

RESUM

L'objectiu del present projecte tracta sobre el disseny i realització d'un sistema d'extrusió basat en cartutxos o càpsules de xocolata adaptables a la BCN3D+, una impressora 3D domèstica comercialitzada per la Fundació CIM.

El projecte pretén millorar les prestacions del sistema *Paste Extruder* i es fa com a formació complementària als estudis del Grau d'Enginyeria en Tecnologies Industrials a l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona.

El document està estructurat en diversos capítols que segueixen una seqüència cronològica, afegint figures en cadascun d'ells per tal de facilitar la comprensió al lector.

Els dos primers capítols serveixen com a explicació de quins són els orígens del projecte i quines raons han portat a fer-lo, seguint amb una introducció sobre quin és i com gestionar el comportament de la xocolata en impressió 3D, i finalitzant amb una anàlisi exhaustiva sobre quins coneixements es tenen de la tecnologia 3D aplicada a la xocolata.

El tercer capítol tracta sobre el disseny conceptual dels diversos elements de l'extrusor, així com dels sistemes que permeten donar-li pressió i temperatura, els quals són els paràmetres a controlar i claus en l'èxit del projecte.

Els dos capítols següents engloben el procés d'adquisició, muntatge i assaig del sistema dissenyat en el capítol previ, a més d'una interpretació dels resultats obtinguts.

Finalment, la memòria es tanca amb una anàlisi de viabilitat, passant per un estudi econòmic i una anàlisi de l'impacte ambiental i social del projecte.



SUMARI

RESUM.....	1
ÍNDIX DE FIGURES	5
ÍNDIX DE GRÀFICS	7
GLOSSARI.....	8
1. PREFACI.....	9
1.1. Origen del projecte	9
1.2. Motivació	9
2. INTRODUCCIÓ.....	9
2.1. Objectius del projecte.....	9
2.2. Abast	10
2.3. Referències	11
2.3.1. La impressió 3D aplicada a la xocolata	11
2.3.2. Impressió de xocolata mitjançant el capçal <i>Paste Extruder</i>	12
2.3.3. Estat de l'art.....	14
3. DISSENY CONCEPTUAL.....	31
3.1. Criteris de disseny.....	31
3.2. Disseny de l'extrusor.....	31
3.2.1. Elements del sistema extrusor	31
3.2.2. Sistema de control de pressió	35
3.2.3. Programació amb <i>Arduino</i>	39
3.2.4. Sistema de control de temperatura	41
3.2.5. Assemblatge del capçal	43
4. ASSEMBLATGE DEL SISTEMA EXTRUSOR	44
4.1. Sistema de pressió	44
4.2. Capçal.....	45
4.3. Bossa i punta extrusora	47
4.4. Sistema de control de temperatura.....	48
4.5. Assemblatge del sistema extrusor	50
5. PROVES I RESULTATS	52

5.1.	Problemàtica en l'adaptació del cilindre a la impressora	52
5.2.	Proves i resultats en estàtic	52
5.2.1.	Primera prova.....	52
5.2.2.	Segona prova.....	55
5.2.3.	Tercera prova	58
5.2.4.	Quarta prova	65
5.2.5.	Conclusions parcials	68
5.3.	Proves i resultats amb la impressora BCN3D+	69
5.3.1.	Funcionament de la impressora BCN3D+	69
5.3.2.	Peces per a adaptar el capçal a la impressora	70
5.3.3.	Primera prova.....	73
5.3.4.	Segona prova.....	79
6.	ANÀLISI ECONÒMICA	84
7.	IMPACTE AMBIENTAL I SOCIAL.....	86
8.	CONCLUSIONS	87
9.	AGRAÏMENTS.....	89
10.	BIBLIOGRAFIA.....	90
10.1.	Referències bibliogràfiques	90
10.2.	Bibliografia complementària	90
ANNEXOS	91

ÍNDIX DE FIGURES

Figura 2.1. Procés de temperat de la xocolata. Font: Industrial <i>Chocolate Manufacture and Use</i>	11
Figura 2.2. Bany Maria. Font: www.bcn3dtechnologies.com	12
Figura 2.4. Peces fetes amb el <i>Paste Extruder</i>	13
Figura 2.3. Capçal <i>Paste Extruder</i> . Font: www.bcn3dtechnologies.com	13
Figura 2.5. Impressora <i>Choc Creator V2</i> . Font: www.chocedge.com	14
Figura 2.6. Funcionament de la impressora <i>Foodini</i>	15
Figura 2.7. Impressora <i>Foodini</i> . Font: www.naturalmachines.com	15
Figura 2.8. Vàlvula de temps i pressió. Font: www.empf.org	17
Figura 2.9. Punta extrusora amb la xeringa extraïble. Font: unfoldfab.blogspot.com	18
Figura 2.10. Fixacions de la punta extrusora i la xeringa en el capçal. Font: unfoldfab.blogspot.com	18
Figura 2.11. Adaptador de la xeringa al tub d'aire comprimit.	18
Figura 2.12. Xeringa amb l'adaptador al tub d'aire comprimit.	19
Figura 2.13. Vàlvula d'Auger. Font: www.empf.org	21
Figura 2.14. <i>Disposable Material Path</i> . Font: www.techconsystems.com	22
Figura 2.15. <i>Claystruder 2</i> . Font: unfoldfab.blogspot.com.es	22
Figura 2.16. Peces del <i>Claystruder 2</i> . Font: unfoldfab.blogspot.com.es	23
Figura 2.17. Cavitats progressives. Font: www.directindustry.es	25
Figura 2.18. <i>Claystruder 3</i> . Font: unfoldfab.blogspot.com.es	25
Figura 2.19. Frostruder MK2. Font: www.makerbot.com	27
Figura 2.20. Vàlvula de raig. Font: www.empf.org	29
Figura 3.1. Adaptador d'aire comprimit.....	32
Figura 3.2. Vista del cilindre.	32
Figura 3.3. Càpsula-bossa.....	33
Figura 3.4. Exemple de bossa amb sortida. Font: www.alibaba.com	34
Figura 3.5. Punta extrusora.....	34
Figura 3.6. Sistema de control de pressió.	36
Figura 3.7. Transistor MOSFET. Font: www.roboteq.com	36
Figura 3.8. Placa <i>Arduino</i> . Font: www.arduino.cc	37
Figura 3.9. Esquema de connexions entre les vàlvules solenoides i la Placa <i>Arduino</i>	38
Figura 3.10. Esquema de connexions sobre la placa <i>protoboard</i>	39
Figura 3.11. Programa de control de les vàlvules solenoides.	41
Figura 3.12. Cable calefactor. www.elementoscalefactores.es	42
Figura 3.13. Termòstat analògic amb sonda. Font: www.elementoscalefactores.es	42
Figura 3.14. Vista isomètrica del capçal.....	43
Figura 3.15. Vista isomètrica de l'assemblatge de l'extrusor en la impressora.....	43
Figura 4.1. Muntatge del sistema de control de pressió.....	44
Figura 4.2. Cilindre.	46
Figura 4.3. Adaptadors de la impressora i de l'aire comprimit al cilindre.	46
Figura 4.4. Bossa.....	47
Figura 4.5. Punta extrusora collada a la sortida de la bossa.	48
Figura 4.6. Punta extrusora.....	48
Figura 4.7. Esquema del sistema de control de temperatura.....	49

Figura 4.8. Cilindre enrotllat amb la resistència de 30 W de potència dissipada.	49
Figura 4.9. Cilindre amb el sistema de control de temperatura	50
Figura 4.10. Assemblatge del sistema extrusor.....	51
Figura 5.1. Cilindre amb el sistema de control de temperatura.....	53
Figura 5.2. Bossa amb xocolata en pols.....	54
Figura 5.3. Aspecte de la xocolata.....	55
Figura 5.4. Resistència enrotllada per la part inferior.....	56
Figura 5.5. Muntatge del capçal amb la resistència de 90 W de potència dissipada.....	56
Figura 5.6. Termòmetre digital.....	57
Figura 5.7. Efecte de la sonda a l'interior del cilindre.	58
Figura 5.8. Tap foradat amb la punta extrusora.....	59
Figura 5.9. Punta extrusora fixada amb massilla segellant.....	59
Figura 5.10. Muntatge del capçal.	60
Figura 5.11. Escuma adaptada a la part superior del cilindre.	61
Figura 5.12. Nou adaptador d'aire comprimit.....	61
Figura 5.13. Resultat de la tercera prova.	64
Figura 5.14. Textura de la xocolata a 50 °C.	67
Figura 5.15. Extrusió de la xocolata.....	68
Figura 5.16. Funcionament de la impressora BCN3D+.....	70
Figura 5.17. Ubicació inicial del cilindre en la impressora BCN3D+.	71
Figura 5.18. Peça per adaptar el capçal a la impressora i ubicació final del cilindre.	72
Figura 5.19. Capçal muntat a la impressora.	72
Figura 5.20. Sistema extrusor muntat a la impressora.....	73
Figura 5.21. Termòmetre amb sonda de contacte.....	74
Figura 5.22. Calibratge de la impressora.	77
Figura 5.23. Extrusió amb punta de 3,9 mm.	78
Figura 5.24. Impressió amb punta d'1 mm.....	79
Figura 5.25. Impressió amb xocolata negra i punta d'1 mm.	82
Figura 5.26. Impressió amb xocolata negra i punta de 2 mm.	83
Figura 11.1. Vista del cilindre amb el cable calefactat enrotllat.	96
Figura 11.2. Vista superior del cilindre amb la bossa al seu interior.....	97

ÍNDEX DE GRÀFICS

Gràfic 5.1. Evolució de la temperatura de la xocolata	62
Gràfic 5.2. Evolució de la temperatura de la xocolata durant el refredament.	63
Gràfic 5.3. Evolució de la temperatura de la xocolata.	65
Gràfic 5.4. Evolució de la temperatura de la xocolata durant l'escalfament abans d'arribar a l'estat estacionari.	66
Gràfic 5.5. Evolució de la temperatura de la xocolata.	75
Gràfic 5.6. Evolució de la temperatura de la xocolata durant l'escalfament.	76
Gràfic 5.7. Evolució de la temperatura de la xocolata durant el refredament.	76
Gràfic 5.8. Evolució de la temperatura de la xocolata.	80
Gràfic 5.9. Evolució de la temperatura de la xocolata durant l'escalfament.	81

GLOSSARI

ABS	<i>Acrylonitrile Butadiene Styrene.</i>
FDM	<i>Fused Deposition Modelling</i>
SLA	<i>Stereolithography</i>
DLP	<i>Digital Light Processing</i>
RepRap	<i>Replicating Rapid Prototyper</i>
DIY	<i>Do It Yourself</i>

1. PREFACI

1.1. Origen del projecte

Aquest projecte neix de la necessitat d'explorar nous horitzons en una tecnologia en ple creixement com és la impressió 3D, en aquest cas en el camp de la gastronomia. Per això, la Universitat Politècnica de Catalunya i la Fundació CIM han signat un conveni de col·laboració amb la Universitat de Barcelona, aportant una nova línia d'actuació en la posada en marxa del Laboratori de Demostracions Tecnològiques i d'Investigació Culinària.

D'altra banda, el projecte també pretén millorar els resultats obtinguts mitjançant el capçal *Paste Extruder*, el qual ofereix mancances en la impressió 3D de xocolata i que s'explicaran més profundament a posteriori.

1.2. Motivació

La motivació que em porta a fer aquest treball és deguda al gran interès que tinc en el món de la impressió 3D i la curiositat de combinar-lo amb un producte tan característic com és la xocolata. A més, durant aquest quadrimestre he cursat l'assignatura optativa de Plànols i Impressió 3D i he realitzat unes pràctiques curriculars a una empresa d'aquest sector, on he treballat amb impressores FDM i SLA tipus DLP, la qual cosa encara ha reforçat més les meves ganes d'aprofundir coneixements en aquest àmbit.

2. INTRODUCCIÓ

En aquest punt es parlarà sobre quins són els objectius plantejats en el projecte, quin és el seu abast i quins són els antecedents existents en aquesta tecnologia.

2.1. Objectius del projecte

L'objectiu principal del projecte consisteix en dissenyar un sistema d'extrusió alimentat amb

cartutxos o càpsules dosificadores de xocolata en trossos petits o en pols. Es parteix d'una impressora 3D que utilitza la tecnologia FDM, concretament la *RepRap* BCN3D+ amb el capçal *Paste Extruder* dissenyada per BCN3D Technologies.

A més d'aquest, existeixen objectius secundaris que permetran optimitzar els resultats obtinguts fins ara amb el capçal *Paste Extruder*:

- Aconseguir un flux constant i controlat, la qual cosa s'assoleix tenint control sobre la temperatura i la pressió exercida sobre la xocolata.
- Evitar el degoteig quan no s'està imprimint.
- En tractar-se d'un fluid alimentari, és important que en el sistema dissenyat la xocolata només tingui contacte amb zones d'un sol ús, permetent-li així treballar amb altres materials pastosos com pot ser la ceràmica.

L'últim punt també pretén solucionar un dels problemes existents actualment amb el capçal *Paste Extruder*: la neteja en acabar la impressió. La raó és deguda a la baixa viscositat que adquireix la xocolata en refredar-se, la qual cosa dificulta el procés d'extracció.

2.2. Abast

Aquest projecte comprèn des de la recerca de possibles sistemes d'extrusió semblants existents en el mercat, fins al disseny i materialització del prototip funcional. Per tal d'aconseguir-ho es realitzaran els càlculs necessaris, així com una anàlisi de viabilitat econòmica i un estudi d'impacte ambiental de la solució adoptada.

Queda fora de l'abast del projecte l'estudi del llit d'impressió, que permet optimitzar els resultats de la impressió, que s'estudia en un altre projecte a causa de la seva complexitat, fet que provoca que no es puguin assegurar els millors resultats en les impressions. A més, tampoc es farà menció al *packaging*, ja que la decisió de validar el projecte com a apte per a la comercialització recau sobre la Fundació CIM.

2.3. Referències

Per tal de posar el projecte en context, a continuació es presenten alguns temes que permeten entendre millor la tecnologia 3D aplicada a la xocolata.

2.3.1. La impressió 3D aplicada a la xocolata

Hi ha pocs aliments tan apreciats pels consumidors com la xocolata, però enginyerilment parlant es tracta d'un material amb un comportament realment complex. Depenent de la velocitat de refredament utilitzada i la temperatura de cristal·lització seleccionada es poden obtenir fins a 6 formes polimòrfiques diferents, cadascuna de les quals té propietats físiques característiques, amb diferent punt de fusió i morfologia cristal·lina. El color i la textura del producte final depenen de la forma polimòrfica a la qual hagi cristal·litzat la xocolata. La forma V (o β) és la forma preferida perquè li confereix un color marró uniforme, brillantor i textura adequada al producte a més de ser la més adient per a imprimir en 3D.

Per tal d'aconseguir la forma polimòrfica V és necessari seguir un procés de temperat consistent en tres passos:

1. Es fon tota la xocolata augmentant la temperatura fins a 50°C.
2. Es deixa refredar fins als 27 °C.
3. Finalment, s'escalfa de nou fins arribar als 30-32 °C i s'extrudeix.

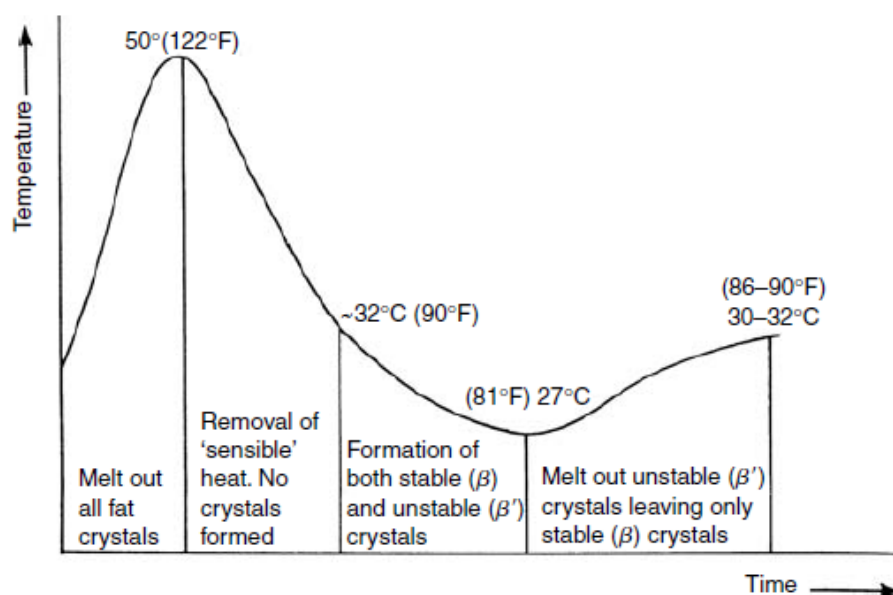


Figura 2.1. Procés de temperat de la xocolata. Font: *Industrial Chocolate Manufacture and Use*.

Actualment, amb el *Paste Extruder* el procés de temperat es duu a terme prèviament fent un bany Maria i s'introdueix a la xeringa a posteriori, com es veurà en el següent apartat. La idea en aquest projecte és adaptar un control de temperatura a l'extrusor per tal d'evitar aquest procés molest i lent.



Figura 2.2. Bany Maria. Font: www.bcn3dtechnologies.com.

2.3.2. Impressió de xocolata mitjançant el capçal *Paste Extruder*

Com ja s'ha comentat, la impressió 3D amb xocolata amb la *RepRap BCN3D+* no és una novetat, atès que aquesta disposa del capçal *Paste Extruder*, el qual permet treballar amb materials pastosos com la ceràmica, el puré de patata o la xocolata. Aquest consisteix en un sistema d'injecció actuat per un motor pas a pas, que controla la quantitat de material extrudit a través de la pressió exercida per un èmbol sobre el material dipositat a l'interior d'una xeringa.

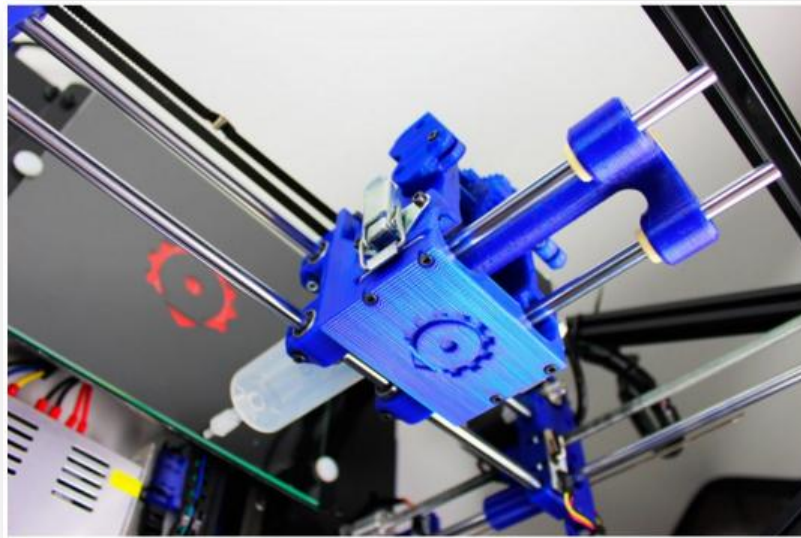


Figura 2.3. Capçal *Paste Extruder*. Font: www.bcn3dtechnologies.com.

Aquest sistema, però, presenta alguns inconvenients que aquest projecte també pretén solucionar:

- No disposa de control de temperatura. Això implica que s'hagi de temperar la xocolata prèviament, la qual cosa provoca que el sistema sigui poc ergonòmic.
- Presenta degoteig quan es deixa d'extrudir, a causa de què la xeringa segueix pressuritzada i no té cap sistema que solucioni aquest problema.

En la següent figura es poden veure algunes de les figures fetes amb aquest capçal.



Figura 2.4. Peces fetes amb el *Paste Extruder*.

2.3.3. Estat de l'art

2.3.3.1. Impressores 3D de xocolata existents en el mercat:

- **Choc Creator V2** (dissenyada per *Choc Edge*): es tracta d'una versió millorada del *Choc Creator*. Característiques:
 - **Dipòsit:** no en té. La xocolata s'introdueix directament a l'interior d'una xeringa com en el *Paste Extruder*.
 - **Sistema actuator:** lineal i recte, és a dir, un èmbol actuat per un motor pas a pas.
 - **Control de temperatura:** no en té.



Figura 2.5. Impressora *Choc Creator V2*. Font: www.chocedge.com.

- **Foodini** (dissenyada per *Natural Machines*): el sistema que utilitza és el que més s'assembla del mercat a la idea que es busca en aquest projecte, tot i que encara es troba en desenvolupament. Característiques:
 - **Dipòsit:** utilitza unes càpsules que l'usuari ha d'omplir amb l'aliment que

vol imprimir i introduir-lo a la màquina.

- **Sistema actuator:** lineal i recte.
- **Control de temperatura:** No s'especifica si en té, tot i que sembla que no.



Figura 2.7. Impressora *Foodini*. Font: www.naturalmachines.com

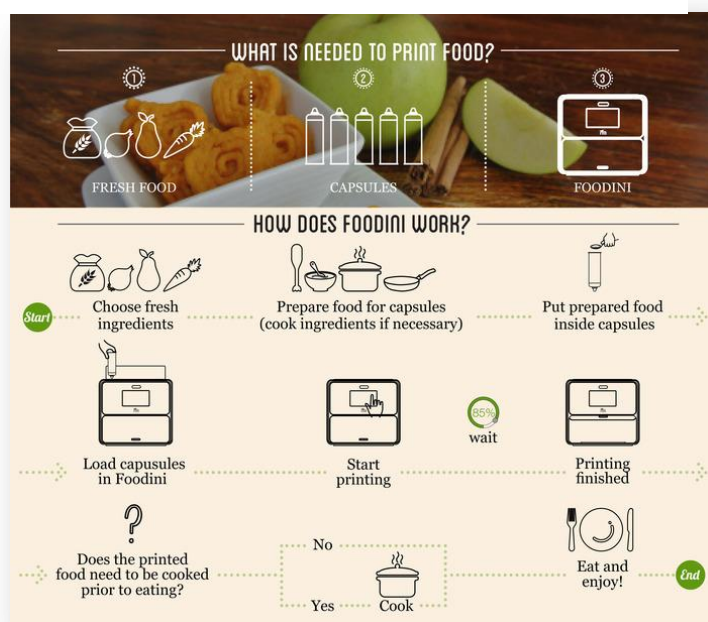


Figura 2.6. Funcionament de la impressora *Foodini*.

