



EPS

Escola Politècnica
Superior

Projecte/Treball Fi de Carrera

Estudi: Enginyeria Industrial. Pla 2002

Títol: ANÀLISI ENERGÈTIC DE DEFORMACIÓ INCREMENTAL
DE XAPA EN MATERIALS POLIMÈRICS

Document: MEMÒRIA

Alumne: Aleix Lleget Novell

Director/Tutor: Maria Luisa Garcia-Romeu de Luna
Departament: Eng. Mecànica i de la Construcció Industrial
Àrea: Enginyeria dels processos de fabricació

Convocatòria (mes/any): Setembre 2014

ÍNDEX

MEMÒRIA	4
1 Introducció	5
1.1 Antecedents.....	5
1.2 Objecte	9
1.3 Abast	9
2 Descripció dels elements de mesura	11
2.1 Mesura de forces.....	11
2.1.1 Descripció de la màquina.....	11
2.1.2 Portaeines i eina.....	12
2.1.3 Utilatge	12
2.1.4 Aparell de mesura de força.....	14
2.2 Mesura elèctrica	14
2.2.1 Transformador d'intensitat	15
2.2.2 Transformador de voltatge.....	16
2.2.3 Targeta d'adquisició de dades	19
2.2.4 LabView.....	19
2.2.5 Càlcul del consum	20
2.3 Mesura de temperatura	21
2.4 Mesura de rugositats	23
3 Experimentació	24
3.1 Geometria.....	24

3.2	Material.....	25
3.2.1	Policarbonat (PC)	27
3.2.2	Policlorur de vinil (PVC).....	27
3.3	Paràmetres de procés	28
3.3.1	Velocitat de rotació	28
3.3.2	Velocitat d'avanç	28
3.3.3	Pas incremental.....	29
3.3.4	Desplaçament horitzontal	29
3.3.5	Lubricant.....	30
3.4	Disseny d'experiments (DOE).....	30
4	Resultats i discussió	33
4.1	Estudi de temps i energia durant el procés	33
4.1.1	En buit	34
4.1.2	Metalls	41
4.1.3	Polímers	45
4.1.4	Comparació	55
4.1.5	Resum de conclusions.....	58
4.2	Energia consumida	59
4.3	Anàlisi d'altres resultats	66
4.3.1	Temperatura.....	66
4.3.2	Força	68
4.3.3	Profunditat	70
4.3.4	Rugositat	72
4.3.5	Elecció dels paràmetres	74

4.4	Emissions CO ₂	80
4.4.1	Matèria primera	81
4.4.2	Fabricació.....	81
4.4.3	Emissions totals dels experiments	83
4.4.4	Predicció de les emissions.....	85
5	Resum del pressupost	87
6	Conclusions	88
7	Relació de documents	90
8	Bibliografia.....	91
9	Glossari	93
9.1	Abreviacions	93
9.2	Símbols	94
	ANNEXOS	95
A	Aparells utilitzats.....	96
A.1	Centre de mecanitzat Kondia HS 1000	96
A.2	Taula dinamomètrica Kistler 9257B	97
A.3	Targeta d'adquisició de dades NI 6008-USB	98
A.4	Transformador de voltatge AmperFlex.....	99
B	Origen de l'energia	102
C	Fotografies experiments	106

MEMÒRIA

1 INTRODUCCIÓ

1.1 Antecedents

A finals dels anys 70 va ser presentada per part de Mason al 1978 (Emmens, et al., 2010) una nova tecnologia de deformació anomenada conformació incremental de xapa, en anglès *Incremental Sheet Forming (ISF)*. Aquesta tecnologia va ser presentada com a una alternativa a l'embotició, ja que pretenia reduir el temps necessari de conformació i augmentar la flexibilitat de producció.

Aquest procés consisteix en aplicar una deformació local sobre la xapa que s'està treballant, la qual pot ser de diferents materials, com metàl·lics o polimèrics. La deformació esmentada es realitza mitjançant un punxó acabat amb una forma semiesfèrica, que pot tenir diferents radis. Aquestes eines permeten conformar peces de diferents característiques geomètriques, per tant no és necessari adaptar l'eina a la peça que es vulgui realitzar. Aquesta característica del procés, permet disminuir els costos per lots reduïts, ja que no s'ha de fabricar una eina i una matriu específica per cada peça.

El principi de funcionament de l'ISF consisteix en fixar la làmina que es vol deformar en un suport i amb el punxó es realitza una trajectòria en el pla sobre aquesta làmina. Una vegada s'ha finalitzat la trajectòria sobre el pla, el punxó descendeix una profunditat determinada i torna a descriure una trajectòria en el pla. Aquest procediment, el qual es pot veure il·lustrat a la Figura 1.1, es repeteix fins a obtenir la geometria desitjada de la peça. Cal dir que la profunditat de cada passada dependrà de diferents factors de conformació, tals com el material, la rugositat o el gruix de la xapa i que s'utilitza lubricant per reduir la component de fricció entre la xapa i l'eina.

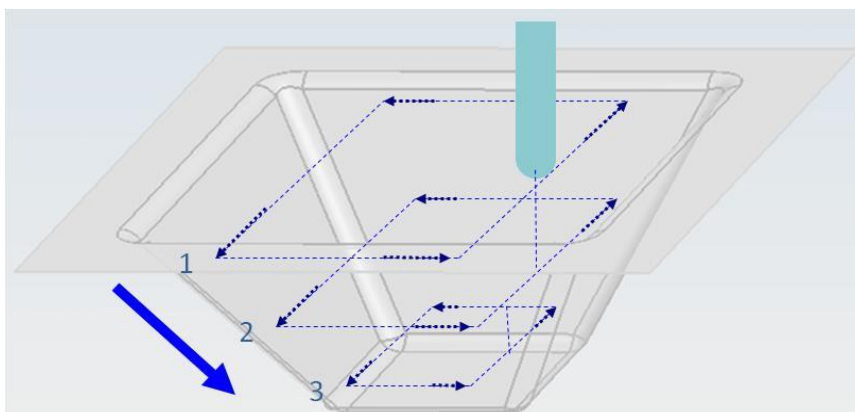


Figura 1.1. Principi de funcionament ISF.

La descripció de la trajectòria a seguir per la fabricació de les peces s'ha de programar i l'executarà un centre de mecanitzat amb control CNC, d'aquesta manera s'aconsegueix un procés totalment automatitzat

Hi ha diverses variants d'aquesta tecnologia que s'han anat desenvolupant al llarg dels anys on les més importants són:

1. *Single Point Incremental Forming (SPIF)*

Aquesta variant com indica el nom només té un punt de contacte entre l'eina i la xapa on es produeix la deformació local. El funcionament és el descrit anteriorment, on la xapa està subjectada pels extrems i el punxó descriu la trajectòria per obtenir la geometria desitjada de la peça. Aquesta variant es pot veure a la Figura 1.2.

Hi ha diversos avantatges i inconvenients en la utilització de l'SPIF (Jeswiet et al., 2005). Els principals avantatges que es presenten són:

- No es necessiten matrius negatives ni positives per poder conformar la geometria.
- Es poden fer canvis en el disseny de la peça de manera ràpida i fàcil, així que aporta una gran flexibilitat a canvis.
- La zona local on s'aplica la deformació plàstica i la naturalesa del procés contribueix a la capacitat de conformació.
- Es pot utilitzar una màquina convencional que disposi de CNC per poder adaptar-la al procés.
- L'acabat superficial de la peça és acceptable, tot i que es pot millorar.
- Es pot executar la peça des d'un arxiu CAD directament.

Els inconvenients més rellevants són:

- El temps de producció és més elevat que en processos competitiu com l'embotició convencional, per això el procés és viable per a lots reduïts.
- No es poden realitzar angles rectes amb un sol pas ja que el material es pot fracturar, per tant es necessitarà més d'un pas per obtenir-los i això augmenta el temps de producció i la complexitat del procés.
- Hi ha una recuperació elàstica que fa perdre precisió geomètrica.

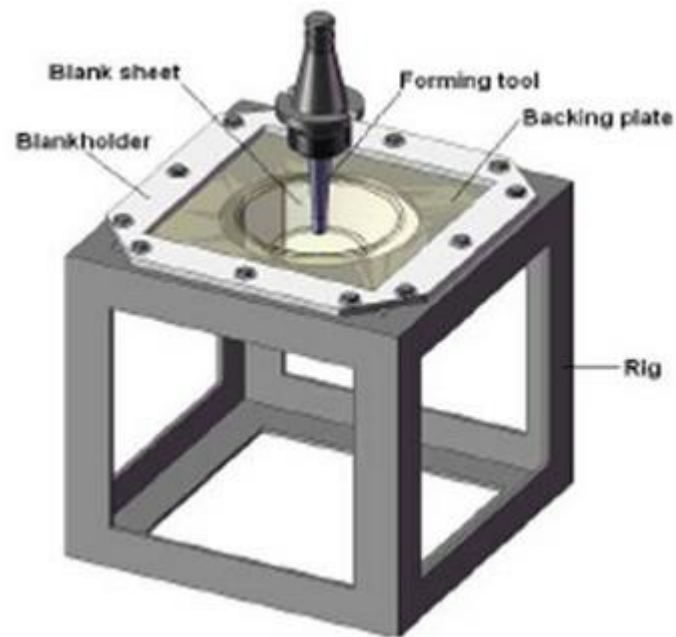


Figura 1.2 Esquema SPIF

2. Two Point Incremental Forming (TPIF)

En aquest procés no només s'utilitza el punxó per donar la forma, sinó que també hi ha una matriu i el punxó seguirà la trajectòria de la matriu per la conformació. Per tant, en aquest cas hi ha dos punts d'aplicació de la força, un és el contacte entre l'eina i la xapa, com en el cas de l'SPIF, i l'altre punt és el de contacte entre la matriu i la xapa. Aquesta matriu tant pot ser positiva com negativa (veure Figura 1.3) i de diferents materials com fusta i resines polimèriques que són fàcilment mecanitzables i de baix cost.

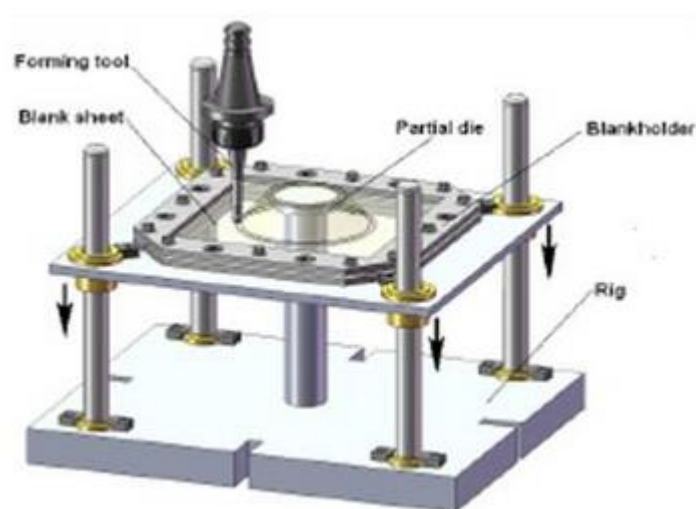


Figura 1.3. Esquema TPIF matriu positiva

El principal avantatge és que s'obtenen millors precisions dimensionals que amb el mètode SPIF (Fiorentino et al., 2011), per altre banda, l'inconvenient és augmenten els costos de producció al haver de fabricar les matrius, tot i que no són comparables amb els costos de fabricació de les matrius en el cas de l'embotició, ja que en aquest procés s'utilitzen materials molt més cars i difícils de mecanitzar.

Durant els últims anys s'han realitzat diverses investigacions i s'han aconseguit avenços importants en aquesta recent tecnologia. Com ja s'ha comentat anteriorment, l'interès sobre aquesta tecnologia ha anat evolucionant gràcies a la reducció de costos per lots reduïts i per la gran flexibilitat que ofereix per conformar peces molt personalitzades. Alguns exemples de les línies d'investigació són: l'anàlisi aquesta tecnologia per la fabricació d'una sola peça d'automòbil (Jeswiet i Hagan et al., 2002), la utilització per la fabricació d'un turmell personalitzat (Ambrogio et al., 2005), la introducció d'un làser per reduir els nivells de tensions residuals de la xapa i reduir els efectes de la recuperació elàstica (Duflou et al., 2007), molts investigadors van destacar la idoneïtat de l'ISF pel processat de materials lleugers (Ambrogio et al., 2008).

Pel que fa a les investigacions referents als materials utilitzats es troben varis articles on s'identifica que els materials més utilitzats en la tecnologia ISF són aliatges d'alumini i acers d'embotició o inoxidable, ja que són deformables en fred sempre que estiguin ben lubricats. Tot i que s'ha començat a treballar amb diferents aliatges de magnesi i de titani que s'ha comprovat que no es poden conformar a temperatura ambient (Park et al., 2009, Zhang et al., 2009).

Per l'objectiu d'aquest projecte, el més interessant són les investigacions que s'han dut a terme més recentment, ja que s'ha començat a treballar amb materials polimèrics, amb els quals el principal avantatge que s'obté és que la conformació es pot realitzar a temperatura ambient, per la qual cosa es redueixen els costos de generació de calor que es necessiten en la majoria del processos de conformació tradicionals de materials plàstics, com per exemple el termoconformat. Els primers estudis que es van realitzar van ser de Franzen et al. (2008) i Le et al. (2008), on els dos utilitzen la variant SPIF de la tecnologia ISF i els dos caracteritzen els límits de formabilitat del material, en el cas de Franzen pel PVC i en el pas de Le pel PVC i el PP. Posteriorment, Martins et al. (2009) es va centrar en l'avaluació de l'aplicació del procés SPIF per diferents polímers (POM, HDPE, PA, PVC i PC) analitzant totes les característiques de formabilitat i precisions obtingudes per després poder fer un mecanisme de selecció del material segons les seves propietats mecàniques. Finalment,

Silvia et al. (2010) va interpretar de forma teòrica el mecanisme de deformació associat al límit de trencament mencionat per Franzen et al. (2008).

Per últim, aquest projecte seguirà també la línia d'estudi de Ingarao et al. (2014) on va realitzar un estudi energètic del procés SPIF amb materials metàl·lics per identificar en quins punts hi ha més consum energètic i a la vegada poder comparar els recursos energètics necessaris per la fabricació amb diferents tecnologies per dur a terme l'SPIF, com un centre de mecanitzat CNC adaptat, un robot i un centre especialitzat en SPIF. En aquest estudi es va arribar a obtenir una sèrie d'equacions que depenen de la geometria i el material que es volia conformar es podia predir quin seria el consum energètic final.

Per tant, és evident que és una tecnologia que està evolucionant i que encara és jove, però pot ser una alternativa viable de conformació. Un dels equips de treball que estan investigant en aquesta línia és el Grup de Recerca d'Enginyeria de Producte i Producció (GREP) situat al parc científic i tecnològic de la Universitat de Girona. Per poder investigar aquesta tecnologia disposen d'un centre de mecanitzat Kondia model HS1000 adaptat a l'ISF.

1.2 Objecte

Existeixen varis estudis que avaluen el consum energètic derivat del procés de producció de ISF, principalment per materials metàl·lics. Per tant, l'objectiu d'aquest projecte és determinar el consum energètic en la conformació de materials plàstics en aquest procés.

S'estudiarà el consum energètic mesurant l'energia elèctrica necessària pel procés, utilitzant diferents paràmetres i estratègies de fabricació, com poden ser diferents materials polimèrics, trajectòries variades de conformat, diferents velocitats d'avanç i rotació i diferents geometries.

Un cop analitzat el consum energètic derivat de la fabricació amb ISF es valorarà l'impacte ambiental que provoca aquesta tecnologia.

1.3 Abast

Per poder assolir l'objectiu del projecte, es realitzaran les següents tasques:

- Adaptar un sistema per la mesura online del consum elèctric durant el procés de conformat.

- Quantificar el consum energètic en funció de diferents paràmetres i identificar quins són els més influents.
- Identificar els consums derivats dels diferents estats de la màquina.
- Realitzar el càlcul de l'empremta ambiental del procés.

2 DESCRIPCIÓ DELS ELEMENTS DE MESURA

Per assolir l'objectiu del projecte han estat necessaris diferents aparells de mesura que es definiran en aquest apartat, en el qual també s'hi expliquen les característiques del centre de mecanitzat necessàries per dur a terme els experiments.

2.1 Mesura de forces

Dins el subapartat de la mesura de forces també s'hi inclou l'explicació dels elements del centre de mecanitzat. Això és així perquè l'aparell que s'utilitza per la mesura de forces està integrat dins el propi muntatge de la màquina.

2.1.1 Descripció de la màquina

Els experiments duts a terme pel desenvolupament del projecte han estat efectuats amb el centre de mecanitzat Kondia HS1000, el qual està adaptat per poder desenvolupar la tecnologia ISF.

Aquest centre de mecanitzat consta de les següents parts (es poden veure a la Figura 2.1):

- Capçal: És on s'acobla el portaeines, el qual ja serà descrit posteriorment. Amb el capçal s'obté el desplaçament vertical en l'eix z i el moviment horitzontal en l'eix x i transmet les diferents velocitats de rotació al portaeines.
- Taula màquina: En aquesta taula és on es subjecta l'utilitatge necessari per poder fer la conformació de les xapes i permet fer el desplaçament horitzontal en l'eix de coordenades y.
- CNC: aquest hardware de control numèric computeritzat Fidia permet governar el moviment de la taula i del capçal per descriure les trajectòries desitjades per obtenir la geometria de les peces a conformar.

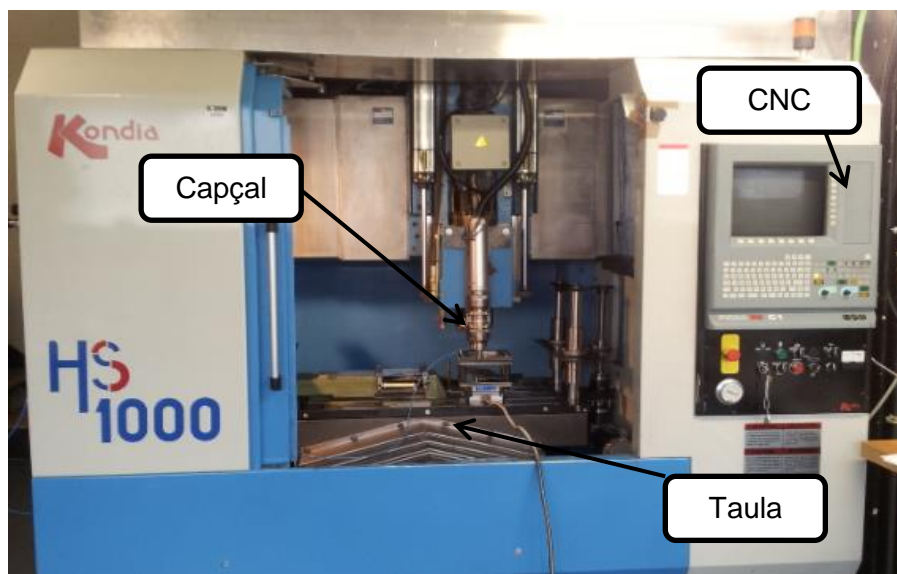


Figura 2.1 Parts de la màquina

2.1.2 Portaeines i eina

El portaeines utilitzat és de tipus Weldon, el qual s'acobra al capçal de la màquina com ja s'ha esmentat anteriorment. Les seves dues funcions són subjectar l'eina i transmetre a l'eina la velocitat de rotació i d'avanç aportades pel capçal de la màquina.

Pel conformat de les peces s'utilitzen dues eines: una eina amb la punta semiesfèrica de diàmetre 10 mm i l'altra de diàmetre 6 mm, les dues fabricades amb material Vanadis 23. Aquest material és un acer pulvimetal·lúrgic d'alt rendiment per a treball en fred, utilitzat per la conformació de materials tant metàl·lics com polímers.

2.1.3 Utillatge

La funció de l'utillatge és el de la subjecció de la xapa per poder realitzar el conformat correctament. Aquets utillatge va ser dissenyat en un anterior projecte final de carrera (Bagudanch, 2011) per poder adaptar el centre de mecanitzar Kondia HS1000 a la tecnologia ISF.

El disseny de l'utillatge consta de diferents parts tal i com s'observa a la Figura 2.2, on les seves principals funcions són les següents:

- La plataforma inferior serveix per fixar l'utillatge a la taula de treball i que es transmetin els moviments en l'eix y. A la vegada també serveix per poder fixar-hi la taula dinamomètrica amb la que es fa la mesura de les forces.

- Són necessaris 4 suports perquè quedi un espai lliure entre la plataforma inferior i la superior i, d'aquesta manera, es pugui conformar les peces lliurement.
- La plataforma superior va unida als suports i es on es col·loca la xapa que s'ha de conformar, finalment, la xapa va subjectada amb una plataforma de fixació que va unida a la plataforma superior i als suports, fent que la xapa no es mogui durant el procés de deformació.

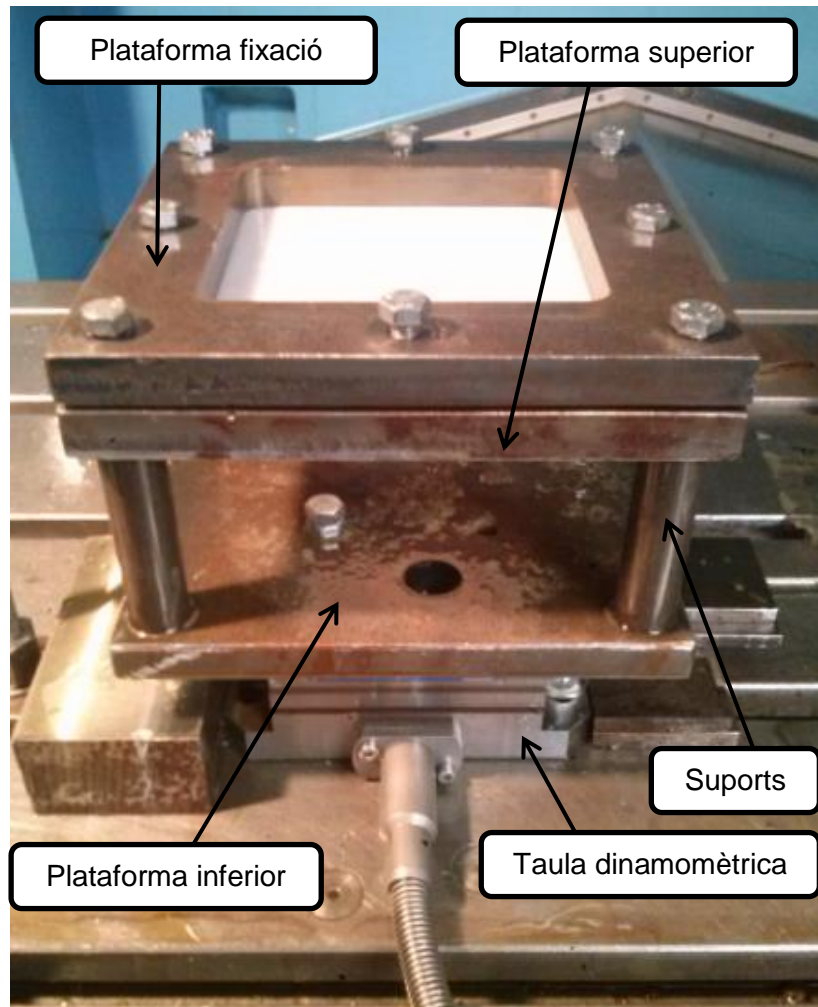


Figura 2.2 Utilatge i les seves parts

2.1.4 Aparell de mesura de força

Per poder obtenir al peça amb la geometria final el centre de mecanitzat Kondia necessita aplicar una certa força per poder deformar la xapa, la qual dependrà de cada tipus de material.

Per poder adquirir les forces necessàries per la deformació de la xapa es disposa d'una taula dinamomètrica Kistler 9257B, la qual ha estat muntada sota la plataforma inferior de l'utilatge (es pot veure a la Figura 2.2), d'aquesta manera les forces són transmises a través de l'utilatge fins la taula dinamomètrica. Aquestes dades són enregistrades amb una freqüència de 10 HZ, és a dir, 10 mesures de per segon i són enregistrades per una targeta d'adquisició de dades DaqBoard 505 i processades pel software Daqview 9.0.0. Finalment, totes les dades són tractades amb el programa informàtic Matlab, que permet representar totes les dades en una gràfica.

Cal comentar que amb la taula dinamomètrica Kistler es poden obtenir les forces durant el procés de tots els eixos coordenades x, y i z, però només s'han tractat les dades de força de l'eix z ja que són les més importants del procés comparades amb les forces dels altres eixos. És lògic que les forces de l'eix z siguin les més significatives ja que la deformació més important del procés es produeix en l'eix vertical.

2.2 Mesura elèctrica

El centre de mecanitzat Kondia està alimentat elèctricament, per tant per fer l'anàlisi energètic del procés d'ISF s'han de realitzar mesures elèctriques. Per poder fer aquestes mesures s'han necessitat varis dispositius, primerament un transformador d'intensitat per reduir el valor d'amperatge i adaptar-lo al rang d'entrada del transformador de voltatge que es situa a continuació, amb el qual és transforma la intensitat consumida a una senyal de voltatge. Aquesta senyal de voltatge s'introdueix a una targeta d'adquisició de dades, la qual va connectada a l'ordinador i a través del software Lavbiew es pot fer un registre de totes aquests voltatges, que converteix novament al valor d'intensitat consumida per la Kondia. Tots aquests dispositius s'expliquen amb més detall en aquest apartat.

