sense cap 3x5mm (10 ud)	10563	0,5	1	0,5
Clau hexagonal 1,5mm	10560	0,75	1	0,75
Femella fre nylon M4 (25ud)	10800	1,25	1	1,25
			Total	112,05

CAPÍTOL II: Pont mòbil

Producte	Referència	Preu unitari	Quantitat	Preu total
Biga 2424 - 320mm	10901	8,95	2	17,9
Biga 0824 - 144mm	10061	4,25	2	8,5
Biga 0824 - 96mm	10031	3,2	2	6,4
Biga 0824 - 80mm	10021	2,7	2	5,4
Angle L1	61512	1,25	10	12,5
Connector corretges transmissió	83090	1,45	2	2,9

Rail 496mm	10161	5,45	2	10,9
Rodes-V per a rails (2ud)	10420	9,95	2	19,9
			Total	84,4

CAPÍTOL III: Sistema motor

Producte	Referència	Preu unitari	Quantitat	Preu total
Motor pas a pas 42BYG	10270	17,55	1	17,55
Suport motor pas a pas	10291	8,95	1	8,95
Roda transmissió 18T (amb caragol)	10311	4,45	2	8,9
Eix roscat 4x31	10390	0,99	1	0,99
Separador plàstic 2mm (50ud)	10594	0,95	1	0,95
Corretja oberta 2m	10483	8,75	1	8,75
Collar d'eix de 4mm	10400	0,55	1	0,55
			Total	46,64

CAPÍTOL IV: Alimentació i control

Producte	Referència	Preu unitari	Quantitat	Preu total
Font commutada 12V 5A	-	13,24	1	13,24
Final de carrera (Micro Switch Me)	13600	2,95	1	2,95
Placa Meduino v1 (Arduino UNO)	42013	19,95	1	19,95
Controladora motor pas a pas Microstep	42103	17,55	1	17,55
Transistor vàlvula BD135	-	0,2	2	0,4
Resistències de protecció 220ohm, 125mW, tol 5%	-	0,05	10	0,5
			Total	54,59

CAPÍTOL V: Sistema pneumàtic-hidràulic

Producte	Referència	Preu unitari	Quantitat	Preu total
Dipòsit 160 cc. per a pistoles de gravetat Krippe.	007204-3600	17,95	1	17,95
Broquet líquid	J2850	55,77	1	55,77
Broquet d'aire 67228-45º	J73420	49,2	1	49,2
Cos broquets	JAUH0	306,14	1	306,14
Suport cos broquets	D55510	43,54	1	43,54
Vàlvula aire 2 vies 12V DC	11438-20C	56,72	1	56,72
Vàlvula aire 3 vies 12V DC		70,56	1	70,56
Filtre regulador	NO-FR1/4	50,85	1	50,85
Manòmetre	NO-M4006	6,37	1	6,37
			Total	657,1

CAPÍTOL VI: Sistema de calfament de platines

Producte	Referència	Preu unitari	Quantitat	Preu total
Placa calefactada 600+/-5 ⁰ C	623,0425,30	532,4	1	532,4
Total				532,4

CAPÍTOL VII: Proteccions

Producte	Referència	Preu unitari	Quantitat	Preu total
Placa de metacrilat transparent grandària A3 (297x420mm)	-	7,26	4	29,04
Total				29,04

Total material (CI a CVII)	1516,22
Despeses enviament	25,9
Altres (10%) ⁽¹⁾	154,212
<hr/>	
Pressupost estimat material	1696,332

CAPÍTOL VIII: Recursos humans

Grup professional	Preu hora	Hores de treball	Preu
Enginyer	14	160	2240
Tècnic	10	20	200
Total			2440

Total recursos humans (CVIII)	2440
Imprevistos (10%) ⁽²⁾	244
<hr/>	
Pressupost estimat recursos humans	2684

Total pressupost (material + recursos humans) 4380,332 €

Taula 26: Pressupost per unitats funcionals. Tots els preus estan indicats en euros i inclouen IVA.

(1) Les despeses de material estimades en “altres” inclouen elements aïllats de baix preu com ferramentes, cables, fustes; la post de suport i les connexions hidràuliques i pneumàtiques; a banda d'imprevistos. Són elements de poc valor i que en molts casos en disposa la universitat, però que en conjunt cal valorar com a despesa.

(2) Les despeses de recursos humans estimades en “imprevistos” contemplan la possibilitat que es necessite més temps per a realitzar el projecte o que siga necessari altre professional per algun imprevist (a mode d'exemple, una realització de peces a mida si s'hi presenta alguna incompatibilitat no contemplada).