Font: www.naturalmachines.com.

N'hi ha moltes més, però la majoria no ofereixen gaire informació sobre el seu funcionament i no aporten informació més rellevant. D'aquesta forma, com es pot comprovar en les impressores analitzades, l'ús d'una xeringa i un control de pressió basat en un motor pas a pas i un èmbol, és el sistema més utilitzat en la impressió 3D de materials pastosos, i conseqüentment, de xocolata.

2.3.3.2. Sistemes extrusors desenvolupats

Un cop vistes algunes de les impressores existents en el mercat, es procedeix a fer una anàlisi dels sistemes extrusors existents més rellevants basats en xeringues, que donaran una informació més detallada sobre aspectes com el transport del material o el control de temperatura.

- **Claystruder:** l'estudi de disseny belga *Unfold* ha desenvolupat un sistema extrusor dissenyat específicament per a la impressió de ceràmica. En tractar-se d'una pasta, com la xocolata, el seu anàlisi pot ser d'utilitat per al projecte. A més, segueix la filosofia *OpenSource*, en la línia de les impressores *RepRap*. A continuació es presenten les diverses versions del sistema:
 - **Claystruder 0:** es basa en el principi que s'usa amb el *Paste Extruder*.
 - **Avantatges:**
 - Compatible amb la majoria de *softwares* per l'ús d'un motor pas a pas.
 - Extrusió d'una quantitat predefinida i predictable amb cada volta del motor pas a pas.
 - **Inconvenients:**
 - Degoteig de la pasta en deixar d'extrudir.
 - Dificultat per realitzar peces de molta alçada a causa de la llargada de la xeringa.
 - No disposa de control de temperatura.
 - **Claystruder 1:** el problema del degoteig a l'inici i al final de la impressió porta a fer un redisseny de l'actuador. Aquest es basa en el sistema extrusor *Frostruder*

MK2, dissenyat per *MakerBot* i que posteriorment s'analitza. D'aquesta forma, el *Claystruder 1*, enlloc de l'èmbol emprat en la versió inicial com a element actuator, utilitza polsos d'aire comprimit per conduir la ceràmica, formant el que industrialment es coneix com vàlvula de temps i pressió (*Time-pressure valve*).

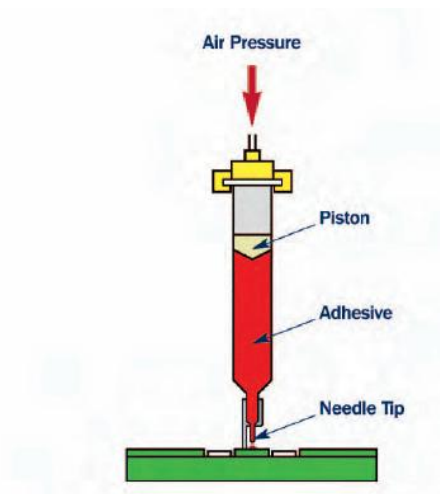


Figura 2.8. Vàlvula de temps i pressió. Font: www.empf.org.

Aquest sistema té un funcionament relativament senzill: els polsos d'aire s'aconsegueixen mitjançant un compressor i una vàlvula solenoide accionada elèctricament mitjançant un controlador, la qual permet regular el pas de l'aire. El problema que existeix amb aquest sistema és que requereix una programació del controlador per tal que la vàlvula s'obri i es tanqui quan sigui necessari expulsar material o deixar d'extrudir. A més, aquest sistema segueix sense resoldre la problemàtica del degoteig de la xeringa en acabar la impressió o quan deixa d'extrudir per canviar de posició, ja que en tancar la vàlvula aquesta segueix pressuritzada, la qual cosa provoca que segueixi expulsant material. El sistema extrusor *Frostruder MK2* amb el qual es va basar el *Claystruder 1*, que s'explica més endavant, sí que resol aquest problema.

Posteriorment, els dissenyadors van introduir noves millores en el seu sistema. Una de les més significatives és la separació de la punta extrusora de la xeringa, la qual cosa evita el problema d'haver de canviar de xeringa cada vegada que es vol canviar el diàmetre de la punta, de forma que no s'ha d'anar omplint i reomplint cada

xeringa que es vol utilitzar, evitant així una mala col·locació en canviar-la. Aquesta idea també és interessant en aquest projecte, ja que com s'ha explicat es necessita un sistema amb càpsules que han de ser extraïbles.



Figura 2.9. Punta extrusora amb la xeringa extraïble. Font: unfoldfab.blogspot.com



Figura 2.10. Fixacions de la punta extrusora i la xeringa en el capçal. Font: unfoldfab.blogspot.com.

En les següents figures es pot observar l'adaptador de la xeringa al tub d'aire comprimit fabricat per impressió 3D.

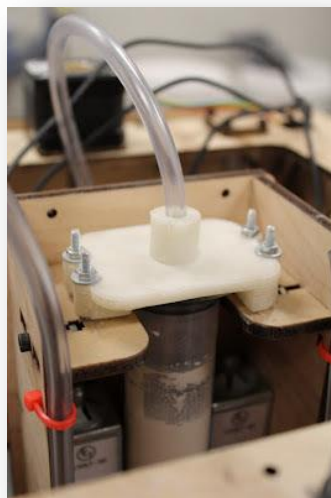


Figura 2.11. Adaptador de la xeringa al tub d'aire comprimit.

Font: unfoldfab.blogspot.com.

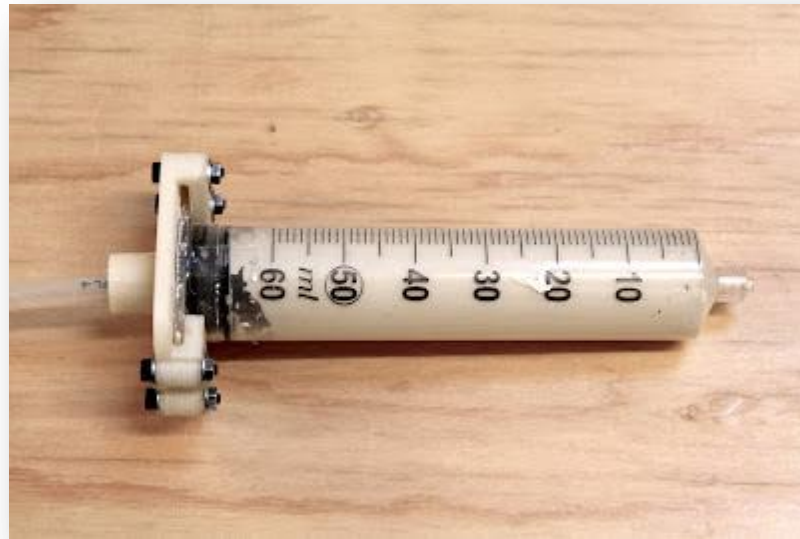


Figura 2.12. Xeringa amb l'adaptador al tub d'aire comprimit.

Font: unfoldfab.blogspot.com.

D'aquesta forma, els avantatges i inconvenients d'aquest sistema són els següents:

- **Avantatges:**
 - Disseny relativament senzill.
 - Capacitat d'engegada/parada gairebé instantània.
 - Facilitat de neteja.
 - Possibilitat de graduació de la pressió de l'aire.

- **Inconvenients:**
 - Dificultat per combinar amb el *firmware* de les impressores *RepRap*.
 - Segueix havent-hi degoteig en els instants de parada de la impressió, a causa de què la xeringa segueix pressuritzada.
 - Menys control del flux extrudit que utilitzant un motor pas a pas.
 - No és útil amb pastes de gran viscositat.
 - Necessitat de tenir un compressor d'aire o alguna altra font d'aire comprimit.

- Perill de bufar la peça amb l'aire comprimit si quedés poc material, la qual cosa podria destruir el model.
- No disposa de control de temperatura.

Un dels majors problemes que presenta aquest sistema és la dificultat de controlar el flux de material extrudit. Això és degut a què com passava en la versió anterior i en el *Paste extruder*, si el sistema no disposa de control de temperatura, la viscositat del material va augmentant al llarg de la impressió a conseqüència del refredament d'aquest, dificultant així el procés d'extrusió.

- **Claystruder 2:** La necessitat de controlar i predir el flux de material extrudit, porta als dissenyadors a buscar alternatives. Hi ha diverses opcions en el mercat, com la bomba de cavitats progressives que es comenta més endavant, però la que escull és l'anomenada vàlvula d'Auger. El funcionament d'aquesta és el següent: una xeringa pressuritzada mitjançant aire comprimit alimenta un cargol d'arquímedes que es troba a l'interior d'una cavitat cilíndrica, amb la finalitat de conduir el fluid fins a la punta extrusora. El cargol gira gràcies a l'acció d'un motor pas a pas que impulsa el fluid cap a baix. La quantitat de flux, per tant, està controlada per la velocitat de rotació del motor.

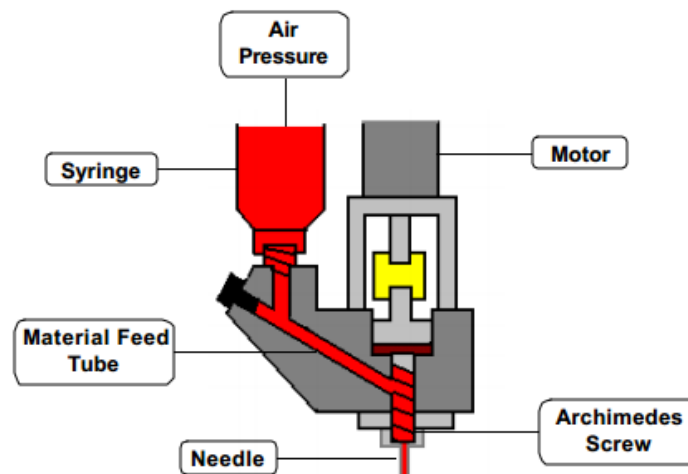


Figura 2.13. Vàlvula d'Auger. Font: www.empf.org

Diverses empreses ofereixen aquest tipus de vàlvules amb tot el sistema integrat, però en la majoria els costos són superiors als 2000 €, la qual cosa fa inviable la seva adquisició. No obstant, *Unfold* proposa la seva realització amb elements independents per tal de reduir els costos. Per això, es fixa en quins components utilitzen aquests tipus de sistemes i els adapta per tal de dissenyar l'extrusor:

- **Motor:** és de corrent continu, per la qual cosa es pot utilitzar un motor pas a pas com el que utilitza la *RepRap* BCN3D+.
- **Assemblatge del cargol:** DMP (*Disposable Material Path*), patentada per *Techcon Systems* i que basa el seu funcionament amb el de la vàlvula d'Auger. Com es pot observar en la següent figura 2.15, el DMP té 3 entrades: una per a la xeringa, una per al motor i una per a la punta extrusora.



Figura 2.14. *Disposable Material Path*. Font: www.techconsystems.com.

A continuació es pot veure com queda el sistema un cop acoblat. Com s'observa en la següent figura, aquesta nova versió del *Claystruder* està formada per una xeringa, un motor pas a pas i dues peces fabricades per impressió 3D que contenen el DMP en el seu interior, seguint l'esquema de la vàlvula d'*Auger*.



Figura 2.15. *Claystruder 2*. Font: unfoldfab.blogspot.com.es



Figura 2.16. Peces del *Claystruder 2*. Font: unfoldfab.blogspot.com.es

Un cop muntat el sistema extrusor, els dissenyadors es disposen a realitzar els primers assajos, en els quals s'obtenen bons resultats. Els principals inconvenients que es tenien en versions anteriors queden resolts:

- El flux d'extrusió és proporcional a la velocitat de rotació del motor.
- Quan es para el motor, l'extrusió és detinguda al complet sense cap tipus de degoteig.

Cal remarcar que a més d'utilitzar ceràmica es van fer proves amb puré de patata i xocolata, i els resultats van ser igualment bons. Sembla, doncs, una alternativa interessant per al projecte.

No obstant, els dissenyadors no van tenir en compte que la ceràmica és un material molt abrasiu. Després d'unes proves més extensives amb ceràmica de porcellana van començar a aparèixer problemes: la rosca del cargol d'Auger es va desgastar, la qual

cosa provocava un mal control de la quantitat de flux i un degoteig en parar el motor. Per contrarestar aquest efecte, el dissenyador va adquirir un cargol d'Auger metàl·lic, però en provar-lo, aquest va desgastar la paret, que seguia sent de plàstic. No va fer cap millora més.

A continuació es presenten els avantatges i inconvenients d'aquest sistema:

- **Avantatges:**
 - Disseny relativament senzill.
 - Permet tenir un gran control de la quantitat de flux extrudit.
 - No hi ha degoteig en cap moment.
 - Compatibilitat amb la impressora BCN3D+, per l'ús d'un motor pas a pas.
- **Inconvenients:**
 - Fluid en contacte amb materials de més d'un sol ús.
 - Cost major a causa de què s'ha d'adquirir el sistema DMP.
 - Dificultat en la neteja.
 - Desgast del DMP a llarg termini, accentuat amb materials abrasius.
 - Necessitat de calibració segons material i temperatura, és a dir, segons viscositat.
- **Claystruder 3:** desenvolupat per *Unfold* i *ViscoTec*. A causa dels mals resultats amb la vàlvula d'Auger, els dissenyadors del *Claystruder* posen la seva vista en un nou principi de funcionament: la bomba de cavitats progressives. Aquest sistema de bombeig elimina la problemàtica de la viscositat del material, permetent treballar en un ampli rang de tipus de materials obtenint grans resultats. A més, permet tenir un gran control de la quantitat de flux de material extrudit. El fet de ser un sistema poc utilitzat en el món de la impressió 3D, porta a *Unfold* a unir-se amb *ViscoTec* per tal d'adquirir un dispensador basat en aquest tipus de bombeig. El seu funcionament consisteix en un vis sens fi de rotació excèntrica que es troba a l'interior d'un capçal amb una geometria oposada. Aquesta geometria permet controlar i predir el flux de material extrudit un cop calibrat amb la viscositat del material.



Figura 2.17. Cavitats progressives. Font: www.directindustry.es.

En les següents figures es pot veure el disseny final de l'extrusor. Com s'observa, la xeringa pressuritzada amb aire comprimit s'encarrega d'alimentar la bomba de cavitats progressives.

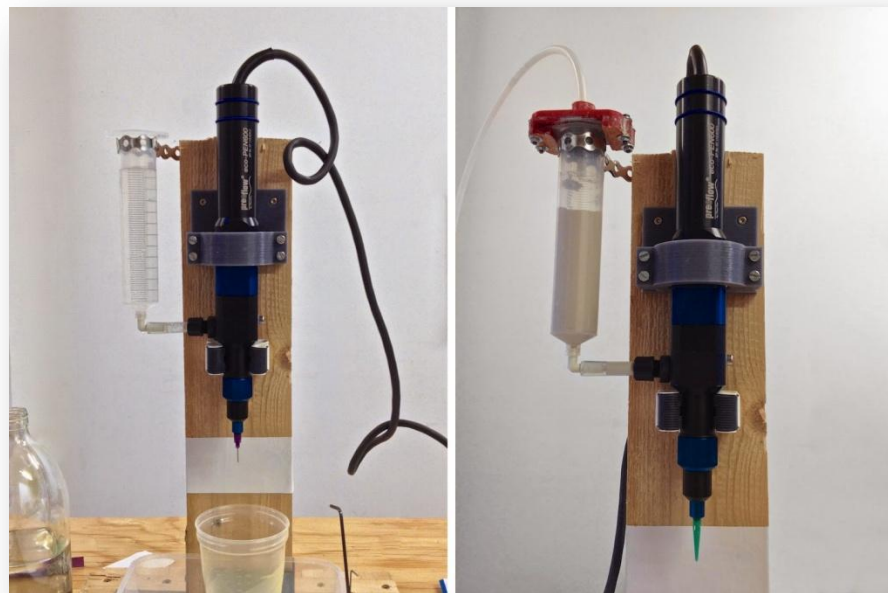


Figura 2.18. Claystruder 3. Font: unfoldfab.blogspot.com.es

Aquest disseny, però, no es basa en la filosofia *RepRap*, ja que hi ha elements comprats, la qual cosa repercuteix en un cost molt elevat. Tot i que com s'ha comentat és un sistema poc utilitzat en extrusors d'impressores 3D, hi ha alguns dissenys a la xarxa que simulen aquest funcionament, encara en fase d'estudi. A priori sembla una altra alternativa al projecte, tot i que segueix apareixent la

problemàtica del fluid en contacte amb materials de més d'un ús i la dificultat d'aconseguir un sistema de bombeig de cavitats progressives sense haver d'afrontar un cost elevat.

Seguidament, es presenten els avantatges i els inconvenients d'aquest sistema:

- **Avantatges:**
 - No depèn de la viscositat del material.
 - Permet tenir un gran control de la quantitat de flux extrudit.
 - No hi ha degoteig ni abans de l'engegada ni després de la parada.
 - Facilitat de neteja.
 - **Inconvenients:**
 - Cost elevat (sempre i quan no s'aconsegueixin tots els elements mitjançant la filosofia *RepRap*).
 - Fluid en contacte amb materials de més d'un sol ús.
 - Sistema complex.
- **Frostruder MK2:** dissenyat per *MakerBot*, després d'una versió inicial que es basava en el mateix sistema que el *Paste Extruder*, la necessitat de tenir un major control de la pressió per evitar el degoteig en les parades d'extrusió de la impressora, porta a *MakerBot* a la versió MK2, la qual incorpora una innovació pionera en l'extrusió de pastes: el control de pressió mitjançant aire comprimit i dues vàlvules solenoides. El funcionament és el mateix que l'explicat en el *Claystruder 1*, però en aquest cas el *Frostruder MK2* incorpora una millora que permet la despressurització de la xeringa en els instants de parada. Aquesta millora consisteix en integrar una segona vàlvula solenoide que actua com a vàlvula d'"alleujament". El seu funcionament és senzill: quan la primera vàlvula (vàlvula de pressió) està en ON, la xeringa està connectada a la font de pressió principal, la qual força a sortir el material que es troba a l'interior de la xeringa. Quan es desitja parar l'extrusió, la vàlvula de pressió es para i la d'alleujament s'obre, que expulsa l'aire a pressió cap a l'exterior. Això produeix una despressurització de la xeringa i, conseqüentment, la xeringa deixa d'extrudir completament.

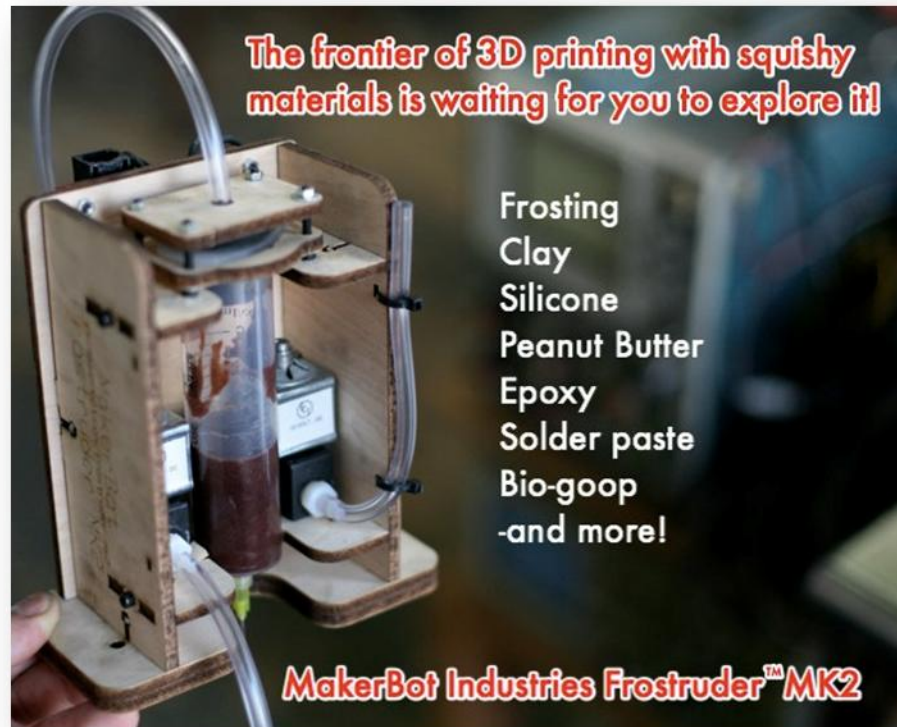


Figura 2.19. Frostruder MK2. Font: www.makerbot.com.

Els avantatges i els inconvenients d'aquest sistema són els següents:

▪ **Avantatges:**

- No hi ha degoteig en els instants de parada.
- Disseny relativament senzill.
- Capacitat d'engegada/parada gairebé instantània.
- Facilitat de neteja.
- Possibilitat de graduació de la pressió de l'aire.

▪ **Inconvenients:**

- Menys control del flux extrudit que utilitzant un motor pas a pas.
- No és útil amb pastes de gran viscositat.
- Necessitat de tenir un compressor d'aire o alguna altra font d'aire comprimit.
- Perill de bufar la peça amb l'aire comprimit en cas de quedar poc material, la qual cosa podria destruir el model.

- No disposa de control de temperatura.

Aquest model sembla una alternativa interessant per al projecte, ja que tot i que el fluid segueix tenint contacte amb elements de més d'un ús, la xeringa, s'evita el degoteig en els instants de parada, solucionant així un dels problemes més importants existents en l'extrusor *Paste Extruder*. Caldria, però, incloure-hi un sistema de control de temperatura i decidir com adaptar el sistema de càpsules.

2.3.3.3. Sistema extrusor alternatiu

Fins ara s'han vist sistemes ja desenvolupats per a la tecnologia 3D, però n'existeixen d'altres que podrien adaptar-se. Un d'ells podria ser el següent:

- **Vàlvula de raig (*Jetting valve*):** també anomenada dispensador de no-contacte, proveeix la major velocitat d'extrusió des d'una altura d'entre 1 i 3 mm. La seva major aplicació és en xips electrònics gràcies a la seva gran precisió.

La clau del seu funcionament és una vàlvula que mesura i expulsa petites quantitats de fluid. Un sistema electropneumàtic accionat mitjançant un controlador com el que utilitza la impressora BCN3D+ fa moure un èmbol amunt i avall, separant una dosi precisa de quantitat de material del dipòsit a la cambra sota pressió. Quan el pistó retorna al seu lloc, expulsa el fluid a través de la punta.