Lupiañez, al seu projecte final de carrera (2012), va fer un estudi energètic del mateix centre de mecanitzat que s'utilitza en aquest projecte per materials metàl·lics, però per aquest s'han introduït millores en l'enregistrament de les dades. Al projecte de Lupiañez les dades de consum s'obtenien amb una pinça amperimètrica col·locada al cable de consum de potència, cosa que dona diferents desavantatges respecte al sistema de tractament de

dades proposat en aquest projecte. Els aspectes més destacats es comenten en els següents punts i es pot veure un resum a la Taula 2.1.

- La lectura en el cas de Lupiañez és aproximada perquè el consum d'intensitat no és un valor constant, sinó que hi ha pics que es produeixen durant la fabricació i amb una pinça amperimètrica no es poden identificar tots els valors amb exactitud, en canvi, amb el sistema proposat per aquets projecte es fa la mesura exacte.
- La intensitat que es mesura en Lupiañez és una mitjana de diferents lectures que es van fent durant el procés sense cap registre, en canvi, per aquest projecte es poden saber les lectures d'intensitat en cada instant de temps ja que s'enregistren a una freqüència de 20 Hz i després es pot fer la mitjana.
- Al projecte de Lupiañez, al no constar d'un registre de les dades, no es podia fer ni gràfiques de consum de tot el procés ni es podien identificar els diferents estats de la màquina, en canvi, amb aquest sistema d'enregistrament de dades proposat es pot tenir un control sobre les gràfiques de potència i si que es permet identificar els diferents estats amb els seus consums característics.

Taula 2.1 Comparativa entre sistema d'enregistrament de Lupiañez (2012) i Lleget (present projecte)

	Lupiañez	Lleget
Lectura	Aproximada	Exacte
Intensitat mesurada	Mitjana	En cada instant de temps
Registre de dades	No	Si
Gràfiques consum	No	Si
Identificació d'estats	No	Si

2.2.1 Transformador d'intensitat

El primer element necessari ha estat un transformador d'intensitat que ha de transformar la intensitat consumida pel centre de mecanitzat a una intensitat menor que pugui ser transformada, posteriorment, a la senyal de voltatge. El transformador que s'ha utilitzat és un transformador TYPE 50/5A, així que transforma una senyal de 50 A a una senyal de 5 A i els valors entremitjos de manera lineal.

En el projecte de final de carrera de Lupiañez (2012) es va fer un anàlisi del consum d'intensitats a en aquest centre de mecanitzat per materials metàl·lics i es pot veure en aquest projecte s'arribava a un pic màxim de 10,88 A. Per tant, amb el transformador de 50

A es pot perdre una mica de precisió i per aquesta raó s'han donat dues voltes al cable d'alimentació a través del transformador. Amb aquestes dues voltes el que s'aconsegueix és que pel transformador hi circuli el doble de flux i és com si es tingués instal·lat un transformador de 25/5A per guanyar més precisió en les mesures. El muntatge del transformador es pot veure a la Figura 2.3.



Figura 2.3 Muntatge del transformador

2.2.2 Transformador de voltatge

Per transformar la senyal d'intensitat que s'obté a la sortida del transformador és necessari un transformador d'intensitat a voltatge. Per fer aquesta transformació, s'ha optat per un transformador AmperFlex 67,374 que transforma la intensitat de corrent alterna a una senyal d'intensitat o voltatge en corrent continua, veure la Figura 2.4.

Aquest transformador AmperFlex té tres opcions d'entrades i dues opcions de sortida. Per les característiques del material que es disposa per realitzar el projecte s'ha optat per la connexió d'entrada que correspon a la intensitat provinent d'un transformador /5A, que és el que s'ha explicat a l'apartat 2.2.1, i pel que fa a la sortida ha estat escollida la sortida que transforma aquesta senyal d'intensitat a una senyal de voltatge entre 0 i 10 V, ja que és el rang d'intensitats que permet mesurar la targeta d'adquisició de dades que hi ha a continuació d'aquest transformador.

Cal comentar que el transformador ha d'estar alimentat a 220 V de corrent alterna o a 24 V de corrent continua. S'ha alimentat amb la opció de corrent alterna perquè al taller es

disposava d'aquest tipus d'alimentació, si s'hagués volgut fer amb corrent continua s'hauria d'haver instal·lat una nova font de la que no es disposava.

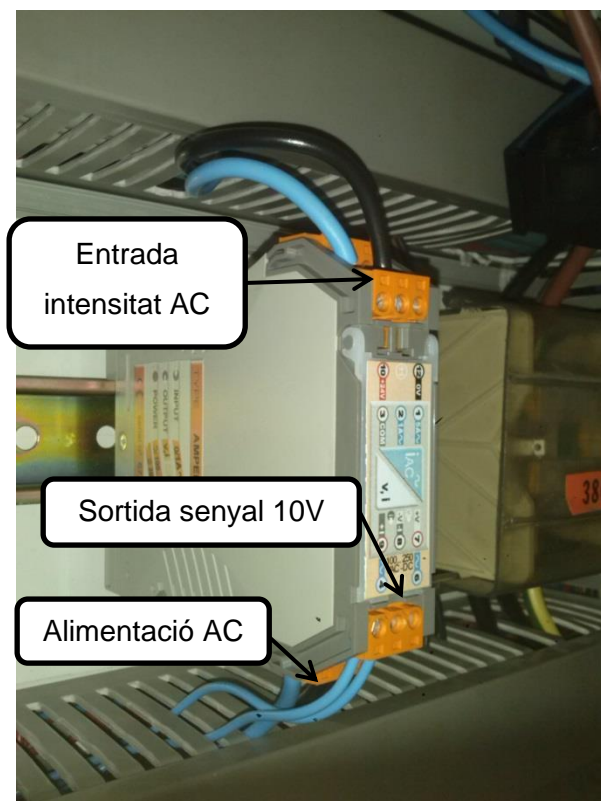


Figura 2.4 Transformador de voltatge

Aquest transformador de voltatge s'havia de calibrar per tal de que la intensitat màxima que pot rebre a l'entrada s'ajustés linealment al rang de sortida de la senyal de voltatge i els valors de senyal quedessin ben repartits entre 0 i 10 V. Per poder fer el calibratge es va muntar un sistema com al representat a la Figura 2.5.

Primer de tot es necessitava una font de voltatge i una resistència variables (Elements 1 i 2 de la Figura 2.5) per poder variar el consum d'intensitat i adaptar-lo als valors mitjans de la màquina. Aquests valors s'han extret del projecte final de carrera de Lupiañez (2012), on va fer un anàlisi del consum elèctric pel conformat de materials metàl·lics amb la Kondia. Pels experiments realitzats, s'observa que el consum del centre de mecanitzat, segons les condicions de treball, oscil·la entre 3 i 6 A de mitjana i un pic màxim enregistrat de 10,88 A. Per tant, amb la font i la resistència variable es va fer el calibratge amb una intensitat de 12 A, ja que es considera que és al màxim que pot arribar la Kondia. Per poder controlar aquesta intensitat subministrada al transformador d'intensitat (Element 4 de la Figura 2.5) es va instal·lar un amperímetre (Element 3 de la Figura 2.5).

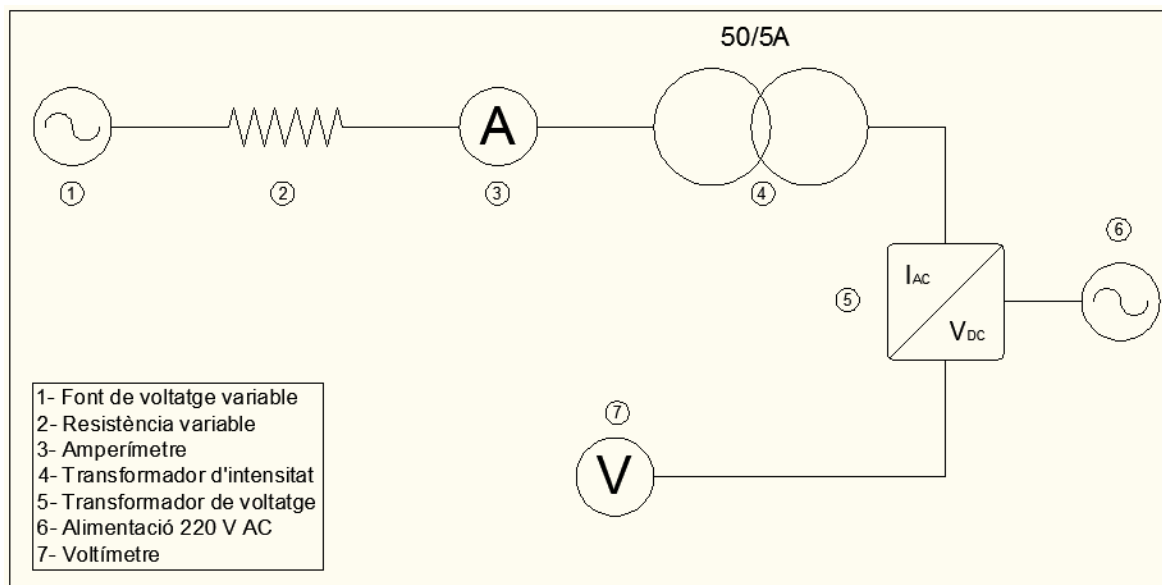


Figura 2.5 Esquema del muntatge de calibratge

Com ja s'ha comentat a l'apartat 2.2.1 es donen dues voltes al cable dins del transformador d'intensitat, d'aquesta manera es transforma en un transformador de 25/5A per tant quan amb la font de voltatge i la resistència s'obté la intensitat màxima de 12 A, a la sortida del transformador hi haurà una intensitat de 2,4 A, amb la qual es farà el calibratge.

Cal recordar que el transformador de voltatge (Element 5 de la Figura 2.5) ha d'estar alimentat per un corrent de 220 V de corrent alterna (Element 6 de la Figura 2.5). Aquesta alimentació va estar connectada durant 15 minuts abans de fer el calibratge per tal de què el tèrmic de l'aparell quedés estabilitzat. Un cop passats els 15 minuts es va subministrar la intensitat màxima de 12 A i amb els ajustadors del transformador es va assignar aquesta intensitat com a intensitat màxima, per tant si els 12 A són la intensitat màxima el transformador de voltatge havia de donar una senyal de sortida de 10 V, que es va comprovar amb el voltímetre connectat a la sortida del transformador (Element 7 de la Figura 2.5). Amb aquest ajust s'obté la funció següent:

$$I = 1,2 \cdot V \quad (\text{Eq. 2.1})$$

On:

- I és la intensitat consumida per la Kondia en A.
- V és la senyal de voltatge en V.

Aquesta funció s'acabarà d'ajustar finalment al taller juntament amb el programa *LabView*.

2.2.3 Targeta d'adquisició de dades

Per poder tractar les senyals de voltatge i enregistrar-les es necessària una targeta d'adquisició de dades. Pel projecte s'ha utilitzat una targeta d'adquisició de dades de *National Instruments* model USB-6008 com la de la Figura 2.6, la qual disposa de 4 ports d'entrades analògiques i 4 de digitals. En aquest cas només s'ha utilitzat un dels ports d'entrada analògics i per poder tractar-ho amb l'ordinador va ser connectada mitjançant USB.



Figura 2.6 Targeta d'adquisició de dades

2.2.4 LabView

Per poder enregistrar les dades de voltatge que arriben a la targeta d'adquisició s'ha utilitzat el programa informàtic *LabView*. El que es va fer amb aquest *software* és que la targeta d'adquisició de dades anés adquirint les dades que hi arribaven amb una freqüència de 20 Hz, per tant, s'enregistraven 20 dades per segon. Es tractava la senyal de l'entrada de manera que es visualitzava una senyal real i una senyal filtrada, la qual estava filtrada a una freqüència de 2 Hz. Aquest filtratge es pot veure a la gràfica de la dreta de la Figura 2.7 i ha estat utilitzada perquè no s'enregistressin tants pics derivats de les puntes d'intensitat durant la fabricació i de la possible contaminació de sorolls que interferien amb la senyal de voltatge com s'observa a la gràfica de l'esquerra de la mateixa figura.

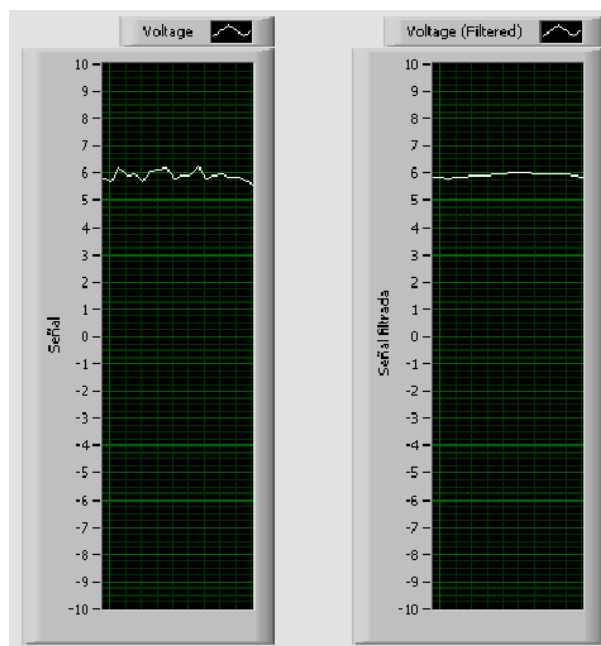


Figura 2.7 Gràfiques de les senyals

Finalment, les dades processades de voltatge han estat transformades a la intensitat que consumeix la Kondia amb l'equació 2.1. Es van fer les mesures amb una pinça amperimètrica al cable de consum de la Kondia i a la vegada es mirava el voltatge que hi havia a la sortida del transformador de voltatge. Amb aquestes mesures es va veure que hi havia un petit error en l'equació 2.1, que podia ser degut a que la intensitat a l'hora del calibratge fluctuava una mica i no era sempre constant a 12 A. L'equació de transformació final és l'equació 2.2.

$$I = 1,23 \cdot V \quad (\text{Eq. 2.2})$$

2.2.5 Càlcul del consum

Amb l'enregistrament de les intensitats a través del *LabView* a la vegada també s'enregistraven el temps de procés, per tant per cada experiment s'ha pogut arribar a calcular l'energia necessària per dur-lo a terme i s'ha pogut comprovar quins processos consumeixen més energia, per després poder calcular l'empremta ambiental del procés. Per poder fer aquest càlcul d'energia primer de tot s'ha de calcular la potència amb l'equació 2.3.

$$P = \sqrt{3} \cdot I \cdot V \cdot \cos\varphi \quad (\text{Eq. 2.3})$$

On:

- P és la potència de la màquina en W.
- I és la intensitat consumida en A.
- V és el voltatge de la màquina en V, en aquets cas és 380 V.
- $\cos\phi$ és el desfasament de les intensitats de línia respecte a les tensions equilibrades, en aquets cas el valor és de 0,9.

Amb la potència consumida ja es pot trobar l'energia total del procés amb l'equació 2.4.

$$E = P \cdot t \quad (\text{Eq. 2.4})$$

On:

- E és l'energia consumida en J.
- t és el temps del procés en segons.

2.3 Mesura de temperatura

En el procés d'ISF l'eina sempre està en contacte amb la xapa i mentre es va realitzant la geometria es genera calor deguda a la fricció entre aquests dos elements. Per poder reduir aquesta fricció i, conseqüentment que no s'arribin a valors de temperatura molt elevats, s'utilitza lubricant.

Per poder mesurar les temperatures a les que s'arriben durant el procés s'ha utilitzat una càmera termogràfica, la qual enregistra imatges amb la distribució de temperatures sobre la superfície de la xapa, trobant en cada instant el valor màxim que s'assoleix. El lubricant farà que no s'enregistri directament la temperatura de la xapa, sinó que es mesura la temperatura que es condueix a través d'ell. Es pot veure un exemple de la mesura de temperatura a la Figura 2.8.

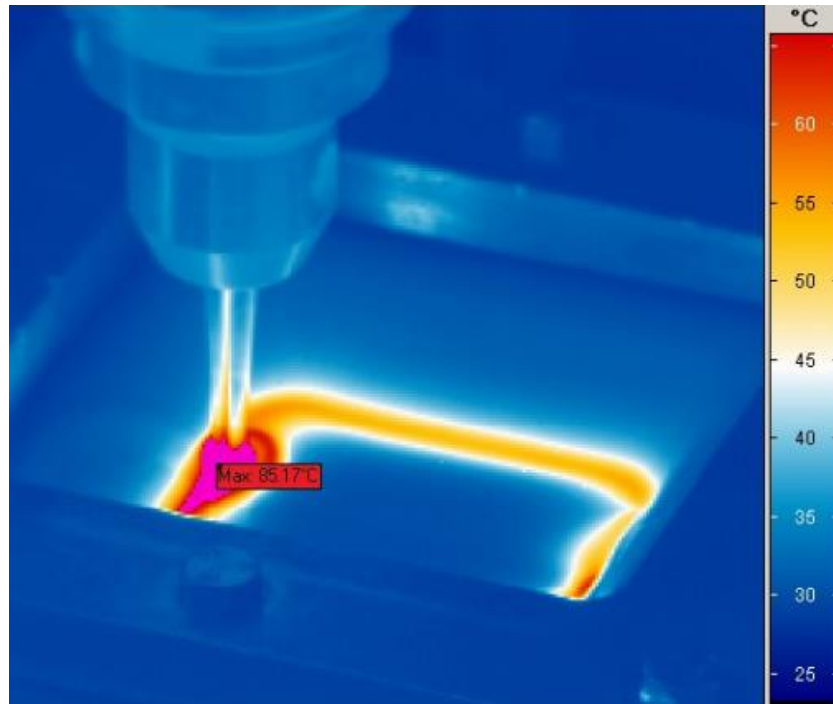


Figura 2.8 Mesura de temperatura amb la càmera termogràfica

La càmera termogràfica utilitzada és el model IRBIS ImageIR 33000 de la marca Infratec (Figura 2.9) que proporciona una alta resolució. Està equipada amb un trípode per poder col·locar-la correctament sense que es mogui durant el procés. Finalment, aquestes imatges enregistrades per la càmera han estat tractades amb el software IRBIS 3.0.



Figura 2.9 Càmera termogràfica

2.4 Mesura de rugositats

Amb el procés d'ISF s'obtenen diferents valors de rugositats en les peces conformades, aquesta rugositat depèn de diferents paràmetres de fabricació com poden ser la velocitat d'avanç, el pas incremental i la velocitat de rotació de l'eina. Per tal de poder quantificar aquestes rugositats s'ha utilitzat un rugosímetre Mitutoyo SurfTest SV-2000 i les dades obtingues s'han tractat amb el software Surfpack-SV Version 1.300.

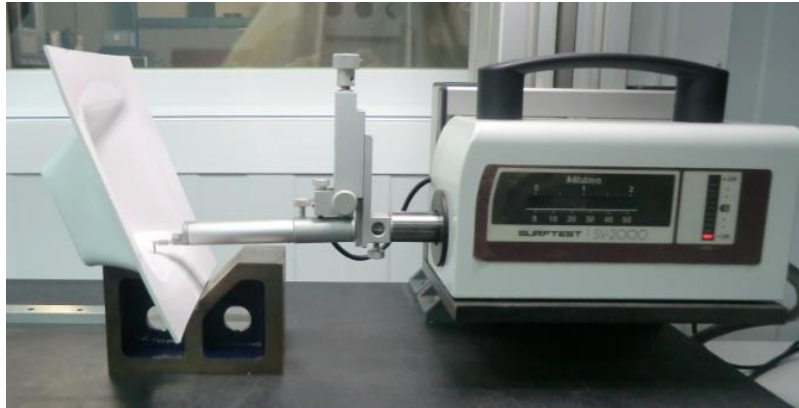


Figura 2.10 Rugosímetre

3 EXPERIMENTACIÓ

3.1 Geometria

Les geometries que s'obtenen amb ISF han anat evolucionat durant els anys amb diferents estudis. A mesura que s'han anat caracteritzant diferents paràmetres que es donen en la deformació s'ha pogut evolucionar de geometries més simples a geometries més complexes. Les primeres que es van utilitzar són les piràmides truncades (Ambrogio et al., 2004) i els cons truncats (Fratini et al., 2004) amb les que es van començar a determinar la influència de diferents paràmetres del procés en aspectes com la precisió dimensional, les forces necessàries per la deformació, les deformacions màximes a les quals es podien arribar, criteris de falla, etc. En l'actualitat, amb el model de fabricació SPIF, es fabriquen peces més complexes que poden tenir parets amb angles variables, amb radi generatiu, etc.

La geometria que s'ha utilitzat en els experiments ha estat una piràmide truncada amb generatriu circular, és a dir, que l'angle de la paret varia en cada increment de profunditat. L'amplada de la piràmide serà de 105 mm, que és el màxim que permet l'utilatge, amb un radi generatriu de 80 mm i una alçada màxima de 43 mm. Cal destacar que aquesta alçada màxima no s'ha obtingut en tots els experiments ja que la xapa es fractura abans i, per tant, s'ha parat el procés abans d'acabar tota la geometria perquè no tindria cap sentit seguir conformant la peça amb la xapa trencada. Pel que fa l'angle inicial de la paret ha estat de 45° perquè Le et al. (2008) demostra que la màxima formabilitat es produeix entre els 67° i 72° , així que si es comencés amb un angle molt petit es trigaria molt de temps a arribar a aquests valors, a més a més, amb aquest angle de 45° no es sotmet la xapa a un esforç que la pugui trencar a l'inici de la conformació. La geometria que es descriurà en els experiments es pot veure a la Figura 3.1.

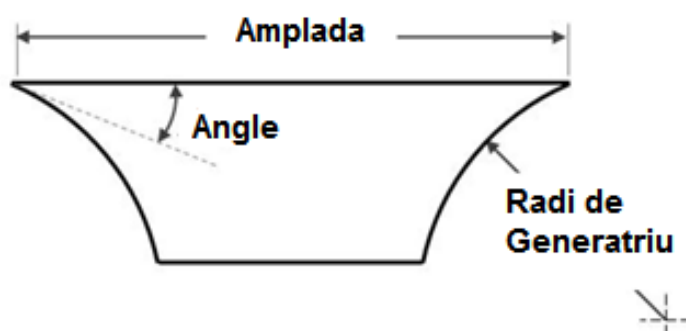


Figura 3.1 Geometria dels experiments

Aquesta geometria ha estat utilitzada en diferents estudis del procés d'ISF tant en metalls com en polímers. En metalls va ser utilitzada per Bagudanch (2011) i en polímers hi ha hagut diferents articles publicats on s'ha utilitzat:

- Franzen et al. (2008) va utilitzar una forma hiperbòlica truncada, la qual té gairebé el mateix perfil que el de la Figura 3.1, la diferència és que té una part al principi de la deformació que l'angle és constant.
- Le et al. (2008) va utilitzar el perfil de la Figura 3.1 ja que era un con truncat amb arc circular com a generatriu.
- Martins et al. (2009), Silva et al. (2010) i Marques et al. (2012) van utilitzar una geometria també semblat a la piràmide truncada, la diferència és que en els primers 25 mm de profunditat s'utilitza un angle constant i a partir d'aquí l'angle comença a ser variable.

Per tant, s'ha trobat adient la utilització d'aquesta geometria ja que hi ha moltes referències i se'n coneixen molts dels aspectes de deformació.

3.2 Material

Els materials polímers són materials relativament nous perquè la majoria no existeixen abans del segle XX, a diferència dels metalls i ceràmiques que ja es fabricaven a la prehistòria. Els polímers es sintetitzen a través dels hidrocarburs i estan compostos per macromolècules, les quals estan formades per un o varis monòmers que es repeteixen al llarg de tota una cadena. Així que, els monòmers són molècules orgàniques petites i reaccionen formant les cadenes llargues obtenint les macromolècules que formen els polímers.

Hi ha tres tipus de polímers: els termoplàstics, que els monòmers formen cadenes llargues i independents, els termoestables, on els àtoms van units en una xarxa d'enllaços covalents que engloba tot el material i resulten com si tot el material fos una única molècula, i els elastòmers, que és un cas intermedi entre els termoplàstics i els termoestables perquè tenen cadenes llargues i al llarg de la cadena hi apareixen alguns enllaços covalents. Aquestes estructures es poden veure a la Figura 3.2.

En aquest projecte només es detallaran les característiques dels termoplàstics, ja que els dos materials que s'utilitzen, policlorur de vinil (PVC) i policarbonat (PC), són d'aquest tipus.

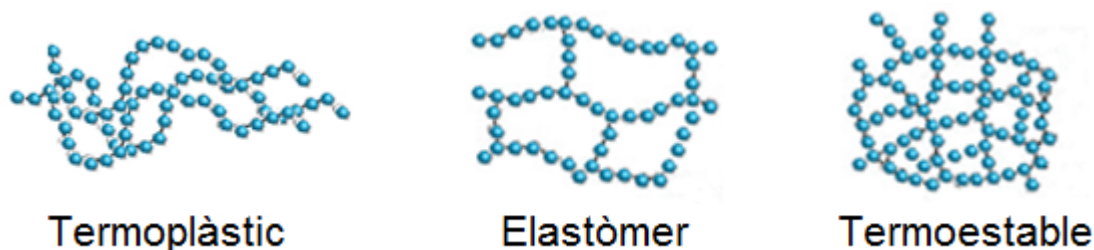


Figura 3.2 Estructura molecular dels polímers

Els termoplàstics poden tenir dues estructures moleculars diferents:

- Amorfa: Les cadenes polimèriques tenen una estructura totalment aleatòria i estan enredades entre elles, per tant completament desordenades. En aquests casos, quan es fa la deformació si un àtom es vol moure mourà tota la cadena i consegüentment aquesta propietat afavoreix a aquesta estructura.
- Cristal·lina: Les cadenes polimèriques tenen una estructura compacta i ordenada.