7.1.2. Pressupost per empreses comercialitzadores

Makeblock

Producte	Referència	Preu unitari	Quantitat	Preu total
Biga 2424 - 320mm	10901	8,95	11	98,45
Biga 0824 - 192mm	10091	4,95	1	4,95
Biga 0824 - 144mm	10061	4,25	2	8,5
Biga 0824 - 96mm	10031	3,2	2	6,4
Biga 0824 - 80mm	10021	2,7	2	5,4
Biga 0824 - 64mm	10011	2,4	1	2,4
Angle L1	61512	1,25	14	17,5
Placa 3x6	10201	1,25	1	1,25
Connector corretges transmissió	83090	1,45	2	2,9
Rail 496mm	10161	5,45	2	10,9
Rodes-V per a rails (2ud)	10420	9,95	2	19,9
Suport motor pas a pas	10291	8,95	1	8,95
Roda transmissió 18T (amb caragol)	10311	4,45	2	8,9
Eix roscat 4x31	10390	0,99	1	0,99
Separador plàstic 2mm (50ud)	10594	0,95	1	0,95
Corretja oberta 2m	10483	8,75	1	8,75
Collar d'eix de 4mm	10400	0,55	1	0,55
Caragol hexagonal M4x35 (10ud)	70510	0,95	8	7,6
Caragol hexagonal M4x22 (25ud)	10523	1,5	1	1,5
Caragol hexagonal M4x14 (25ud)	10513	1,25	2	2,5
Caragol hexagonal M4x8 (25ud)	10503	0,95	4	3,8
Caragol sense cap 3x5mm (10 ud)	10563	0,5	1	0,5
Clau hexagonal 1,5mm	10560	0,75	1	0,75
Femella fre nylon M4 (25ud)	10800	1,25	1	1,25
Final de carrera (Micro Switch Me)	13600	2,95	1	2,95
Motor pas a pas 42BYG	10270	17,55	1	17,55
Controladora motor pas a pas Microstep	42103	17,55	1	17,55
Placa Meduino v1 (Arduino UNO)	402013	19,95	1	19,95
			Suma	283,54
			Enviament	10
			Total	293,54

Spraying Systems Co.

Producte	Referència	Preu unitari	Quantitat	Preu total
Broquet líquid	J2850	55,77	1	55,77
Broquet d'aire 67228-45º	J73420	49,2	1	49,2
Cos broquets	JAUH0	306,14	1	306,14
Suport cos broquets	D55510	43,54	1	43,54
Vàlvula aire 2 vies 12V DC	11438-20C	56,72	1	56,72

Vàlvula aire 3 vies 12V DC		70,56	1	70,56	
Filtre regulador	NO-FR1/4	50,85	1	50,85	
Manòmetre	NO-M4006	6,37	1	6,37	
				Suma	639,15
				Enviament	9
				Total	648,15

Heras Scientific

Producte	Referència	Preu unitari	Quantitat	Preu total	
Placa calefactada 600+/-5 ⁰ C	623,0425,30	532,4	1	532,4	
				Suma	532,4
				Enviament	0
				Total	532,4

Tmart

Producte	Referència	Preu unitari	Quantitat	Preu total	
Font commutada 12V 5A	-	13,24	1	13,24	
				Suma	13,24
				Enviament	0
				Total	13,24

Materials World

Producte	Referència	Preu unitari	Quantitat	Preu total	
Placa de metacrilat transparent grandària A3 (297x420mm)	-	7,26	4	29,04	
				Enviament	6,9
				Total	35,94

Materials comprats en menuts distribuïdors

Producte	Referència	Preu unitari	Quantitat	Preu total	
Transistor vàlvula	BD135	0,2	2	0,4	
Resistències de protecció 220ohm, 125mW, tol 5%		0,05	10	0,5	
Dipòsit 160 cc. per a pistoles de gravetat Kripxe.	007204-3600	17,95	1	17,95	
				Total	18,85

Total material + enviament	1542,12
Altres (10%)	154,212
Pressupost estimat material	1696,33

Recursos humans

Grup professional	Preu hora	Hores de treball	Preu
Enginyer	14	160	2240
Tècnic	10	20	200
		Total	2440

Total recursos humans (CVIII)	2440
Imprevistos (10%) ⁽²⁾	244

Pressupost estimat recursos humans	2684
---	-------------

Total pressupost (material + recursos humans) 4380,332 €

Taula 27: Pressupost per empreses comercialitzadores. Tots els preus estan indicats en euros i inclouen IVA.

(1) Les despeses de material estimades en “altres” inclouen elements aïllats de baix preu com ferramentes, cables, fustes; la post de suport i les connexions hidràuliques i pneumàtiques; a banda d'imprevistos. Són elements de poc valor i que en molts casos en disposa la universitat, però que en conjunt cal valorar com a despesa.

(2) Les despeses de recursos humans estimades en “imprevistos” contemplen la possibilitat que es necessite més temps per a realitzar el projecte o que siga necessari altre professional per algun imprevist (a mode d'exemple, una realització de peces a mida si s'hi presenta alguna incompatibilitat no contemplada).