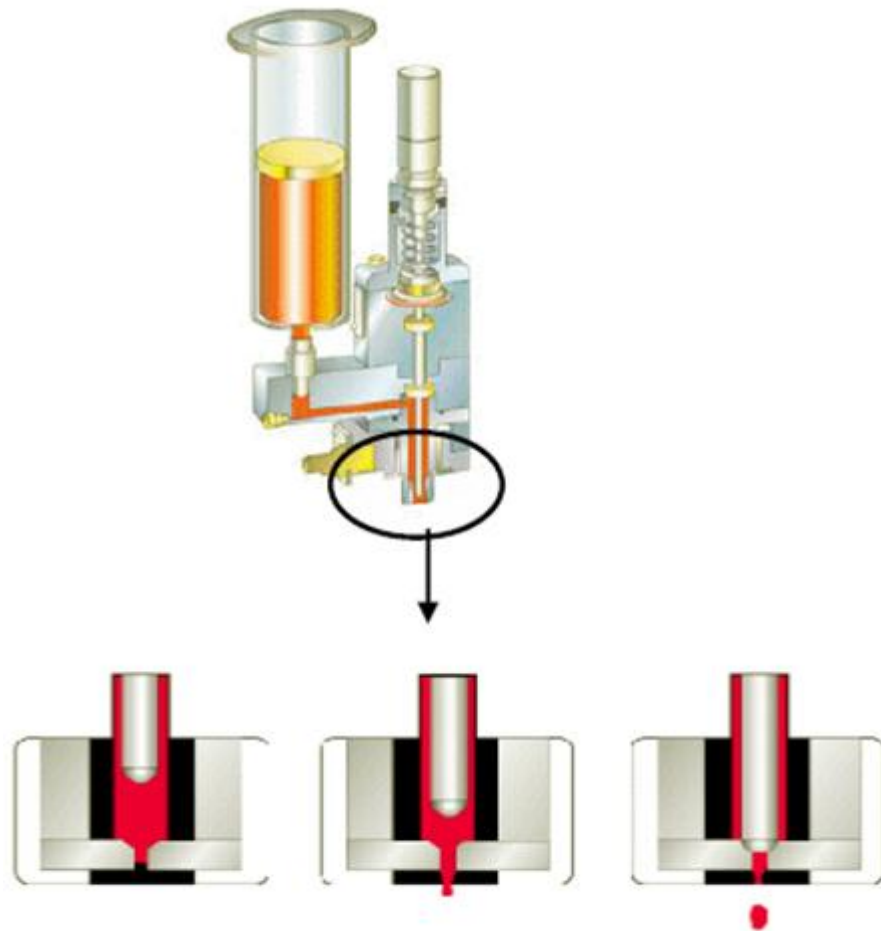


Figura 2.20. Vàlvula de raig. Font: www.empf.org.

L'índex de dispensació és d'unes 200 expulsions per segon, amb un diàmetre de gota d'uns 100 μm . La temperatura del fluid és controlada a la vàlvula per mantindre la quantitat de flux extrudit. Aquesta alta velocitat provoca que sembli una extrusió contínua.

Quan s'extrudeix, la punta s'ha de posicionar entre 0,5 i 3 mm sobre la base.

Els avantatges i inconvenients d'aquest sistema extrusor són els següents:

- **Avantatges:**
 - Gran control de la quantitat de flux extrudit.
 - Pot extrudir materials amb un ampli rang de viscositat.
 - Compatibilitat amb la impressora BCN3D+.
 - Facilitat de neteja.

- **Inconvenients:**
 - Sistema molt complex i gairebé gens utilitzat en impressió 3D.
 - Fluid en contacte amb elements de més d'un ús.
 - Cost elevat.

3. DISSENY CONCEPTUAL

3.1. Criteris de disseny

Com ja s'ha comentat anteriorment, l'objectiu d'aquest projecte és aconseguir un sistema extrusor alimentat amb cartutxos o càpsules monodosi aconseguint un flux constant i controlat sense tenir degoteig en els moments en què no s'està extrudint. A més, els elements del sistema no han d'estar en contacte amb la xocolata, i en cas d'estar-ho, han de ser d'un únic ús.

Per tal de complir les especificacions, s'ha pensat en dissenyar un sistema en què la pressió s'aporti mitjançant aire comprimit i que el fluid s'extrudeixi directament des d'una càpsula tipus bossa, per tal que aquesta tingui la capacitat de comprimir-se i expulsar la xocolata. En el següent apartat es farà una explicació més detallada del disseny.

3.2. Disseny de l'extrusor

L'extrusor dissenyat es basa en el sistema utilitzat pel *Frostruder MK2*, explicat en l'apartat 2.3.3.2., aprofitant que aquest és de codi obert. S'ha decidit escollir aquest sistema perquè és el que millor s'adapta als objectius abans exposats, a més de ser un sistema assequible econòmicament.

3.2.1. Elements del sistema extrusor

3.2.1.1. Adaptador d'aire comprimit

Aquest adaptador permetrà connectar la font d'aire comprimit amb el cilindre mitjançant un tub d'aire comprimit. Es fabricarà amb ABS mitjançant la tecnologia d'impressió 3D, ja que és un material resistent i aquesta és una peça que ha d'aguantar pressions elevades.

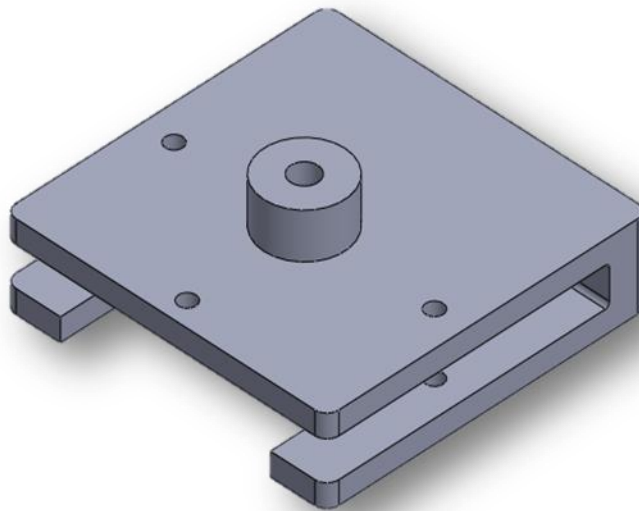


Figura 3.1. Adaptador d'aire comprimit.

3.2.1.2. Cilindre

El cilindre és l'element bàsic del sistema extrusor. Aquest ha de ser capaç de conduir la calor, donat que es vol que hi hagi un control de temperatura sobre aquest, on estarà allotjada la càpsula que es descriu en el següent apartat i que contindrà la xocolata. Per aquesta raó, es decideix fer-lo d'alumini, que és un dels materials amb major conductivitat tèrmica i prou accessible.

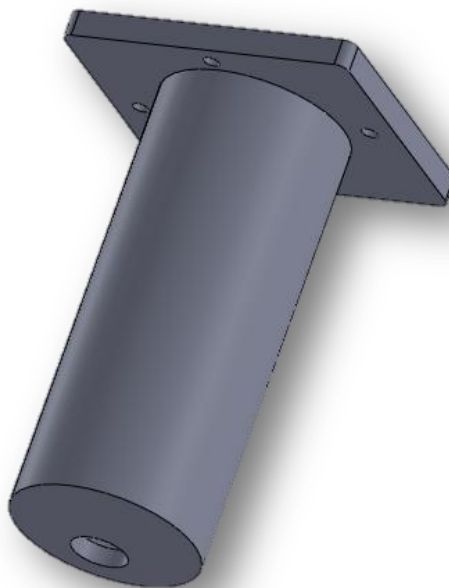


Figura 3.2. Vista del cilindre.

3.2.1.3. Càpsula-bossa

Fins ara s'ha anomenat càpsula a l'element que ha d'anar a l'interior del cilindre. No obstant, per utilitzar un sistema de pressió basat en aire comprimit, la càpsula ha de ser una bossa d'algun material conductor tèrmic tipus alumini per tal de poder ser comprimida per l'aire a pressió, a més d'absorbir la temperatura generada pel cilindre. Per això, ha d'estar el més ajustada possible al cilindre i ha de tenir una forma allargada i de poc diàmetre per tal d'aconseguir un escalfament de la xocolata més homogeni. A més, ha de tenir una sortida amb rosca a la qual s'hi collarà la punta extrusora i per la qual s'extrudirà la xocolata. D'aquesta forma s'aconseguirà que la xocolata només tingui contacte amb la bossa i la punta extrusora.

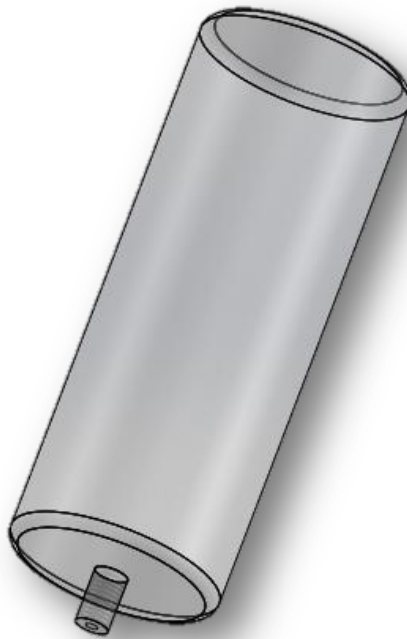


Figura 3.3. Càpsula-bossa.



Figura 3.4. Exemple de bossa amb sortida.
Font: www.alibaba.com.

3.2.1.4. Punta extrusora o *nozzle*

Per tal de complir les especificacions es necessita una punta que només s'utilitzi per a extrudir xocolata. A més, la mida de la sortida de la punta serà de 3,9 mm, que és el diàmetre de la punta de la xeringa del *Paste Extruder*. No obstant, existeixen adaptadors de punta que permeten reduir el diàmetre de la punta extrusora.

La idea inicial és que tingui una rosca coincident amb la de la sortida de la bossa, de tal

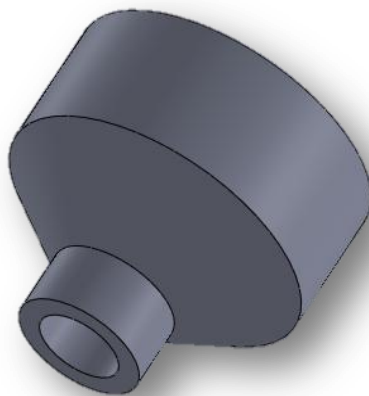


Figura 3.5. Punta extrusora.

forma que quan es vagi a fer la impressió es roscarà una amb l'altra.

3.2.2. Sistema de control de pressió

Com s'ha comentat, es pren com a sistema de referència l'utilitzat en el *Frostruder MK2*. Aquest té un sistema de pressió basat en polsos d'aire comprimit, industrialment conegut com a vàlvula de temps-pressió. Aquesta consisteix en la utilització de dues vàlvules solenoides de dues vies que limiten el pas de l'aire: una restringeix el pas d'aire comprimit provinent d'un compressor i l'altra, anomenada d'alleujament, va connectada a un altre tub que permet despressuritzar el cilindre quan no es vol extrudir, ja que si aquest no existís, en parar l'extrusió seguiria caient xocolata donat que el cilindre seguiria pressuritzat. Per aconseguir aquesta despressurització hi ha dues opcions:

- **Opció 1:** cilindre alleugerit a la pressió atmosfèrica. Quan la primera vàlvula està en ON (vàlvula de pressió), el cilindre està connectat a la font de pressió principal, la qual força la xocolata que es troba a l'interior del cilindre a sortir. Quan es desitja parar l'extrusió, la vàlvula de pressió es para i la d'alleujament s'obre, que permet expulsar l'aire a pressió cap a l'exterior. Aquest sistema, però, podria provocar que continués havent-hi degoteig per l'acció de la gravetat.
- **Opció 2:** cilindre alleugerit al buit mitjançant l'efecte Venturi. Aquest es produeix quan en un conducte hi ha un augment de velocitat molt gran provocat per una disminució de la secció, de forma que si en aquest punt del conducte s'introdueix l'extrem d'un altre, es produeix una aspiració del fluid d'aquest conducte que es mescla amb el que circula pel primer. En altres paraules, si en la bifurcació es redueix la secció del tub que condueix l'aire que prové del compressor, deixant les vàlvules en ON en el moment en què es deixa d'extrudir es crearà el buit a l'interior del cilindre, la qual cosa permetrà minimitzar al màxim el degoteig.

El procediment a seguir en la fase de proves serà provar d'utilitzar la primera opció, i en cas de no funcionar es farà el mateix amb la segona.

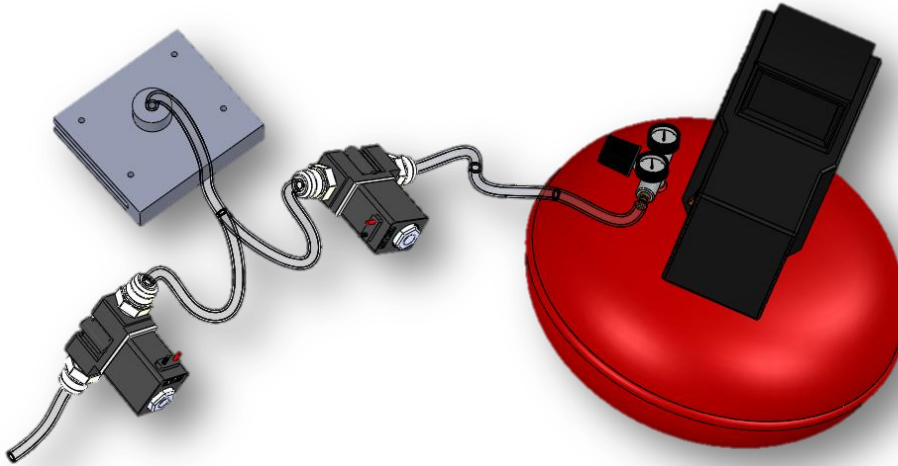


Figura 3.6. Sistema de control de pressió.

El canvi d'estat de les vàlvules es produeix quan hi ha pas de corrent a través del solenoide que les acompanya. Els components electrònics que permeten decidir quan es vol aquest pas de corrent són els transistors MOSFET canal N. Aquests elements tenen la capacitat d'actuar com a interruptors, de forma que quan s'envia un senyal suficientment alt per la porta (G) provinent de la placa controladora, el MOSFET deixa passar el corrent del drenador (D) al sortidor (S). Això s'explica perquè el MOSFET com a interruptor treballa en dos estats: tall, en el qual no hi ha corrent entre el drenador i el sortidor, i òhmica, en el que sí que n'hi ha. En l'esquema que es presenta més endavant es poden veure les connexions que s'han de realitzar per tal de controlar les vàlvules per mitjà d'aquests components.



Figura 3.7. Transistor MOSFET. Font: www.roboteq.com.

L'element que permet decidir quan es vol treballar en un estat o en l'altre en els MOSFETs és la placa controladora *Arduino*. Aquesta està connectada a les portes dels MOSFETs mitjançant els pins digitals, els quals envien un senyal de tensió que permet canviar l'estat de els MOSFETs, i conseqüentment de les vàlvules.



Figura 3.8. Placa *Arduino*. Font: www.arduino.cc.

En la següent figura es pot observar l'esquema de connexions del sistema de pressurització mitjançant vàlvules solenoides. S'ha escollit una font de 12 V perquè és a la tensió que requereixen les vàlvules i a la que també pot treballar la placa. A més, s'ha incorporat un díode de protecció entre cada pol dels solenoides per tal d'evitar fer malbé el circuit en cas d'una mala connexió.

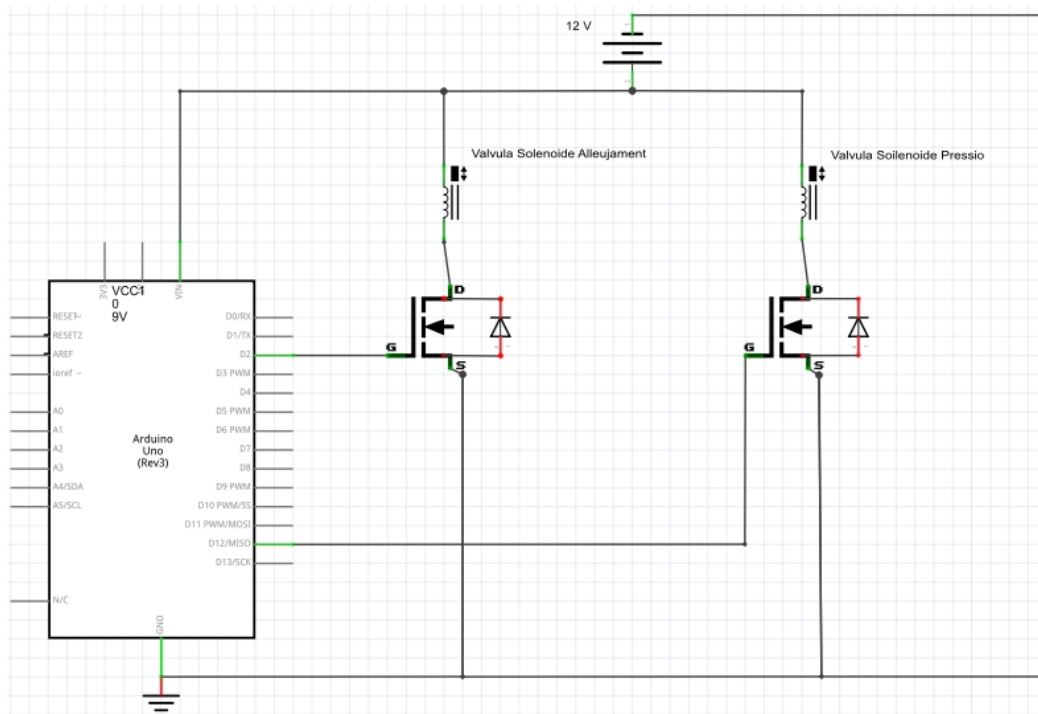


Figura 3.9. Esquema de connexions entre les vàlvules solenoides i la Placa *Arduino*.

El seu funcionament és el següent: en un estat inicial el MOSFET es troba en estat de tall i les vàlvules estan tancades, impossibilitant el pas d'aire comprimit a través seu. L'estat canvia quan la tensió entre la porta (G) i el sortidor (S) del MOSFET corresponent és major que la V_t^1 , produint-se el pas a l'estat d'òhmica. Això s'aconsegueix mitjançant la funció *digitalWrite()* de l'*Arduino*, que envia una tensió de 5 V des del pin digital seleccionat a la porta del MOSFET.

$$V_{GS} = V_G - V_S = 5 - 0 = 5 V$$

$$V_{GS} > V_t$$

Com s'ha explicat anteriorment, en l'estat d'òhmica els MOSFETs permeten el pas de corrent entre el drenador (D) i el sortidor (S), que va des de la tensió de 12 V fins al terra, travessant el solenoide que acompanya la vàlvula corresponent i, consegüentment, canviant l'estat d'aquesta.

¹ La V_t (*Threshold Voltage*) és la tensió llindar a la qual el MOSFET canvia d'estat. En el MOSFET que s'ha adquirit per a aquest projecte (model RFP50N06) aquesta està entre 2 i 4 V.

A continuació es mostra l'esquema de connexions sobre la placa *protoboard*. Com es pot observar, hi apareixen dos díodes LED, cadascun dels quals va acompanyat d'una resistència de 330Ω per tal de limitar el corrent a través d'ells i evitar cremar-los. Aquests es programaran de forma que facin llum quan la vàlvula que li correspongui a cadascun estigui oberta.

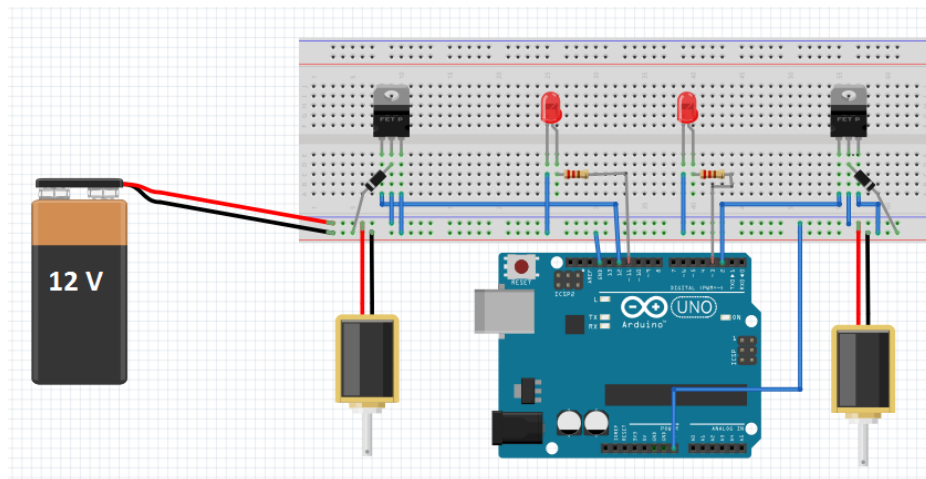


Figura 3.10. Esquema de connexions sobre la placa *protoboard*.

3.2.3. Programació amb *Arduino*

Un cop explicat el funcionament de les vàlvules i l'esquema de connexions a realitzar per tal de controlar-les, en aquest apartat s'explica la programació de la placa *Arduino* que permetrà aconseguir el sistema de pressurització desitjat.

Abans que res, cal esmentar que s'ha simplificat l'estudi a impressions d'extrusió contínua a fi de tenir el cilindre pressuritzat durant tota la impressió i només despressuritzar-lo en acabar, a causa de la complexitat de programació que adquireix el projecte sense fer aquesta simplificació, i més tenint en compte que l'essència del projecte és de caire mecànic. D'aquesta forma, el sistema de pressurització consistirà en obrir la vàlvula de pressió durant la impressió i tancar-la o deixar-la connectada, segons l'opció escollida de l'apartat 3.2.2., i obrir la d'alleujament en el moment d'acabar la impressió.

L'estructura bàsica de programació amb *Arduino* és bastant simple. El primer pas consisteix en establir en quins pins estan connectats els elements a controlar mitjançant la funció *int*.

En el cas d'aquest projecte es tenen dues vàlvules solenoides connectades als pin 12 i 2, i dos *LEDs* connectats als pins 11 i 3, respectivament. Seguidament, hi ha dos apartats: *setup()* i *loop()*. *Setup()* consisteix en la preparació del programa i *loop()* en l'execució. En la funció *setup()* s'inclou la declaració de variables com a sortides o entrades i és la primera funció que executa el programa, la qual només es realitza una vegada. En aquest cas tot són sortides.