Es veurà més endavant que segons l'estructura que posseeixi el termoplàstic canvia les seves propietats mecàniques, tot i que no s'utilitzen polímers 100% cristal·lins.

Una de les característiques més importants en els termoplàstics és la temperatura de transició vítria (T_G) i és tant important com la temperatura de fusió (T_F). En un plàstic, sempre que no sigui completament cristal·lí, quan treballa a una temperatura inferior a la temperatura de transició vítria conserva l'estat sòlid on el moviment dels àtoms és molt més reduït, en canvi, quan la temperatura de treball es troba entre la vítria i de la fusió el plàstic es transforma en un estat gomós on hi ha molt moviment d'àtoms. Aquesta característica comporta unes propietats mecàniques que només es troben en els termoplàstics que es representen a la Figura 3.3. Es pot veure que en estat amorf i cristal·lí a la part vítria la rigidesa és semblant, la diferència és que un material amorf, és fràgil i no permet gaires deformacions, en canvi, amb l'estructura cristal·lina, sempre que es treballi per sota de la temperatura de fusió, el plàstic serà tenaç i tindrà una zona de deformació elàstica i una altra plàstica fins arribar a la fractura. Pels termoplàstics que no són cristal·lins, quan es treballa per sobre de la temperatura vítria, l'estat és gomós ja que l'embolic entre les cadenes impedeix que flueixin, això fa que el plàstic es transformi en tenaç i sempre està en la zona de deformació elàstica, sent necessaris uns esforços menors que els cristal·lins per obtenir la mateixa deformació.

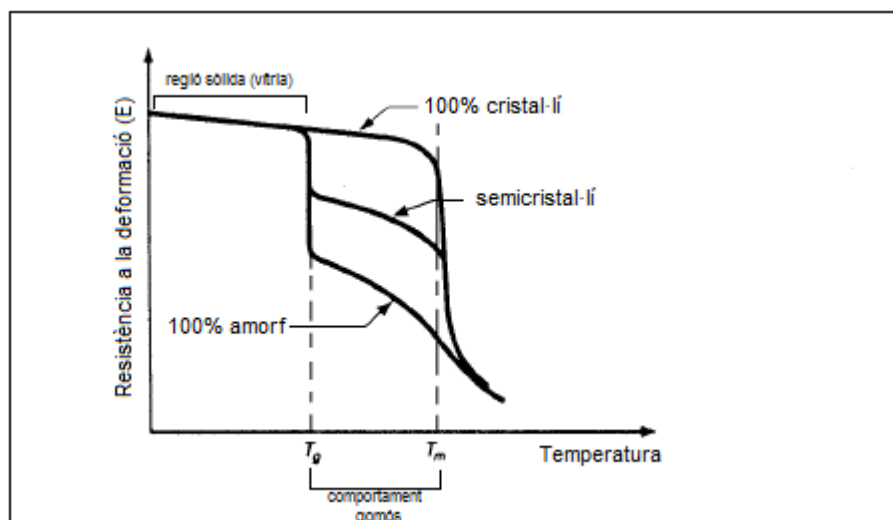


Figura 3.3 Comportament mecànic dels termoplàstics

3.2.1 Policarbonat (PC)

El policarbonat és un termoplàstic amb una estructura amorfa amb una elevada temperatura de transició vítrea (150°C), això fa que tingui unes excel·lents propietats mecàniques amb una tenacitat i resistència molt elevades i una bona resistència a la termofluència i es pugui utilitzar a temperatures elevades properes als 125°C. Per aquestes propietats descrites i per l'anterior utilització d'aquest material en diferents estudis (Martins et al., 2009 i Marques et al., 2012) s'ha considerat adient per la realització dels experiments, utilitzant xapes de 1,5 mm i 2 mm de gruix. A la Taula 3.1 es poden veure les propietats més importants del PC.

Taula 3.1 Propietats PC

Propietats PC	
Composició	$[C_3H_6(C_6H_4)_2CO_4]_n$
Mòdul elasticitat	2500 MPa
Resistència a la tensió	65 MPa
Elongació	110%
Temperatura de transició vítrea	150°C
Temperatura de fusió	230°C

3.2.2 Policlorur de vinil (PVC)

El policlorur de vinil s'obté amb un 57% de clorur de sodi i un 43% del petroli o gas natural, fent que sigui el polímer amb menys dependència del petroli. EL PVC té una estructura amorfa i la seva temperatura de transició vítrea és de 81 °C, per tant el seu rang de treball

idoni és entre els $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ i els $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, quan s'escalfa per sobre de 81°C passa a l'estat gomós, però una vegada refredat recupera la seva consistència inicial. Segons els plastificants que s'hi afegeixin pot ser flexible o rígid i pel projecte s'utilitza en estat rígid. Pel que fa a les seves propietats mecàniques té una bona resistència a l'impacte i és tenaç i una bona estabilitat tèrmica com és elevat és el seu pes molecular. Per aquestes raons descrites i per la utilització d'aquest material en diferents estudis (Franzen et al., 2008, Martins et al., 2009, Silva et al., 2010 i Marques et al., 2012) s'ha considerat una bona elecció per la realització dels experiments, amb uns gruixos de xapes iguals que els de PC. A la Taula 3.2 es poden veure les seves característiques principals.

Taula 3.2 Propietats del PVC

Propietats PVC	
Composició	$(\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl})_n$
Mòdul elasticitat	2800 MPa
Resistència a la tensió	40 MPa
Elongació	2%
Temperatura de transició vítria	81°C
Temperatura de fusió	212°C

3.3 Paràmetres de procés

3.3.1 Velocitat de rotació

La velocitat de rotació de l'eina determina les voltes que dona l'eina per minut i depenent de la rotació d'aquesta velocitat s'obtenen diferents acabats superficials. En aquest cas la Kondia pot treballar des de rotació lliure fins a les 24000 rpm.

3.3.2 Velocitat d'avanç

La velocitat d'avanç és la velocitat en la que es mou l'eina per sobre de la xapa. Els valors més utilitzats per aquesta tecnologia estan compresos entre 400 i 3000 mm/min. Per una velocitat de 400 mm/min es guanya molta seguretat durant el procés, ja que es pot controlar millor si la xapa trenca i a la vegada si falla algun paràmetre de procés es pot parar abans de que es creïn desperfectes en l'eina o els utilitatges. Amb una velocitat de 3000 mm/min es perd una mica de seguretat, però es guanya un estalvi energètic important ja que redueix molt el temps del procés, per tant pot semblar més adient treballar amb velocitats altes si es vol que la màquina tingui el menor impacte ambiental possible.

3.3.3 Pas incremental

Com ja s'ha comentat en l'apartat 1.1 en ISF després de cada trajectòria en el pla l'eina descendeix una profunditat determinada per fer la següent trajectòria al pla, aquesta profunditat és el pas incremental del procés. El pas incremental es pot determinar amb tres estratègies diferents que es poden veure a la Figura 3.4:

- Profunditat de baixada constant (Δz): l'eina es mou axialment amb un valor constant. L'acabat superficial no es gaire bo per parets que tinguin un angle baix perquè la separació entre capa i capa és elevada.
- Altura de cresta constant (Δh): l'eina es mou axialment, però en aquest cas el pas incremental entre cada capa depèn de la inclinació de la paret. Amb aquesta estratègia si que s'aconsegueixen bons acabats superficials en parets amb angles baixos.
- Increment angular constant ($\Delta\theta$): l'eina es mou axialment i l'angle de la punta de l'eina en cada pas incremental, respecte la posició anterior, ha de ser constant. Amb aquesta estratègia no s'obtenen bons acabats superficials en parets amb un angle d'inclinació elevat, ja que hi hauria molta distància entre capa i capa.

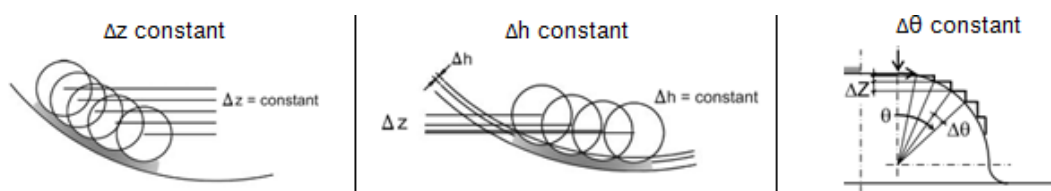


Figura 3.4 Estratègies de pas incremental

Per la geometria escollida per la realització del projecte es parteix d'un angle de 45° i va augmentat en cada passada, fins arribar a un angle màxim d'uns 80° , per tant l'estratègia a seguir és la de profunditat de baixada constant, ja que amb l'estratègia d'altura de cresta constant és per fer parets amb poca inclinació i amb la d'increment angular no s'obtenen bons acabats superficials en parets amb angles d'inclinació elevats.

3.3.4 Desplaçament horitzontal

Per la translació de l'eina sobre la xapa també hi ha tres estratègies diferents: el desplaçament en sentit únic, en dos sentits o en espiral. En el cas del sentit únic i espiral l'eina sempre es mou en les agulles del rellotge, la diferència és que en sentit únic després de cada capa el procés es para per baixar una profunditat i fer la següent capa, en canvi, en

espiral el procés no es para mai i va baixant a mesura que descriu la trajectòria de la capa. Per aquests dos casos el problema és que apareix el fenomen de la torsió perquè al girar sempre cap al mateix sentit, la fricció de l'eina amb la xapa fa que aquesta es quedi distorsionada en el sentit de les agulles del rellotge.

Per evitar aquest fenomen de la torsió en el projecte s'ha escollit el desplaçament en dos sentits, per tant una capa es fa en sentit horari i la capa següent en sentit antihorari, d'aquesta manera la distorsió que apareix en una capa queda contrarestada en la següent al anar en el sentit oposat.

3.3.5 Lubricant

Pel procés d'ISF és molt important que la superfície de treball estigui ben lubricada, això és perquè la xapa i l'eina estan en contacte constantment i d'aquesta manera s'aconsegueix reduir la fricció entre els dos elements. Amb la reducció de la fricció també es redueix la calor generada i conseqüentment es millora l'acabat superficial perquè el contacte no és tant abrasiu.

En diferents estudis que s'han efectuat com Franzen et al. (2008) i Silva et al. (2010) s'han utilitzat emulsions d'aigua i sabó, però dins el grup del GREP els últims treballs finals de carrera que s'han dut a terme (Bagudanch 2010, Lupiañez 2012 i Zambrano 2013) s'ha utilitzat el lubricant Houghton TD-52 ideal per la conformació en fred i amb el qual s'han obtingut bons resultats. Per tant, es considera aquest lubricant adequat per la realització dels experiments d'aquest projecte.

3.4 Disseny d'experiments (DOE)

Amb tots els paràmetres descrits a l'apartat 3.3 s'ha efectuat l'elecció de dos nivells de paràmetres, un nivell alt i un nivell baix. Amb la combinació d'aquests dos nivells es podrà fer un disseny d'experiments on cada experiment tingui una combinació diferent entre tots els nivells i així es podrà determinar la influència que tenen cada paràmetre en el consum del procés. Els valors dels dos nivells escollits per fer el disseny dels experiments es poden veure a la Taula 3.3.

Taula 3.3 Definició dels dos nivells de paràmetres

Factor	Nivell baix	Nivell alt
Pas incremental (mm)	0,2	0,5
Diàmetre de l'eina (mm)	6	10
Velocitat d'avanç (mm/min)	1500	3000
Velocitat de rotació (rpm)	Lliure*	2000
Gruix de la xapa (mm)	1,5	2,0

*Lliure significa que l'eina rotarà lliurement depenent de la fricció entre l'eina i la xapa.

Un cop definits els nivells s'ha efectuat un disseny exponencial reduït 2^{5-1} amb 16 experiments i s'ha utilitzat el programa Minitab perquè, a través de les dades dels dos nivells introduïdes, generés el DOE a realitzar, obtenint els experiments de la Taula 3.4.

Taula 3.4 Disseny d'experiments (DOE)

Nº experiment	Delta z (mm)	Diàmetre eina (mm)	Velocitat avanç (mm/min)	Velocitat rotació (rpm)	Gruix (mm)
1	0,2	6	3000	Lliure	1,5
2	0,2	6	1500	2000	1,5
3	0,5	10	3000	2000	2,0
4	0,2	6	1500	Lliure	2,0
5	0,5	10	1500	Lliure	2,0
6	0,5	6	3000	2000	1,5
7	0,5	6	1500	2000	2,0
8	0,5	6	1500	Lliure	1,5
9	0,5	10	1500	2000	1,5
10	0,2	6	3000	2000	2,0
11	0,2	10	1500	Lliure	1,5
12	0,2	10	1500	2000	2,0
13	0,5	6	3000	Lliure	2,0
14	0,2	10	3000	2000	1,5
15	0,2	10	3000	Lliure	2,0
16	0,5	10	3000	Lliure	1,5

S'han realitzat aquests experiments tant per les xapes de PC com per les de PVC i per cada un dels materials s'han fet tres rèpliques per poder corroborar que els valors obtinguts són correctes i poder detectar possibles errors en algun dels experiments.

Per poder determinar si l'ordre en que es fan els experiments influeix sobre el consum energètic durant el procés, es va decidir de fer dues de les rèpliques intercalant els de

rotació a 2000 rpm amb els de rotació lliure i una de les rèpliques per cada material es van fer executant tots els de rotació a 2000 rpm un darrera l'altre i posteriorment tots els de rotació lliure seguits.

Cal recordar que en cada un dels experiments s'han fet les mesures de forces necessàries per poder fer el procés de conformat, la intensitat consumida durant el procés per poder determinar l'energia necessària, el rang de temperatures que s'assoleixen en els experiments, l'alçada màxima assolida i, finalment, la rugositat obtinguda en cada peça per poder determinar la qualitat de l'acabat superficial en funció dels paràmetres de fabricació.

4 RESULTATS I DISCUSSIÓ

4.1 Estudi de temps i energia durant el procés

L'anàlisi energètic realitzat en aquest apartat està basat en l'anàlisi presentat a l'article "A comprehensive analysis of electric energy consumption of single point incremental forming processes", Ingarao et al. (2014), on s'analitzaven els consums energètics per fer unes determinades geometries amb diferents tecnologies per fer SPIF. En aquets cas s'ha pres atenció a l'anàlisi efectuat en un centre de mecanitzat adaptat a ISF, que tot i no ser el mateix en el que s'han efectuat els experiments d'aquest treball s'ha agafat com a referència per determinar si les tendències de potència són semblants o no per diferents estats i corroborar que els resultats obtinguts són correctes. Addicionalment en aquest projecte s'inclou l'estudi realitzat en materials metàl·lics i en materials polimèrics i, més endavant, s'analitzarà les propietats que es poden obtenir amb diferents paràmetres de procés i l'impacte mediambiental del procés amb polímers.

Amb aquesta referència, un dels estudis realitzats ha estat l'anàlisi del temps i la potència durant tot el procés de fabricació a la Kondia per poder identificar quins són els estats en què es consumeix més energia. Per fer aquest estudi, primerament, s'ha fet l'anàlisi en buit del procés per poder identificar els diferents modes de fabricació i identificar alguns dels paràmetres que més afecten al procés. Seguidament, s'han realitzat proves en materials polímers i metàl·lics per poder determinar si hi ha una dependència entre el material i l'energia consumida pel conformat de la peça i seguir identificant quins són els paràmetres més importants. Els experiments realitzats i el que es vol analitzar amb cada un d'ells fent-ne la comparació es pot veure a la Figura 4.1.

L'anàlisi del consum dels experiments efectuats en aquest apartat 4.1 ha estat realitzat des del repòs absolut del centre de mecanitzat fins que ja s'ha acabat el procés de conformat i el centre de mecanitzat queda parat una altra vegada. S'ha trobat adient fer-ho d'aquesta manera perquè així es poden veure els estats que corresponen a l'estat de fabricació i els que són de preparació o improductius. Per poder identificar els diferents estats s'ha calculat el temps amb un cronòmetre, amb el que es pot perdre precisió, però s'ha considerat que en processos que tenen una durada mínima d'uns 15 minuts no influeix molt si és comet un error de pocs segons. També cal especificar que tots aquests experiments han estat fets amb la xapa que ha de ser conformada ja fixada a l'utilatge, perquè el consum en aquest temps de preparació de la xapa dependria de la destresa de l'operari en extreure la xapa conformada anteriorment i la fixació de la següent.

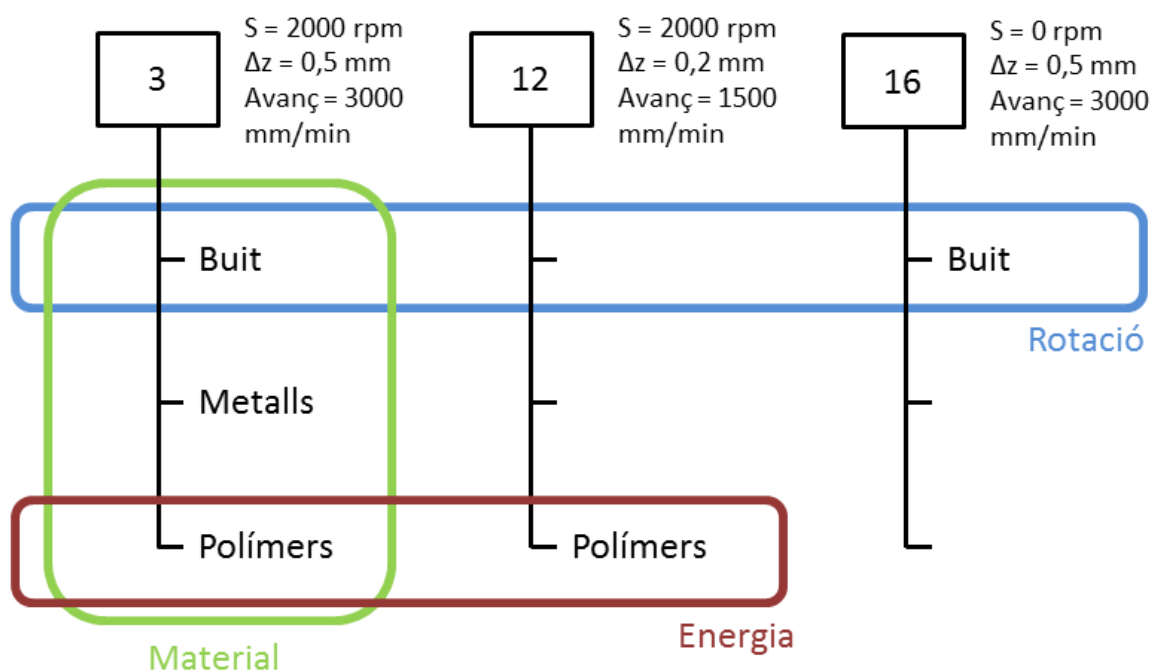


Figura 4.1 Experiments proposats per fer l'estudi energètic.

4.1.1 En buit

Els experiments realitzats en buit, és a dir, sense cap xapa fixada a l'utilatge, s'han dut a terme per poder identificar tots els modes en que treballa el centre de mecanitzat i poder determinar alguns dels paràmetres més importants del procés. Per fer aquest anàlisi, s'han seleccionat els experiments 3 i 16 especificats a la Taula 3.4, que són els experiments més curts, amb un pas incremental de 0,5 mm i una velocitat d'avanç de 3000 mm/min, l'única diferència és que un té una velocitat de rotació de l'eina de 2000 rpm i l'altre té la velocitat de rotació lliure. S'ha decidit donar importància al paràmetre de la velocitat de rotació perquè al treball final de carrera de Lupiañez (2012) el paràmetre més influent en el consum del centre de mecanitzat sempre era aquest.

Primer de tot s'analitzarà l'experiment 3 i es començarà analitzant la potència consumida durant tot el procés, que es calculava amb l'equació 2.3, per poder descriure tots els estats i els resultats es poden veure a Figura 4.2.

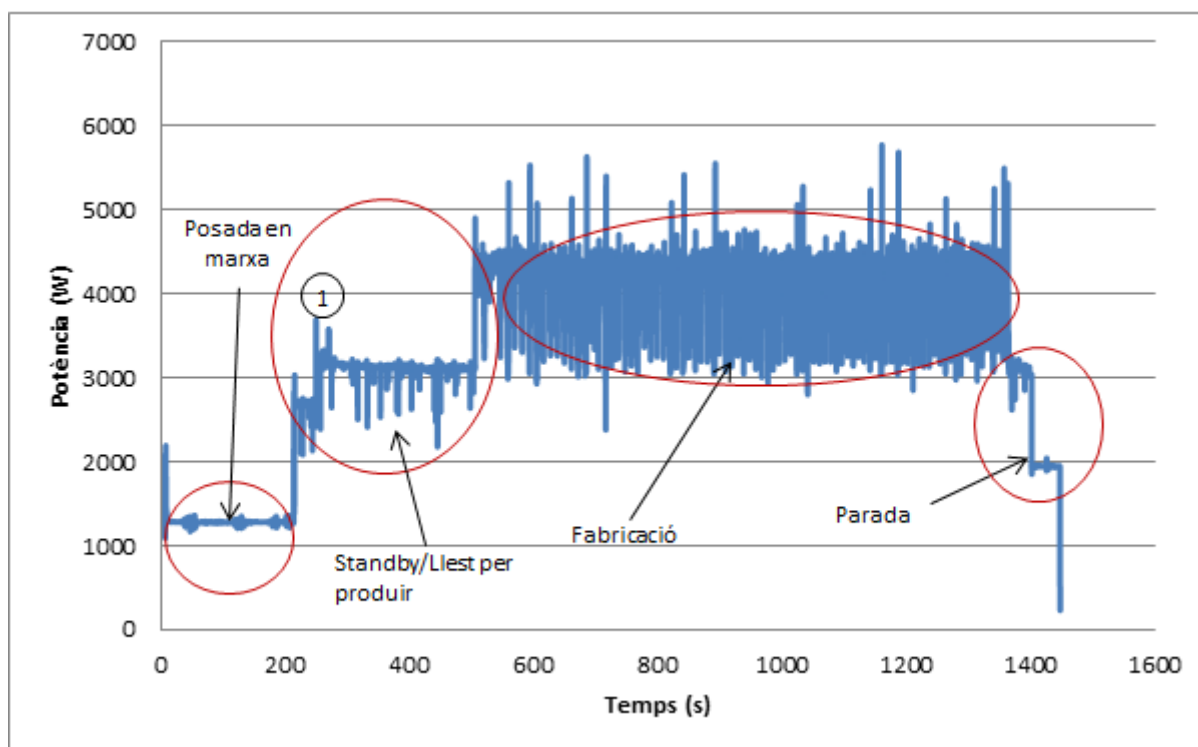


Figura 4.2 Gràfic de la potència consumida en l'experiment 3 en buit

A la Figura 4.2 es poden diferenciar 4 estats diferents encerclats en vermell corresponents al centre de mecanitzat durant tot el procés en funció de la potència consumida, on dins de cada estat hi pot haver diverses etapes. Es defineixen tots els estats de la màquina on s'expliquen totes les etapes que tenen englobades, i tot i que en alguns casos hi poden haver algunes diferències, en línies generals quan l'experiment es faci amb rotació, el perfil de la gràfica serà molt semblant a l'explicat a continuació:

- Posada en marxa: és quan la màquina parteix del repòs i se li subministra l'energia elèctrica per començar a engegar. Dins d'aquest estat hi ha dues etapes:
 - Engegar PC: Quan s'està engegant l'ordinador al qual està connectat el centre de mecanitzat.
 - Engegar CNC: En aquest moment es prepara el control numèric del centre de mecanitzat per poder començar a treballar.
- Standby / Llest per produir: Aquest estat correspon al moment en que s'està preparant la màquina per poder començar a carregar els programes d'execució de les peces. Consta de quatre etapes diferents:
 - Reset eixos: En aquest moment és quan s'activen els motors per poder moure el capçal i la taula de treball i, a la vegada, també queda apunt el circuit pneumàtic.

L'activació d'aquests elements es veu clarament amb el salt de potència que hi ha respecte l'estat anterior.

- Referència eixos: Es realitza el zero de la màquina per poder començar a referenciar el zero de la peça.
- Referència peça: Es fa el zero de la peça per poder conformar la geometria sobre la xapa que es desitja. En aquest cas el temps de durada és més incert perquè es fa de manera manual, així que dependrà de l'habilitat de l'operari. S'ha de comentar que en aquesta etapa es pot veure un increment de la potència (marcat amb un 1 a la Figura 4.2) mentre es fa el zero de la peça, aquest salt és degut a que s'activa la torre de refrigeració del capçal de la màquina. Aquesta activació depèn de les temperatures que s'assoleixin al capçal i, per tant, és un factor extern que no es pot controlar la seva activació.
- Càrrega CNC: Aquesta és l'etapa on es carrega el programa de control numèric que s'ha d'executar. En aquest cas també es veu un increment important de la potència, degut a que per poder executar el programa la rotació de la Kondia ha d'estar engegada. Per tant, es pot veure que pel fet d'engegar la rotació hi ha un increment important de consum de potència degut al consum del motor de la rotació del capçal.
- Fabricació: En l'estat de fabricació només es contempla una etapa. Es pot veure que la potència mitjana és constant durant tot el procés, però hi ha molts pics. Aquests pics són deguts a que en cada capa la rotació gira en sentits oposats al descriure la trajectòria una en sentit horari i l'altre antihorari, per tant, hi ha un pic de consum de potència cada vegada que la rotació s'engega i una disminució de la potència cada vegada que es para la rotació per poder començar a girar en sentit contrari.
- Parada: Aquest estat correspondrà a l'instant en que ja s'ha acabat de fabricar la peça. Consta de dues etapes:
 - Parada procés: Com que s'està fent l'experiment en buit s'arriba fins a la profunditat màxima de 43 mm i quan ja s'ha acabat de fer l'última capa el procés s'atura. Aquesta zona correspon a la zona amb més consum de potència de l'estat de parada, on hi ha el mateix consum des de que es fa el reset dels eixos de l'estat de standby, això és perquè el centre de mecanitzat està en repòs i preparat que s'executi un altre programa.
 - Parada màquina: Com que no s'executa cap altre programa es procedeix a parar la màquina. Aquesta zona correspon a la segona zona de l'estat de parada, amb menys consum de potència, aquesta baixada de consum és degut a que es deshabiliten els motors i el circuit pneumàtic, per tant seria un consum com en

l'estat de posada en marxa, en aquest cas més alt perquè hi ha la refrigeració engegada.