Annex I: Càlculs electrònics

SELECCIÓ DEL CIRCUIT AMPLIFICADOR

Càlcul del transistor

Atès que el consum de les bobines de les vàlvules és elevat, no les podem connectar directament als terminals d'Arduino, que només poden proporcionar 40 mA. Serà necessari incorporar un transistor que faci la tasca d'amplificador del senyal.

Per al càlcul primerament necessitem les característiques elèctriques de les vàlvules, que en aquest cas són:

$$V_{CC} = 12V \quad P_V = 10 W$$

La potència màxima és donarà en funcionament de les vàlvules i la tensió màxima (en borns del col·lector) quan el transistor es trobe sense conduir. La intensitat serà:

$$I_V = \frac{P_V}{V_{CC}} = 0,833 A \approx I_C$$

On s'aproxima la intensitat de la vàlvula a la del col·lector, ja que en saturació ofereix molt poca resistència al pas de corrent.

Amb aquestes dades, podem fer posar les condicions de selecció del transistor:

$$V_{CE0màx} > 12V, \quad I_{Cmàx} > 0,833 A$$

Preseleccionem el transistor BJ135, molt comú en aplicacions de potència moderada en maquinari electrònic.

BD135/137/139

Medium Power Linear and Switching Applications

- Complement to BD136, BD138 and BD140 respectively

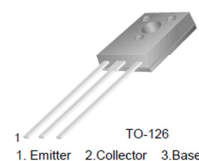


Figura 37: Transistors de la sèrie BD135/137/139

Que té les següents característiques elèctriques:

NPN Epitaxial Silicon Transistor

Absolute Maximum Ratings $T_C=25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Value	Units
V_{CBO}	Collector-Base Voltage : BD135 : BD137 : BD139	45	V
		60	V
		80	V
V_{CEO}	Collector-Emitter Voltage : BD135 : BD137 : BD139	45	V
		60	V
		80	V
V_{EBO}	Emitter-Base Voltage	5	V
I_C	Collector Current (DC)	1.5	A
I_{CP}	Collector Current (Pulse)	3.0	A
I_B	Base Current	0.5	A
P_C	Collector Dissipation ($T_C=25^\circ\text{C}$)	12.5	W
P_C	Collector Dissipation ($T_a=25^\circ\text{C}$)	1.25	W
T_J	Junction Temperature	150	$^\circ\text{C}$
T_{STG}	Storage Temperature	- 55 ~ 150	$^\circ\text{C}$

Electrical Characteristics $T_C=25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Test Condition	Min.	Typ.	Max.	Units
$V_{CEO(sus)}$	Collector-Emitter Sustaining Voltage : BD135 : BD137 : BD139	$I_C = 30\text{mA}, I_B = 0$	45			V
			60			V
			80			V
I_{CBO}	Collector Cut-off Current	$V_{CB} = 30\text{V}, I_E = 0$			0.1	μA
I_{EBO}	Emitter Cut-off Current	$V_{EB} = 5\text{V}, I_C = 0$			10	μA
h_{FE1}	DC Current Gain : ALL DEVICE : BD135 : BD137, BD139	$V_{CE} = 2\text{V}, I_C = 5\text{mA}$ $V_{CE} = 2\text{V}, I_C = 0.5\text{A}$ $V_{CE} = 2\text{V}, I_C = 150\text{mA}$	25			
h_{FE2}			25			
h_{FE3}			40		250	
			40		160	
$V_{CE(sat)}$	Collector-Emitter Saturation Voltage	$I_C = 500\text{mA}, I_B = 50\text{mA}$			0.5	V
$V_{BE(on)}$	Base-Emitter ON Voltage	$V_{CE} = 2\text{V}, I_C = 0.5\text{A}$			1	V

Taula 28: Característiques del transistor BD135

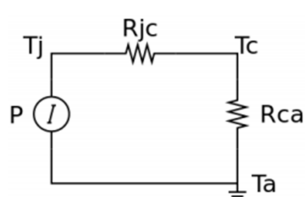
Els paràmetres de voltatge màxim i intensitat màxima de col·lector són de comprovació instantània:

$$V_{CEO} = 45\text{V} < V_{CEO_{\max}}, \quad I_C = 1,5\text{A} < I_{C_{\max}}$$

Ara comprovem si les capacitats tèrmiques són suficients. Comprovem, en el cas més desfavorable, el voltatge màxim de col·lector en saturació. Aquest, del full de característiques i la gràfica, el podem suposar com a màxim de 0,8 V. A eixe potencial li correspon una intensitat del 0,833 A, pel que:

$$P = V_{CEO(sat)} \cdot I_C = 0,8 \cdot 0,833 = 0,666\text{ W}$$

Segons el full de característiques, la temperatura màxima de la junta (T_J) és de 150°C . Si prenem la temperatura ambient com 50°C (per a comptar amb l'efecte de concentració de calor en la carcassa en un dia d'estiu), podem calcular si se supera la temperatura màxima de la junta en condicions d'operació:



$$R_{jc} = \frac{T_{j_{\max}} - T_c}{P_{d_{jc}}} = \frac{150 - 25}{12,5} = 10\text{ }^\circ\text{C/W}$$

$$R_{ja} = \frac{T_{j_{\max}} - T_a}{P_{d_{ja}}} = \frac{150 - 25}{1,25} = 100\text{ }^\circ\text{C/W}$$