En la funció *loop()* apareixen dues subfuncions bàsiques que permeten tenir control sobre les vàlvules: *digitalWrite(pin,value)* i *delay(time)*. La subfunció *digitalWrite*, com s'ha comentat anteriorment, introdueix un nivell alt (*HIGH*), que equival a una tensió de 5 V, o baix (*LOW*), 0 V, en el pin especificat. Quan s'introdueix el nivell alt en algun dels pins connectats als *LEDs*, el *LED* corresponent s'encén, mentre que quan s'introdueix el nivell alt en algun dels pins connectats a la porta d'un MOSFET, aquest passa de l'estat de tall a òhmica, permetent el pas de corrent entre el drenador i el sortidor i, consegüentment, activant la vàlvula corresponent. Quan s'introdueix el nivell baix es produeix el cas contrari. La subfunció *delay(time)*, en canvi, deixa l'estat anterior durant l'espai de temps indicat. Aquesta permet establir el temps durant el qual s'està extrudint.

El programa següent està basat en l'opció 1 del sistema de pressurització explicat en l'apartat 3.2.2.. En aquesta, la vàlvula solenoide de pressió (vàlvula 1) s'activa quan s'està imprimint, i es desactiva i s'activa la d'alleujament (vàlvula 2) quan s'acaba la impressió. En aquest cas s'ha posat un valor de 10 segons d'impressió i 10 segons de parada.



```
Sistema_normal $

int ledPin1 = 11;           // LED 1 connectat al pin 11
int ledPin2 = 3;           // LED 2 connectat al pin 3
int solenoidePin1 = 12;    // Vàlvula 1 connectada al pin 12
int solenoidePin2 = 2;    // Vàlvula 2 connectada al pin 2

void setup()
{
  pinMode(ledPin1, OUTPUT); // Estableix ledPin1 com a sortida
  pinMode(ledPin2, OUTPUT); // Estableix ledPin2 com a sortida
  pinMode(solenoidePin1, OUTPUT); // Estableix solenoidePin1 com a sortida
  pinMode(solenoidePin2, OUTPUT); // Estableix solenoidePin2 com a sortida
}

void loop()
{
  digitalWrite(ledPin1, HIGH); // Activa el LED 1
  digitalWrite(solenoidePin1, HIGH); // Activa la vàlvula 1
  delay(10000); // Impressió durant 10 s
  digitalWrite(ledPin1, LOW); // Desactiva el LED 1
  digitalWrite(solenoidePin1, LOW); // Desactiva la vàlvula 1
  digitalWrite(ledPin2, HIGH); // Activa el LED 2
  digitalWrite(solenoidePin2, HIGH); // Activa la vàlvula 2
  delay(10000); // Parada durant 10 s
  digitalWrite(ledPin2, LOW); // Desactiva el LED 2
  digitalWrite(solenoidePin2, LOW); // Desactiva la vàlvula 2
} // Es reinicia la funció loop()
```

Figura 3.11. Programa de control de les vàlvules solenoides.

3.2.4. Sistema de control de temperatura

Com s'ha explicat en l'apartat 2.3.1., la xocolata ha d'extrudir-se a la temperatura de 32°C després d'haver-se fós a 50 °C, amb l'objectiu d'aconseguir l'extrusió desitjada. S'ha decidit aplicar el sistema de control de temperatura sobre el cilindre, ja que és on estarà allotjada la xocolata.

El mètode de transferència de calor escollit per escalfar el cilindre és el de conducció. Es tracta de l'opció més lògica: l'escalfador elèctric per efecte Joule mitjançant el contacte entre dues superfícies: la calefactora, la resistència, i la calefactada, el cilindre.

Tenint en compte que cal tenir control sobre la temperatura, el sistema que es proposa en aquest cas és la utilització d'un cable calefactor recobert de silicona tèrmica² enrotllat al voltant del cilindre i que s'encarregui de transmetre-li la calor. Aquest anirà connectat a un termòstat analògic amb sonda que permetrà regular la temperatura. A més, per minimitzar al màxim les pèrdues de calor, s'enrotllarà el cilindre i el cable calefactor amb escuma elastomèrica³.



Figura 3.12. Cable calefactor.
www.elementoscalefactores.es.

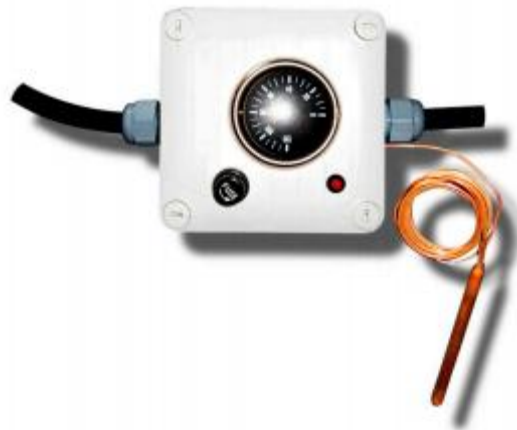


Figura 3.13. Termòstat analògic amb sonda.
Font: www.elementoscalefactores.es.

² La silicona tèrmica és una substància que incrementa la conducció de la calor entre dos superfícies en contacte directe.

³ L'escuma elastomèrica és un material d'aïllament tèrmic a base de cautxú sintètic i amb estructura cel·lular tancada.

3.2.5. Assemblatge del capçal

En les següents figures es pot observar com queda el capçal assemblat i juntament amb la impressora *RepRap BCN3D+*.

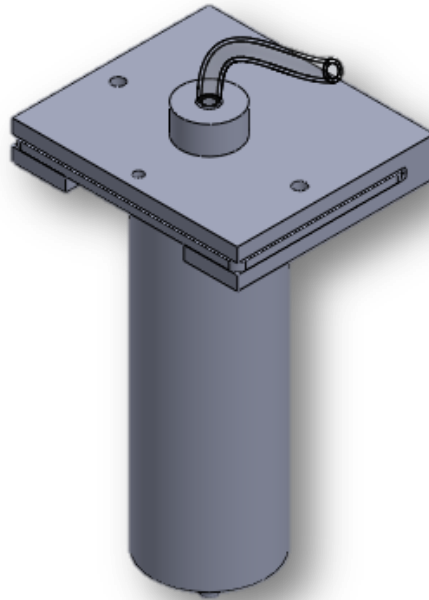


Figura 3.14. Vista isomètrica del capçal.

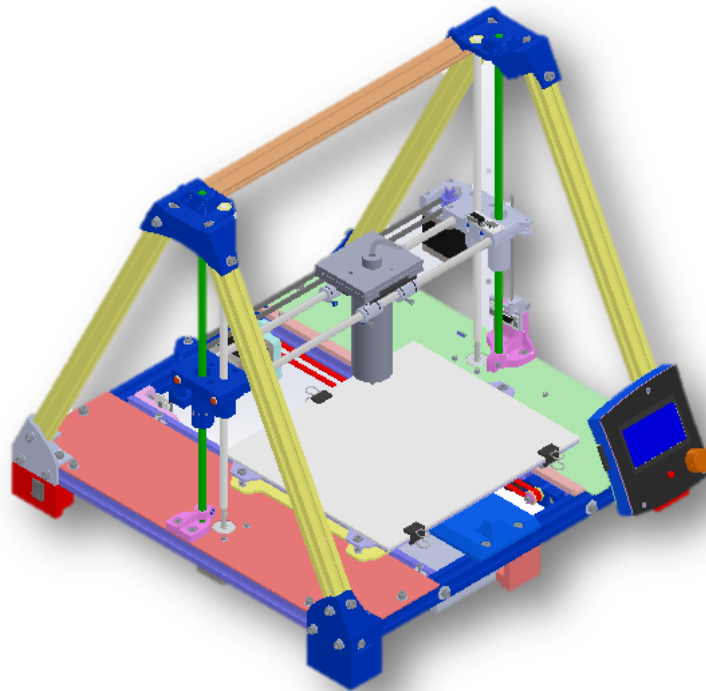


Figura 3.15. Vista isomètrica de l'assemblatge de l'extrusor en la impressora.

4. ASSEMBLATGE DEL SISTEMA EXTRUSOR

Un cop fet el disseny i adquirits tots els components necessaris per a la materialització del prototip, es procedeix al seu assemblatge. Cal esmentar que el muntatge que s'explica en aquest apartat és l'inicial, ja que va rebre modificacions durant la fase de proves, que es presenta més endavant.

4.1. Sistema de pressió

Donat que els seus elements són més accessibles en comparació amb els de l'extrusor, donat que no requereixen disseny previ per tal d'obtenir-los, el sistema de pressurització i despressurització és el primer que es realitza. En els annexos es poden veure tots els components adquirits per a la realització del sistema de control de pressió.

Seguint l'esquema de connexions de l'apartat 3.2.2. es realitza el muntatge amb els components adquirits descrits en l'apartat anterior. En la següent figura es mostra el muntatge final.

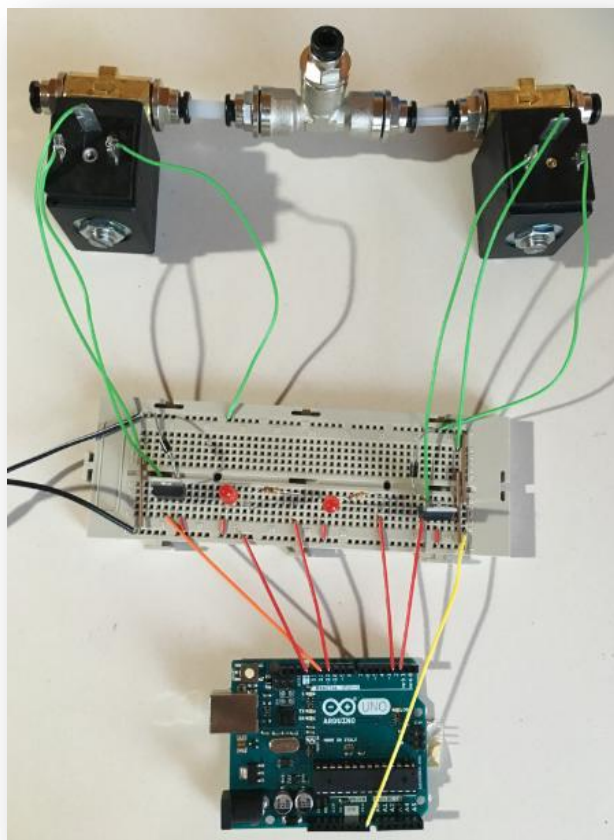


Figura 4.1. Muntatge del sistema de control de pressió.

A continuació, a fi de comprovar el correcte funcionament del sistema, es va carregar a l'*Arduino* el programa explicat en l'apartat 3.2.3.. En la figura 4.2 es pot apreciar com el primer *LED* està encès, la qual cosa significa que la vàlvula de pressió hauria d'estar connectada, com efectivament passa comprovant que la bossa de plàstic està rebent pressió. Contràriament, quan passen els 10 segons que s'havien programat, es desconnecta la vàlvula de pressió i es connecta la vàlvula d'alleujament, produint-se la despressurització de la bossa.

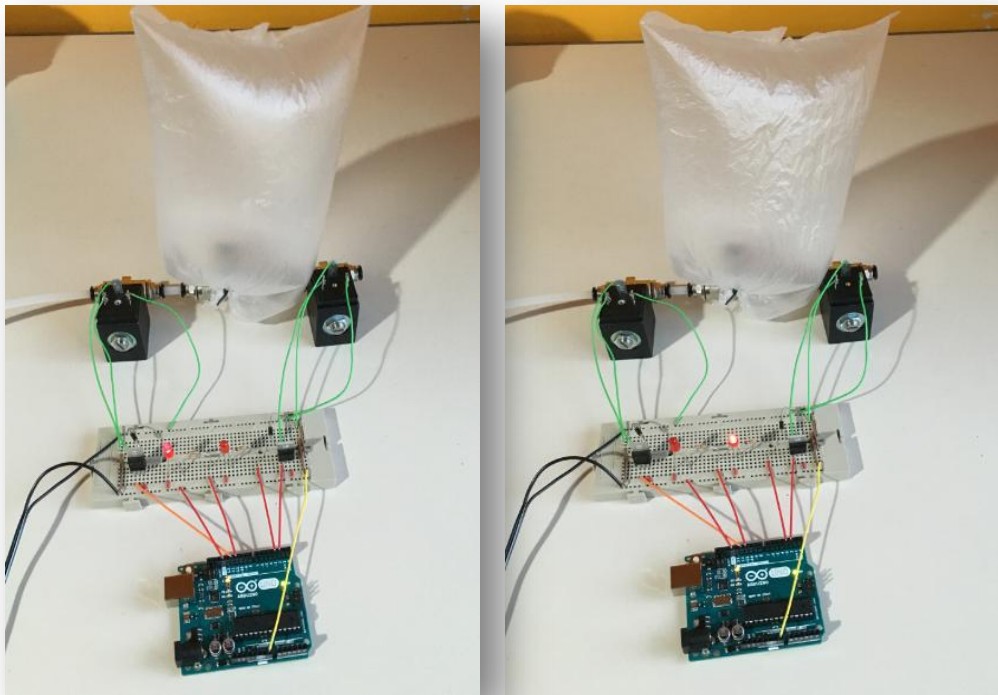


Figura 4.2. Sistema de control de pressió en funcionament.

4.2. Capçal

Per tal de fer el muntatge del capçal, es va enviar a mecanitzar el cilindre dissenyat i a fabricar per impressió 3D l'adaptador del cilindre a l'aire comprimit, així com una peça que serviria per muntar el capçal sobre la impressora.

Les mides del cilindre es van escollir el més semblants possible a les dimensions de la xeringa del *Paste Extruder* tenint en compte les limitacions del torn on es porta a fabricar la peça. En els plànols adjuntats a l'annex es poden veure les mides de forma més detallada.

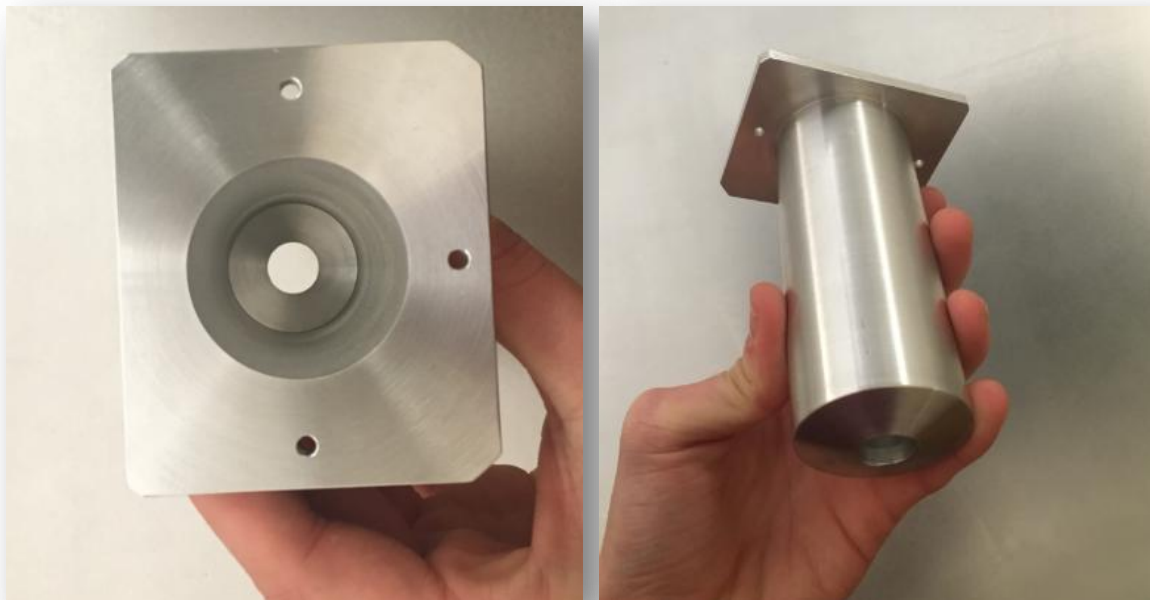


Figura 4.2. Cilindre.

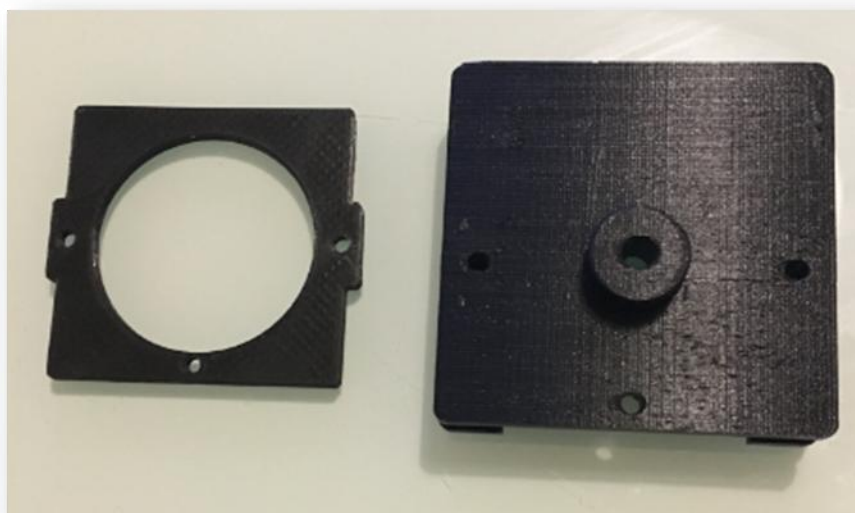


Figura 4.3. Adaptadors de la impressora i de l'aire comprimit al cilindre.

4.3. Bossa i punta extrusora

Com s'ha comentat en l'apartat de disseny conceptual, la bossa havia de complir unes especificacions determinades quant a mides i material. Per això, aquesta es va demanar a una empresa especialitzada en aquest tipus d'envasats, *Instant Proces S.L.*, que va permetre aconseguir el prototip de bossa desitjat.



Figura 4.4. Bossa.

Com s'observa en la figura anterior, la bossa disposa d'una sortida amb un tap roscat, que és de mètrica 12 i 1,75 mm de pas. En el moment d'imprimir, aquest es canviarà per la punta extrusora, que adaptarà el diàmetre de la sortida al diàmetre necessari per imprimir. En les següents figures es poden veure la punta extrusora amb el roscat interior que coincideix amb el del tap i aquesta collada a la sortida de la bossa.



Figura 4.6. Punta extrusora.



Figura 4.5. Punta extrusora collada a la sortida de la bossa.

4.4. Sistema de control de temperatura

Seguint el model explicat en l'apartat 3.2.4., el fabricant donava dues opcions de resistències: un cable calefactor de 4 mm de diàmetre, d'un metre de longitud i de 30 W/m de potència dissipada (30 W), entesa com la potència dissipada per efecte Joule, o un altre també de 4 mm de diàmetre, de dos metres de longitud i de 45 W/m de potència dissipada (90 W). Tot i que al llarg del treball s'anomenen les resistències per la seva potència dissipada per comoditat, els valors d'aquestes en el Sistema Internacional són:

- Resistència de 30 W de potència dissipada:

$$P = \frac{V^2}{R};$$

$$R = \frac{V^2}{P} = \frac{230^2}{30} = 1763,33 \Omega$$

- Resistència de 90 W de potència dissipada:

$$R = \frac{V^2}{P} = \frac{230^2}{90} = 587,78 \Omega$$

Es va decidir adquirir la primera per qüestió de costos, però com es veurà en l'apartat de proves i resultats, aquests no van ser els desitjats i també es va haver de demanar l'altra. Per tenir una idea de la distribució de temperatures del sistema, en els annexos es pot trobar l'anàlisi de la transferència de calor utilitzant la segona resistència esmentada (90 W). En la següent figura es mostra el sistema de connexions entre els diferents elements del sistema:

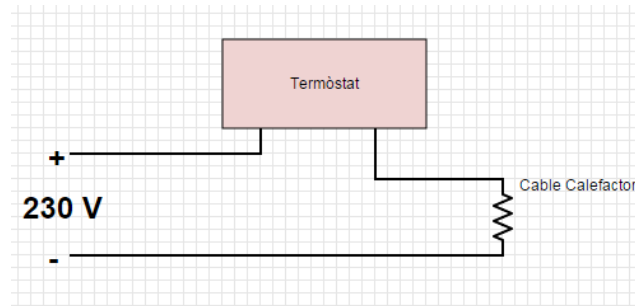


Figura 4.7. Esquema del sistema de control de temperatura.

En la següent figura, es pot veure el primer muntatge amb la resistència de 30 W de potència dissipada com es va enrotllar de forma que les dues sortides d'aquesta quedessin a la part superior, i així fer les connexions amb facilitat. Finalment, com s'ha comentat, la potència d'aquesta va resultar insuficient per a temperar la xocolata com es veurà més endavant.



Figura 4.8. Cilindre enrotllat amb la resistència de 30 W de potència dissipada.

Seguidament, es va enrotllar el cilindre i la resistència amb escuma elastomèrica autoadhesiva, que permetia evitar les pèrdues calorífiques cap a l'exterior, a més de fixar els elements del circuit.



Figura 4.9. Cilindre amb el sistema de control de temperatura

4.5. Assemblatge del sistema extrusor

Finalment, un cop muntades les parts per separat, es va fer l'assemblatge de tot el conjunt mitjançant tubs de conducció d'aire comprimit. El sistema ja estava preparat per fer les proves.



Figura 4.10. Assemblatge del sistema extrusor.

5. PROVES I RESULTATS

5.1. Problemàtica en l'adaptació del cilindre a la impressora

Des del principi va existir l'inconvenient que la impressora on s'havien de fer les proves estava al Laboratori Tecnològic d'Investigació Culinària, al recinte del campus d'alimentació de Torribera de Santa Coloma de Gramenet. El fet de no tenir vehicle propi i de tenir un horari que limitava la possibilitat d'anar-hi, a més de tenir les vacances de Nadal entre mig durant les quals el recinte estava tancat, va provocar que només es pogués anar en el moment de fer les proves, un cop ja es disposava de tot el sistema extrusor, i sense tenir la possibilitat d'anar-hi abans per prendre mides.

Com ja s'ha comentat, les mides del cilindre es van decidir basant-se en la xeringa del *Paste Extruder* per evitar cap tipus de problema a l'hora d'adaptar-lo a la impressora, però per limitacions del torn on s'havien portat a mecanitzar es van haver de canviar, obviant que augmentar lleugerament el diàmetre exterior del cilindre no suposaria cap problema en l'adaptació a la impressora. No obstant, la sorpresa va ser que en anar a fer les proves, el cilindre no encaixava bé entre les dues barres longitudinals. Això va provocar que es prengués la decisió de fer unes primeres proves en estàtic, és a dir, sense utilitzar la impressora, per veure els possibles defectes que tenia el sistema, tractar de millorar-los i posteriorment pensar alguna forma de muntar el capçal a la impressora.