Amb el gràfic de la Figura 4.2 es pot veure que el consum de potència és molt més important en l'etapa de fabricació però per corroborar-ho es fa un anàlisi del temps gastat en cada etapa i l'energia necessària. Amb la Figura 4.3 es pot veure que el l'etapa de fabricació és la més llarga de totes amb un 58,71% del temps emprat, tot i que l'experiment 3 és el més curt que hi ha amb rotació, per tant, és evident que per tots els processos l'etapa de fabricació serà la que més temps gastarà.

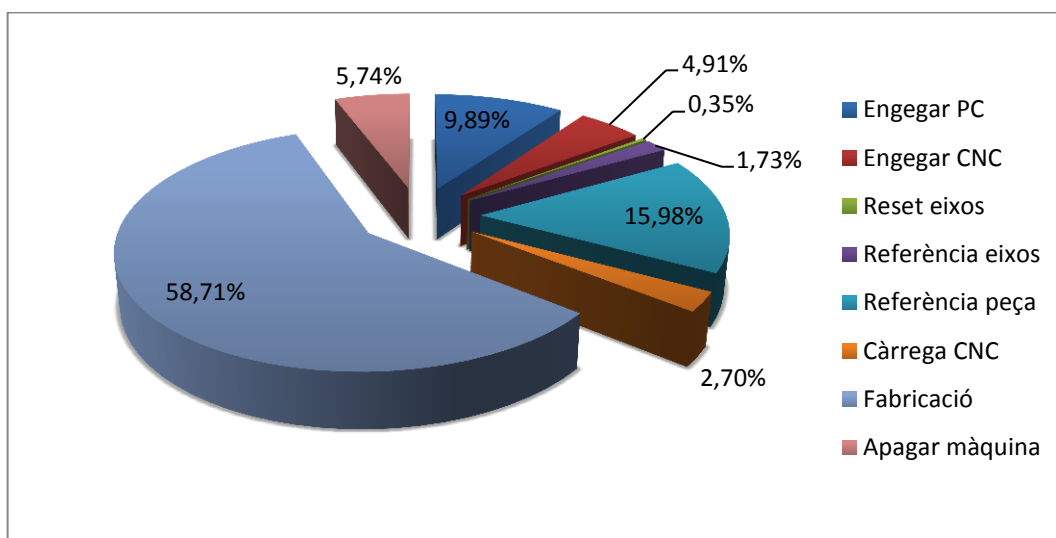


Figura 4.3 Percentatge dels temps de cada etapa en l'experiment 3 en buit

Però no només és important quantificar el temps, sinó que també s'ha de tenir en compte l'energia consumida durant el procés, que s'obté amb les dades de potència i de temps de cada etapa. A la Taula 4.1 es pot veure el resum de totes les dades i, finalment, es pot observar que l'etapa de més consum energètic és la de fabricació, ja que no només és la que més temps ocupa, sinó que també és la que més potència consumeix, i representa un 71,45 % dels 4948,08 kJ totals que es consumeixen durant tot el procés de conformació.

Seguidament, per identificar si el fet de tenir la rotació activada o desactivada afecta sobre el patró de consum del centre de mecanitzat es fa el mateix anàlisi realitzat per l'experiment 3, però en aquest cas per l'experiment 16 com ja s'ha comentat anteriorment. Primerament, s'analitza la gràfica de consum de potència presentada a la Figura 4.4 on les etapes són exactament iguals que en el cas anterior però hi ha diferències significatives en algunes parts del procés.

Taula 4.1 Anàlisi de temps i energies de l'experiment 3 en buit

Modes de la màquina	Descripció	Temps total (s)	Percentatge temps (%)	Potència (W)	Energia (kJ)	Percentatge energia (%)
Posada en marxa	Engegar PC	143	9,89%	1285,42	183,82	3,71%
	Engegar CNC	71	4,91%	1291,35	91,69	1,85%
Standby/Llest per produir	Reset eixos	5	0,35%	2701,17	13,51	0,27%
	Referència eixos	25	1,73%	2689,32	67,23	1,36%
	Referència peça refrigeració parada	5	0,35%	2671,55	13,36	0,27%
	Referència peça refrigeració engegada	226	15,63%	3127,67	706,85	14,29%
	Càrrega CNC	39	2,70%	3382,38	131,91	2,67%
Fabricació	Fabricació	849	58,71%	4164,30	3535,49	71,45%
Parada	Parada procés	37	2,56%	3103,97	114,85	2,32%
	Aparar màquina	46	3,18%	1942,95	89,38	1,81%
ENERGIA TOTAL					4948,08	

Primer de tot, s'ha de comentar que en aquest cas la torre de refrigeració del capçal ha estat parada des del moment en què s'ha engegat la màquina fins que s'ha aturat, així que no hi ha cap punt en que es vegi que la potència augmenta. Pel que fa als dos primers estats hi ha el mateix comportament que en el cas anterior, i en aquest cas s'observa més clarament l'efecte de que la rotació ha d'estar engegada per poder carregar el programa que s'ha d'executar (marcat a la Figura 4.4 amb un 1). La diferència més important és en l'etapa de fabricació, ja que al no tenir la rotació engegada no apareix el consum del motor que subministra la velocitat de rotació i la potència necessària és la mateixa que en l'estat de standby perquè només es necessiten activats els motors dels eixos, que ja estaven activats anteriorment. Així quan el procés de conformat arriba als 43 mm de profunditat, torna a quedar en l'etapa de parada del procés esperant l'execució d'un nou programa o l'ordre d'aparar la màquina. En aquest cas s'apaga la màquina i quan els motors dels eixos queden desabilitats la potència consumida es redueix fins als mateixos nivells de consum que en l'etapa de posada en marxa, fins que finalment s'acaba s'apaga del tot.

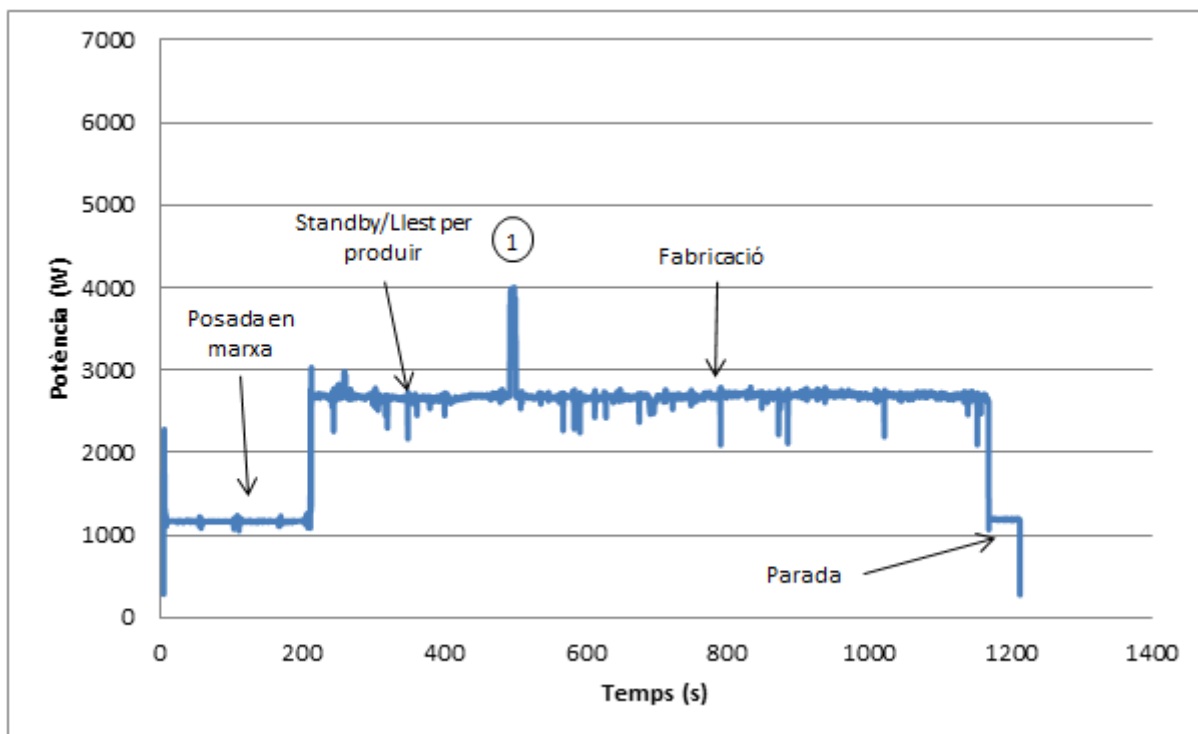


Figura 4.4 Gràfic de la potència consumida en l'experiment 16 en buit

Veient que hi ha una diferència important de consum de potència respecte l'experiment amb la rotació activada, s'analitza el temps de cada etapa i a la Figura 4.5 es pot veure que l'etapa de fabricació segueix estant la més important en quant al percentatge del temps de funcionament i que es manté el mateix patró que en l'experiment 3. Hi ha una sensible rebaixa del percentatge del temps de fabricació i és conseqüència de que com que no es té rotació, en cada capa no s'ha d'esperar que la rotació es pari i es torni a engegar en sentit contrari, d'aquesta manera es redueix el temps de fabricació. Aquesta condició es corrobora amb el temps de fabricació de cada experiment on en l'experiment 3 és de 849 segons (Taula 4.1) i per l'experiment 16 és de 633 segons (Taula 4.2). Tenint en compte que totes les altres condicions de treball són les mateixes, amb la rotació no només augmenta el consum de potència, sinó que també augmenta el temps necessari per realitzar la peça, i conseqüentment també fa augmentar el consum energètic.

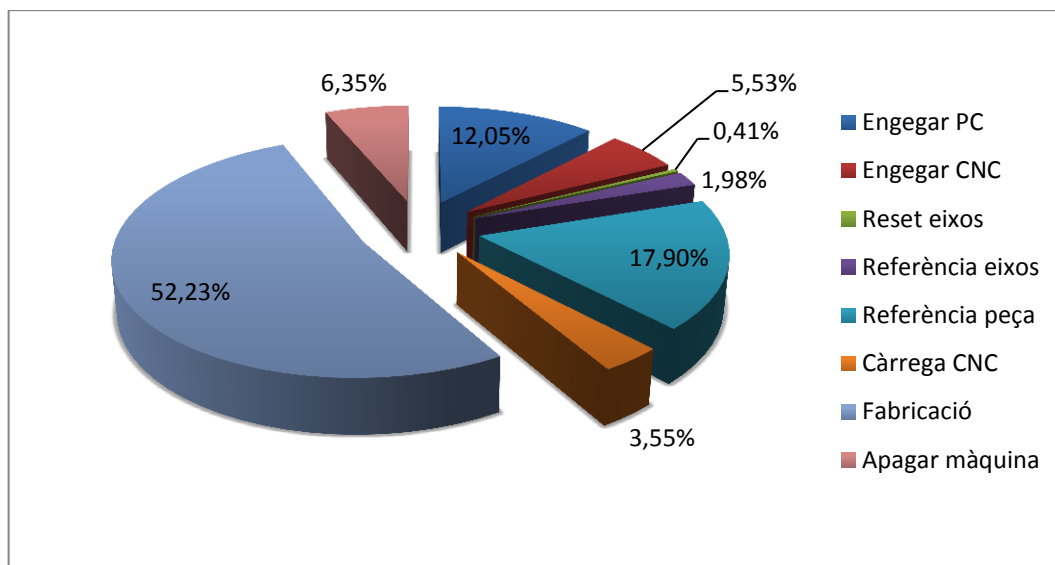


Figura 4.5 Percentatge dels temps de cada etapa en l'experiment 16 en buit

Finalment, es poden veure les dades d'energia consumides en cada etapa del procés a la Taula 4.2 on s'observa que l'etapa de fabricació segueix estant l'etapa de més consum d'energia representat un 59,13% del total, i en aquest cas també guanya una mica més d'importància l'etapa de la referència de la peça que passa a consumir el 20,18 % de l'energia total.

Taula 4.2 Anàlisi de temps i energies de l'experiment 16 en buit

Modes de la màquina	Descripció	Temps total (s)	Percentatge temps (%)	Potència (W)	Energia (kJ)	Percentatge energia (%)
Posada en marxa	Engegar PC	146	12,05%	1172,88	171,24	5,96%
	Engegar CNC	67	5,53%	1178,80	78,98	2,75%
Standby/Llest per produir	Reset eixos	5	0,41%	2701,17	13,51	0,47%
	Referència eixos	24	1,98%	2683,40	64,40	2,24%
	Referència peça	217	17,90%	2671,55	579,73	20,18%
	Càrrega CNC	43	3,55%	2890,72	124,30	4,33%
Fabricació	Fabricació	633	52,23%	2683,40	1698,59	59,13%
Parada	Parada procés	34	2,81%	2665,63	90,63	3,16%
	Apagar màquina	43	3,55%	1190,65	51,20	1,78%
ENERGIA TOTAL					2872,57	

Per concloure l'anàlisi dels experiments en buit comentar que és cert que en tots els experiments l'etapa de fabricació és la més important, però amb les dades mostrades s'observa que hi ha una gran diferència de consum amb rotació i sense. En aquest cas no es poden comparar directament les energies consumides durant l'etapa de fabricació perquè en un cas la refrigeració està parada i en l'altre està engegada, però es pot fer el càlcul de la potència teòrica que s'hauria consumit amb la refrigeració engegada en l'experiment 16. A les dades de la Taula 4.1 es pot veure que en el moment d'engegar-se la refrigeració hi ha un salt de potència de 456,12 W, per tant, com que la intensitat consumida per la unitat refrigeradora serà sempre més o menys la mateixa es pot sumar aquesta potència a la potència consumida en l'experiment 16 durant el procés de fabricació, d'aquesta manera s'obté la potència teòrica que hauria tingut si la refrigeració hagués estat engegada. En l'experiment 16 la potència és de 2683,4 W i la potència teòrica amb la refrigeració seria de 3139,52 W, coneixent aquesta potència i el temps de fabricació l'energia consumida durant el procés hauria estat de 1987,32 kJ. Així que si en l'experiment 3 hi ha un consum total de 3535,49 kJ i en l'experiment 16 hi ha un consum teòric de 1987,32 kJ, pel fet de tenir la rotació engegada, tenint en compte que els altres paràmetres de procés són iguals, suposa un augment de consum d'energia del 77,8%, per tant el paràmetre de la rotació és un factor clau a tenir en compte en els experiments. Cal dir que no en tots els casos serà exactament aquest valor perquè les intensitats consumides no sempre són constants, però s'ha considerat admetre l'error per poder obtenir un valor aproximat i poder quantificar de manera aproximada la importància de la rotació en el consum d'energia.

4.1.2 Metalls

Pel que fa als metalls, s'ha fet l'experiment 3 del DOE en acer i alumini, d'aquesta manera es podran comparar els resultats obtinguts amb els altres materials i es podrà determinar si el material té alguna influència en el consum energètic en aquest centre de mecanitzat Kondia. S'ha de tenir en compte que en aquests experiments ja no sempre s'acaba a la profunditat de 43 mm, perquè si la xapa de metall trenca abans d'assolir la geometria programada es para el procés amb la parada d'emergència, així que és més difícil de comparar els valors de les energies consumides perquè no és segur que trenquin sempre a la mateixa profunditat.

Primerament, es presenten els resultats de l'experiment realitzat en xapa d'alumini i s'observa a la Figura 4.6 que el comportament de consum de potència segueix essent el mateix que en els casos anteriors i amb els mateixos rangs de potència. En aquest cas la unitat refrigeradora s'engega mentre s'està fent la referència de la peça (marcat amb el

número 1 a la Figura 4.6). En aquest cas s'hi introdueix una petita variant en l'estat de parada, on apareix una nova etapa. Com que la peça es trenca abans d'arribar a la profunditat de 43 mm, en aquest cas a una profunditat de 39,5 mm, s'atura el procés amb la parada d'emergència. Aquesta parada es pot veure a la zona marcada amb un 2 a la Figura 4.6, on es passa d'una potència mitjana d'uns 4000 W a una potència aproximada de 1900 W, aquesta caiguda és deguda a que al parar el procés amb la parada d'emergència es deshabiliten els motors de moviment dels eixos i el circuit pneumàtic. Per poder treure la peça que s'ha conformat s'ha de tornar a fer el reset als eixos per poder moure la taula i poder col·locar una peça nova, així que quan es fa el reset es torna als nivells habituals de l'etapa standby amb un consum aproximat d'uns 3000 W. Finalment, es para la màquina com en els casos esmentats anteriorment.

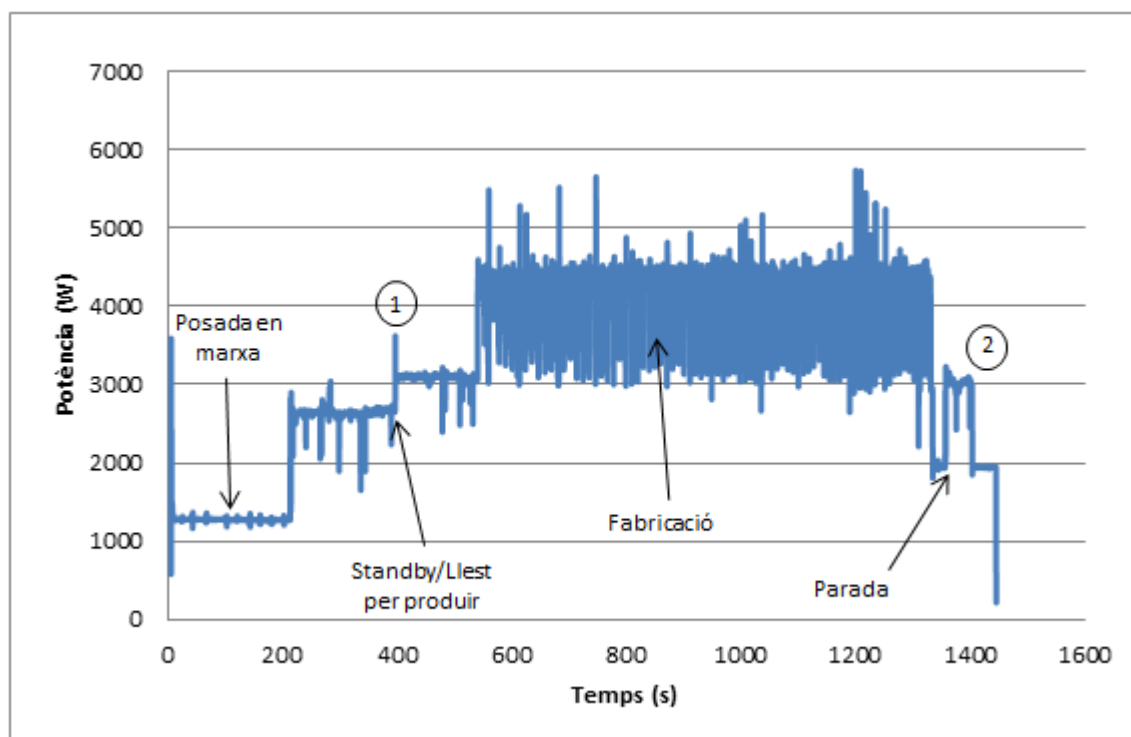


Figura 4.6 Gràfic de la potència consumida en l'experiment 3 amb alumini

Pel que fa al repartiment de temps entre les diferents etapes i el consum d'energia es poden veure els resultats a la Taula 4.3 on es segueix veient la mateixa tendència que fins ara on l'etapa de fabricació té un pes important dins el temps total, en aquest cas en un 53,43%, cosa que fa que l'energia consumida sigui del 67,36% dels 4765,65 kJ consumits durant tot el procés.

Taula 4.3 Anàlisi de temps i energies de l'experiment 3 amb alumini

Estats de la màquina	Etapes	Temps total (s)	Percentatge temps (%)	Potència (W)	Energia (kJ)	Percentatge energia (%)
Posada en marxa	Engegar PC	146	10,10%	1291,35	188,54	3,96%
	Engegar CNC	68	4,71%	1273,58	86,60	1,82%
Standby/Llest per produir	Reset eixos	5	0,35%	2410,91	12,05	0,25%
	Referència eixos	30	2,08%	2636,01	79,08	1,66%
	Referència peça refrigeració parada	148	10,24%	2636,01	390,13	8,19%
	Referència peça refrigeració engegada*	113	7,82%	3098,05	350,08	7,35%
	Càrrega CNC	52	3,60%	3536,40	183,89	3,86%
	Fabricació	Fabricació	772	53,43%	4158,38	3210,27
Parada	Parada emergència	23	1,59%	1966,64	45,23	0,95%
	Reset eixos	46	3,18%	3009,20	138,42	2,90%
	Aparar màquina	42	2,91%	1937,02	81,35	1,71%
				ENERGIA TOTAL	4765,65	

Per poder tenir més dades per poder confirmar si el material afecta o no al consum també es realitza l'experiment 3 amb acer. Com es pot observar a la Figura 4.7 la potència segueix tenint el mateix perfil de consum de potències en cada estat. El que es pot observar és que en aquets cas la unitat refrigeradora s'activa a la meitat de l'etapa de fabricació, vist amb el salt de tendència que hi ha en el consum de potència en aquesta etapa marcat amb un 1 a la Figura 4.7, i així queda clar que l'activació d'aquesta unitat és un fenomen que no es pot controlar i s'activa aleatòriament. També es pot veure que el procés s'ha parat amb la parada d'emergència veient la tendència marcada amb un 2 a la Figura 4.7 i es corrobora amb el fet de que durant l'experiment la xapa va trencar-se a una profunditat de 42,5 mm.

Finalment, a la Taula 4.4 s'observa que el percentatge de temps de fabricació és de 54,77% i l'energia consumida durant el procés de fabricació són el 69,74 % dels 4832,73 kJ consumits durant tot el procés.

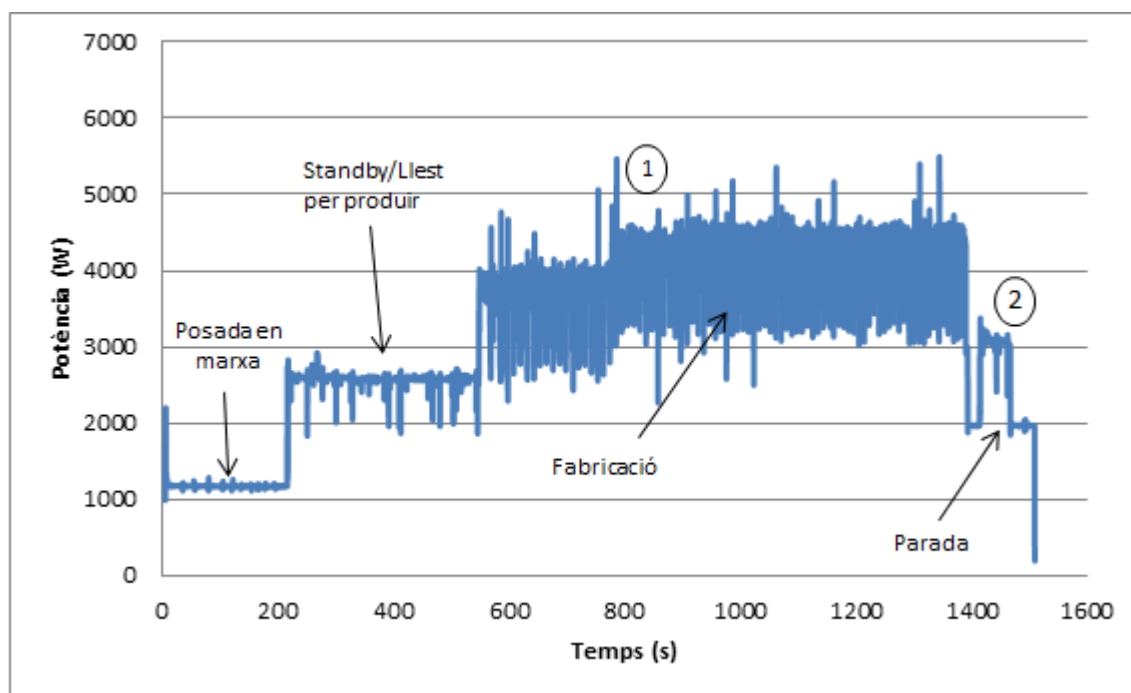


Figura 4.7 Gràfic de la potència consumida en l'experiment 3 amb acer

Taula 4.4 Anàlisi de temps i energies de l'experiment 3 amb acer

Estats de la màquina	Etales	Temps total (s)	Percentatge temps (%)	Potència (W)	Energia (kJ)	Percentatge energia (%)
Posada en marxa	Engegar PC	147	9,75%	1178,80	173,28	3,59%
	Engegar CNC	69	4,58%	1172,88	80,93	1,67%
Standby/Llest per produir	Reset eixos	5	0,33%	2304,29	11,52	0,24%
	Referència eixos	29	1,92%	2588,62	75,07	1,55%
	Referència peça	260	17,24%	2576,77	669,96	13,86%
	Càrrega CNC	56	3,71%	2973,65	166,52	3,45%
Fabricació	Fabricació amb refrigeració parada	211	13,99%	3696,33	779,93	16,14%
	Fabricació amb refrigeració engegada*	615	40,78%	4211,69	2590,19	53,60%
Parada	Parada emergència	22	1,46%	1990,33	43,79	0,91%
	Reset eixos	52	3,45%	3056,58	158,94	3,29%
	Apagar màquina	42	2,79%	1966,64	82,60	1,71%
ENERGIA TOTAL					4832,73	

Així que veient els resultats i comparant-los amb els obtinguts en l'experiment 3 en buit, sembla que no hi ha dependència del material pel consum de potència del centre de mecanitzat, tot i que aquesta afirmació s'acabarà d'analitzar a l'apartat següent.