Figura 38: Model tèrmic transistor

$$T_j = R_{ja} \cdot P + T_a = 100 \cdot 0,666 + 50 = 116,6\text{ }^\circ\text{C} < 150\text{ }^\circ\text{C}$$

Per tant, el disseny és correcte. El fabricant ens dóna corbes on podem comprovar els anteriors resultats i que el transistor funciona en zona de seguretat:

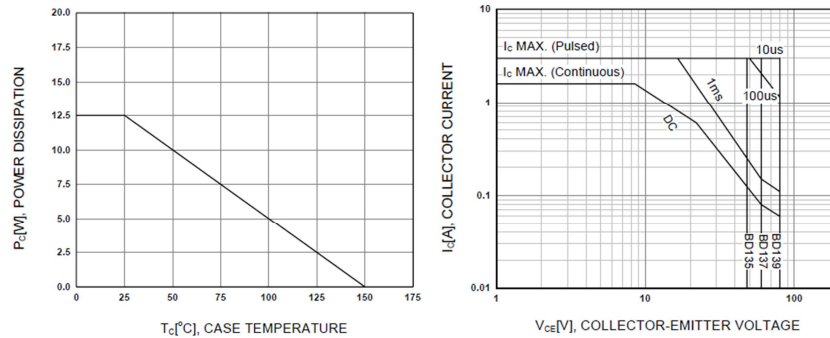


Figura 39: Potència dissipada en funció de la temperatura (esquerra). Àrea de seguretat de funcionament (dreta)

Càlcul de la resistència de protecció per als transistors

Els transistors necessiten d'una resistència connectada entre el pin que envia el senyal, provinent de la placa Arduino, i el pin de la base; per tal de limitar el corrent entre base i emissor (I_B) i així evitar que es pugui cremar el transistor. La resistència ha d'assegurar, no obstant la protecció, que es produïska la suficient intensitat de base que permeti entrar el col·lector en saturació. Per tant, es planteja una condició d'intensitat mínima de la base:

$$I_{B_{\min}} = \frac{V_R}{R_{B_{\max}}}$$

La intensitat de base està directament relacionada amb el guany del transistor (h_{FE} o β). Mitjançant la Figura 40: Guany en funció del corrent de col·lector (esquerra). Voltatge base-emissor en funció del corrent de col·lector (dreta), podem esbrinar el guany màxim, que per a 0,833 A de I_C és de 60. Prendrem un valor de 40, que assegure l'entrada en saturació davant eventualitats.

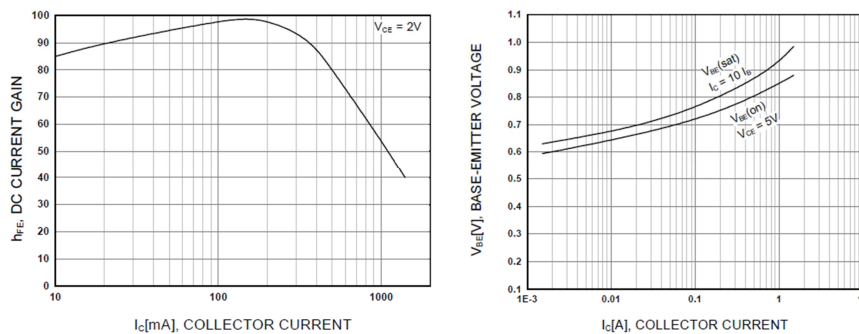


Figura 40: Guany en funció del corrent de col·lector (esquerra). Voltatge base-emissor en funció del corrent de col·lector (dreta)

$$I_B = \frac{I_C}{h_{FE}} = \frac{0,833}{50} = 16,66 \text{ mA}$$

Per altra banda, per al càlcul de V_R , cal saber el voltatge del pin (de les característiques de la placa Arduino: 5V) i quina és la caiguda de tensió entre base i emissor. Atenent a la Figura 40 novament i tenint en compte el guany, el podem estimar com 1 V màxim. Així, V_R serà:

$$V_R = V_{pin} - V_{BE} = 5 - 1 = 4V$$

Així, la condició de la resistència serà:

$$R_B \leq \frac{4}{0,0166} = 241\Omega$$

Atenent a les resistències comercials:

x 1	x 10	x 100	x 1.000 (K)	x 10.000 (10K)	x 100.000 (100K)	x 1.000.000 (M)
1 Ω	10 Ω	100 Ω	1 K Ω	10 K Ω	100 K Ω	1 M Ω
1,2 Ω	12 Ω	120 Ω	1K2 Ω	12 K Ω	120 K Ω	1M2 Ω
1,5 Ω	15 Ω	150 Ω	1K5 Ω	15 K Ω	150 K Ω	1M5 Ω
1,8 Ω	18 Ω	180 Ω	1K8 Ω	18 K Ω	180 K Ω	1M8 Ω
2,2 Ω	22 Ω	220 Ω	2K2 Ω	22 K Ω	220 K Ω	2M2 Ω
2,7 Ω	27 Ω	270 Ω	2K7 Ω	27 K Ω	270 K Ω	2M7 Ω
3,3 Ω	33 Ω	330 Ω	3K3 Ω	33 K Ω	330 K Ω	3M3 Ω
3,9 Ω	39 Ω	390 Ω	3K9 Ω	39 K Ω	390 K Ω	3M9 Ω
4,7 Ω	47 Ω	470 Ω	4K7 Ω	47 K Ω	470 K Ω	4M7 Ω
5,1 Ω	51 Ω	510 Ω	5K1 Ω	51 K Ω	510 K Ω	5M1 Ω
5,6 Ω	56 Ω	560 Ω	5K6 Ω	56 K Ω	560 K Ω	5M6 Ω
6,8 Ω	68 Ω	680 Ω	6K8 Ω	68 K Ω	680 K Ω	6M8 Ω
8,2 Ω	82 Ω	820 Ω	8K2 Ω	82 K Ω	820 K Ω	8M2 Ω
						10M Ω

Taula 29: Resistències comercials, amb una tolerància del 10% o 5%

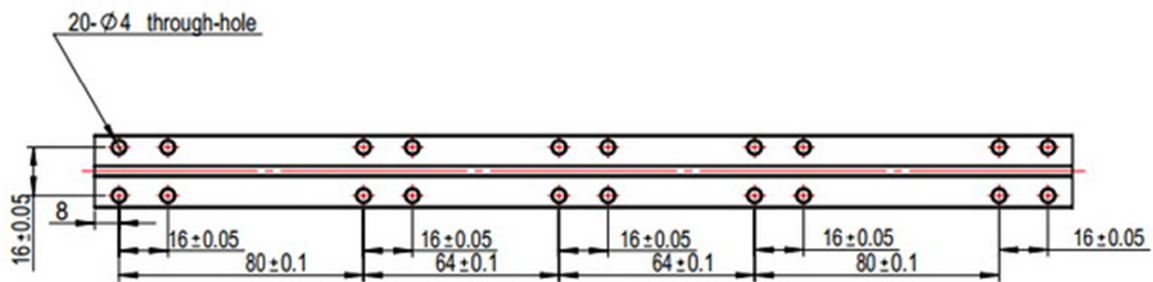
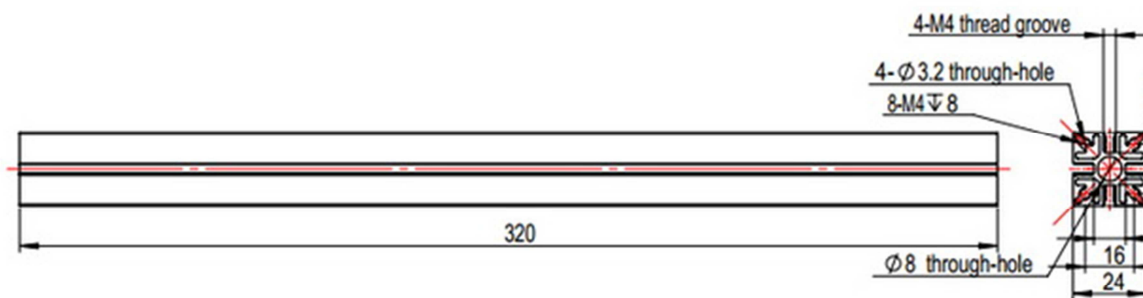
Triem el valor de 220 Ω , que correspon al valor més proper per baix. La potència màxima serà

$$P_{R_{min}} \geq I_B^2 \cdot R_B = 0,0166^2 \cdot 220 = 61 \text{ mW}$$

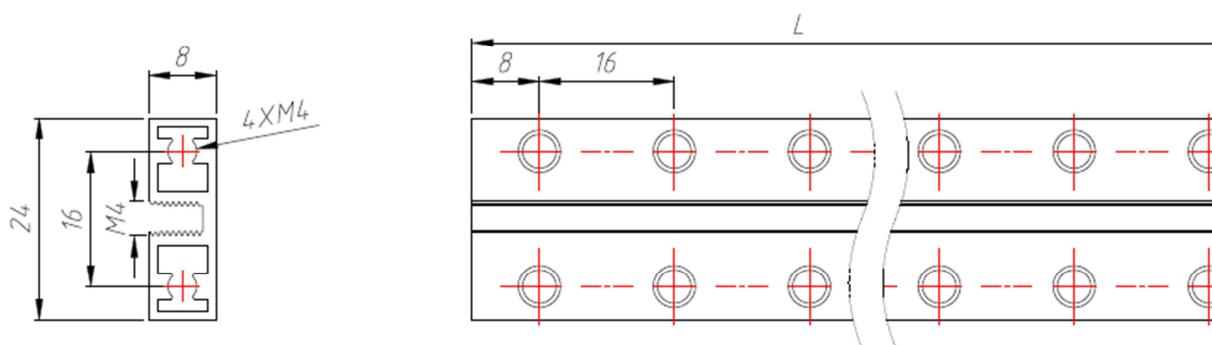
El valor comercial més proper és de 125 mW per a eixe valor de resistència.