5.2. Proves i resultats en estàtic

5.2.1. Primera prova

Inicialment, es va partir del muntatge inicial explicat en l'apartat anterior. Abans de començar, hi havia una situació d'incertesa envers a diversos aspectes: en primer lloc, tenint en compte que el sistema de pressió era d'aire comprimit, s'havia d'aconseguir segellar el cilindre el màxim possible per evitar possibles fugues d'aire i un dels punts crítics era la sortida inferior del cilindre, per on sortia la punta extrusora. Per començar, prèviament es va decidir rosar la punta extrusora amb la bossa i introduir-les a l'interior del cilindre a posteriori. Un altre dubte existent era on col·locar la sonda: a l'interior del cilindre, per tal de tenir un major control sobre quina era la temperatura interior o enrotllada a la resistència

exterior, la qual cosa facilitava el muntatge, ja que per introduir la sonda a l'interior s'havia de fer sortir el cable que unia la sonda amb el termòstat per la part superior del cilindre, amb la possibilitat que això comportava de provocar pèrdues de pressió en la pressurització del cilindre. Per altra banda, calia comprovar si la resistència de 30 W de potència dissipada seria suficient per escalfar la xocolata als 50 °C inicials i quan de temps trigaria en fer-ho.



Figura 5.1. Cilindre amb el sistema de control de temperatura.

Es va decidir fer les proves amb xocolata amb llet (32% de cacau) en pols, que havia donat bons resultats en proves anteriors d'impressió 3D de xocolata i que es recullen en un informe que se'm va facilitar i que es pot veure en l'annex: Informe de les jornades d'impressió a Torribera. En aquesta prova es va decidir treballar amb xocolata en pols.



Figura 5.2. Bossa amb xocolata en pols.

A continuació, es va procedir a encendre la resistència fixant el termòstat a 70 °C i es va deixar escalfar durant uns 30 minuts aproximadament. Es va extreure i es va comprovar l'aspecte de la xocolata. Com s'observa en la figura, aquest no era el desitjat, ja que a 50 °C la xocolata hauria d'estar completament fosa. En comprovar-se la temperatura, però, aquesta era d'uns 30 °C aproximadament.



Figura 5.3. Aspecte de la xocolata.

Finalment, es va provar de pressuritzar el cilindre a fi de determinar quines eren les zones on hi havia pèrdua de pressió. Aquestes eren, com era de preveure, el joc de la punta extrusora amb el cilindre i la part superior entre l'adaptador d'aire i aquest.

Per tant, quedaven diversos aspectes a millorar en la següent prova: en primer lloc, calia canviar de resistència, ja que aquesta no tenia prou potència per escalfar la xocolata correctament. D'altra banda, era necessari prendre accions per tal de minimitzar les pèrdues de pressió en els dos punts conflictius esmentats.

5.2.2. Segona prova

En la segona prova es van intentar solucionar els problemes que s'havien tingut en la prova inicial. En aquesta ja es disposava de la resistència de 90 W de potència dissipada i es va decidir enrotllar-la també per la part inferior, donat que es tenia més cable.

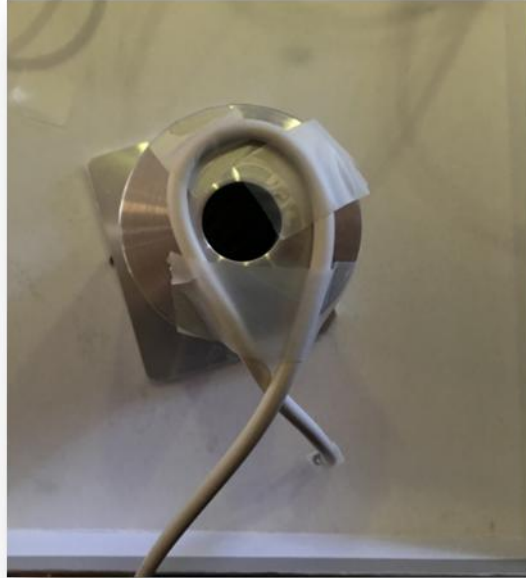


Figura 5.4. Resistència enrotllada per la part inferior.

Seguidament, es va acabar d'enrotllar i es va recobrir amb l'aïllant tèrmic. Per tal de segellar la part inferior, es va aprofitar l'aïllant per enganxar-lo amb la punta extrusora. D'aquesta forma, la bossa s'havia d'introduir per la part superior i rosca amb la rosca que estava fixa.



Figura 5.5. Muntatge del capçal amb la resistència de 90 W de potència dissipada.

El primer objectiu era saber com es comportava la xocolata amb la nova resistència. Per fer-ho, en aquesta prova es va aconseguir un termòmetre digital, el qual permetria tenir un major coneixement sobre l'eficiència del control de temperatura.



Figura 5.6. Termòmetre digital.

En aquest cas, es va prendre la decisió de provar de posar la sonda a l'interior del cilindre, però va ser un error. La resistència es va sobreescalfar a conseqüència de què la sonda guanyava temperatura poc a poc perquè es trobava a l'interior del cilindre i això va provocar que es cremés l'escuma aïllant, que tenia un límit de temperatura màxim de 80 °C. Quedava clar, doncs, que l'única opció era col·locar la sonda a l'exterior enrotllada amb la resistència.



Figura 5.7. Efecte de la sonda a l'interior del cilindre.

Pel que fa a les pèrdues de pressió, va aparèixer un nou problema: l'aire es perdia majoritàriament entre la rosca de la bossa i la punta extrusora. Això era perquè la rosca de la punta no coincidia exactament amb la de la bossa, causant la sortida d'aire del cilindre.

En aquesta segona prova, per tant, quedava patent que la sonda havia d'anar necessàriament fora i que el material aïllant era sensible a altes temperatures. Malauradament no es va poder fer l'estudi de temperatures de la xocolata per culpa del problema amb l'aïllant.

5.2.3. Tercera prova

El tercer intent va ser el que va donar millors resultats en relació als problemes amb la pressurització del cilindre i al temperat de la xocolata. A partir de les proves anteriors es va veure que hi havia un problema de difícil solució amb la pèrdua de pressió per la sortida del cilindre. Per un costat quedava clar que la idea inicial d'usar una punta extrusora

d'un sol ús era inviable degut a què la punta havia d'estar fixada per segellar les possibles pèrdues en el joc amb el cilindre. A més, la rosca de la bossa no encaixava perfectament amb la de la punta. La idea més senzilla que es podria pensar seria la d'enganxar la punta amb la bossa fixant la punta al cilindre, però no s'ha d'oblidar que l'essència del projecte era aconseguir un sistema amb càpsules d'un sol ús, la qual cosa dificultava encara més trobar una possible solució al problema.

Finalment, es va trobar una alternativa: foradar el tap amb el que anava la bossa, la rosca dels quals coincidia perfectament, i enganxar-lo a la punta. Això permetria roscar la sortida de la bossa amb el tap en el moment de començar la impressió, i desenroscar-la en acabar.



Figura 5.8. Tap foradat amb la punta extrusora.

A continuació, es va situar la punta amb el tap a la sortida del cilindre, quedant fixats a pressió. Per evitar possibles pèrdues per les ranures laterals del tap i subjectar-los completament, es va posar massilla segellant.



Figura 5.9. Punta extrusora fixada amb massilla segellant.

Un cop solucionat el problema de les pèrdues per la sortida del cilindre, es va procedir tornar a enrotllar la resistència. En aquest cas, per tal d'evitar cremar l'escuma aïllant com s'havia produït en la prova anterior, es va pensar d'envoltar la resistència amb fibra de vidre, la qual eliminaria qualsevol possibilitat de cremar l'escuma elastomèrica, que s'enrotllaria a sobre de la fibra de vidre. A més, tractant-se d'un molt bon aïllant tèrmic, es reduirien encara més les pèrdues de calor pels laterals del cilindre.



Figura 5.10. Muntatge del capçal.

El següent problema que es va afrontar va ser el de evitar les pèrdues de pressió per la part superior del cilindre, com s'havia fet abans amb la sortida d'aquest. Per fer-ho, es va tallar un tros d'escuma i es va adaptar a la part superior del cilindre.

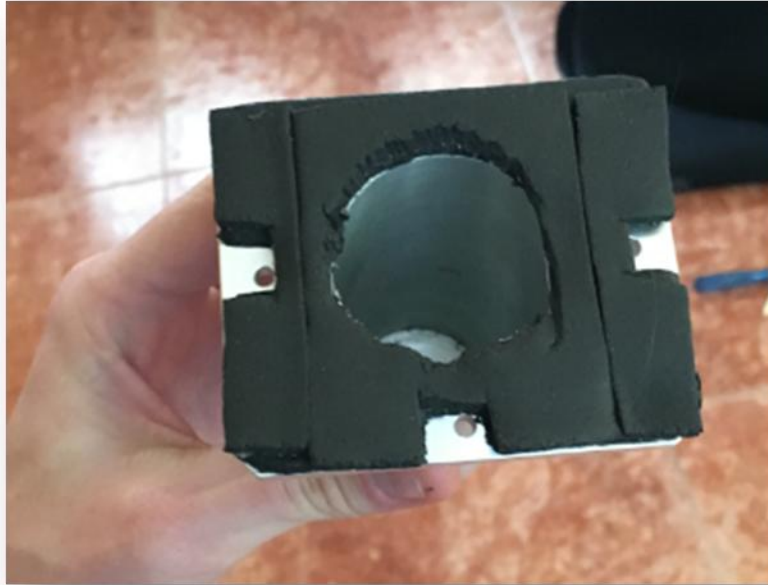


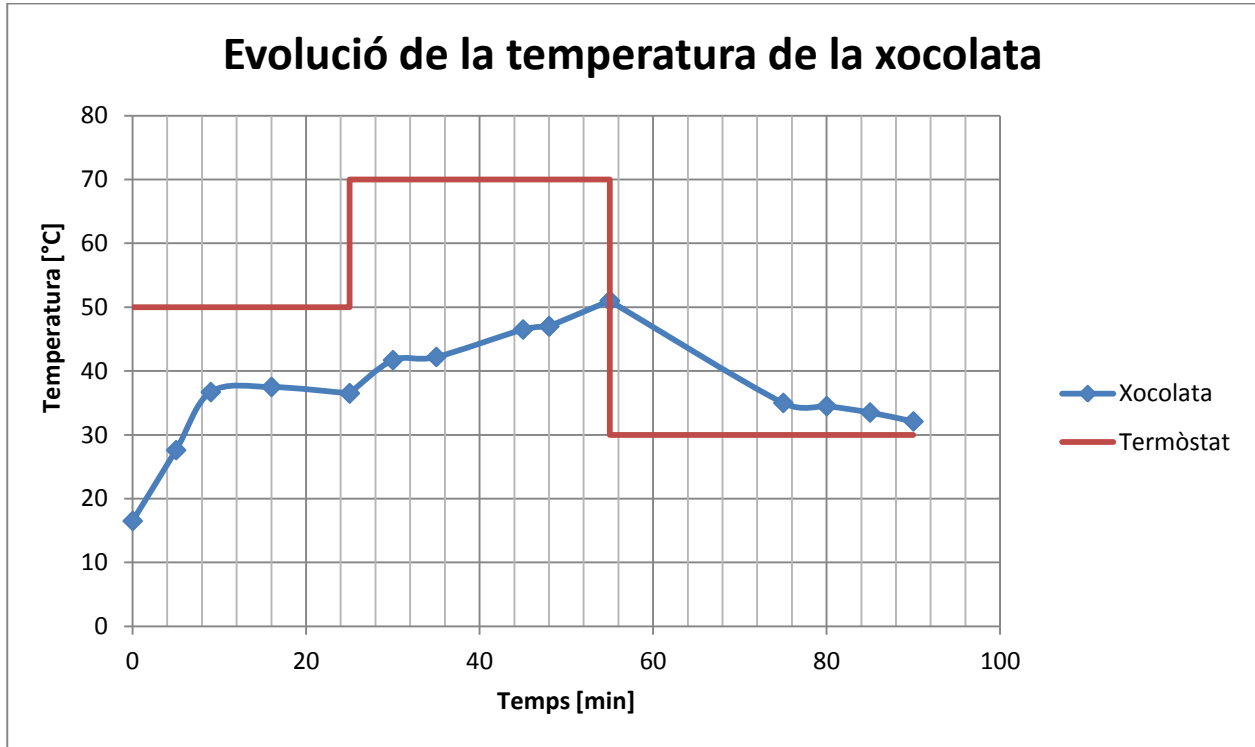
Figura 5.11. Escuma adaptada a la part superior del cilindre.

Seguidament, es va provar de donar pressió al cilindre tapant la sortida, però les fugues seguien apareixent i es va arribar a la conclusió que l'única solució al problema era modificar l'adaptador d'aire comprimit i fer diversos forats més per posar-hi més cargols de la forma que es pot veure en la següent figura. D'aquesta forma es van aconseguir evitar les pèrdues de pressió per l'extrem superior del cilindre.



Figura 5.12. Nou adaptador d'aire comprimit.

Finalment, es va posar la bossa a l'interior i es va rosçar amb la punta per començar-la a escalfar. Es va partir de la mateixa xocolata de la primera prova. En el següent gràfic es poden veure els resultats obtinguts a partir de les diverses mesures que es van prendre.



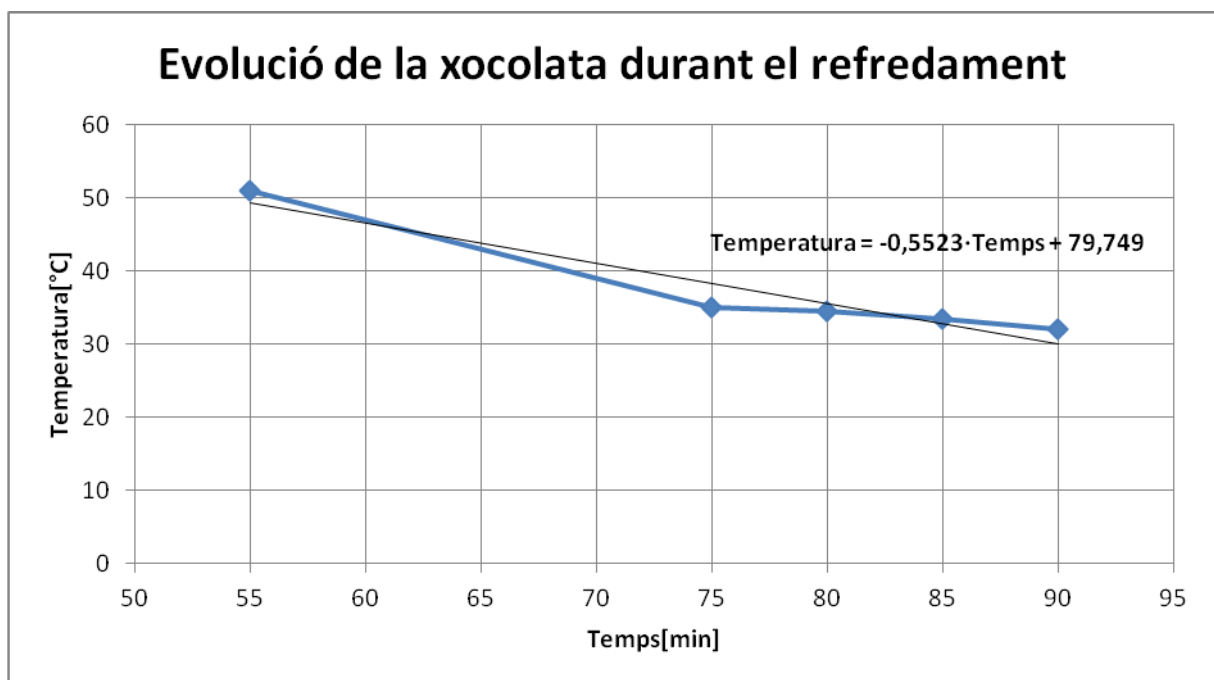
Gràfic 5.1. Evolució de la temperatura de la xocolata

Seguint el model de temperat de l'apartat 2.3.1., el primer pas era fondre totalment la xocolata a 50 °C. Tot i que tenint en compte els càlculs teòrics realitzats, que es poden trobar en l'annex B, es donava per suposat que fixant una temperatura de 50 °C al termòstat no s'arribaria a aquesta temperatura a la xocolata, en aquesta primera prova es va decidir provar com evolucionava la temperatura en aquest cas. Com s'observa, s'arriba fins a una temperatura d'entre 35 i 40 °C, per la qual cosa es va decidir augmentar la temperatura del termòstat a 70 °C per tal d'assegurar la fusió total de la xocolata.

Els resultats obtinguts, però, són bastant diferents als calculats teòricament, dels quals se'n va extreure que per obtenir 50 °C a la xocolata, la temperatura que s'havia de fixar al termòstat havia de ser aproximadament 90 °C. Cal tenir en compte, però, que es va considerar que la bossa no està en contacte amb el cilindre i que tota la calor que rep prové

de l'aire que es troba a l'interior d'aquest per convecció, la qual cosa no és certa, donat que en algunes zones també existeix transferència de calor per conducció pel contacte entre la bossa i el cilindre, implicant això una transferència més eficient.

Aquesta prova no serveix per establir un relació sobre quant de temps és necessari per arribar a la temperatura de 50 °C, ja que amb aquesta temperatura al termòstat no s'hi pot arribar. No obstant, sí que es pot analitzar el temps que tarda a refredar-se. En el següent gràfic es mostra l'evolució de la xocolata durant el refredament:



Gràfic 5.2. Evolució de la temperatura de la xocolata durant el refredament.

A partir de l'equació de la recta podem obtenir el temps necessari per refredar-se fins a la temperatura de 30 °C.

$$Temperatura = -0,5523 \cdot Temps + 79,749;$$

$$32 = -0,5523 \cdot Temps + 79,749;$$

$$Temps = 86,45 \text{ minuts}$$

$$\text{Temps de refredament} = 86,45 - 55 = 31,45 \text{ minuts}$$

D'aquesta forma, establint una temperatura al termòstat de 30 °C per al refredament, es tardarien aproximadament 32 minuts per aconseguir tenir la xocolata a la temperatura

desitjada. Cal tenir en compte, que per fer el temperat perfecte s'hauria d'arribar primer a 27 °C i després pujar a 32 °C, la qual cosa no es va fer per falta de temps.

No obstant, tot i dur a terme aparentment un temperat prou correcte, els resultats no van ser bons. La xocolata en pols, al no ser remoguda, no agafava la textura adequada, i al donar-hi pressió (uns 4 bars aproximadament), es va extrudir de la forma que es veu a la figura.



Figura 5.13. Resultat de la tercera prova.

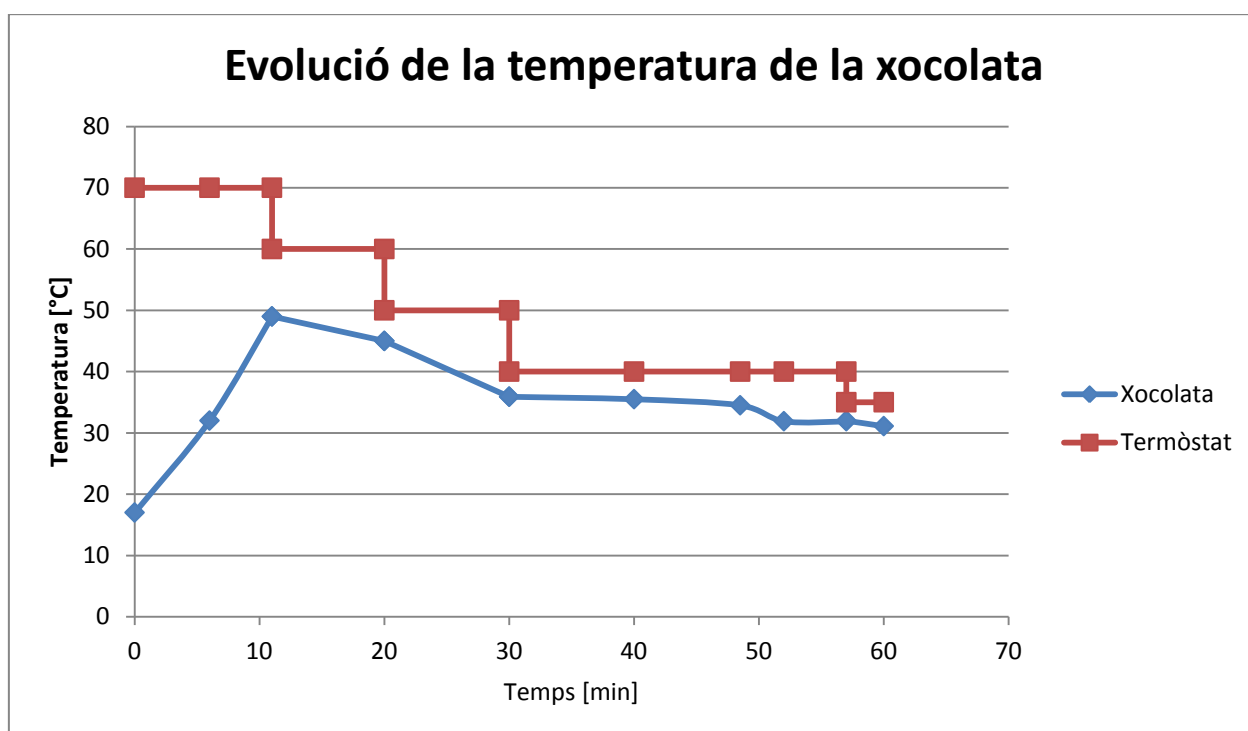
En conclusió, s'havien resolt la majoria de problemes tècnics que havien aparegut durant les diverses proves, però en aquesta apareixia un nou problema: la xocolata. Sembla que la xocolata en estat pols no acaba d'agafar la textura viscosa que interessa per extrudir i aconseguir els resultats òptims.

5.2.4. Quarta prova

En la quarta i última prova en estàtic, l'únic canvi que es va realitzar va ser el de canviar de xocolata i l'estat inicial d'aquesta dintre de la bossa, donat que els resultats amb xocolata en pols no havien estat bons. En aquest cas, i seguint les recomanacions de l'informe esmentat anteriorment, es va utilitzar xocolata de rajola amb una composició del 50 % de cacau. Aquesta es va trossejar sense arribar a ser pols i es va introduir a la bossa.