4.1.3 Polímers

En polímers s'ha volgut analitzar el mateix que en l'apartat 4.1.1, però en aquest cas veient que la rotació és un fenomen molt important, s'ha decidit realitzar dos casos extrems per l'anàlisi de com influeixen els altres paràmetres en el consum d'energia del procés de conformat tant en policarbonat com en policlorur de vinil. Els dos casos extrems escollits són l'experiment 3, que és el més ràpid amb la rotació activada ja que té un avanç de 3000 mm/min i un pas incremental de 0,5 mm, i l'altre és l'experiment 12 que és el més llarg de tots, amb una velocitat d'avanç de 1500 mm/min i un pas incremental de 0,2 mm, els dos efectuats amb policarbonat. S'ha de tenir en compte, com en el cas dels metalls, que no sempre s'arriba a la profunditat de 43 mm de la geometria dissenyada.

Primerament, es presenta la corba característica de consum de potència en l'experiment 3 amb policarbonat de la Figura 4.8, on s'observa que segueix el mateix patró que en els casos anteriors i en aquest cas la unitat refrigeradora s'engega en el moment que s'estava realitzant la referència dels eixos (marcat amb un 1 a la Figura 4.8) i també hi ha l'aturada del procés amb la parada d'emergència ja que la xapa va trencar a una profunditat de 32,5 mm i es pot veure representat a la zona marcada com amb el número 2 de la Figura 4.8.

Pel que fa a l'anàlisi del temps s'observa a la Figura 4.9 que l'etapa de fabricació segueix essent la que major temps ocupa amb un 48,31% del temps, tot i haver trencat abans d'arribar als 43 mm de profunditat. El percentatge del consum d'energia en l'etapa de fabricació també es redueix al escurçar el temps del procés, tal i com es veu a la Taula 4.5, però segueix essent l'etapa amb un pes més important amb un percentatge del 61,32%.

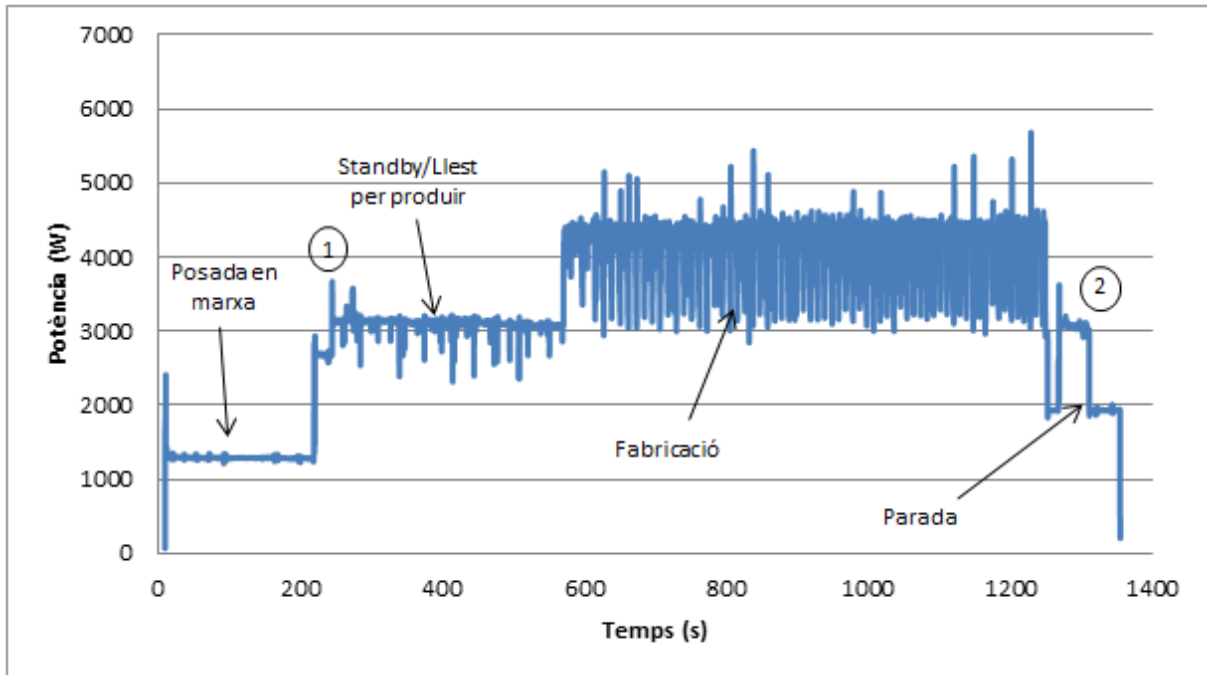


Figura 4.8 Gràfic de la potència consumida en l'experiment 3 amb policarbonat

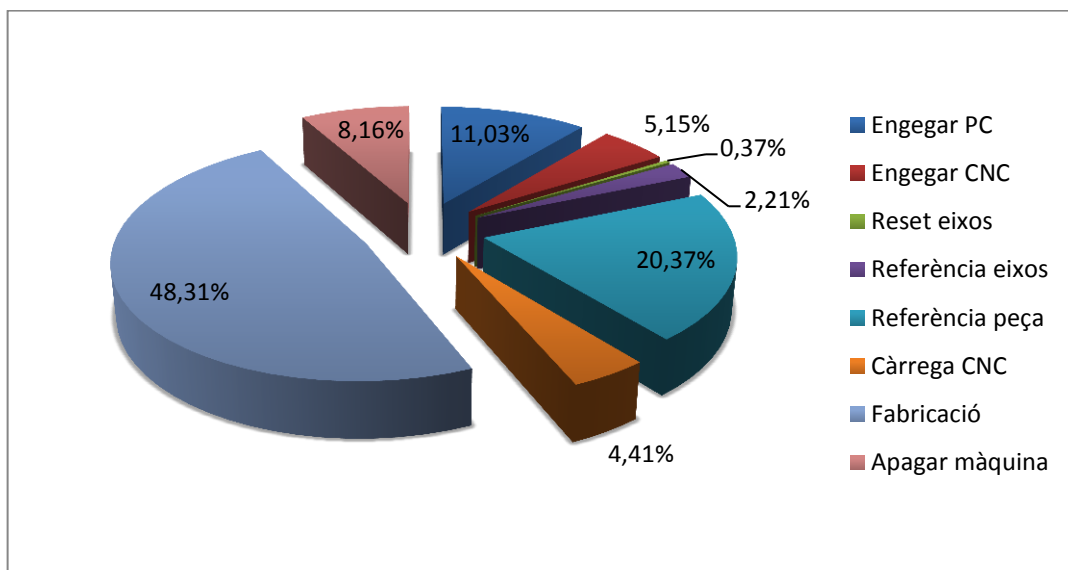


Figura 4.9 Percentatge dels temps de cada etapa en l'experiment 3 amb policarbonat

Taula 4.5 Anàlisi de temps i energies de l'experiment 3 amb policarbonat

Modes de la màquina	Descripció	Temps total (s)	Percentatge temps (%)	Potència (W)	Energia (kJ)	Percentatge energia (%)
Posada en marxa	Engegar PC	150	11,03%	1297,27	194,59	4,36%
	Engegar CNC	70	5,15%	1285,42	89,98	2,01%
Standby/Llest per produir	Reset eixos	5	0,37%	2505,69	12,53	0,28%
	Referència eixos refrigeració parada	20	1,47%	2677,47	53,55	1,20%
	Referència eixos refrigeració engegada	10	0,74%	3133,59	31,34	0,70%
	Referència peça	277	20,37%	3115,82	863,08	19,32%
	Càrrega CNC	60	4,41%	3483,08	208,99	4,68%
Fabricació	Fabricació	657	48,31%	4170,22	2739,84	61,32%
Parada	Parada emergència	18	1,32%	1925,17	34,65	0,78%
	Reset eixos	43	3,16%	3074,36	132,20	2,96%
	Apagar màquina	50	3,68%	2144,35	107,22	2,40%
ENERGIA TOTAL					4467,96	

El més interessant en aquest apartat de polímers és poder comparar els dos experiments proposats al ser extrems, per poder treure les conclusions de la influència dels paràmetres sobre el consum de l'energia. Es mostra a la Figura 4.10 la corba de consum de potència en l'experiment 12 amb policarbonat, on es pot veure que es segueix tenint la mateixa tendència en el consum de les potències en cada estat, respecte els altres experiments amb rotació, però en aquest cas la refrigeració ha estat en marxa des del mateix moment en què s'ha posat en funcionament el centre de mecanitzat. Així que veient les gràfiques de potència sembla que la velocitat d'avanç i el pas incremental no afecten al consum de potència, la qual cosa s'analitzarà més endavant en aquest mateix apartat.

Respecte el temps de procés en aquest experiment, tot i que el procés s'ha parat a la profunditat de 30,2 mm, hi ha un augment significatiu del pes del temps emprat en el l'etapa de fabricació fins arribar a un pes del 74,25%, tal i com es pot veure a la Figura 4.11, així que és evident que els paràmetres del pas incremental i la velocitat d'avanç són un paràmetre molt influent en el temps necessari per dur a terme la geometria i, conseqüentment, amb un augment del consum d'energia. Aquest augment d'energia es pot veure a la Figura 4.11 on la fabricació ja representa un 82,20% del consum total i els altres estats ja queden en un segon pla totalment.

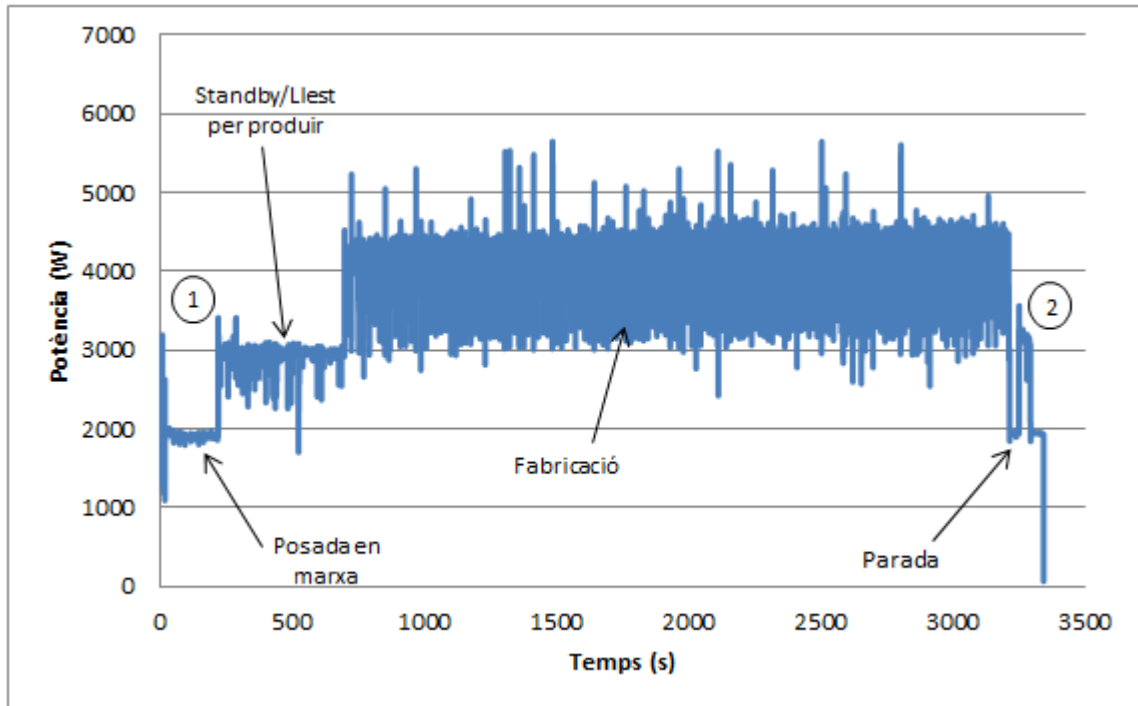


Figura 4.10 Gràfic de la potència consumida en l'experiment 12 amb policarbonat

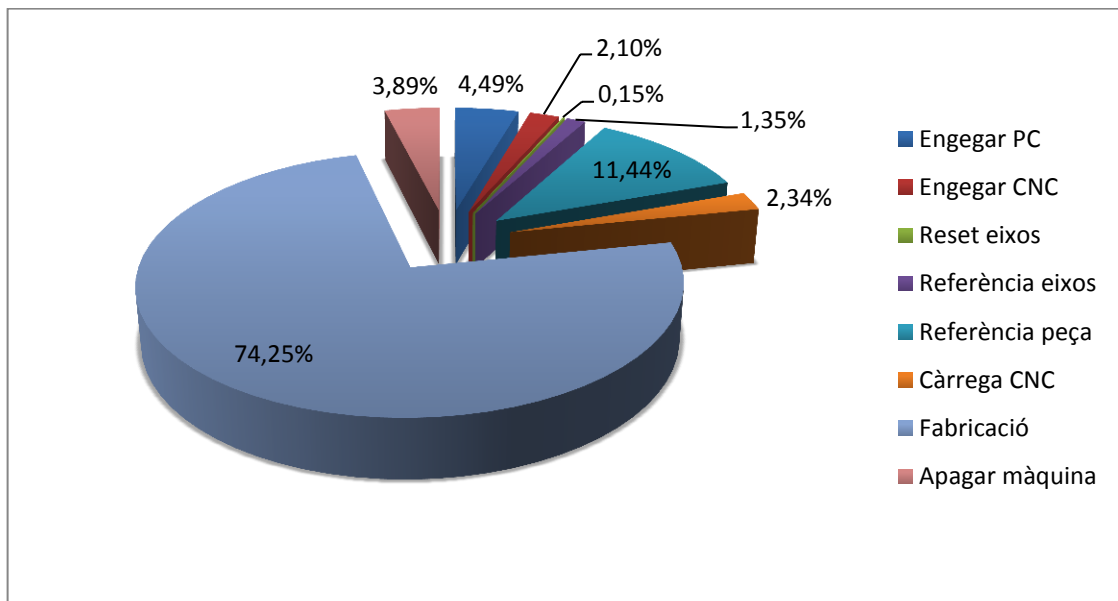


Figura 4.11 Percentatge dels temps de cada etapa en l'experiment 12 amb policarbonat

Taula 4.6 Anàlisi de temps i energies de l'experiment 12 amb policarbonat

Modes de la màquina	Descripció	Temps total (s)	Percentatge temps (%)	Potència (W)	Energia (kJ)	Percentatge energia (%)
Posada en marxa	Engegar PC refrigeració parada	18	0,54%	1315,04	23,67	0,19%
	Engegar PC refrigeració engegada*	132	3,95%	1913,33	252,56	1,99%
	Engegar CNC	70	2,10%	1907,40	133,52	1,05%
Standby/Llest per produir	Reset eixos	5	0,15%	3026,97	15,13	0,12%
	Referència eixos	45	1,35%	2973,65	133,81	1,05%
	Referència peça	382	11,44%	2967,73	1133,67	8,92%
	Càrrega CNC	78	2,34%	3423,85	267,06	2,10%
Fabricació	Fabricació	2480	74,25%	4211,69	10444,99	82,20%
Parada	Parada emergència	38	1,14%	1937,02	73,61	0,58%
	Reset eixos	43	1,29%	3115,82	133,98	1,05%
	Apagar màquina	49	1,47%	1937,02	94,91	0,75%
					ENERGIA TOTAL	12706,92

Com que en tots els casos que s'han estudiat fins ara el comportament de consum de potència dels estats anteriors i posteriors de l'etapa de fabricació són molt semblants, només depenen de l'efecte de si la refrigeració està parada o engegada, pel cas del PVC es va optar per no fer l'anàlisi dels experiments des de l'inici fins al final, per no haver de parar i engegar la màquina cada vegada, sinó que només s'ha analitzat en detall l'etapa de fabricació i s'ha fet una estimació del consum de potència dels altres estats utilitzant totes les dades de potència i de temps enregistrades pels casos anteriors, essent evident que no s'obtenen valors exactes i es comet un error, però que no és important pel tractament de les dades. Per poder fer aquesta estimació s'han de calcular els temps i potències mitjanes de cada etapa prenent com a referència tots els casos anteriors, on aquestes dades es poden veure a la Taula 4.7.

Taula 4.7 Temps i potències mitjanes de cada etapa del procés

Estats	Temps (s)	Potències sense refrigeració (W)	Potències amb refrigeració (W)
Engegar PC	147	1273,55	1913,33
Engegar CNC	208	1240,41	1907,40
Reset eixos	5	2561,11	3026,97
Referència eixos	31	2652,59	3053,62
Referència peça	271	2638,97	3077,32
Càrrega CNC*	42	2603,51	3062,24
Parada emergència	25	1256,98**	1954,79
Reset eixos	42	2665,63	3071,97
Apagar màquina	45	1190,65	1985,60

*Només es té en compte la part en que la rotació no està engegada per carregar el programa CNC, perquè sinó fa pujar la mitjana. La rotació per la càrrega de CNC està inclosa dins les dades de fabricació enregistrades en el moment de fer la peça.

**No es tenia cap dada per aquesta situació, però tenint en compte que als gràfics de consum de potència es pot veure que té el mateix consum que en engegar l'ordinador i el CNC s'ha fet la mitjana d'aquests dos valors.

El primer experiment a analitzar és el 3 i es pot veure que en el moment d'enregistrar la intensitat durant la fabricació, inicialment, la refrigeració està parada i s'engega durant el conformat de la peça (marcat a la Figura 4.12 amb un 1). Per aquesta raó s'ha decidit fer l'estimació de la gràfica de consum potència amb les etapes inicials considerant la refrigeració parada i un cop s'engega la refrigeració ja no es para fins al final. Com es pot veure a la Figura 4.12 la corba de potència amb l'estimació és molt semblant al perfil dels altres casos i tenint en compte que s'ha fet per valors mitjans i no apareixen pics es pot considerar una bona aproximació. S'ha de comentar que també s'ha inclòs l'etapa de parada d'emergència (marcat amb un 2 a la Figura 4.12) perquè en aquest cas la xapa es va trencar a la profunditat de 41,5 mm, per tant es va haver de parar el procés abans d'arribar a la profunditat màxima.

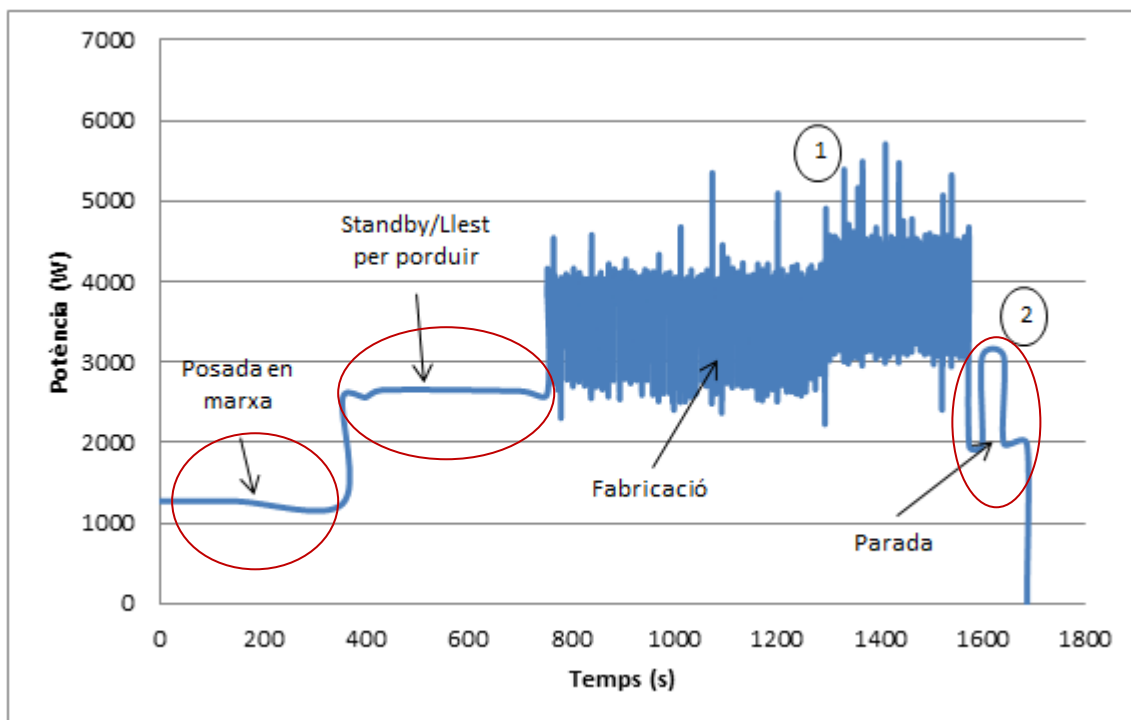


Figura 4.12 Gràfic de la potència consumida en l'experiment 3 amb policlorur de vinil

Es pot veure a la Figura 4.13 que el percentatge de temps emprat per la fabricació segueix essent el més important respecte les altres etapes amb un 50,40 % del temps total i, per tant, un percentatge semblant al de l'experiment 3 amb policarbonat.

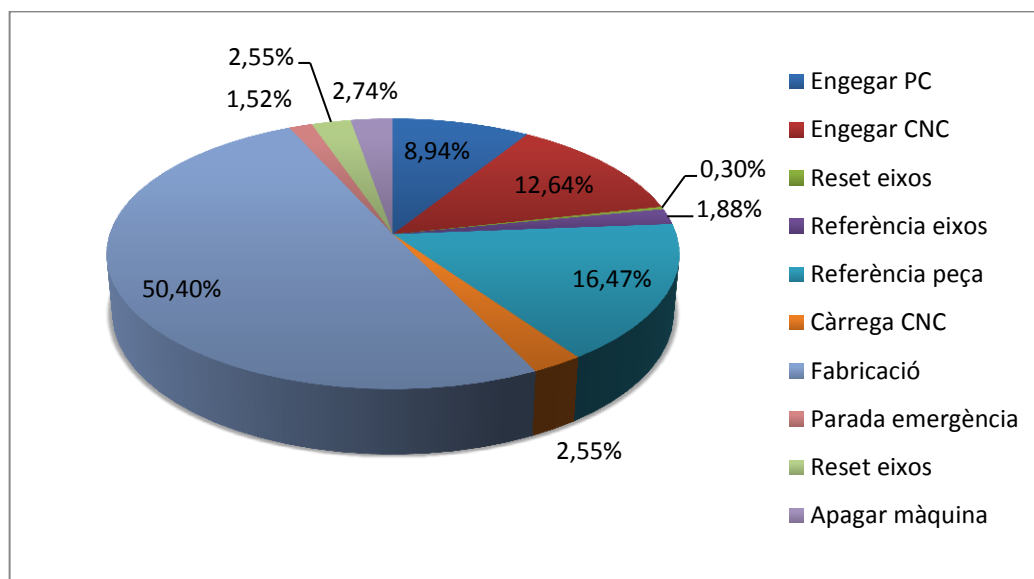


Figura 4.13 Percentatge dels temps de cada etapa en l'experiment 3 amb policlorur de vinil

Aquest efecte de que el temps segueix essent l'etapa que ocupa més temps en el procés es pot veure reflectit en el consum que es produeix en aquesta etapa. A la Taula 4.8 es pot veure que l'energia consumida és el 66,25% dels 4834,95 kJ consumits durant tot el procés.

Taula 4.8 Anàlisi de temps i energies de l'experiment 3 amb policlorur de vinil

Modes de la màquina	Descripció	Temps total (s)	Percentatge temps (%)	Potència (W)	Energia (kJ)	Percentatge energia (%)
Posada en marxa	Engegar PC	147	8,94%	1273,55	187,21	3,87%
	Engegar CNC	208	12,64%	1240,41	258,01	5,34%
Standby/Llest per produir	Reset eixos	5	0,30%	2561,11	12,81	0,26%
	Referència eixos	31	1,88%	2652,59	82,23	1,70%
	Referència peça	271	16,47%	2638,97	715,16	14,79%
	Càrrega CNC	42	2,55%	2603,51	109,35	2,26%
Fabricació	Fabricació amb refrigeració parada	550	33,43%	3714,11	2042,76	42,25%
	Fabricació amb refrigeració engegada	279	16,96%	4158,38	1160,19	24,00%
Parada	Parada emergència	25	1,52%	1954,79	48,87	1,01%
	Reset eixos	42	2,55%	3071,97	129,02	2,67%
	Apagar màquina	45	2,74%	1985,60	89,35	1,85%
ENERGIA TOTAL					4834,95	

Ja s'ha vist la diferència de consum d'energia entre l'experiment 3 i 12 fets amb policarbonat degut al pas incremental i la velocitat d'avanç i per acabar de corroborar la influència d'aquests dos paràmetres ens el consum d'energia del procés s'analitza també l'experiment 12 en policlorur de vinil. En aquets cas també es fa la mateixa estimació de les etapes que no corresponen a l'etapa de fabricació, però en aquest cas durant l'execució d'aquest experiment la refrigeració està tota l'etapa de fabricació engegada, per tant s'ha de considerar que s'engega abans. Observant els altres experiments, gairebé sempre, la refrigeració s'engega en l'estat de standby, per tant es considera que s'engegarà en aquest moment, i més concretament en l'etapa de referència de la peça (marcat amb un 1 a la Figura 4.14). El perfil de consum de potència obtingut per aquest experiment es pot veure a la Figura 4.14 i segueix essent el perfil obtingut en els altres casos, tenint en compte l'aproximació. En aquest cas també apareix la part de la parada d'emergència perquè la xapa va trencar a una profunditat de 35,2 mm.