Annex II: Plànols

PLÀNOLS DE LES PECES UTILITZADES DE *MAKEBLOCK*

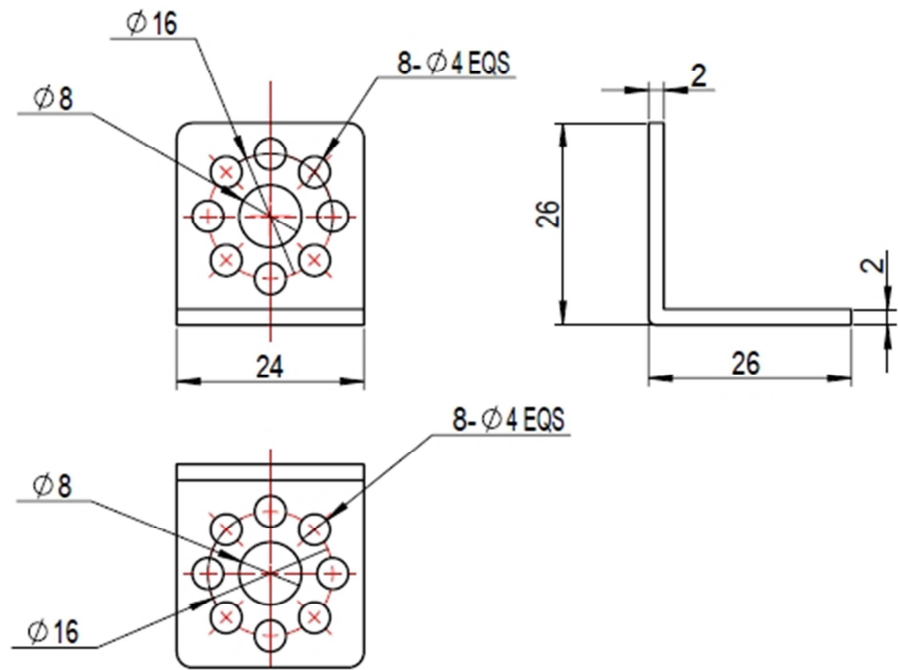


Biga 2424 - 320mm

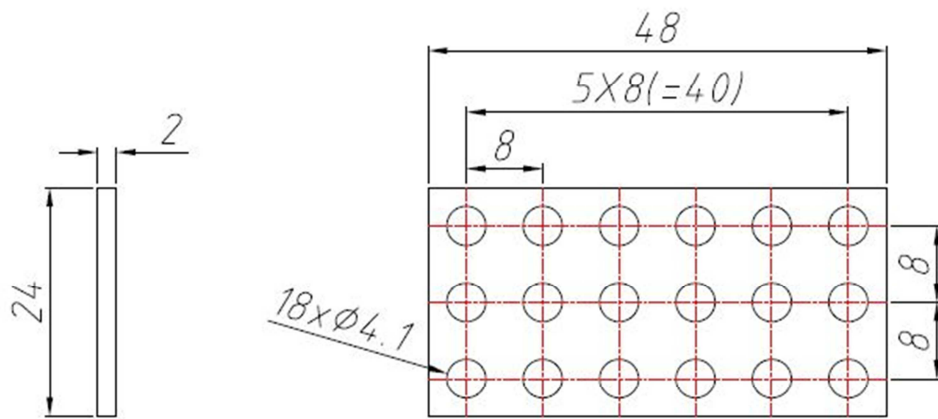


Note : In the middle of the thread groove is M4.