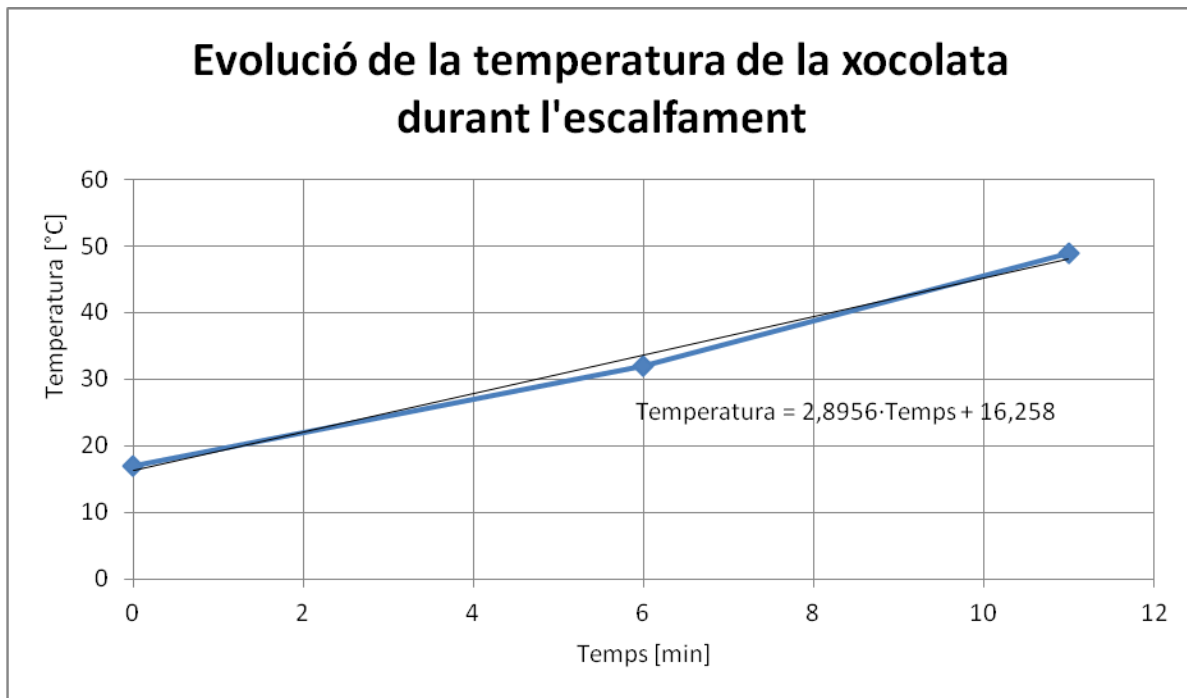
D'altra banda, a l'inici es va triturar la xocolata però aquest cop es va deixar en trossos petits, sense arribar a ser pols.

En el següent gràfic s'observen els resultats d'aquesta prova.



Gràfic 5.3. Evolució de la temperatura de la xocolata.

En aquest cas es va començar fixant la temperatura del termòstat a 70 °C i, a diferència de la prova anterior, la xocolata va arribar a la temperatura de 50 °C sense cap problema. Analitzant més en detall la fase d'escalfament durant els primers minuts, que va ser quan es va arribar a la temperatura desitjada, s'obté el gràfic següent:



Gràfic 5.4. Evolució de la temperatura de la xocolata durant l'escalfament abans d'arribar a l'estat estacionari.

En aquest cas, a partir de l'equació de la recta obtenim:

$$\text{Temperatura} = 2,8956 \cdot \text{Temps} + 16,258;$$

$$50 = 2,8956 \cdot \text{Temps} + 16,258;$$

$$\mathbf{\text{Temps} = 11,65 \text{ min}}$$

Es pot afirmar, per tant, que el temps necessari per arribar a 50 °C amb una temperatura fixada al termòstat de 70°C, és d'aproximadament 11 minuts i mig. Podria pensar-se que pot dependre del tipus de xocolata, però la calor específica entre els diversos tipus és poc variable, la qual cosa permet tenir certa seguretat en què aquest valor sigui extrapolable en la majoria de composicions.

Durant el procés de temperat, es va observar com la xocolata adquiria una textura viscosa que semblava òptima sense haver de remenar-la en cap moment, la qual cosa feia predir que es podria dur a terme l'extrusió.



Figura 5.14. Textura de la xocolata a 50 °C.

Abans de donar pressió al cilindre es va tancar la part superior de la bossa. Seguidament, es va procedir a la extrusió i els resultats van ser satisfactoris. Es va iniciar l'extrusió amb una pressió de 1 bar i es va anar pujant gradualment fins a arribar a 3 bar, tot i que a partir de 2 el flux extrudit era massa ràpid i descontrolat. Per tant, la millor extrusió es va obtenir entre 1 i 2 bar de pressió d'aire comprimit.



Figura 5.15. Extrusió de la xocolata.

D'altra banda, cal destacar que durant l'escalfament de la xocolata no es va tancar la punta per evitar el possible degoteig per gravetat degut a l'estat fos en què es trobava, però tot i així, no n'hi va haver, resolent així un altre dels objectius del projecte: evitar el degoteig. Per tant, de les dues opcions possibles per controlar el sistema de pressurització explicades en l'apartat 3.2.2, l'opció 1 era suficient per despressuritzar el cilindre i evitar així la caiguda de xocolata en els moments en els quals no s'estava imprimint.

5.2.5. Conclusions parcials

A partir d'aquestes proves es van poder extreure diverses conclusions que van servir per solucionar problemes del sistema i reduir el temps en les proves amb la impressora que es presenten en el següent apartat. Aquestes són:

- La resistència inicial de 30 W de potència dissipada va resultar insuficient per escalfar la xocolata, fet que va comportar haver d'adquirir-ne una altra de 90 W, amb la qual els resultats van ser satisfactoris.
- La sonda del termòstat s'ha de col·locar necessàriament a l'exterior del cilindre

enrotllada amb la resistència, ja que si no està en contacte amb aquesta pot provocar-li un sobreescalfament.

- L'ús d'un sistema de pressió basat en aire comprimit implica tenir un segellament total en tot el cilindre. Per això, va ser necessari prendre diverses mesures en els dos extrems del cilindre per tal de solucionar aquest problema.
- L'escuma elastomèrica es va haver de reforçar amb fibra de vidre per la part interior, ja que d'aquesta forma es pot treballar amb temperatures majors.
- La xocolata amb llet (32% de cacau) no es va fondre correctament a diferència de la xocolata negra de rajola (50% de cacau). La raó és deguda al major percentatge de mantega de cacau, que dona major fluïdesa a la xocolata.

5.3. Proves i resultats amb la impressora BCN3D+

5.3.1. Funcionament de la impressora BCN3D+

La impressora BCN3D+ funciona amb 4 eixos de funcionament: eix X, eix Y, eix Z i l'eix de l'extrusor (E). Els eixos X i Y són els que es combinen per donar la forma a la capa corresponent de la peça que s'està imprimint, mentre que l'eix Z és el que li dona l'altura. L'eix E aporta el material amb què es fabrica la peça i es controla segons l'extrusor amb el que s'està treballant:

- En el cas de la figura, en la tecnologia FDM es controla mitjançant un motor pas a pas.
- En el *Paste Extruder*, també es controla amb un motor pas a pas que fa moure un èmbol.
- En el cas de l'extrusor d'aquest projecte el control es fa mitjançant aire a pressió.

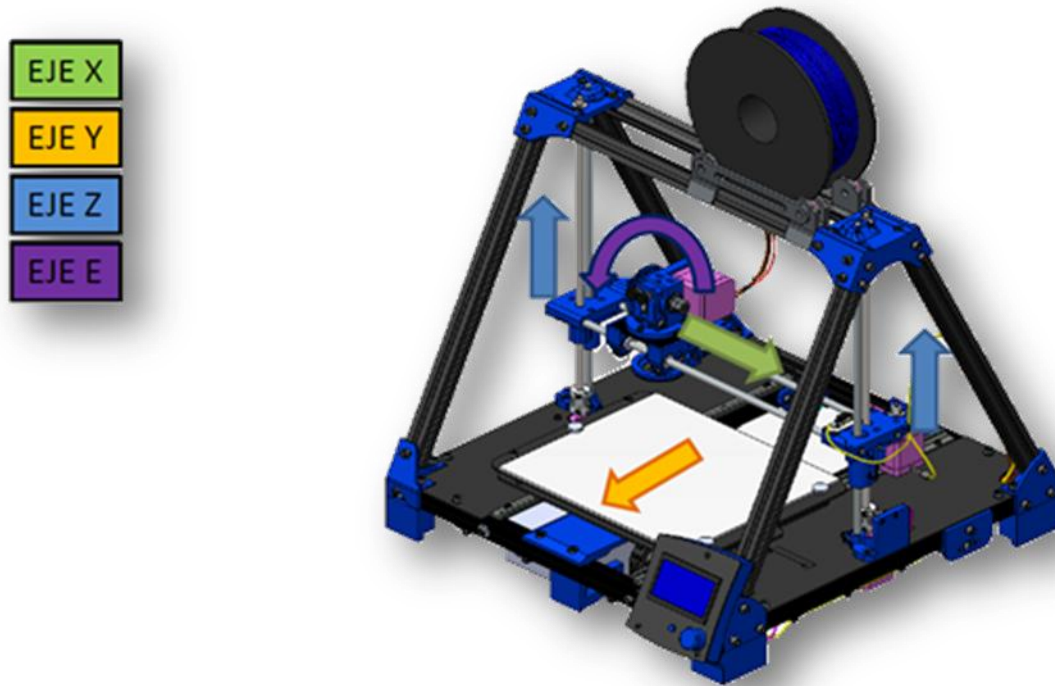


Figura 5.16. Funcionament de la impressora BCN3D+.

5.3.2. Peces per a adaptar el capçal a la impressora

Com s'ha explicat anteriorment, el problema que es va tenir en el moment d'acoblar el capçal a la impressora va ser que el diàmetre del cilindre era superior a la distància entre les dues barres longitudinals de la impressora, fent impossible la incorporació del capçal a la impressora.

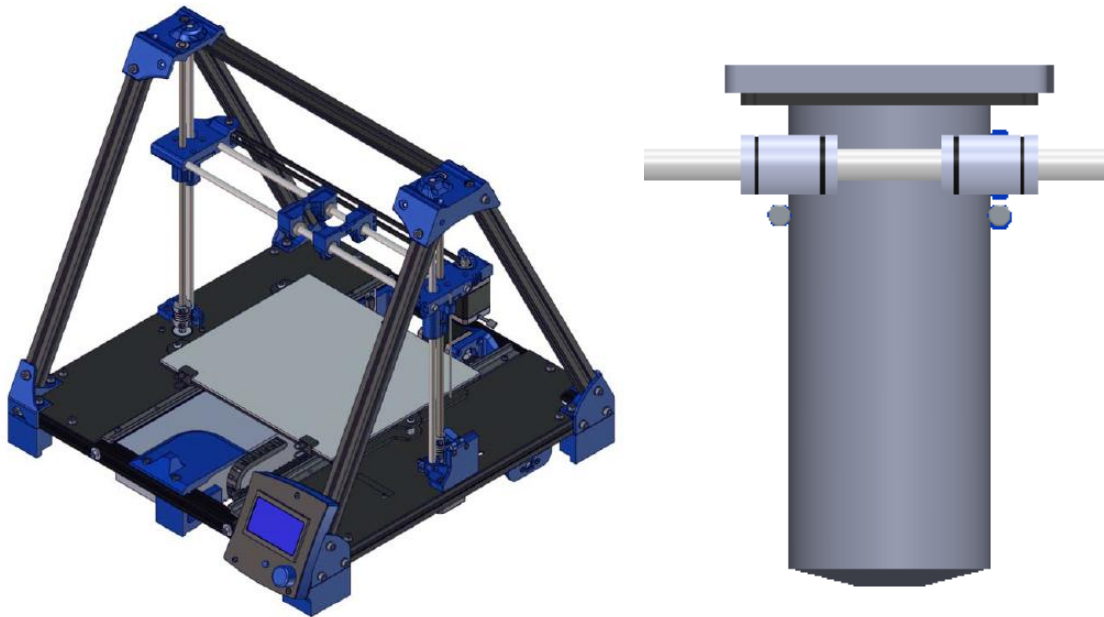


Figura 5.17. Ubicació inicial del cilindre en la impressora BCN3D+.

Per tal de solucionar aquesta problemàtica, s'havia de dissenyar alguna peça que permetés implementar el sistema sense modificar l'origen de coordenades en X i Y, tenint en compte que amb la impressora es pot calibrar l'eix Z amb facilitat, per la qual cosa es va decidir que el capçal es situaria a sota d'on hauria d'haver estat situat inicialment, variant només l'altura inicial de la punta que es calibraria en el moment d'iniciar la impressió. Un altre aspecte important a tenir en compte en el disseny de la peça era que s'havien d'ajustar en la mesura del possible les seves dimensions per tal de reduir al mínim que es pugui l'altura d'impressió a la impressora.

En les següents figures es pot veure la peça que es va dissenyar, la qual es va imprimir dues vegades, i la ubicació final del cilindre en la impressora utilitzant aquestes dues peces.

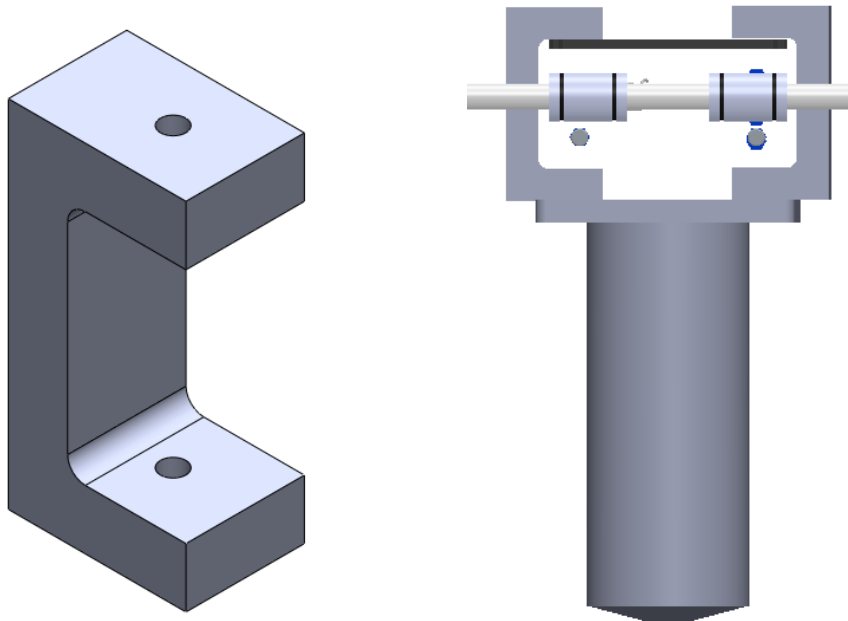


Figura 5.18. Peça per adaptar el capçal a la impressora i ubicació final del cilindre.

Un cop ja es disposava de les peces es va procedir a muntar el capçal a la impressora. Com es veu, les mides de les peces dissenyades eren les adequades i l'altura d'impressió encara era considerable.

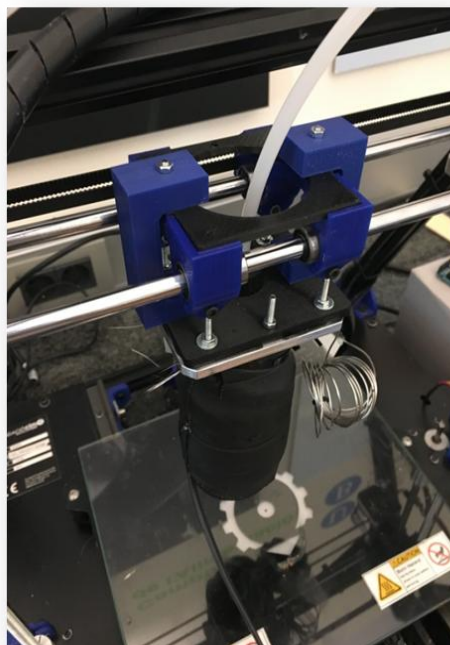


Figura 5.19. Capçal muntat a la impressora.



Figura 5.20. Sistema extrusor muntat a la impressora.

5.3.3. Primera prova

En la primera prova es va tornar a utilitzar **xocolata amb llet** (32% de cacau) per veure si es seguien obtenint mals resultats com en una de les proves anteriors. Tenint en compte que en la prova precedent es va utilitzar xocolata en pols i no es va aconseguir una extrusió òptima, en aquest cas es va provar amb xocolata en trossets petits.

5.3.3.1. Anàlisi de temperatures

El següent pas a tenir el sistema muntat va ser fer un nou estudi de temperatures per tal de ratificar i optimitzar els resultats obtinguts en les proves anteriors. En aquest cas, es disposava d'un element més exacte per tal de fer les mesures: un termòmetre amb sonda de contacte.

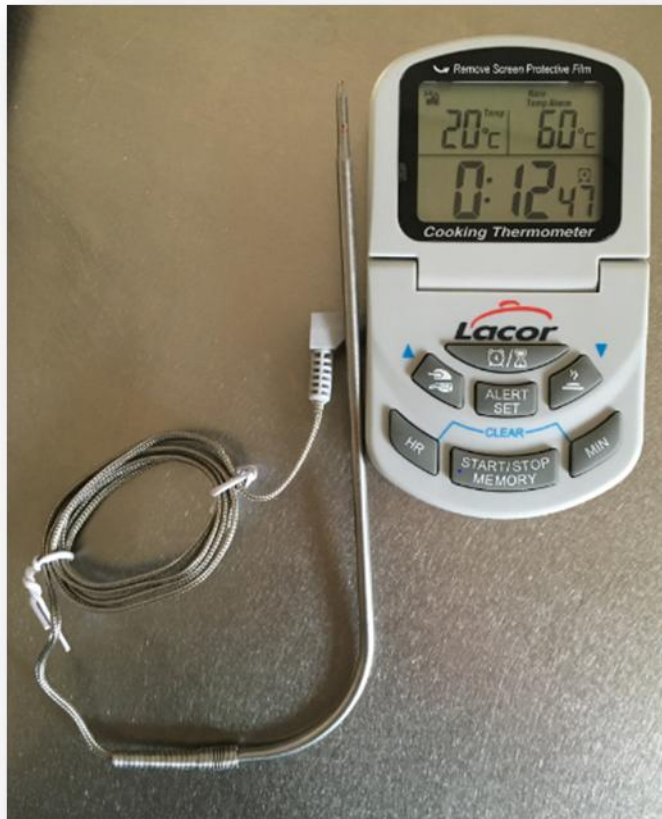
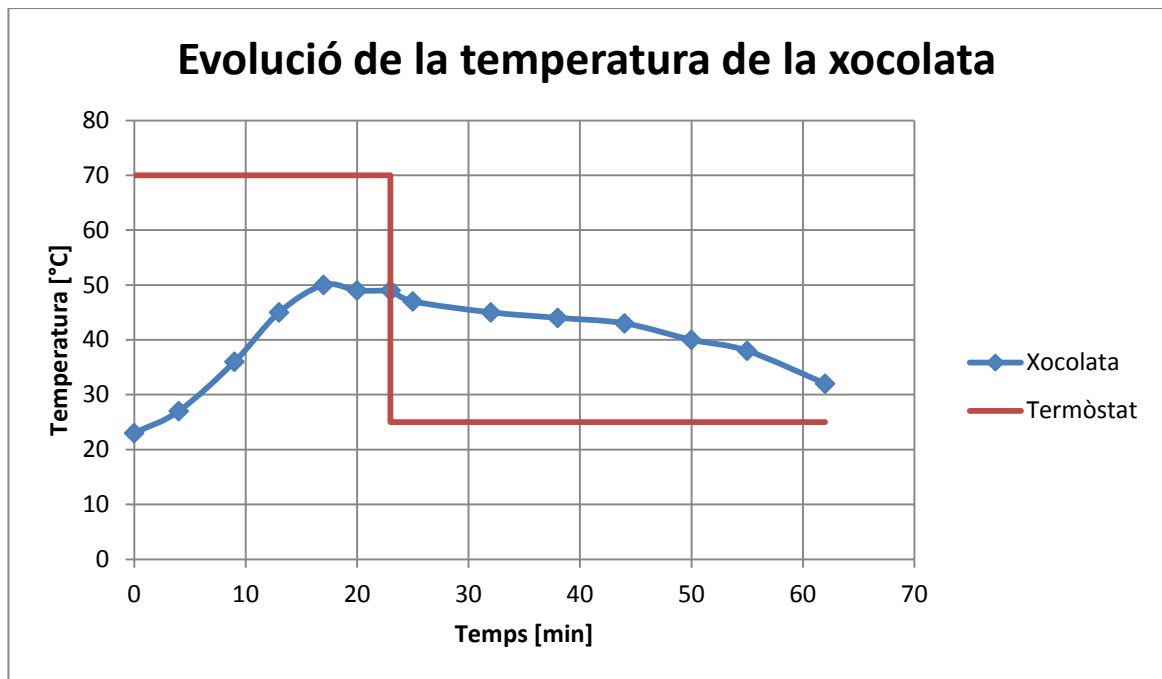


Figura 5.21. Termòmetre amb sonda de contacte.