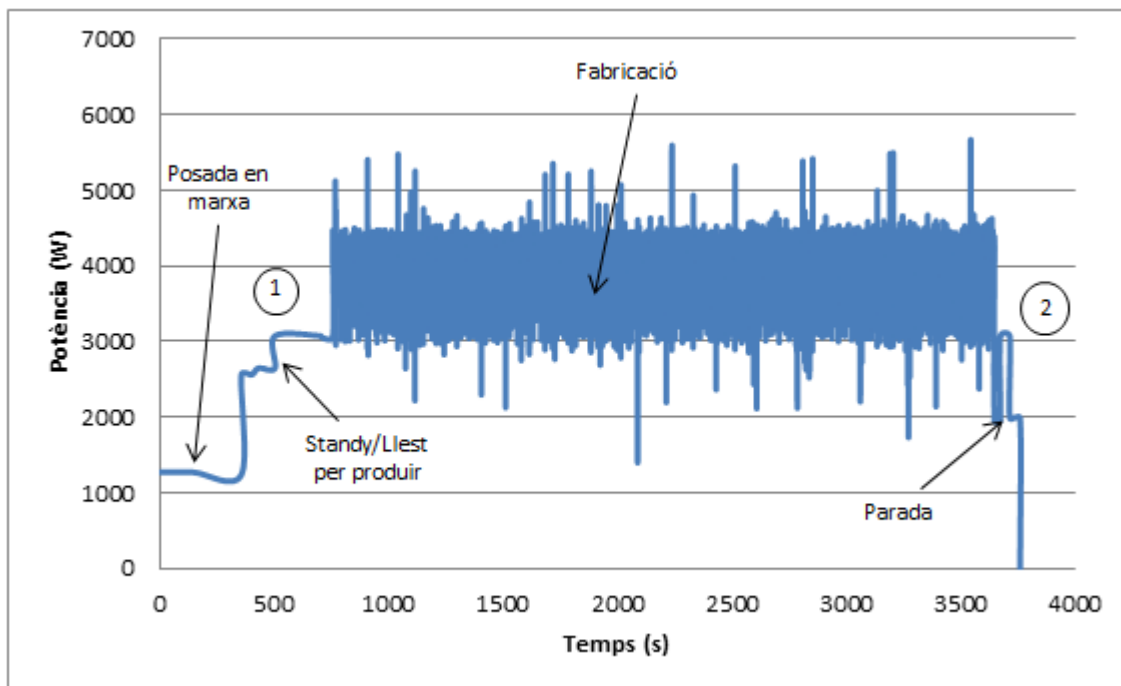


Figura 4.14 Gràfic de la potència consumida en l'experiment 12 amb policlorur de vinil

Queda evident que el temps augmenta considerablement amb aquests nous paràmetres, com ja succeeix en el cas del policarbonat. En aquets cas la xapa ha trencat a una profunditat de 35,2 mm i el temps té un pes del 78,05 % del temps total com es pot veure a la Figura 4.15.

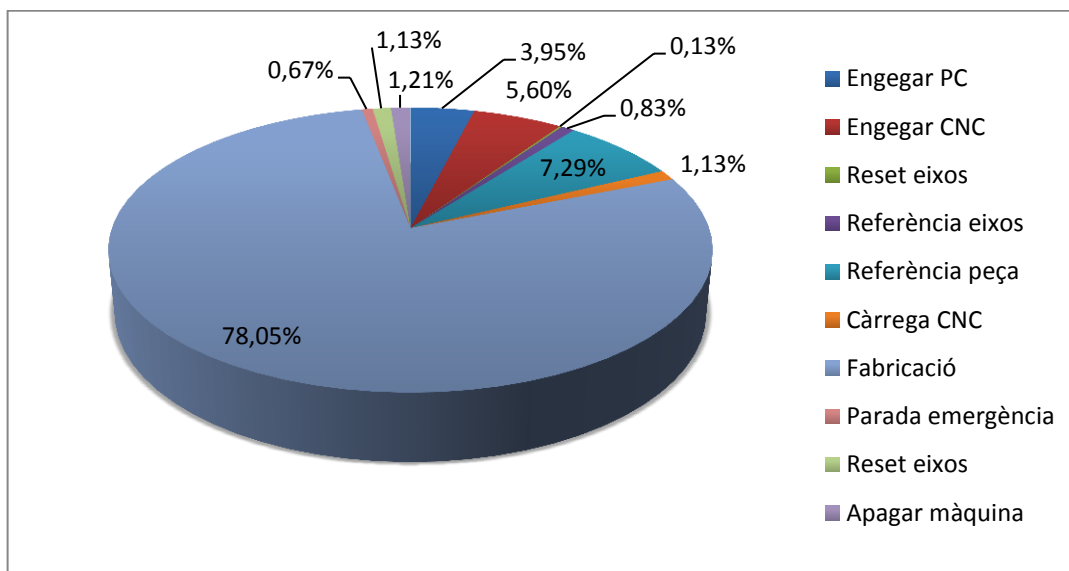


Figura 4.15 Percentatge dels temps de cada etapa en l'experiment 12 amb policlorur de vinil

Així que degut a aquest augment del temps hi ha un augment significatiu del consum d'energia en l'etapa de fabricació, a més de ser la que més temps ocupa del procés, és la que més potència consumeix. Els consums d'energia es poden veure a la Taula 4.9 i l'etapa de fabricació suposa el consum del 87,39% dels 13785,2 kJ consumits durant tot el procés.

Taula 4.9 Anàlisi de temps i energies de l'experiment 12 amb policlorur de vinil

Modes de la màquina	Descripció	Temps total (s)	Percentatge temps (%)	Potència (W)	Energia (kJ)	Percentatge energia (%)
Posada en marxa	Engegar PC	147	3,95%	1273,55	187,21	1,36%
	Engegar CNC	208	5,60%	1240,41	258,01	1,87%
Standby/Llest per produir	Reset eixos	5	0,13%	2561,11	12,81	0,09%
	Referència eixos	31	0,83%	2652,59	82,23	0,60%
	Referència peça refrigeració parada	71	1,91%	2638,97	187,37	1,36%
	Referència peça refrigeració engegada	200	5,38%	3077,32	615,46	4,46%
	Càrrega CNC	42	1,13%	3062,24	128,61	0,93%
	Fabricació	Fabricació	2901	78,05%	4152,45	12046,26
Parada	Parada emergència	25	0,67%	1954,79	48,87	0,35%
	Reset eixos	42	1,13%	3071,97	129,02	0,94%
	Apagar màquina	45	1,21%	1985,60	89,35	0,65%
ENERGIA TOTAL					13785,20	

La conclusió que s'extreu de la comparació d'aquests casos extrems en polímers és que els paràmetres de velocitat d'avanç i del pas incremental no afecten a l'augment del consum de potència, però sí que representen un augment molt gran del temps del procés i, a la vegada, un augment important de l'energia necessària per arribar a la mateixa geometria.

Pel cas del policarbonat, l'afirmació de que la potència no augmenta es pot veure gràcies a les figures de potència consumida (Figura 4.8 i Figura 4.10) ja que la tendència de consum és la mateixa, però aquest fet es corrobora amb les dades de les taules resum d'on s'extreu que la potència de l'experiment 3 és de 4170,22 W i el de l'experiment 12 és de 4211,69 W, que es poden considerar del mateix ordre, ja que la intensitat no és sempre un valor constant. El temps no es pot comparar directament perquè en l'experiment 3 s'assoleix una profunditat de 32,5 mm i a l'experiment 12 una profunditat de 30,2 mm, però tot i que en l'experiment 12 s'ha assolit menys profunditat el temps en aquest ha estat de 2480 segons en front dels 657 segons de l'experiment 3. Això suposa que tot i no arribant a la mateixa

profunditat s'ha necessitat 3,77 vegades més de temps, això comporta que, si la potència es pot considerar gairebé igual en els dos processos de fabricació, es necessita 3,77 vegades més d'energia amb els paràmetres de l'experiment 12 per aconseguir la mateixa geometria, això es pot veure amb la gran diferència d'energia consumida durant tot el procés que en l'experiment és de 12706,92 kJ en front dels 4467,96 kJ de l'experiment 3.

Pel cas del policlorur de vinil, també es pot considerar que la potència és del mateix ordre observant les corbes de potència obtingudes (Figura 4.12 i Figura 4.14) i es corrobora amb les dades de potència consumida amb la refrigeració engegada que en l'experiment 3 és de 4158,38 W i en l'experiment 12 és de 4152,45 W. Com en el cas anterior, el temps no es pot comparar directament perquè no trenquen a la mateixa profunditat, en l'experiment 3 trenca a 41,5 mm i l'experiment 12 a una profunditat de 35,2 mm, i amb uns temps de fabricació per l'experiment 3 de 829 segons i l'experiment 12 de 2901 segons. Així que, tot i trencant abans, en l'experiment 12 el temps és 3,50 vegades més gran que en l'experiment 3, per tant com que la potència és constant i es necessiten 3,5 vegades més de temps, l'energia necessària també serà de 3,5 vegades més gran respecte l'experiment 3, fet que queda confirmat amb la diferència que hi ha de consum d'energia, que per l'experiment 3 és de 4834,95 kJ i per l'experiment 12 és de 13785,2 kJ.

Amb els resultats dels dos materials polimèrics es pot dir que des d'un punt de vista energètic, és evident que la millor situació és conformar les peces amb un pas incremental i una velocitat d'avanç el més alta possible per reduir el temps de procés i, d'aquesta manera, reduir l'energia necessària per aconseguir la geometria.

4.1.4 Comparació

Amb totes les dades obtingudes per tots els materials, ja es pot fer la discussió final de si el material afecta o no en el consum del procés. Per poder fer això s'han de comparar els resultats obtinguts en l'experiment 3 amb les diferents situacions: en buit, amb polímers, amb acer i amb alumini. L'energia total consumida en tots els casos és del mateix rang com es pot veure en la Taula 4.10, però aquesta energia no es pot comparar directament perquè els temps de procés no han estat sempre els mateixos al no arribar a conformar-se fins a la mateixa profunditat i també és diferent perquè no sempre la refrigeració s'ha engegat en el mateix moment. El que sí que es pot comparar directament és la potència consumida en l'etapa de fabricació mentre la refrigeració està engegada que, com es pot comprovar a la Taula 4.10, és gairebé sempre la mateixa. Això és degut a que els valors d'intensitat mitjana consumida són pràcticament iguals. Hi pot haver diferències perquè, tal i com ja s'ha

comentat, cada vegada que s'engega i es para la rotació es produeixen pics d'intensitat i aquests no sempre tenen el mateix valor, cosa que poden fer variar les mitjanes. L'element més determinant de que el material no té influència és que si realment el material fos un paràmetre influent en el consum d'energia, en el cas del procés realitzat en buit la intensitat hauria de ser més baixa que en els altres, ja que no s'està deformat cap material i no hi ha cap força que s'oposi al moviment, però es pot veure que no es així.

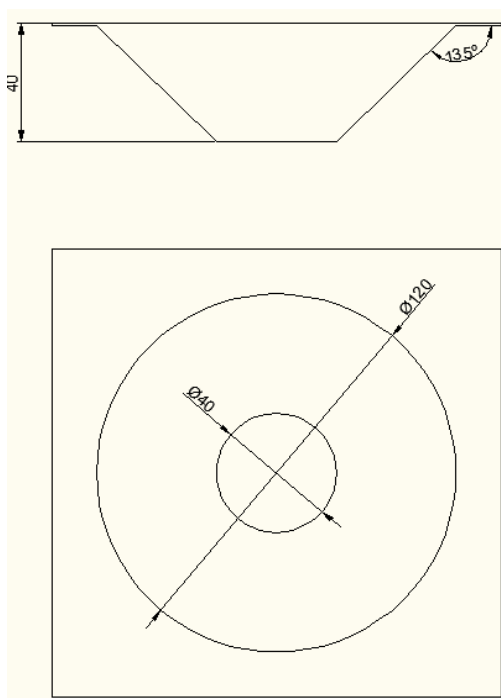
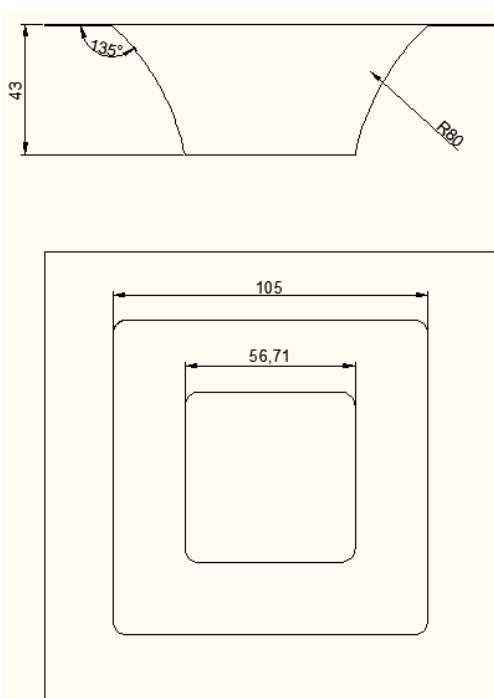
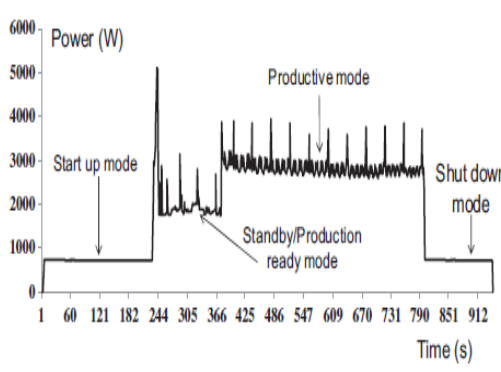
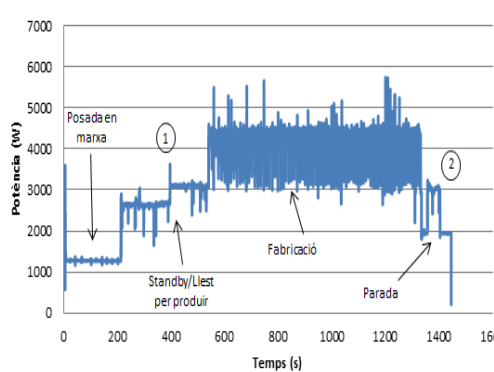
Taula 4.10 Resum de les dades d'intensitat, potència i energia de l'experiment 3 amb diferents materials

Material	Intensitat mitjana (A)	Potència (W)	Energia total (kJ)
En buit	7,03	4164,30	4948,08
Policarbonat	7,04	4170,22	4467,68
PVC	7,02	4158,38	4834,95
Alumini	7,02	4158,38	4765,65
Acer	7,11	4211,69	4832,73

En l'estudi d'Ingarao (2014) esmentat es presenta el gràfic de potència d'un experiment fet en una xapa d'alumini amb una geometria en forma de con truncat amb un diàmetre inicial de 120 mm, una profunditat de 40 mm i un angle d'inclinació de 45°. Els paràmetres de procés són una velocitat d'avanç de 2000 mm/min, la velocitat de rotació lliure, un pas incremental de 1 mm i una eina de 10 mm de diàmetre. Tot i que ni la geometria, ni els paràmetres de procés són iguals i que en aquest cas els experiments es van realitzar en un centre de mecanitzat MAHO MH 600C, es pot fer una comparació amb els resultats obtinguts pel cas de la xapa d'alumini d'aquest projecte. En el cas d'Ingarao també s'hi identifiquen les quatre etapes identificades en els apartats anteriors pel centre de mecanitzat Kondia, però en alguns s'hi veuen diferències. Pels estats de posada en marxa i standby el comportament és el mateix, però en l'estat de fabricació es veu que, tot i que l'experiment no es fa amb la rotació activada, hi ha un salt en la potència consumida, cosa que en el centre de mecanitzat Kondia la potència seguiria estant la mateixa que en l'estat d' standby, tal i com s'ha vist a l'apartat 4.1.1. Una de les altres variacions és que en aquest centre de mecanitzat l'estat de parada només té una etapa amb un consum semblant al de l'estat de posada en marxa, com si en el cas de la Kondia es passés directament a l'etapa d'apagada de la màquina o s'hagués parat el procés amb l'emergència i no s'hagués de fer el reset dels eixos. Si que hi ha diferències evidents perquè els dos centres de mecanitzat són de característiques diferents, però en els dos casos s'hi poden identificar els mateixos estats, cosa que corrobora que els perfils de potència obtinguts en la Kondia s'adapten als perfils de

consum de potència de centres de mecanitzat adaptats a la tecnologia ISF. La comparació entre les característiques dels dos processos es pot veure a la Taula 4.11.

Taula 4.11 Taula comparativa del procés Ingarao et al. (2014) vs. Lleget (present projecte)

	Ingarao	Lleget
GEOMETRIA		
PARÀMETRES	<ul style="list-style-type: none"> - Centre: MAHO MH 600C - Velocitat rotació: Lliure - Velocitat avanç: 2000 mm/min - Pas incremental: 1 mm - Diàmetre eina: 10 mm 	<ul style="list-style-type: none"> - Centre: Kondia HS1000 - Velocitat rotació: 2000 rpm - Velocitat avanç: 3000 mm/min - Pas incremental: 0,5 mm - Diàmetre eina: 10 mm
GRÀFICS POTÈNCIES		

4.1.5 Resum de conclusions

Al llarg d'aquest apartat s'han extret diverses conclusions gràcies a les proves realitzades en diferents condicions, per això s'enumeren a continuació.

Primerament, s'ha de comentar que els anàlisis que s'han fet han estat sobretot destinats a comentar el consum de l'energia durant el procés de fabricació, no només perquè sigui el més important en quant a consum, sinó que també s'ha considerat així perquè en aquests experiments s'analitzava des del moment que s'engega la màquina fins que es para, però realment el procediment d'engegar la màquina i fer les referències només s'ha de fer en la primera peça a conformar. Un cop s'ha conformat la primera peça tots els experiments es fan un darrera l'altre sense apagar el centre de mecanitzat.

La rotació és un paràmetre molt important perquè si es realitza el conformat amb la rotació engegada la potència augmenta aproximadament 1000 W respecte de tenir-la parada, però no només augmenta la potència, sinó que també augmenta el temps de procés perquè en cada capa s'ha de parar la rotació i fer-la rotar cap el sentit contrari, així que el procés és més llarg. D'aquesta manera la potència influeix en l'augment del consum d'energia tant per fet de que augmenta la potència consumida com perquè fa augmentar el temps de conformat.

El pas incremental i la velocitat d'avanç no tenen una influència sobre l'augment de consum de potència, però sí que s'ha pogut veure que influeixen molt en que el procés de conformat sigui més llarg, fent que l'energia consumida sigui major. El paràmetre que s'ha confirmat que no afecta en el consum d'energia és el material que s'ha de conformar, per tant no és un paràmetre a tenir en compte pel que fa a consums d'energia.

Un dels elements que s'ha de remarcar, tot i que s'analitzarà més en detall en apartats següents, és el consum derivat de la unitat refrigeradora. S'ha pogut comprovar que és un fenomen totalment aleatori i no es pot controlar quan s'engegarà i quan es parerà. El fet de que la refrigeració s'engegui afecta amb un salt de consum de potència d'uns 400 W aproximadament.

Per concloure aquest apartat, es pot afirmar que la millor situació per conformar una peça des del punt de vista energètic és executar el programa sense rotació, amb un pas incremental el més elevat possible, una velocitat d'avanç elevada i la unitat refrigeradora desconnectada, però no es pot considerar desconnectar la unitat refrigeradora perquè afectaria al funcionament del centre de mecanitzat i es podrien crear desperfectes en el capçal a causa de les elevades temperatures que es podrien assolir.

4.2 Energia consumida

Un dels objectius del projecte és quantificar l'energia necessària per la conformació de polímers en el centre de mecanitzat Kondia, en aquest cas en PC i PVC, i per fer aquest anàlisi s'ha dissenyat el DOE, perquè amb els resultats obtinguts es pugui arribar a determinar quina seria l'energia que s'hauria d'emprar per fer cada peça segons els paràmetres de conformació, per això un cop vistos els paràmetres més influents en els processos de fabricació, es realitzarà un estudi estadístic d'aquests paràmetres per veure més clarament la influència que tenen en el consum d'energia. A la vegada s'estudiarà el fenomen de la unitat refrigeradora, per si té un patró de comportament el qual es pugui adaptar a l'estudi.

Per poder fer aquest estudi de l'energia consumida s'han fet les tres rèpliques dels 16 experiments per cada material, on només es mesura la intensitat i el temps necessari per realitzar la peça en l'etapa de fabricació. Per poder identificar el patró que segueix la unitat refrigeradora i la influència que té sobre el consum d'energia, per cada experiment s'ha identificat si aquesta unitat està en marxa o parada amb les mesures d'intensitat i quin és el valor característic del consum en funció d'aquesta condició. Com s'ha dit a l'apartat 3.4 es fan dues de les rèpliques intercalant els experiments de rotació a 2000 rpm amb els de rotació lliure i la última rèplica amb tots els de rotació a 2000 rpm seguits i després els de rotació lliure, així es podrà veure si té influència l'ordre d'execució dels experiments.

Els resultats que es presenten en aquesta memòria són dos exemples representatius, tot i que s'ha fet el mateix estudi per tots els casos. A la Taula 4.12 es poden veure els resultats obtinguts en la rèplica 1 amb policarbonat, en aquest cas és una de les rèpliques on els experiments s'han fet de manera intercalada. Seguidament a la Taula 4.13 es poden veure els resultats obtinguts en la rèplica 1 feta en PVC, en aquest cas és una de les rèpliques en que s'han fet tots els experiments amb rotació seguits i després dels de rotació lliure. Amb les dues taules de resultats, tot i que els experiments no sempre duren el mateix, es pot comprovar que els que són més llargs i tenen la rotació engegada hi ha un augment significatiu del consum d'energia. Pel que fa a les potències es segueixen tenint les mateixes tendències presentades en els apartats anteriors degut a que les intensitats mitjanes són semblants segons el mode de fabricació. Quan els experiments són amb rotació i la unitat refrigeradora està engegada tenen un consum d'intensitat aproximat de 7 ampers disminuint uns 0,6 ampers cada vegada que es para. Es veu el mateix comportament en els casos de rotació lliure, quan està la refrigeració engegada hi ha un consum aproximat de 5 ampers i quan la refrigeració està parada el consum disminueix uns 0,6 ampers igualment.

Taula 4.12 Consum de la Kondia per cada experiment de la rèplica 1 en policarbonat

Nº experiment	Mode de fabricació	Temps total (s)	I. mitjana (A)	Potència (W)	Energia (kJ)	Energia total (kJ)
1	Refrigeració engegada	1133	5,14	3044,74	3449,69	3526,30
	Refrigeració parada	29	4,46	2641,93	76,62	
2	Refrigeració engegada 1	218	6,98	4134,68	901,36	11396,63
	Refrigeració parada	671	6,41	3797,04	2547,81	
	Refrigeració engegada 2	1887	7,11	4211,69	7947,46	
3	Refrigeració parada	623	6,24	3696,33	2302,82	2302,82
4	Refrigeració engegada	629	5,07	3003,27	1889,06	5617,42
	Refrigeració parada	1437	4,38	2594,54	3728,36	
5	Refrigeració engegada	1048	5,05	2991,42	3135,01	3135,01
6	Refrigeració engegada	752	6,94	4110,99	3091,46	3091,46
7	Refrigeració engegada	1212	7,05	4176,15	5061,49	5061,49
8	Refrigeració engegada	76	5,13	3038,81	230,95	2430,27
	Refrigeració parada	840	4,42	2618,24	2199,32	
9	Refrigeració parada	532	6,34	3755,57	1997,96	4052,28
	Refrigeració engegada	481	7,21	4270,93	2054,32	
10	Refrigeració engegada	1740	7,00	4146,53	7214,96	7214,96
11	Refrigeració engegada	1803	5,10	3021,04	5446,94	7037,84
	Refrigeració parada	609	4,41	2612,31	1590,90	
12	Refrigeració engegada	2208	7,13	4223,54	9325,57	9325,57
13	Refrigeració engegada	554	5,07	3003,27	1663,81	1663,81
14	Refrigeració parada	209	6,36	3767,42	787,39	6709,17
	Refrigeració engegada	1410	7,09	4199,84	5921,78	
15	Refrigeració engegada	1293	4,98	2949,96	3814,30	3942,54
	Refrigeració parada	50	4,33	2564,92	128,25	
16	Refrigeració engegada	587	5,07	3003,27	1762,92	1762,92

Veient que les intensitat depenen directament de la rotació i de la unitat refrigeradora i que sempre tenen uns valors aproximats, es fa una mitjana entre tots els processos per determinar la intensitat que es consumirà en cada mode de fabricació del centre de mecanitzat, d'aquesta manera sabent les intensitats que hi haurà en cada mode de fabricació i sabent el temps que tardarà el procediment depenent dels paràmetres, es podrà donar un valor teòric de l'energia necessària de cada experiment, tenint en compte que no es podrà saber del cert el moment en que trencarà la xapa. Aquestes intensitats mitjanes es presenten a la Taula 4.14.