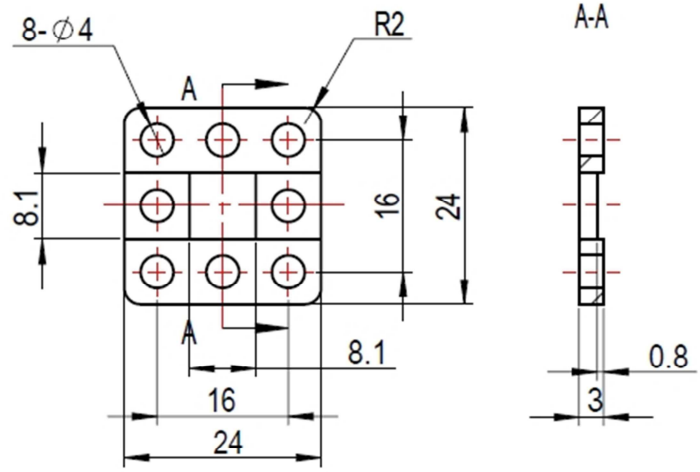
Biga 0824



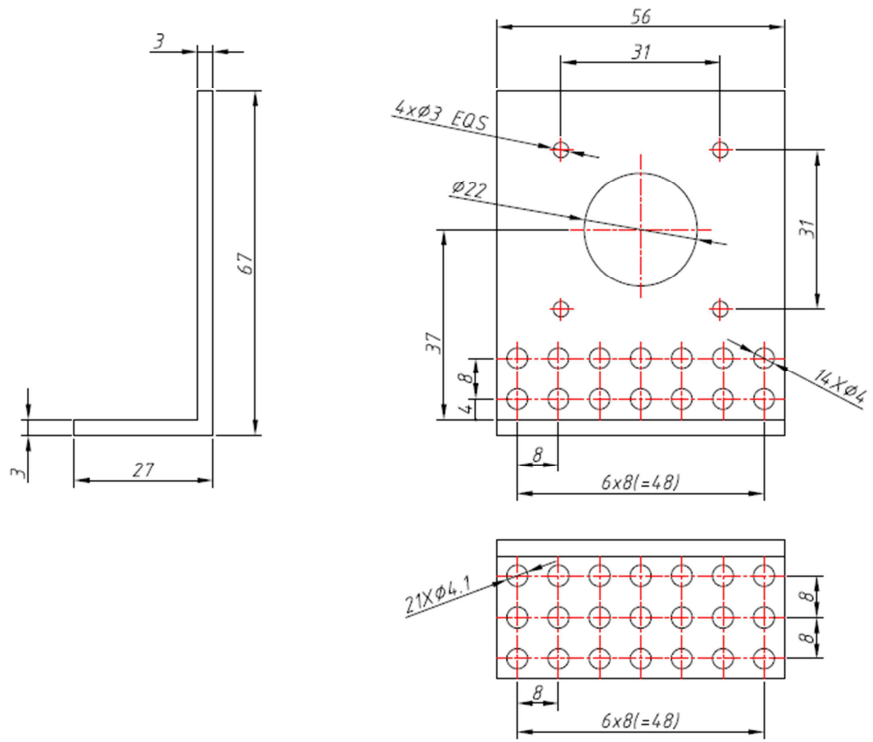
Angle L1



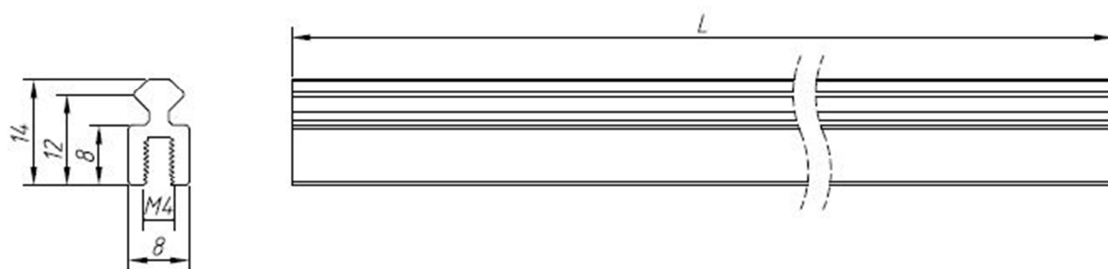
Placa 6x3



Connector corretja

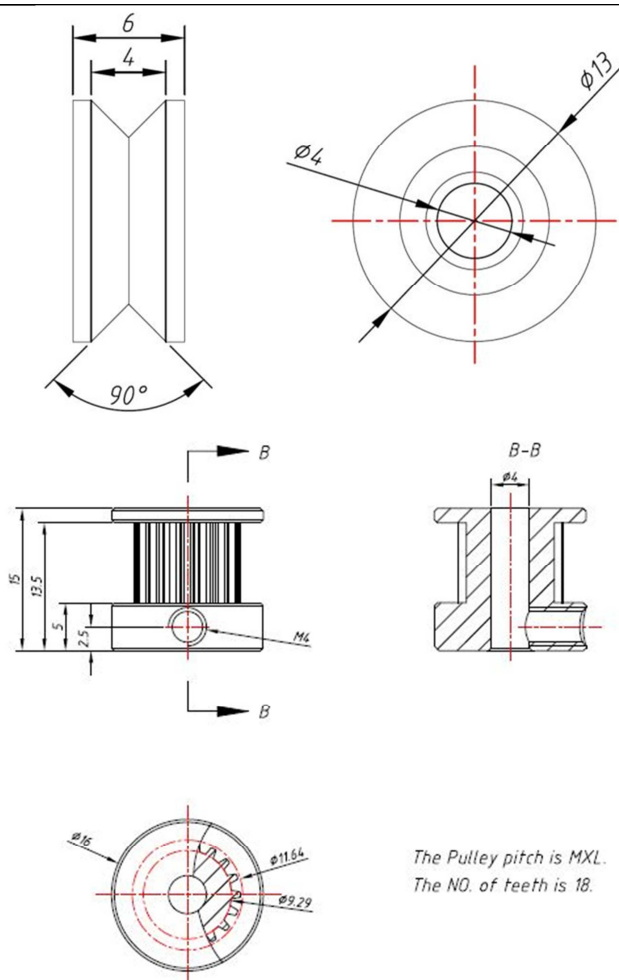


Suport motor pas a pas

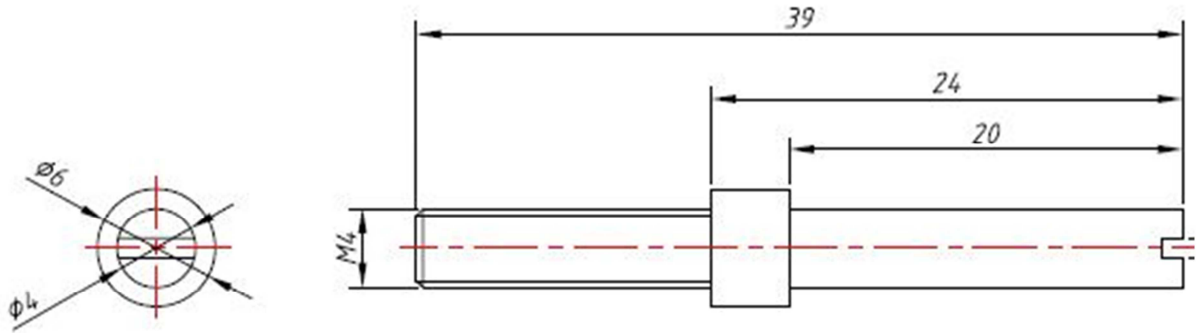