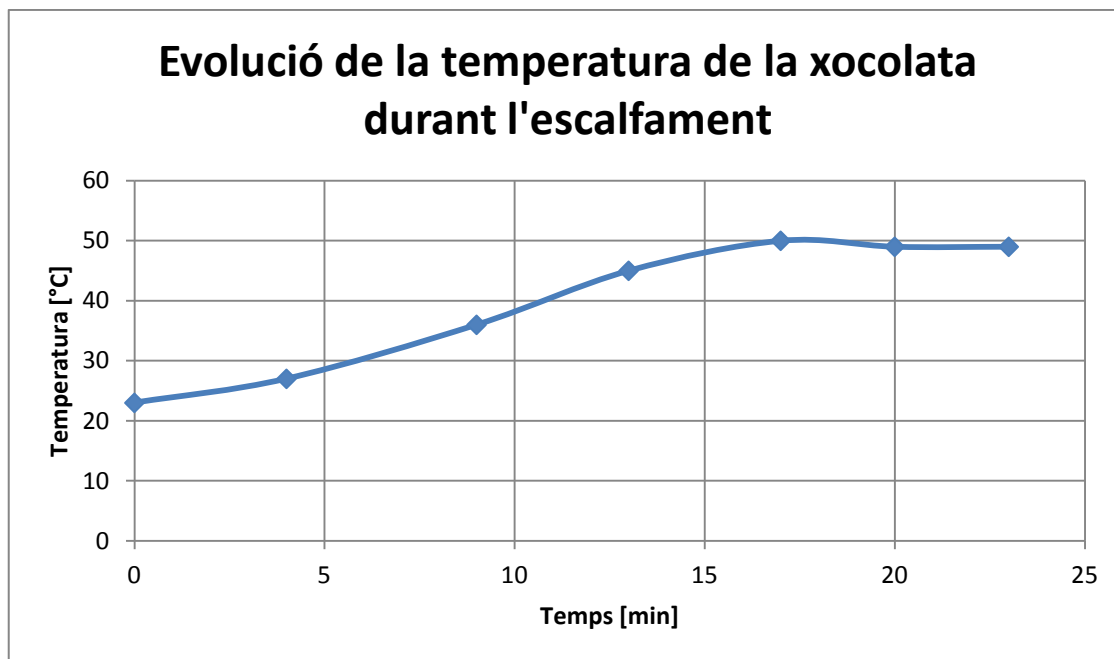
Amb l'objectiu d'extreure conclusions més clares, en aquestes proves es va decidir fixar el termòstat a dos valors, un per l'escalfament i un pel refredament. En la primera part del procés es va fixar el termòstat a 70 °C, donat que se sabia que era una temperatura que permetia arribar a la desitjada de 50 °C amb facilitat. Seguidament, es va establir la temperatura del termòstat a 25 °C per veure quant temps tardava a refredar-se fins a la temperatura desitjada. En el gràfic que es presenta a continuació es pot veure l'evolució de la temperatura de la xocolata durant tot el procés.



Gràfic 5.5. Evolució de la temperatura de la xocolata.

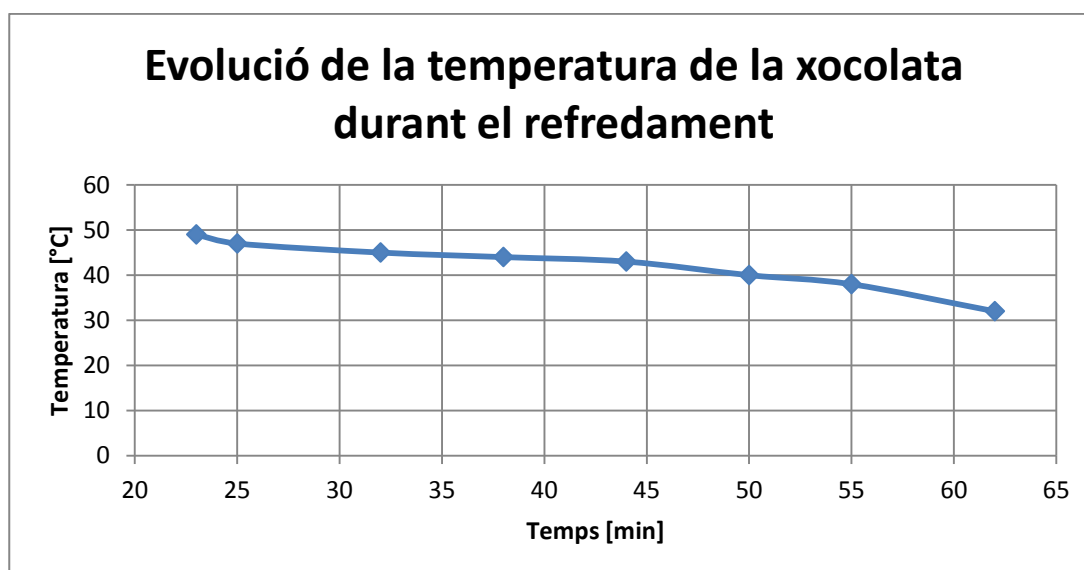
Pel que fa a l'evolució de la temperatura durant l'escalfament, a conseqüència de què la xocolata estava a trossos a l'interior de la bossa no va ser suficient arribar a 50 °C, sinó que es va haver de mantenir durant uns minuts a aquesta temperatura per a què es fongués totalment, la qual cosa es va aconseguir sense haver de tocar el termòstat. Cal tenir en compte que la temperatura de la xocolata no ha de superar els 50 °C, ja que sinó es podria cremar.

Com s'observa en el gràfic, el temps necessari per a fondre tota la xocolata va ser de **23 minuts** aproximadament.



Gràfic 5.6. Evolució de la temperatura de la xocolata durant l'escalfament.

D'altra banda, el refredament va ser el que va costar més temps. A diferència del que s'havia calculat amb el termòmetre làser en una de les proves anteriors (menys de 32 minuts), en aquest cas encara va costar més, arribant fins als **39 minuts**. La diferència s'explica perquè el termòmetre amb sonda mesura la temperatura a la part central de la xocolata, mentre que amb el làser es mesurava la part superficial, que a l'estar en contacte amb l'aire era inferior. D'aquesta forma, s'admet com a més fiable el valor obtingut en aquesta prova.



Gràfic 5.7. Evolució de la temperatura de la xocolata durant el refredament.

5.3.3.2. Impressió

Un cop ja s'havia realitzat el temperat correcte de la xocolata, es va procedir al seu assemblatge per intentar extrudir.

Abans que res, el primer pas va ser calibrar la impressora. Com s'ha explicat anteriorment, aquest pas és necessari pel canvi d'altura de la punta extrusora. Per fer-ho, primer es va anivellar el llit d'impressió, i a continuació, amb l'opció *Auto Home* es va anar ajustant la barra del final de carrera Z fins que es va aconseguir una altura de 0,2 mm entre la punta extrusora i el llit d'impressió.



Figura 5.22. Calibratge de la impressora.

Seguidament, es va connectar el compressor per tal de veure quin flux d'extrusió s'obtenia. En fer-ho, es va poder observar que la punta extrusora de 3,9 mm era massa gran, i a més, regulant la pressió no s'aconseguia un flux constant, probablement perquè la temperatura no era l'adequada, perduda segurament durant el temps de muntatge de l'extrusor.

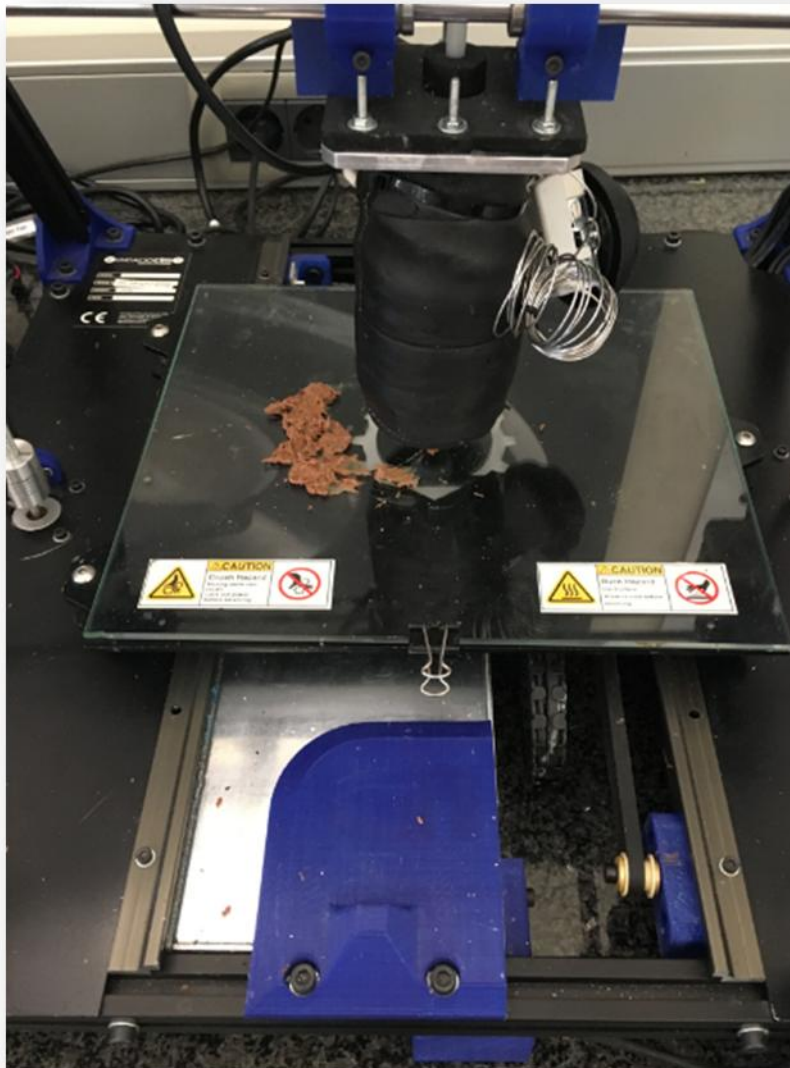


Figura 5.23. Extrusió amb punta de 3,9 mm.

Per tal de contrarestar aquests inconvenients, es va provar d'extrudir amb un adaptador de punta d'1 mm i es va pujar lleugerament la temperatura del termòstat. Es va deixar un espai de temps perquè la temperatura de la xocolata augmentés i es va tornar a provar amb la nova punta.

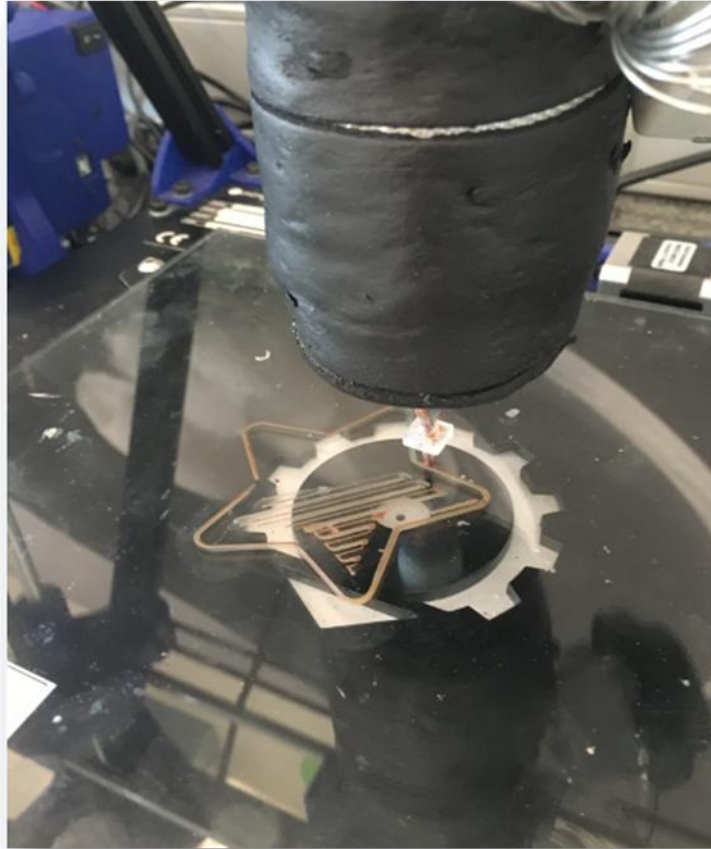


Figura 5.24. Impressió amb punta d'1 mm.

En aquest cas la punta ja era l'adequada, però la temperatura seguia sense ser la correcta. Es va tornar a pujar però no es van obtenir millors resultats.

Com en la prova anterior, la xocolata amb llet no acabava de donar els resultats òptims, probablement a causa del baix percentatge de mantega de cacau (32%), que com es va comentar és el component que li dóna fluïdesa a la xocolata. En el següent intent es provaria d'utilitzar xocolata amb un major percentatge de mantega de cacau.

5.3.4. Segona prova

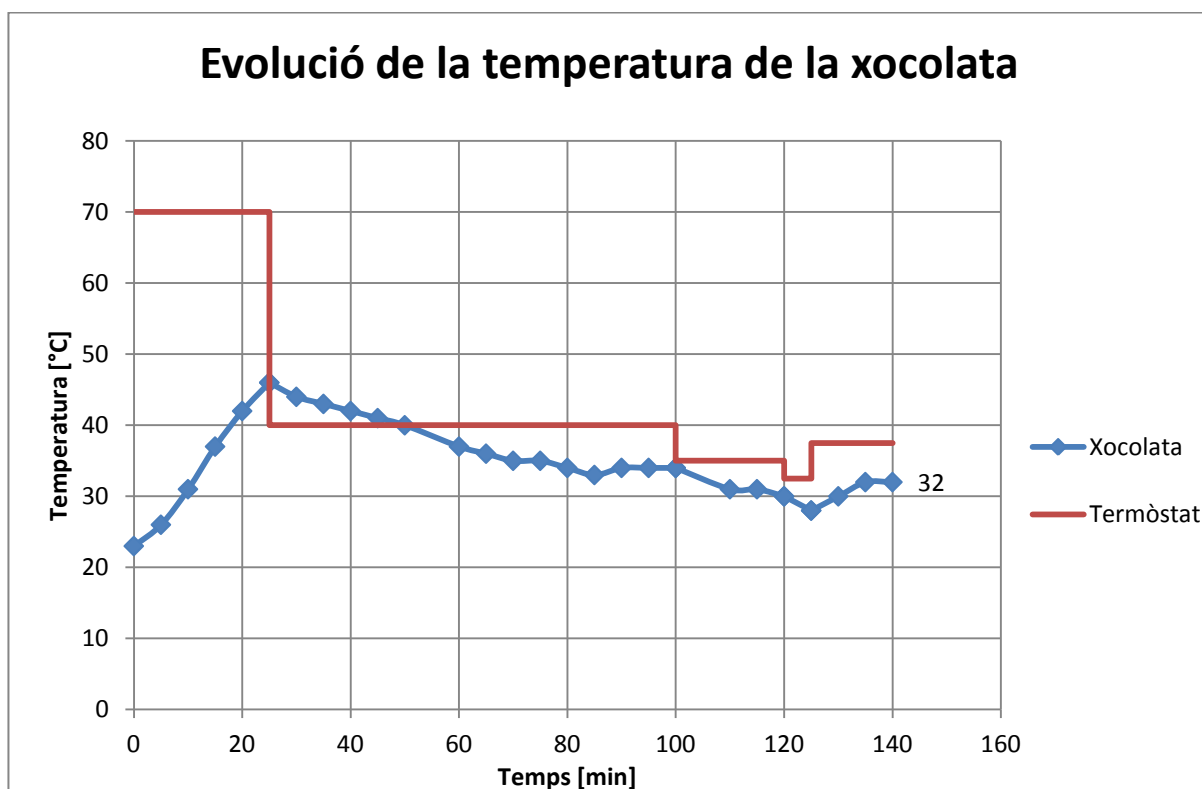
En aquesta segona prova es va utilitzar **xocolata negra de rajola** (50 % de cacau) triturada sense arribar a l'estat pols, amb la qual s'havia aconseguit extrudir en una prova anterior i que contenia un major percentatge de mantega de cacau que la xocolata amb llet.

5.3.4.1. Anàlisi de temperatures

En aquesta experimentació es va prendre la decisió de fer un anàlisi més acurat per veure amb més claredat la relació entre la temperatura del termòstat i la de la xocolata en estat estacionari.

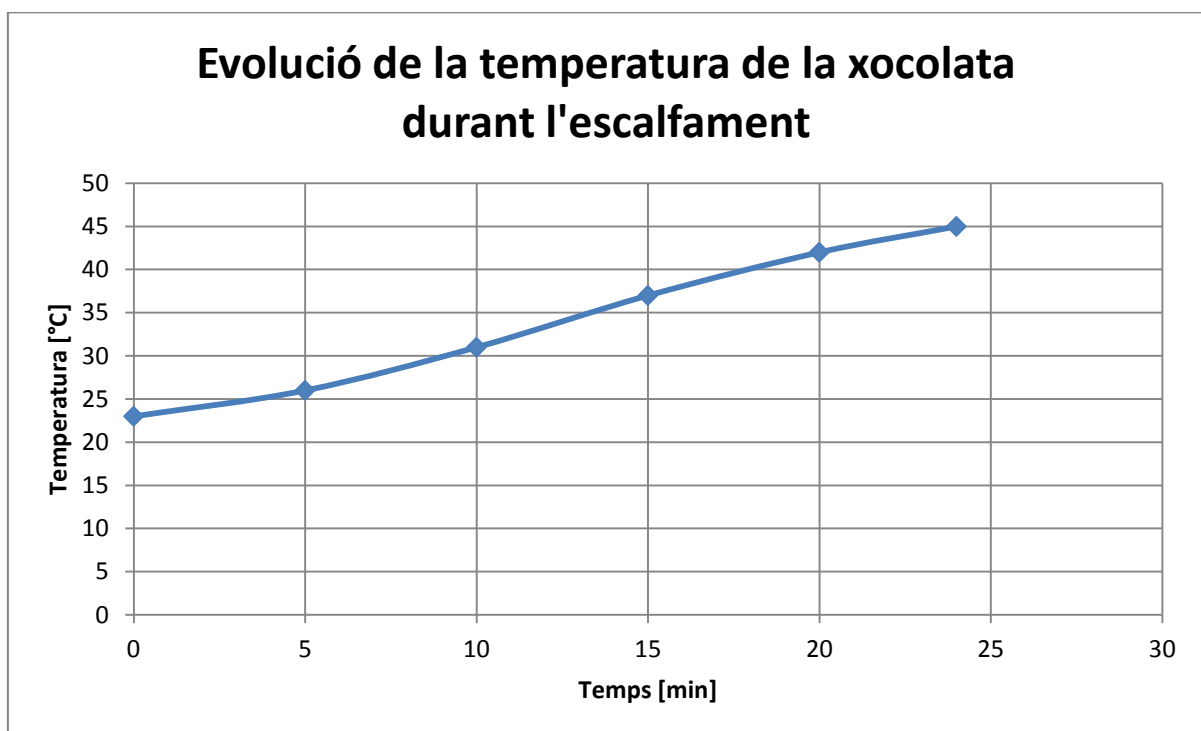
Com s'aprecia en la figura, per aconseguir una temperatura en estat estacionari de 32 °C a la xocolata, s'ha de fixar el termòstat entre 35 i 40 °C. Això té una gran importància, ja que permet poder muntar el capçal amb la tranquil·litat de saber que la temperatura es mantindrà a la que és adequada per a l'extrusió. A més, permet tenir la xocolata a la temperatura de 32 °C durant la impressió.

Cal dir, però, que es tracta d'un termòstat analògic i que té un rang de tolerància de temperatures, per la qual cosa aquestes van variant. Per a aconseguir un major control de les temperatures caldria tenir un termòstat digital.



Gràfic 5.8. Evolució de la temperatura de la xocolata.

Pel que fa a l'escalfament, en aquest cas la xocolata es va fondre amb facilitat, segurament per l'alt percentatge de mantega de cacau, i no va ser necessari arribar als 50 °C. El temps d'escalfament va ser de **24 minuts**, gairebé el mateix que amb l'altra xocolata. El fet de què aquest valor sigui tan diferent de l'obtingut en una de les proves anteriors explicades en la memòria (12 minuts aproximadament) s'explica pel corrent de convecció dels fluids: quan una porció de fluid s'escalfa, disminueix la seva densitat i puja, provocant que les zones amb major temperatura estiguin a la part superior, que és on es mesurava amb el termòmetre làser. Amb el termòmetre amb sonda de contacte, en canvi, es mesura la temperatura central del fluid que costa més temps d'escalfar.



Gràfic 5.9. Evolució de la temperatura de la xocolata durant l'escalfament.

No es va fer l'anàlisi del procés de refredament, ja que es va anar variant la temperatura del termòstat i el temps que es va obtenir no representa un valor real. No obstant, veient que la temperatura d'escalfament es gairebé la mateixa i veient el decreixement de temperatures en el refredament, es dona per suposat que establint un valor de 25 °C al termòstat s'obtidria un temps semblant al del cas anterior.

5.3.4.2. Impressió

A continuació es va tornar a muntar el capçal, es va fixar el termòstat entre 35 i 40 °C com s'havia determinat prèviament i es va tornar a utilitzar l'adaptador de punta d'1 mm. Com es pot veure en la figura, en aquest cas el resultat va ser el desitjat. Amb una pressió d'1 bar aproximadament (semblant a la que s'havia observat en les proves anteriors) es va aconseguir un flux constant i controlat. A més, es van poder fer diverses capes, la qual cosa significa que la temperatura d'extrusió era la correcta.



Figura 5.25. Impressió amb xocolata negra i punta d'1 mm.

Finalment, es va provar d'imprimir amb una punta de 2 mm. En aquest cas, la definició de la peça no era tan bona com en la impressió anterior. A més, com es pot veure en la següent

figura, hi va haver alguna bufada, probablement perquè va entrar aire a la bossa.



Figura 5.26. Impressió amb xocolata negra i punta de 2 mm.

6. ANÀLISI ECONÒMICA

Tot seguit es presenta el pressupost per dur a terme el projecte i la materialització del prototip que consta de les següents parts:

- Avaluació del cost d'enginyeria.
- Avaluació de les llicències i les subscripcions obtingudes.
- Avaluació dels costos del prototip.
- Avaluació i determinació del cost final.

No s'ha fet l'anàlisi del VAN i el TIR, ja que com s'ha comentat a l'abast, aquest projecte no inclou la venda i explotació del prototip.