Taula 4.13 Consum de la Kondia per cada experiment de la rèplica 1 en policlorur de vinil

Nº experiment	Mode fabricació	Temps total (s)	I. mitjana (A)	Potència (W)	Energia (kJ)	Energia total (kJ)
1	Refrigeració parada	583	4,31	2553,08	1488,44	4048,76
	Refrigeració engegada	861	5,02	2973,65	2560,32	
2	Refrigeració engegada	3222	7,17	4247,23	13684,58	13684,58
3	Refrigeració parada	550	6,27	3714,11	2042,76	3202,95
	Refrigeració engegada	279	7,02	4158,38	1160,19	
4	Refrigeració engegada	2327	4,91	2908,49	6768,07	6768,07
5	Refrigeració engegada	1000	5,04	2985,50	2985,50	2985,50
6	Refrigeració engegada	803	7,09	4199,84	3372,47	3372,47
7	Refrigeració engegada 1	182	6,99	4140,61	753,59	5140,87
	Refrigeració parada	723	6,41	3797,04	2745,26	
	Refrigeració engegada 2	385	7,20	4265,00	1642,03	
8	Refrigeració engegada	873	4,91	2908,49	2539,12	2752,60
	Refrigeració parada	85	4,24	2511,61	213,49	
9	Refrigeració engegada	1327	6,97	4128,76	5478,86	5478,86
10	Refrigeració engegada	2100	7,07	4187,99	8794,79	8794,79
11	Refrigeració engegada	1341	4,96	2938,11	3940,01	6689,61
	Refrigeració parada	1072	4,33	2564,92	2749,60	
12	Refrigeració engegada	2901	7,01	4152,45	12046,27	12046,27
13	Refrigeració engegada	520	4,87	2884,80	1500,10	1784,16
	Refrigeració parada	115	4,17	2470,15	284,07	
14	Refrigeració engegada	2105	6,98	4134,68	8703,51	8703,51
15	Refrigeració parada	1178	4,36	2582,70	3042,42	4232,19
	Refrigeració engegada	387	5,19	3074,36	1189,78	
16	Refrigeració parada	628	4,99	2955,88	1856,29	1856,29

Taula 4.14 Intensitats mitjanes segons els modes de fabricació de la Kondia

Mode de fabricació	Material	I. mitjanes (A)	I. mitjana total (A)
Rotació amb refrigeració	PC	7,07	7,06
	PVC	7,05	
Rotació sense refrigeració	PC	6,35	6,38
	PVC	6,41	
Lliure amb refrigeració	PC	5,08	5,04
	PVC	4,99	
Lliure sense refrigeració	PC	4,40	4,37
	PVC	4,33	

Un cop s'han obtingut els valors característics de cada mode de fabricació s'analitza la unitat de refrigeració. Primer de tot es presenten dos gràfics diferents on es veu la influència de la unitat refrigeradora en el consum d'intensitat. En la Figura 4.16 es pot veure el comportament en un experiment amb la rotació a 2000 rpm, on inicialment la refrigeració està engegada, seguidament a uns 200 segons de procés es para, però finalment a un temps aproximat de 900 segons es torna a engegar, mantenint-se així fins al final. En la Figura 4.17 es presenta un exemple amb la rotació lliure i en aquest cas també es veuen diferenciades les zones on la refrigeració està engegada o parada, en aquest cas a l'inici de l'experiment la refrigeració està engegada i a un temps de 600 segons es para i es manté en repòs fins al final de l'experiment.

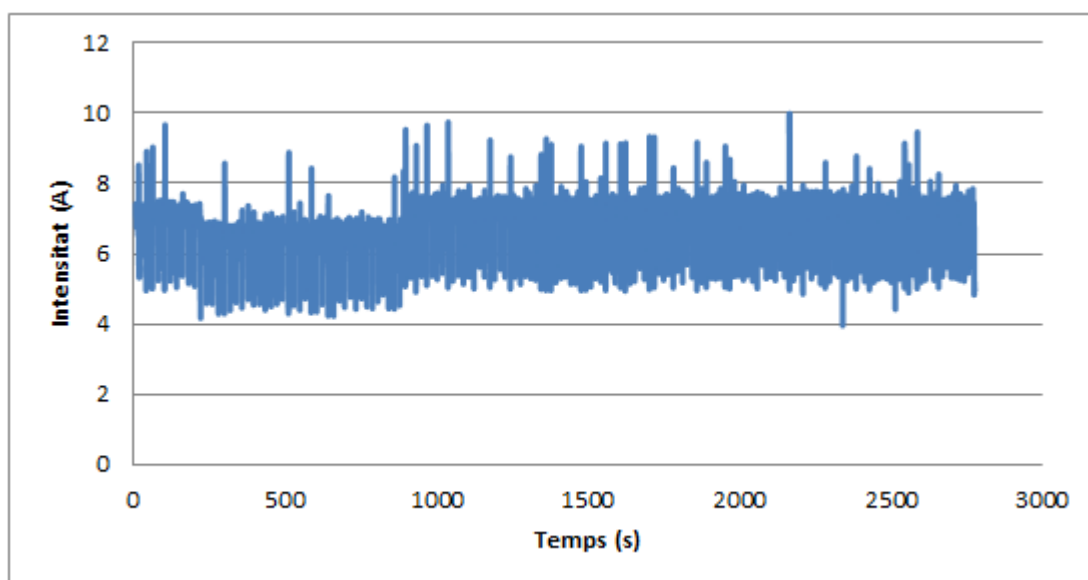


Figura 4.16 Intensitat consumida en l'experiment 2 de la rèplica 1 amb PC

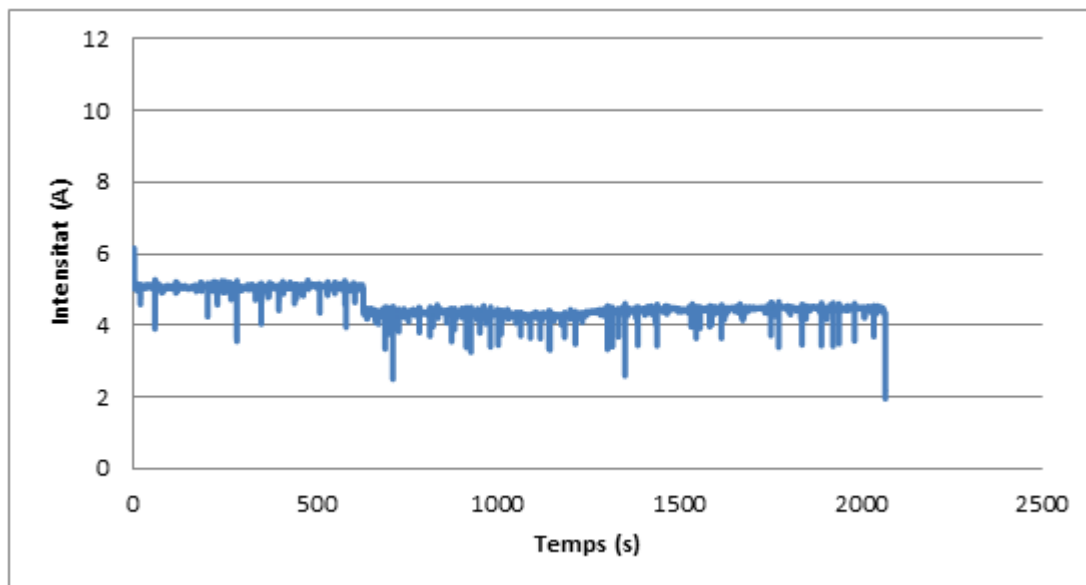


Figura 4.17 Intensitat consumida en l'experiment 4 de la rèplica 1 amb PC

Es pot veure que la refrigeració és aleatòria i en aquest cas només s'han adjuntat dos gràfics amb dos exemples representatius, però com es pot veure a la Taula 4.12 i a la Taula 4.13 hi ha altres experiments on es dona que la refrigeració sempre està engegada i en d'altres sempre està parada. Així que el comportament de la unitat refrigeradora és aleatori, però es pot estudiar el percentatge de temps que està engegada i parada depenent de l'ordre en que s'efectuïn els experiments. A la Taula 4.15 es pot veure que en el cas de l'estratègia de fer els experiments alternants, el percentatge en que està engegada la unitat refrigeradora i en la que està parada és molt semblant tant amb rotació com sense rotació, aproximadament un 78 % del temps la refrigeració està engegada i el 22 % restant està apagada. On es veu una diferència de comportament de la unitat refrigeradora és en l'estratègia de fer els experiments seguits, quan es fan tots els de rotació la unitat refrigeradora està gairebé sempre engegada, el qual és lògic perquè amb la rotació la temperatura del capçal sempre tendeix a augmentar a causa del fregament així que s'haurà d'estar refrigerant constantment per no sobrepassar els límits de temperatura. En canvi, amb aquesta estratègia, als experiments de rotació lliure s'ha disminuït el percentatge de temps d'utilització de la refrigeració fins a estar un 65,14 % del temps engegada, cosa que també és lògica perquè al ser de rotació lliure al capçal no hi puja tant la temperatura, però tot i així hi segueix havent una forta dependència de la refrigeració.

Taula 4.15 Percentatge de temps en que està engegada la unitat refrigeradora en funció de l'estratègia

Estratègia	Rotació	Refrigeració	Percentatge de temps (%)*
Alternats	Engegada	Engegada	80,10%
		Parada	19,90%
	Parada	Engegada	76,48%
		Parada	23,52%
Seguits	Engegada	Engegada	95,63%
		Parada	4,37%
	Parada	Engegada	65,14%
		Parada	34,86%

*Les mitjanes han estat fetes ponderades amb el temps de duració de cada mode de fabricació, ja que no tots els processos duren el mateix i no es poden fer directament.

Així que finalment, es podria dir que el millor escenari és fer els experiments amb rotació lliure i de manera consecutiva, no només perquè hi ha menys consum de potència degut al consum del motor de rotació, sinó perquè també hi haurà un estalvi energètic degut a que la unitat refrigeradora no estarà tant de temps engegada. Si s'han de fer experiments tant amb rotació activada com amb la rotació lliure amb l'estratègia de fer els experiments alternants, si es fa una mitjana ponderada en el temps del percentatge en que està engegada la refrigeració, s'obté que està engegada el 78,51% del temps i per l'estratègia de fer-los seguits aquest percentatge és del 85,32%, així que, tot i que no és una diferència molt important, el percentatge de temps en que està engegada la refrigeració és millor en el cas de fer els experiments alternants, per tant la millor estratègia a seguir.

Finalment, en aquest apartat es corroboren les conclusions extretes en l'apartat 4.1, on les conclusions s'han extret basant-se amb l'anàlisi d'uns experiments en concret. Ara, amb les dades de consum d'energia per tots els experiments, es pot fer un anàlisi complet del consum d'energia per tal de determinar si les conclusions extretes són correctes i determinar de manera definitiva els paràmetres més influents en el consum d'energia elèctrica per la conformació de les peces. Per poder dur a terme aquest estudi s'ha fet un anàlisi estadístic ANOVA amb el software Minitab i els resultats obtinguts pel policarbonat es mostren a la Figura 4.18 i els del policlorur de vinil a la Figura 4.19.

Observant els resultats es pot veure que pels dos materials hi ha el mateix comportament d'influència dels paràmetres en el consum d'energia i es confirmen les afirmacions fetes anteriorment. S'observa que els paràmetres de pas incremental i velocitat d'avanç com més elevats siguin menys consum d'energia es tindrà perquè fan que el procés sigui més curt i això comporta que no es consumeixi energia durant tant de temps. El paràmetre de la

rotació és millor tenir-la desactivada perquè no només consumeix més potència el fet de tenir-la activada, sinó que també allarga el procés. I finalment, queda clar que els paràmetres de diàmetre d'eina i el gruix de la xapa no tenen un paper destacat en l'influència de consum d'energia. La diferència que s'aprecia entre els dos processos és que pel policarbonat es consumeix menys energia, però no és degut a un efecte del material, sinó perquè la xapa, habitualment, tenca abans que la de PVC, per tant això fa escurçar el procés i es consumeix menys energia, aquest punt es confirmarà a l'apartat següent.

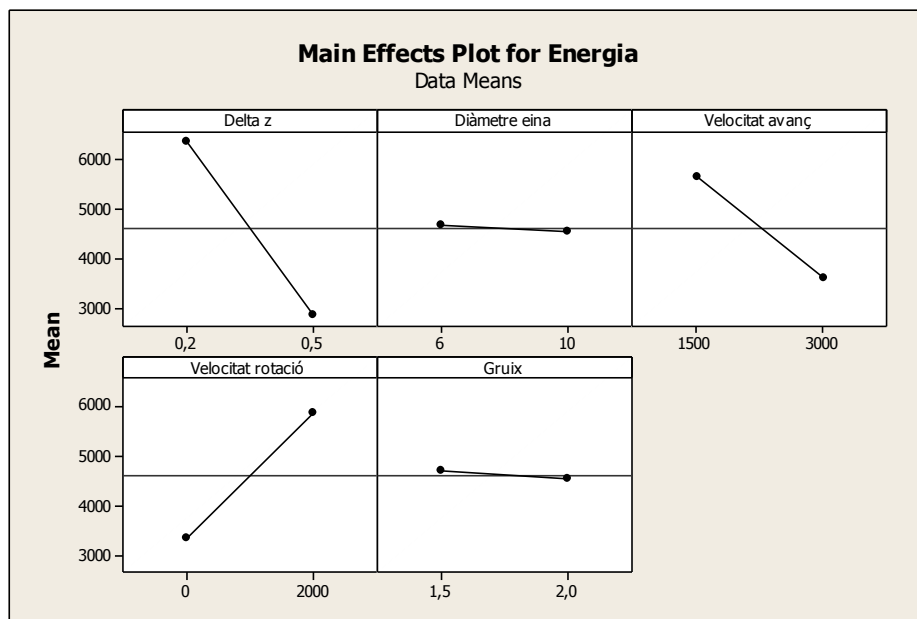


Figura 4.18 Anàlisi estadístic del consum d'energia en funció dels paràmetres de procés en PC

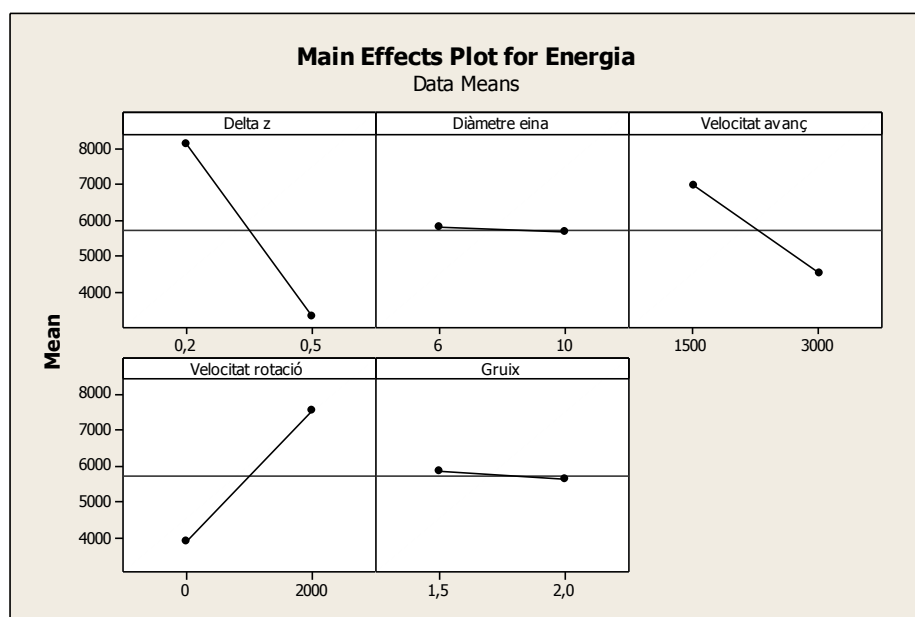


Figura 4.19 Anàlisi estadístic del consum d'energia en funció dels paràmetres de procés en PVC

4.3 Anàlisi d'altres resultats

Per fer un anàlisi del tot complet, en aquest projecte no s'analitza només l'energia consumida, sinó que es fa un estudi de les altres característiques de les peces conformades (força màxima, temperatura, profunditat i rugositat) per poder determinar quines són les millors opcions de conformat en aquests dos materials tenint un compromís entre aquestes característiques i l'energia consumida. Per tant, en aquest apartat es presenten els resultats esmentats pels dos materials i un anàlisi estadístic ANOVA fet amb les mitjanes de les tres rèpliques per cada experiment per veure la influència de cada paràmetre sobre cada resultat obtingut.

4.3.1 Temperatura

Amb la càmera termogràfica s'enregistren les temperatures màximes que s'assoleixen en cada experiment, aquestes temperatures també serviran per poder comentar posteriorment l'efecte que tenen sobre la força necessària per la conformació. Les temperatures obtingudes pel policarbonat es mostren a la i l'anàlisi estadístic a la , pel cas del policlorur de vinil les temperatures enregistrades es mostren a la Taula 4.16 i l'anàlisi estadístic a la Figura 4.20.

Taula 4.16 Temperatures en PC

Nº experiment	Temperatura PC (°C)
1	47,67
2	84,87
3	85,29
4	46,49
5	51,83
6	81,05
7	85,13
8	45,80
9	85,33
10	84,80
11	48,92
12	85,30
13	62,70
14	84,78
15	57,08
16	68,15

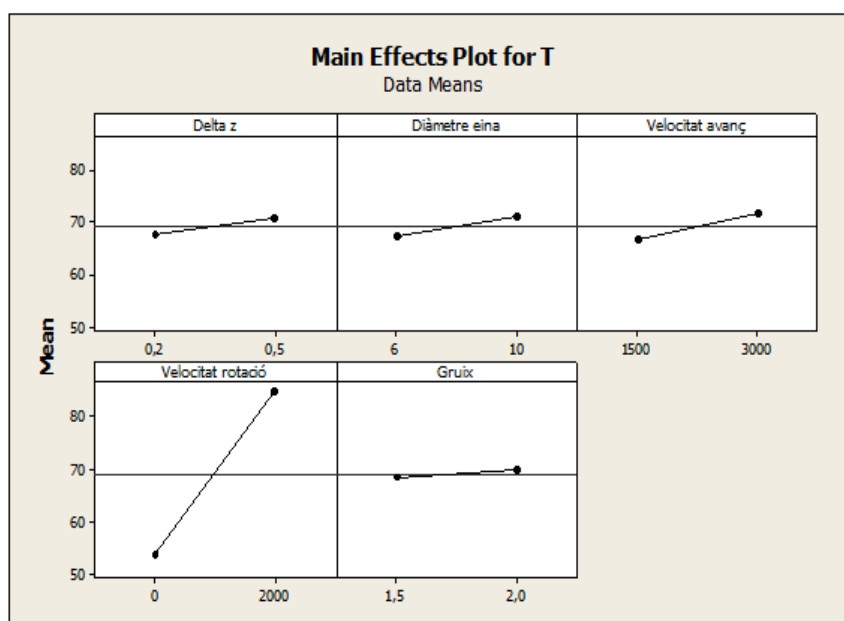


Figura 4.20 Anàlisi estadístic de la temperatura en funció dels paràmetres en PC

Taula 4.17 Temperatures PVC

Nº experiment	Temperatura PVC (°C)
1	45,49
2	76,06
3	85,29
4	42,39
5	47,38
6	78,12
7	79,54
8	40,58
9	85,41
10	75,79
11	41,04
12	85,29
13	56,61
14	83,07
15	51,18
16	53,67

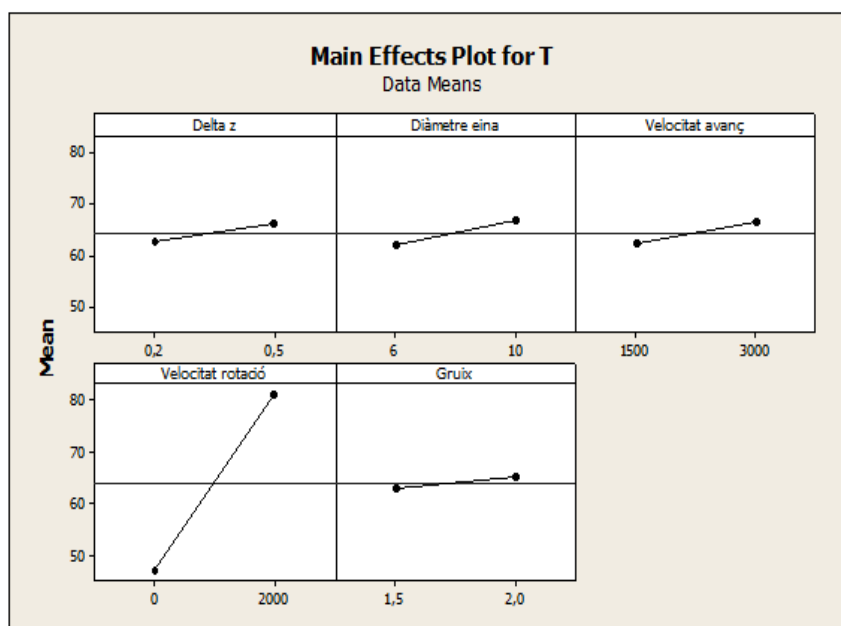


Figura 4.21 Anàlisi estadístic de la temperatura en funció dels paràmetres en PVC

Es pot veure a la Figura 4.20 i a la Figura 4.21 que els paràmetres de fabricació afecten als dos materials gairebé de la mateixa manera i s'ha de destacar sobretot el paràmetre de la rotació, on es veu la diferència més important en la variació de temperatura.

- Pas incremental: Hi ha un petit augment de temperatura quan el pas incremental és més elevat, això és perquè com que l'eina a cada capa disminueix una profunditat més gran hi ha més contacte entre l'eina i el material provocant més fricció i, conseqüentment, un augment de la temperatura.
- Diàmetre de l'eina: Es veu un petit augment de temperatura quan el diàmetre de l'eina és més gran degut a que hi ha més superfície de contacte entre l'eina i la xapa com en el cas anterior.
- Velocitat d'avanç: Com més elevada és la velocitat d'avanç més elevada és la temperatura. Si ens fixem en un punt concret de la xapa la temperatura màxima s'assoleix quan hi passa l'eina, per tant si la velocitat és més elevada tarda menys a passar l'eina per aquest punt i això provoca que no es pugui refredar.
- Velocitat de rotació: és el paràmetre més influent de tots amb diferència ja que com més elevada sigui la velocitat de rotació la temperatura serà molt més elevada, en aquest cas també és degut a la fricció que apareix entre l'eina i la xapa.

- Gruix: És el paràmetre menys significatiu de tots i es pot veure la tendència de que com més gruixuda sigui la xapa més temperatura s'assolirà.

4.3.2 Força

Les forces que s'analitzen són les forces màximes necessàries per la deformació enregistrades per cada procés. Les dades obtingudes pel policarbonat es presenten a la Taula 4.18 i l'anàlisi estadístic a la Figura 4.22, per altra banda els resultats del policlorur de vinil es mostren a la Taula 4.19 i l'anàlisi estadístic a la Figura 4.23, els quals es comenten a continuació.

Taula 4.18 Forces màximes en PC

Nº experiment	Força PC (N)
1	311,48
2	397,55
3	444,40
4	421,56
5	738,21
6	400,26
7	400,99
8	409,03
9	350,71
10	384,58
11	474,93
12	413,05
13	483,26
14	341,95
15	537,85
16	545,46

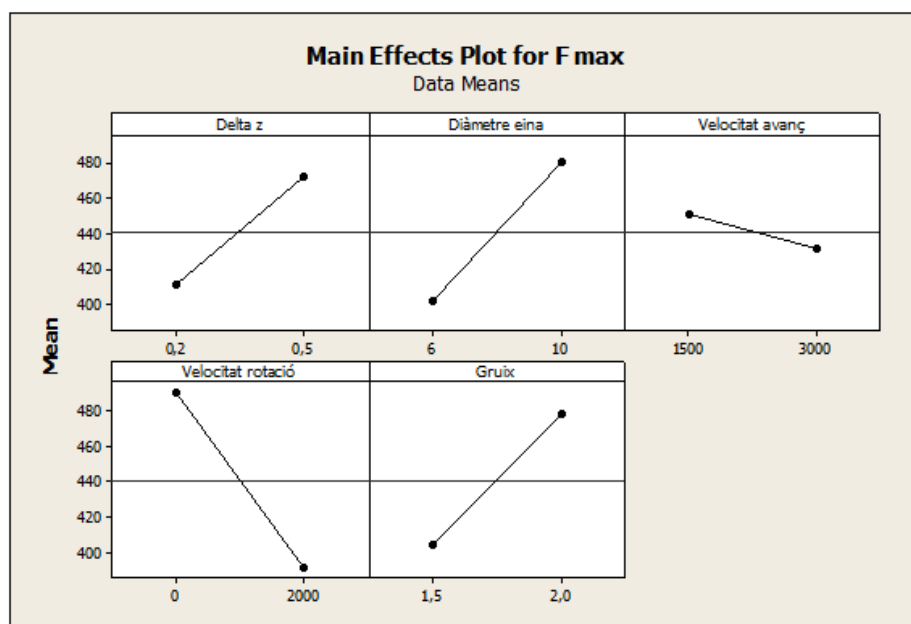


Figura 4.22 Anàlisi estadístic de la força màxima en funció dels paràmetres en PC

A la Figura 4.22 i a la Figura 4.23 s'observa que tots els paràmetres, menys el pas incremental en el cas del PVC, són bastant determinants en quant a la força màxima necessària. Es pot observar una diferència entre les forces de deformació del policlorur respecte les del policarbonat de vinil, ja que són més elevades pel policarbonat ja que és més resistent.