Model NO.	L
Slider-256	256
Slider-496	496

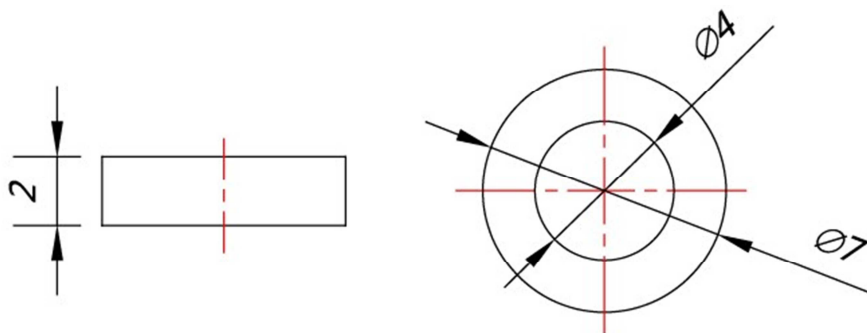
Rail



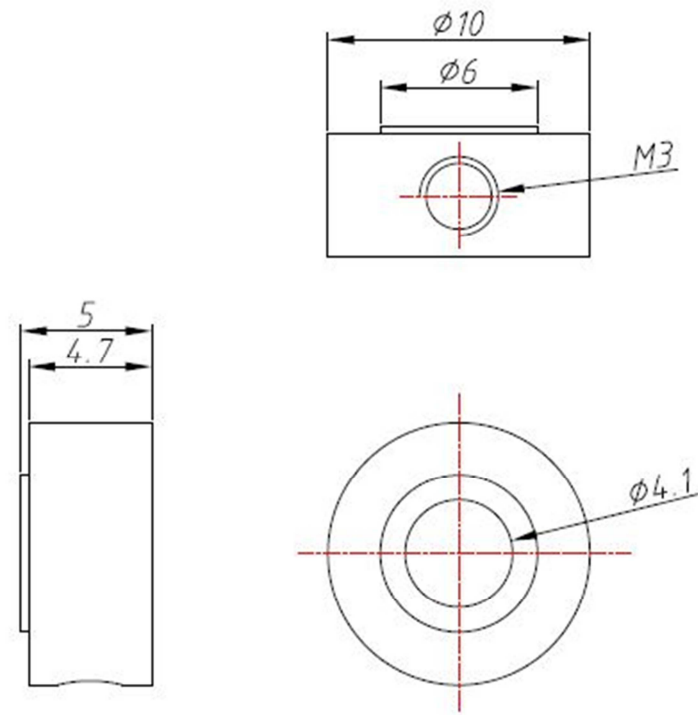
Connector corretja i roda de transmissió



Eix de roscat



Volandera plàstica



Collar d'eix



Caragols M4 i caragol presoner 3x5mm