PRESSUPOST						
CONCEPTE	DEDICACIÓ [h]		PREU [€/h]		COST [€]	
Cost d'enginyeria						
Cerca d'informació	50		25		1.250	
Disseny conceptual	120		50		6.000	
Disseny CAD	30		25		750	
Muntatge i proves	40		50		2.000	
Memòria	60		20		1.200	
Total	300		-		11.200	
CONCEPTE	LLICÈNCIA [€]	SUBSCRIPCIÓ ANUAL [€]	HORES ANUALS [h]	PREU [€]	DEDICACIÓ [h]	COST [€]
Llicència de software						
CAD: SolidWorks	3.647,44	1.1182,34	1500	3,22	30	96,6
Microsoft Office 2013	74,99	-	1500	0,05	50	2,5
TOTAL						99,1

CONCEPTE	COMPONENT	COST COMPONENT[€]	UNITATS	COST [€]
Costos del prototip				
Capçal	Cilindre	181,5	1	181,5
	Adaptador d'aire comprimit	14,45	1	14,45
	Suport per a la impressora	2,60	1	2,60
	Punta extrusora	3,50	1	3,50
Bossa		5,00	1	5,00
Sistema de control de pressió				
	Vàlvula solenoide	25,50	2	51,00
	Placa <i>Arduino</i>	27,50	1	27,50
	Placa <i>Protoboard</i>	13,40	1	13,40
	Mosfet canal N	2,30	2	4,60
	Díode LED	0,25	2	0,50
	Resistència	0,20	2	0,40
	Diode	0,50	2	1,00
	Joc de cables de connexió	6,60	1	6,60
	Adaptadors de tub	2,50	8	20,00
	Adaptador CA/CC	9,00	1	9,00
	Tub de conducció d'aire comprimit	3,00	1	3,00
	Compressor d'aire	89,95	1	89,95
Sistema de control de temperatura				
	Termòstat analògic	25,50	1	25,50
	Resistència 90 W	6,85	1	6,85
	Escuma elastomèrica	17,00	1	17,00
	Fibra de vidre	3,55	1	3,55
TOTAL				486,9
COST TOTAL				11.786

7. IMPACTE AMBIENTAL I SOCIAL

L'avaluació d'impacte ambiental del projecte es regula per la llei 21/2013 de 9 de desembre, la qual defineix aquest procés:

“La evaluación ambiental resulta indispensable para la protección del medio ambiente. Facilita la incorporación de los criterios de sostenibilidad en la toma de decisiones estratégicas, a través de la evaluación de los planes y programas. Y a través de la evaluación de proyectos, garantiza una adecuada prevención de los impactos ambientales concretos que se puedan generar, al tiempo que establece mecanismos eficaces de corrección o compensación.

La evaluación ambiental es un instrumento plenamente consolidado que acompaña al desarrollo, asegurando que éste sea sostenible e integrador.”

La fase de construcció d'aquest projecte ha generat gran quantitat de residus. Per això, s'han intentat seguir unes mesures de prevenció per tal de minimitzar al màxim possible l'impacte ambiental. En primer lloc, s'ha intentat reciclar el material sobrant i les peces que no eren d'utilitat en els contenidors adequats, guardant aquelles que poden tenir un possible ús en el futur, com l'escuma elastomèrica sobrant o els cables de connexió utilitzats en el circuit de control del sistema de pressió. A més, tot el procés productiu de mecanitzat del cilindre segueix la normativa ISO corresponent per tal d'assegurar la correcta i segura utilització de les màquines i tractament dels residus.

D'altra banda, pel que fa a l'impacte social en la fase de proves en estàtic, a l'utilitzar un element sorollós com és el compressor i haver hagut de fer-les en el domicili particular, s'ha procurat respectar l'horari establert com a temps de descans en el veïnat.

8. CONCLUSIONS

El projecte desenvolupa el disseny i materialització d'un sistema d'extrusió basat en cartutxos amb la finalitat de ser implementat en la impressora *RepRap BCN3D+*. Aquest extrusor pretén millorar els resultats obtinguts fins ara amb el capçal *Paste Extruder*.

Al tractar-se d'una tecnologia en plena expansió i que segueix la filosofia DIY (*Do It Yourself*), en la qual tothom exposa la seva creativitat a la xarxa, s'ha pogut extreure informació útil per al desenvolupament del projecte que ha permès estalviar temps i prendre decisions apropiades per a l'èxit d'aquest.

S'han complert els objectius que s'havien establert a l'inici del projecte. Aquests són els següents:

- En primer lloc, s'ha complert l'objectiu principal, que era aconseguir un sistema d'extrusió alimentat amb cartutxos, concretament amb bosses que contenen la xocolata que posteriorment s'utilitzarà per imprimir.
- En segon lloc, s'ha aconseguit tenir control sobre el flux d'extrusió. Això ha estat possible gràcies a tenir un sistema en el qual es pot regular la pressió, com és un sistema d'aire comprimit, i un sistema de control de temperatura amb una resistència calorífica de contacte al voltant del cilindre i un termòstat.
- Un altre objectiu era aconseguir evitar el degoteig en el moment en què no s'està extrudint. Com s'ha explicat al llarg de la memòria, aquest era un dels problemes del *Paste Extruder*, a causa de què en els moments en què la impressora deixava d'imprimir la xeringa seguia extrudint a conseqüència de seguir estant pressuritzada. En el sistema dissenyat s'aconsegueix resoldre aquesta problemàtica mitjançant la vàlvula d'alleujament.
- Finalment, l'últim objectiu era evitar el contacte de la xocolata amb elements que no fossin d'un sol ús. Per tal d'aconseguir-ho, s'ha aprofitat la idea d'utilitzar una càpsula extrudint la xocolata directament, passant només per la punta extrusora, la qual ha hagut de fixar-se al capçal per poder utilitzar un sistema de pressió basat en aire comprimit.

D'altra banda, quant a conclusions més concretes relacionades amb el correcte

funcionament del sistema en la impressora, s'ha determinat que:

- De les dues opcions de despressurització explicades en l'apartat 3.2.2., s'ha observat que l'opció de despressuritzar el cilindre a la pressió atmosfèrica és suficient per complir la funció que es busca.
- Els millors resultats d'impressió s'han obtingut amb un adaptador de punta extrusora d'1 mm, 1 bar de pressió en el compressor i xocolata en alt contingut de mantega de cacau, concretament xocolata negra de rajola del 50 %.

Per acabar, es pot concloure que com qualsevol sistema imperfecte, aquest no és una excepció i, per tant, té marge de millora. Per això, entre d'altres que es podrien comentar, es proposen quatre propostes de millora del projecte:

- L'ús d'un sistema de pressió basat en aire comprimit ha provocat que s'hagi hagut de fixar la punta, incomplint un dels objectius inicials, que era tenir tots els elements d'un sol ús. Per això, caldria trobar algun sistema que permetés tenir una punta extraïble, la qual cosa comportaria, probablement, haver de canviar de sistema de pressió.
- Aquest sistema té la restricció de què està pensat per a extrusions contínues. Per tal de donar solució a aquest problema, seria necessari fer una adaptació del *firmware* de l'*Arduino* a extrusions no contínues.
- Un dels inconvenients més grans d'aquest sistema és el temps necessari per refredar la xocolata en la segona fase del temperat, que és de l'ordre dels 40 minuts. Una solució possible seria dissenyar algun tipus de sistema d'extracció de calor que funcionés en la fase de refredament.
- Finalment, per qüestió de costos en aquest projecte es va adquirir un termòstat analògic, amb l'inconvenient de l'alt rang de tolerància de temperatures que aquest treballa. Per tal de tenir més control sobre les temperatures seria més exacte utilitzar un termòstat digital.

9. AGRAÏMENTS

Un treball d'aquestes dimensions no seria possible sense el suport i la col·laboració de moltes persones.

En primer lloc, al tutor del projecte, Felip Fenollosa, pels seus consells i ajuda en els moments de frustració.

En segon lloc, a la família, per haver estat sempre al meu costat, no només durant aquest treball, sinó durant tota la carrera.

Finalment, a Andrea, perquè sense ella, de ben segur, això no hagués estat possible.

10. BIBLIOGRAFIA

10.1. Referències bibliogràfiques



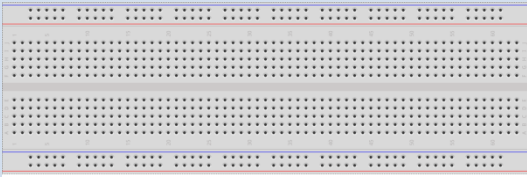
- [1] T. Becket, Stephan. *Industrial Chocolate Manufacture and Use*. Oxford, 2009.
- [2] Bonals, Lluís Albert. *Termotecnia*. Universitat Politècnica de Catalunya, 2014.
- [3] Debaste, F. *Proceedings of European Congress of Chemical Engineering (ECCE-6)* Copenhagen, 2007.
- [4] Unfold fab. *Road To a Better Paste Extrusion*. Brussels, 2012. [<http://unfoldfab.blogspot.com.es>].
- [5] *Manufacturer's corner: Dispensing Methods*. Philadelphia, USA. [<http://www.empf.org>]
- [6] Landoni, Boris. *Syringe Heater for 3Drag Chocolate Printer*. 2015. [<http://www.open-electronics.org/syringe-heater-for-3drag-chocolate-printer>].
- [7] Makerbot. *Frostruder MK2*. 2009 [<http://www.makerbot.com/blog/2009/11/02/rd-frostruder-mk2>].
- [8] Riley, George. *Jet Dispensing of Underfills*. 2007. [<http://flipchips.com/tutorial/process/jet-dispensing-of-underfills>]





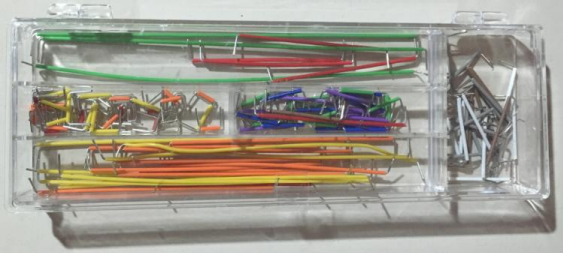
10.2. Bibliografia complementària

- Fenollosa, Felip. *Acotació i Toleràncies. Teoria i Exemples*. Barcelona, 2015.
- Chevalier, A. *Dibujo Industrial*, 2002.
- Lupon, Emili. *Diapositives de l'assignatura d'Electrònica*. Barcelona, 2015.
- Documentació sobre el *Paste Extruder* de BCN3DTechnologies. [<https://www.bcn3dtechnologies.com/ca/documentacio>]



ANNEX A: Taula de components del sistema de control de pressió

Component	Imatge	Unitats	Observacions
Vàlvula solenoide		2	12 V DC
Placa <i>Arduino</i>		1	Model UNO
Placa <i>protoboard</i>		1	-

MOSFET canal N		2	Model RFP50N06
Díode LED		2	Roig
Resistència		2	330 Ω
Díode		2	Model 1N4007
Cables de connexió		-	

Adaptadors de tub		8	7 adaptadors tub-vàlvula i 1 connector T
Transformador CA/CC regulable		1	12 V El cable ratllat és el positiu i el no ratllat el negatiu
Tub de conducció d'aire comprimit		-	
Compressor d'aire		1	Regulable fins a 6,8 bar (100 psi)

Taula 11.1. Components del sistema de control de pressió

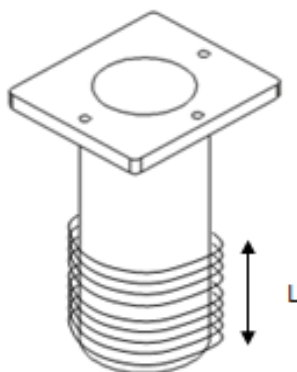
ANNEX B: Anàlisi de la transferència de calor en el capçal

Les conductivitats tèrmiques dels elements afectats pel sistema de control de temperatura són les següents:

Element	Conductivitat tèrmica (λ) [$\frac{W}{m \cdot K}$]
Cilindre (alumini)	209,3
Bossa (alumini)	209,3
Escuma elastomèrica aïllant	0,034
Fibra de vidre	0,04

Taula 11.2. Conductivitats tèrmiques. Font:www.wikipedia.org.

Partint de la resistència de 90 W de potència dissipada, primer es calcula la longitud de contacte entre el cable i el cilindre per tenir una idea de la zona que s'escalfarà suposant que s'enrotlla al voltant del cilindre sense espai de cable entre cada gir.



$$\text{Nombre de voltes} = \frac{2 \text{ m}}{\pi \cdot 0,05} = 12,73 \text{ voltes}$$

$$L = 12,73 \text{ voltes} \cdot 4 \text{ mm} = 50,92 \text{ mm}$$

Figura 11.1. Vista del cilindre amb el cable calefactat enrotllat.

Es tracta d'un valor orientatiu, ja que els cables no estaran completament junts, per la qual cosa sembla una longitud acceptable tenint en compte la longitud de la paret del cilindre, que és 11,83 cm com es pot veure en els plànols.

A continuació, es fa un anàlisi de la transferència de calor en el sistema en qüestió. L'objectiu d'aquest estudi és intentar tenir una idea de la temperatura que hem de seleccionar en el termòstat per tal d'aconseguir la temperatura desitjada a la paret interior de la bossa. S'ha

decidit no incloure la transferència de calor a la xocolata perquè els seus coeficients tèrmics són molt variables segons l'estat físic d'aquesta, la qual cosa complicaria molt l'estudi. No obstant, aconseguir la temperatura desitjada a la part interior de la bossa significaria que escalfar la xocolata només seria qüestió de temps.

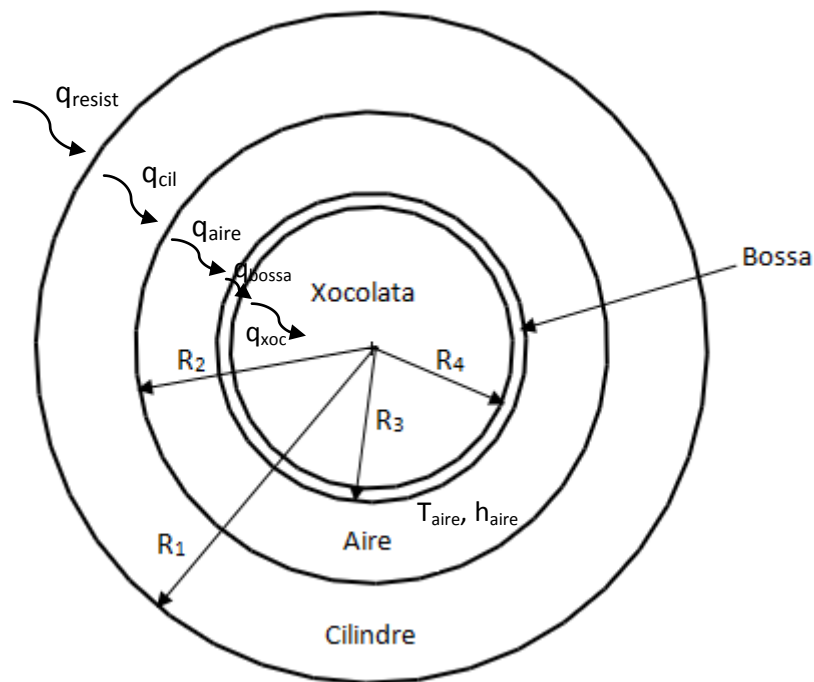


Figura 11.2. Vista superior del cilindre amb la bossa al seu interior.

En la figura anterior es poden observar les zones per on ha de passar la calor aportada per la resistència a la paret exterior del cilindre. Els mecanismes de transferència de calor que es produeixen són:

- **Conducció:** en els parets del cilindre i la bossa.
- **Convecció:** entre el cilindre i la bossa, tot i que hi ha zones de contacte.

Suposant règim estacionari i negligint les pèrdues calorífiques cap a l'exterior, tenint en compte l'aïllant tèrmic que envolta el cilindre, es sap que la potència tèrmica que la resistència cedeix a la paret exterior del cilindre ha de ser igual a la potència que per conducció es transfereix entre les superfícies 1 i 2, que serà la mateixa que es transferirà a

través de l'aire, seguint per la bossa i acabant a la xocolata.

$$q_{\text{resist}} = q_{\text{cil}} = q_{\text{aire}} = q_{\text{bossa}} = q_{\text{xoc}}$$

sent,

$$q_{\text{resist}} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{\ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{\text{alumini}} \cdot L_{\text{cilindre}}}} = \frac{T_2 - T_{\text{aire}}}{\frac{1}{h_{\text{aire}} \cdot A_{\text{cilint}}}} = \frac{T_{\text{aire}} - T_3}{\frac{1}{h_{\text{aire}} \cdot A_{\text{bossaext}}}} = \frac{T_3 - T_4}{\frac{\ln\left(\frac{R_3}{R_4}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{\text{alumini}} \cdot L_{\text{bossa}}}}$$

On:

$$R_1 = 0,025 \text{ m}$$

$$R_2 = 0,02 \text{ m}$$

$$R_3 = 0,0175 \text{ m}$$

$$R_4 = 0,017 \text{ m}$$

$$\lambda_{\text{alumini}} = 209,3 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$L_{\text{alumini}} = 0,1183 \text{ m}$$

$$h_{\text{aire}} = 300 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

$$A_{\text{cilint}} = 2 \cdot \pi \cdot R_2 \cdot L_{\text{alumini}} = 1,4866 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$$

$$L_{\text{bossa}} = L_{\text{alumini}} = 0,1183 \text{ m}$$

$$A_{\text{bossaext}} = 2 \cdot \pi \cdot R_3 \cdot L_{\text{bossa}} = 1,308 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$$

Dels valors anteriors cal fer diverses observacions:

- El coeficient de convecció de l'aire és en convecció forçada, a causa de què l'aire es va renovant gràcies al sistema de pressió. Per aquesta raó, es tracta d'un valor difícil de quantificar.
- Per calcular les àrees s'ha agafat la longitud total de l'alumini enlloc de la longitud de

contacte de la resistència amb el cilindre calculada anteriorment, ja que a l'hora de fer el muntatge la resistència es reparteix homogèniament en la superfície exterior del cilindre.

Finalment, per calcular la temperatura requerida a la resistència per assolir els 50 °C necessaris per fondre la xocolata a partir de les igualtats anteriors s'obté la següent equació:

$$q_{\text{resist}} = \frac{T_1 - T_4}{\frac{\ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{\text{alumini}} \cdot L_{\text{cilindre}}} + \frac{1}{h_{\text{aire}} \cdot A_{\text{cilint}}} + \frac{1}{h_{\text{aire}} \cdot A_{\text{bossaext}}} + \frac{\ln\left(\frac{R_3}{R_4}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{\text{alumini}} \cdot L_{\text{bossa}}}};$$

$$90 = \frac{T_1 - 50}{\frac{\ln\left(\frac{0,025}{0,02}\right)}{2 \cdot \pi \cdot 209,3 \cdot 0,1183} + \frac{1}{300 \cdot 1,4866 \cdot 10^{-2}} + \frac{1}{300 \cdot 1,308 \cdot 10^{-2}} + \frac{\ln\left(\frac{0,0175}{0,017}\right)}{2 \cdot \pi \cdot 209,3 \cdot 0,118}};$$

$$T_1 = 93,26 \text{ °C}$$

Segons els càlculs teòrics, aquesta és la temperatura que s'hauria d'establir a la resistència per tal d'obtenir els 50 °C desitjats a la xocolata. Tenint en compte que el termòstat pot arribar fins a 90 °C i que el valor trobat serà menor a causa de què la calor entre el cilindre i la bossa no es transmet tota per convecció, sinó que hi ha zones de contacte, i sabent que la calor es transmet millor per conducció que per convecció, es creu que aquesta resistència aportarà una potència suficient, com es confirma en l'apartat de proves i resultats.

ANNEX C: Informe de les jornades d'impressió a Torribera

Aquest informe va ser previ a la realització del projecte, i va servir de base per a la realització d'aquest. En aquest, es parla sobre unes proves que es van realitzar al Laboratori Tecnològic d'Investigació Culinària amb el capçal *Paste Extruder* i amb diversos tipus de xocolata.

• INTRODUCCIÓ:

Es fixa com a objectiu realitzar proves amb la impressora BCN3D+ de la Fundació CIM relatives a la utilització de la tècnica d'impressió 3D per aconseguir figures alimentàries. Es treballarà inicialment amb xocolata que serà facilitada per Simón Coll que també forma part del projecte.

• PROVES INICIALS AMB XOCOLATA VALRHONA:

- Prova amb xocolata del 64% de cacau. Massa fluida. Només s'han aconseguit figures planes de fins a 3 capes.
- Prova de xocolata plàstica. No va sortir bé: massa elàstica.

• PROVES AMB XOCOLATA SIMÓN COLL:

Acord amb l'empresa Simón Coll (Xavier Coll) per desenvolupar el projecte amb la versatilitat que pugui permetre.

- Prova amb xocolata amb llet (32% de mantega de cacau). Bé. S'han aconseguit 50 capes (capa de 1,2 mm).
- Prova amb xocolata 50% (GOTES) (36% de mantega de cacau). Massa fluid. Suposadament massa mantega de cacau.
- Prova amb xocolata 50% (RAJOLA) (per determinar % de mantega de cacau). Bé. S'han aconseguit 55 capes que era el límit de la màquina.

• CONCLUSIONS SOBRE LA TECNOLOGIA UTILITZADA I EL PRODUCTE

- Reduir la velocitat d'impressió per donar temps a la solidificació de la xocolata en la

figura. Si es vol accelerar caldria refrigerar la peça que s'està confeccionant.
PROPOSTA DE RECERCA: MILLORA DEL LLIT D'IMPRESSIÓ.

- Intentar regular la temperatura ambient per tal que la solidificació sigui prou ràpida. Problema de què la xocolata es pugui solidificar en la xeringa i taponar-se. PROPOSTA DE RECERCA EN DIFERENTS TEMPERATURES EXTERIORS.
- Xeringa protegida per evitar la solidificació ràpida del seu interior. PROPOSTA DE RECERCA D'UNA CAMISA CALEFACTADA. Aquí caldria tenir una camisa calefactada en la punta final de la xeringa a 32°C.
- Xocolata poc fluida per una millor construcció de la peça. PROPOSTA DE RECERCA: BUSCAR XOCOLATES AMB UN PERCENTATGE DE MANTEGA DE CACAU BAIX (per sota del 30%).
- S'ha treballat amb desplomats d'angles de 30° a 45°. CAL PENSAR QUE EL DISSENY DE PECES AMB AQUESTA LIMITACIÓ.
- Paràmetres més importants a controlar:
 - Temps.
 - Temperatura ambient.
 - Temperatures de solidificació de la xocolata de la figura i de la xeringa.
 - Viscositat de la xocolata.
- Proposta d'estudi teòric dels tipus específic de xocolata que s'estableixi.
 - Càlcul del calor específic.
 - Càlcul del calor latent.
 - Estudi de la seva viscositat.
 - Estudi de la seva textura global (elasticitat, duresa en sòlid, etc.).
- **PROPOSTES DE CONTINUACIÓ DEL PROJECTE:**
 - **Cartutx dosificació amb xocolata en trossets petits o en pols amb una part final i punta extrusora calefactades a 32 °C.**
 - El pes de la xeringa, dificulta la precisió del procés. Algunes vegades baixa més producte. Es proposa xeringa o cartutx al costat (no vertical) amb tub connectat a la

punta.

○ Altres aliments:

- Galetes 3D. Caldria pensar en la cocció. La plataforma de sota la impressora pot ser mòbil i introduir el producte a un forn o similar.
- Pastes.
- Productes amb diferents ingredients amb impressora 3D amb 2 o més xeringues.

ANNEX D: Plànols

En aquest apartat es presenten els plànols dels elements del sistema extrusor que s'han de fabricar.