Taula 4.19 Forces màximes en PVC

Nº experiment	Força PVC (N)
1	288,27
2	323,79
3	459,96
4	410,94
5	547,82
6	248,50
7	367,96
8	313,86
9	317,29
10	379,48
11	395,79
12	368,55
13	383,51
14	303,06
15	480,12
16	342,03

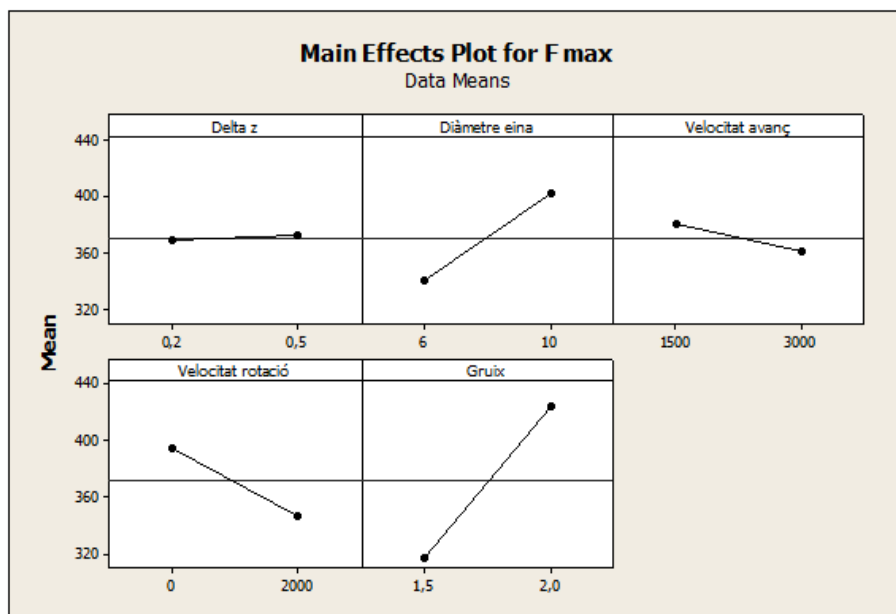


Figura 4.23 Anàlisi estadístic de la força màxima en funció dels paràmetres en PVC

- Pas incremental: Pels dos materials es pot veure que com més gran és el pas incremental més força es necessita, tot i que en el cas del policlorur de vinil aquest paràmetre no és gaire significatiu. Tot i que hi ha un augment de la temperatura i hauria de fer que la força disminuís, la força augmenta perquè si el pas incremental és més elevat a cada capa significa que s'ha de desplaçar més material i aquest fet condiona més a que hi hagi l'augment.
- Diàmetre de l'eina: S'observa que com més gran és el diàmetre de l'eina més força es necessita, degut a que la pressió feta per l'eina és constant, així que si augmenta la superfície la força ha d'augmentar.
- Velocitat d'avanç: Com més elevada sigui la velocitat d'avanç menys força es necessitarà degut a que la temperatura de la xapa augmenta i això fa que les cadenes del polímer tinguin més mobilitat i sigui necessària menys força per la deformació.
- Velocitat de rotació: Com en el cas anterior, com més elevada sigui la velocitat de rotació menys força es necessita ja que augmenta la temperatura degut al fregament.
- Gruix: S'observa que si el gruix de la xapa és més elevat més força es necessita per la deformació. Això és degut a que hi ha més material a desplaçar, per tant es necessita més força.

4.3.3 Profunditat

La profunditat és un paràmetre molt important perquè determina si s'arriba a fabricar la peça del tot o no. Els resultats de la profunditat mitjana on trenquen les xapes es poden veure a la Taula 4.20 pel policarbonat i el seu anàlisi estadístic a la Figura 4.24, pel cas del policlorur de vinil les profunditats es mostren a la Taula 4.21 i l'anàlisi estadístic de l'afectació dels paràmetres a la Figura 4.25.

Taula 4.20 Profunditats en PC

Nº experiment	Profunditat PC (mm)
1	26,93
2	31,07
3	31,17
4	27,00
5	37,17
6	35,50
7	36,33
8	31,83
9	30,17
10	31,53
11	30,80
12	28,33
13	32,83
14	30,80
15	32,57
16	36,33

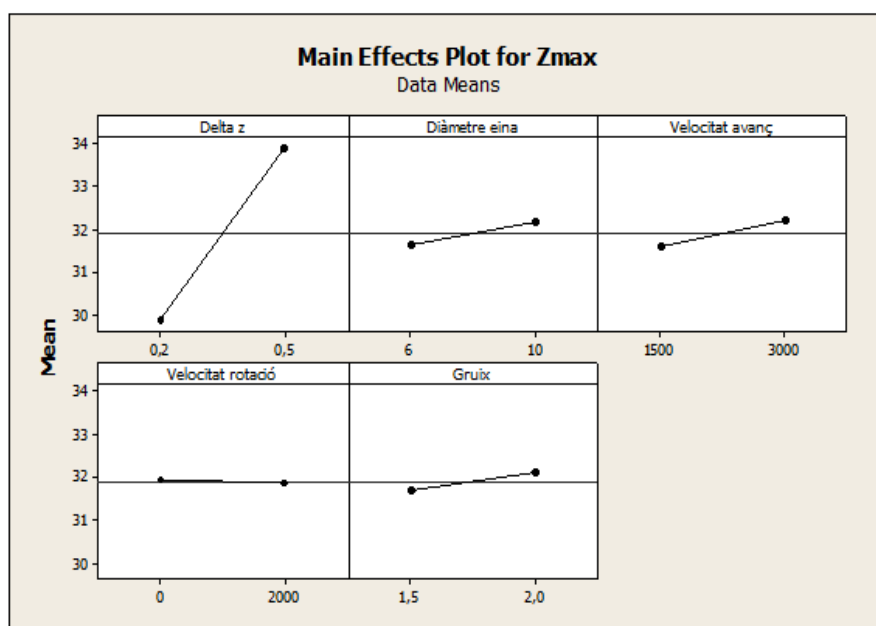


Figura 4.24 Anàlisi estadístic de la profunditat en funció dels paràmetres en PC

A la Figura 4.24 i a la Figura 4.25 es pot observar que per les profunditats si que es veuen diferències evidents entre el policarbonat i el policlorur de vinil. En aquest cas el policarbonat s'observa que té una influència molt important el pas incremental, però tots els altres paràmetres no tenen una influència rellevant, en canvi, pel policlorur de vinil tots els paràmetres són molt influents per arribar a més profunditat. Per entendre millor aquest efecte s'ha de recordar que la temperatura de transició vítria del policlorur de vinil és relativament més baixa que la del policarbonat, per tant les seves propietats es veuran més afectades pels canvis de temperatura i a la mateixa temperatura el PVC serà més deformable perquè s'inicia abans la termofluència i, a la vegada, també és pot deformar més ja que el límit elàstic també és més elevat. I així es corrobora veient que el PVC arriba a profunditats més elevades.

Taula 4.21 Profunditats en PVC

Nº experiment	Profunditat PVC (mm)
1	36,00
2	35,41
3	42,63
4	36,79
5	40,11
6	39,02
7	40,63
8	35,24
9	39,97
10	41,89
11	34,17
12	40,54
13	41,87
14	42,35
15	39,19
16	42,75

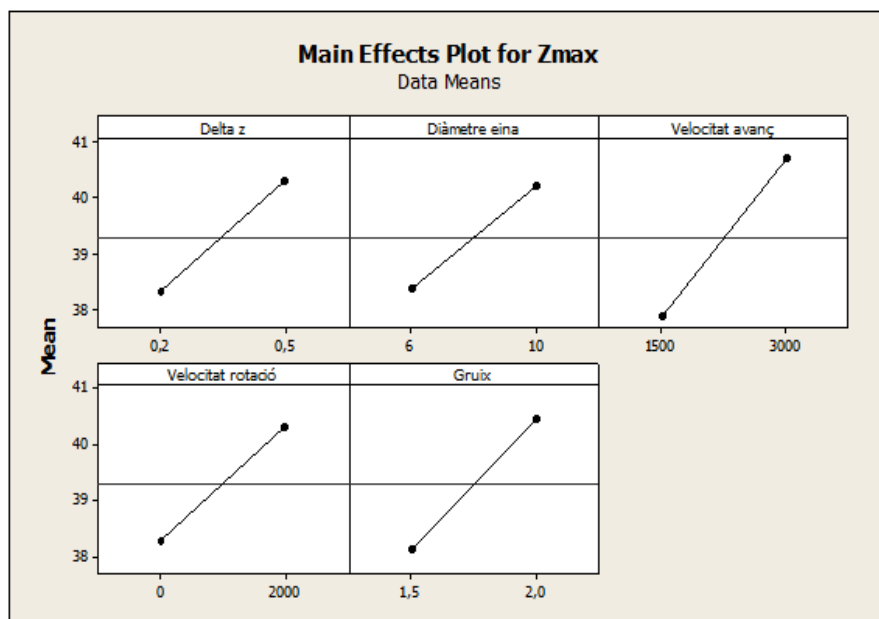


Figura 4.25 Anàlisi estadístic de la profunditat en funció dels paràmetres en PVC

- Pas incremental: En els dos casos es pot veure que el pas incremental afecta de manera semblant, que com més elevat és el pas incremental millor és la profunditat.
- Diàmetre d'eina: En els dos casos un major diàmetre de l'eina implica que s'aconsegueixi una profunditat més elevada. Això és degut a que si el diàmetre de l'eina és menor la penetració de l'eina a la xapa augmenta i fa que la deformació local sigui més elevada.
- Velocitat d'avanç: per aquest paràmetre la profunditat augmenta com més alta és la velocitat d'avanç en conseqüència de que la temperatura augmenta i el material és més deformable.
- Velocitat de rotació: Per la velocitat de rotació és on es veuen les diferències més significatives. En el cas del policarbonat que la velocitat de rotació sigui més elevada no fa que la profunditat assolida sigui més gran, això succeeix perquè el policarbonat amb la rotació es desgasta més que el PVC i per aquest motiu la xapa es debilita i trenca abans. En canvi, pel cas del PVC que hi hagi rotació afavoreix a que s'arribin a profunditats més elevades ja que té més resistència al desgast, però sobretot perquè s'arriba a la temperatura vítria del material i el material flueix més fàcilment sense trencar-se.

- Gruix: El gruix de la xapa afecta de manera que com més elevat sigui més elevada serà la profunditat assolida. Aquest fet és perquè al tenir més material és més difícil que es produeixi la falla.

4.3.4 Rugositat

La rugositat és un altre dels paràmetres més importants perquè determinarà la qualitat superficial de la peça acabada. Les rugositats obtingudes amb els experiments es poden veure a la Taula 4.22 pel cas del policarbonat i el seu anàlisi estadístic a la Figura 4.26, pel policlorur de vinil els resultats es presenten a la Taula 4.23 i l'anàlisi estadístic corresponent a la influència de paràmetres a la Figura 4.27.

Taula 4.22 Rugositats en PC

Nº experiment	Rugositat PC (μm)
1	0,073
2	0,193
3	1,195
4	0,067
5	0,175
6	0,135
7	0,839
8	0,107
9	0,721
10	0,135
11	0,136
12	0,865
13	0,135
14	0,623
15	0,156
16	0,222

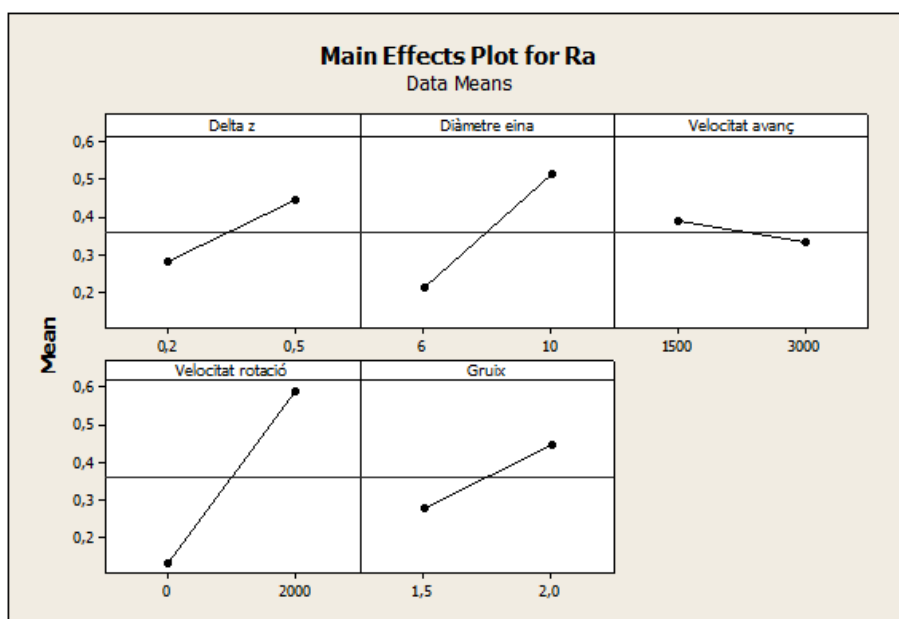


Figura 4.26 Anàlisi estadístic de la rugositat en funció dels paràmetres en PC

A la Figura 4.26 i a la Figura 4.27 es presenten els resultats de l'anàlisi estadístic pels dos materials on s'observa que tots els paràmetres tenen tendències semblants menys en el cas del diàmetre de l'eina. A la vegada, s'ha de destacar que s'obtenen millors rugositats amb el policarbonat que amb el PVC com es mostra en els valors mitjans de les rugositats aconseguïdes.

Taula 4.23 Rugositats en PVC

Nº experiment	Rugositat PVC (μm)
1	0,377
2	0,359
3	0,794
4	0,321
5	0,359
6	0,443
7	1,374
8	0,422
9	1,611
10	1,002
11	0,352
12	0,493
13	0,889
14	0,374
15	0,388
16	0,408

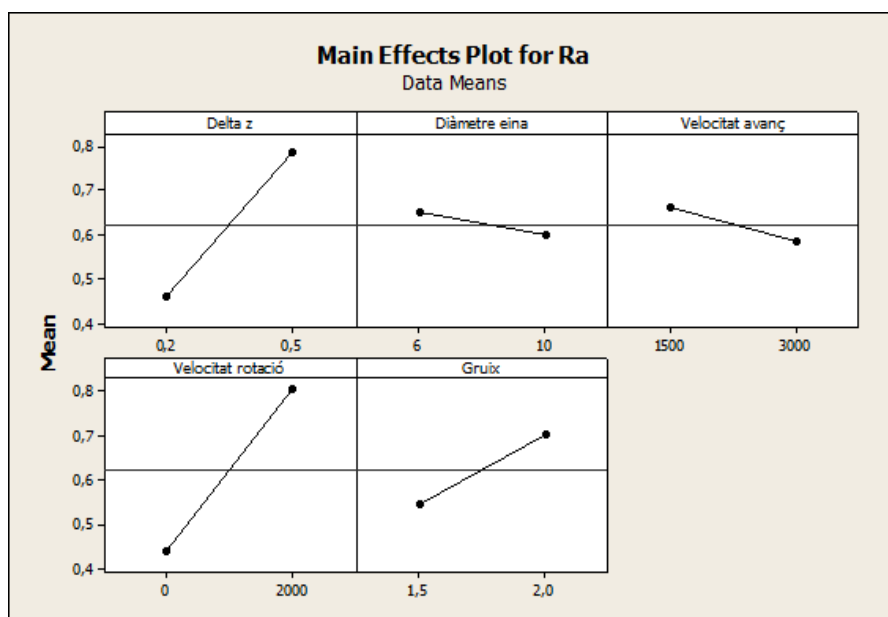


Figura 4.27 Anàlisi estadístic de la rugositat en funció dels paràmetres en PC

- Pas incremental: En els dos casos, tot i que la diferència és més important el en PVC, com més gran sigui el pas incremental més elevada serà la rugositat, per tant es veurà penalitzada. És evident perquè entre capa i capa hi ha una diferència d'alçada més gran i això fa disminuir l'acabat superficial.
- Diàmetre de l'eina: En aquest cas és on es veuen les diferències més destacades entre els dos materials. En el cas del policarbonat es veu que la rugositat augmenta amb l'augment del diàmetre de l'eina, també s'ha de destacar que aquests experiments amb l'eina de 10 mm són els primers que es van realitzar i no es va utilitzar tant de lubricant com en altres casos cosa que va poder penalitzar la rugositat al haver-hi més fregament, a més a més, durant els experiments es va trencar l'eina de 10 mm i es va haver de substituir per una altra, cosa que també és possible que afectés a la rugositat. Pel cas del PVC succeeix al contrari, tot i que no es veu un canvi tan dràstic, com menor és el diàmetre de l'eina pitjors resultats de rugositat s'obtenen.
- Velocitat d'avanç: afecta als dos materials de la mateixa manera i com més elevada és la velocitat d'avanç més baixa és la rugositat.
- Velocitat de rotació: Correspon al paràmetre més influent en la penalització de la rugositat ja que com més elevada és la velocitat de rotació més augmenta la

rugositat perquè hi ha més erosió i desgast de la xapa. El que s'ha comentat abans de que el policarbonat té menys resistència al desgast es pot corroborar amb aquestes les dades de les figures esmentades ja que es pot veure que en mitjana la rugositat amb la rotació parada està per sota els 0,2 μm i amb al rotació engegada sobre els 0,6 μm , per tant les rugositats són tres vegades pitjors. En canvi, pel PVC les rugositats mitjanes amb la rotació parada estan per sobre el 0,4 μm i amb la rotació engegada estan sobre els 0,8 μm , així que la penalització és del doble.

- Gruix: En els dos casos els gruix segueix la mateixa tendència i com més gruixuda és la peça els acabats superficials són pitjors.

4.3.5 Elecció dels paràmetres

Amb l'anàlisi realitzat de com influeixen els paràmetres a les característiques finals de les peces conformades ja es pot fer una discussió de quins poden ser els millors paràmetres per fabricar una peça. S'han analitzat els paràmetres de força i temperatura, però es consideren que no són els paràmetres més importants perquè el que determinarà la qualitat de la peça obtinguda finalment és la profunditat assolida i la rugositat que s'obté. Així que es fa especial èmfasi en aquestes dues propietats de les peces conformades, però a la vegada s'ha de tenir en compte l'energia consumida que és un dels paràmetres que més es valoren. Per tant, s'ha de buscar un compromís entre rugositat, profunditat i energia necessària.

Primer de tot s'observen els paràmetres analitzats per veure si n'hi ha alguns que siguin molt determinants per la qualitat mecànica i energètica de les peces i es puguin treure conclusions:

- Pas incremental: Amb un pas incremental més elevat s'obtenen millors consums d'energia i unes profunditats a les peces més elevades, però a la vegada queda penalitzada la rugositat.
- Diàmetre de l'eina: Pel consum d'energia no és un paràmetre determinant ja que es pot veure que gairebé no afecta. Seguidament s'observa que per la profunditat obtinguda és millor un diàmetre d'eina gran, sobretot pel PVC, però després un diàmetre d'eina gran penalitza la rugositat del PVC i, en canvi, pel policarbonat la millora.
- Velocitat d'avanç: Que la velocitat d'avanç sigui més elevada fa millorar el consum energètic i que s'aconsegueixin profunditats més elevades, però després es veu afectada la qualitat superficial.

- Velocitat de rotació: Al tenir la velocitat de rotació de l'eina activada té uns efectes molt negatius en el consum d'energia i en les rugositats obtingudes, però per altra banda afavoreix a obtenir millors profunditats. Tot i que hi ha elements contradictoris, el fet de tenir la rotació engegada sembla que pesen més els efectes negatius obtinguts, així que possiblement dins de totes les estratègies la millor opció és tenir la rotació lliure, de totes maneres s'analitzarà millor més endavant.
- Gruix: Pel que fa a l'energia consumida no és un paràmetre molt rellevant, com tampoc ho és per la profunditat obtinguda en policarbonat, però sí en PVC que com més gruix millor profunditat. Finalment, pel que fa a la rugositat amb els dos materials com més elevat sigui el gruix pitjor acabat superficial. De totes maneres sembla que aquest paràmetre és el menys influent de tots.

Així que l'anàlisi realitzat és útil per poder determinar quins paràmetres són millors de manera individual, però no en conjunt, per aquesta raó s'ha realitzat un altre estudi que consisteix en analitzar per cada una de les tres característiques a les que s'hi dóna més importància (energia, profunditat i rugositat) quin és el millor experiment i quin el pitjor, així es podrà decidir quins són els millors paràmetres i quins es poden descartar.

Per fer aquest anàlisi s'han ponderat els resultats en tant per cent, de tal manera que el pitjor resultat obtingut està ponderat al 0 % i el millor al 100 %. S'ha de tenir en compte que el valor sigui més alt no significa que sigui millor, com per exemple amb la rugositat, per tant s'especifica a la Taula 4.24 quins nivells corresponen al 100 % i quins al 0 %.

Taula 4.24 Especificació de ponderació de les característiques obtingudes

Característica	Positiu	Negatiu
Energia	Baixa	Alta
Temperatura	Alta	Baixa
Força	Baixa	Alta
Profunditat	Alta	Baixa
Rugositat	Baixa	Alta

Primerament, s'analitzen els resultats dels millors casos del policarbonat on a la Figura 4.28 s'observa que pel millor cas de consum d'energia també s'obté molt bona rugositat arribant gairebé al 100 %, però la profunditat es veu penalitzada i només arriba al 60 %. A la Figura 4.29 es mostra el millor cas de rugositat, però és molt desfavorable tant per l'energia que arriba a un 40 %, però encara més per la profunditat que és del 0 %, així que aquest experiment queda totalment descartat. Per acabar s'analitza el millor cas de profunditat i

com es veu a la Figura 4.30 per l'energia s'obté un valor proper al 85% i per la rugositat un valor del 90%, així que els paràmetres de l'experiment 5 són els millors a seguir.

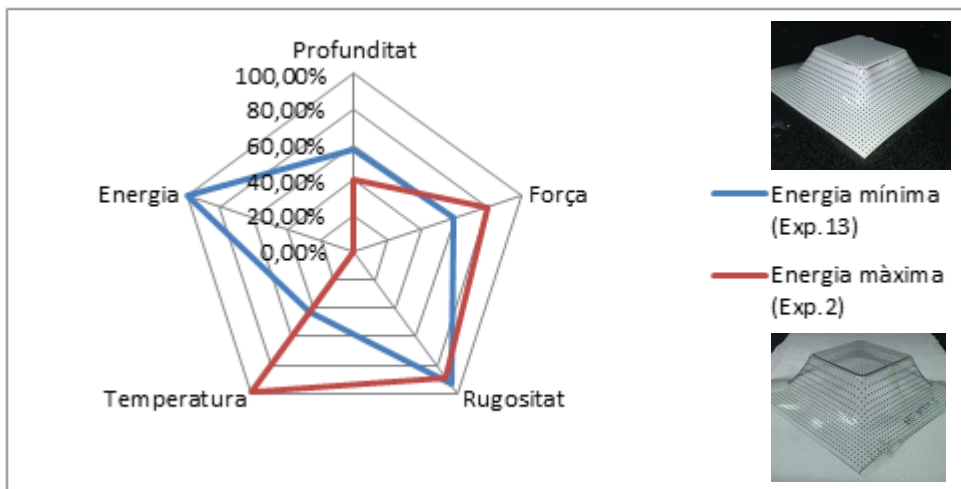


Figura 4.28 Anàlisi dels casos extrems d'energia en PC

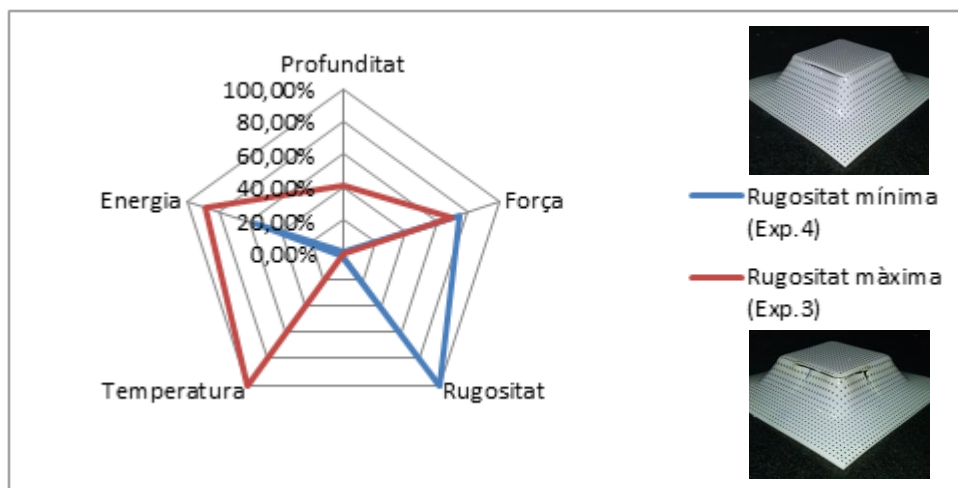


Figura 4.29 Anàlisi dels casos extrems de rugositat en PC

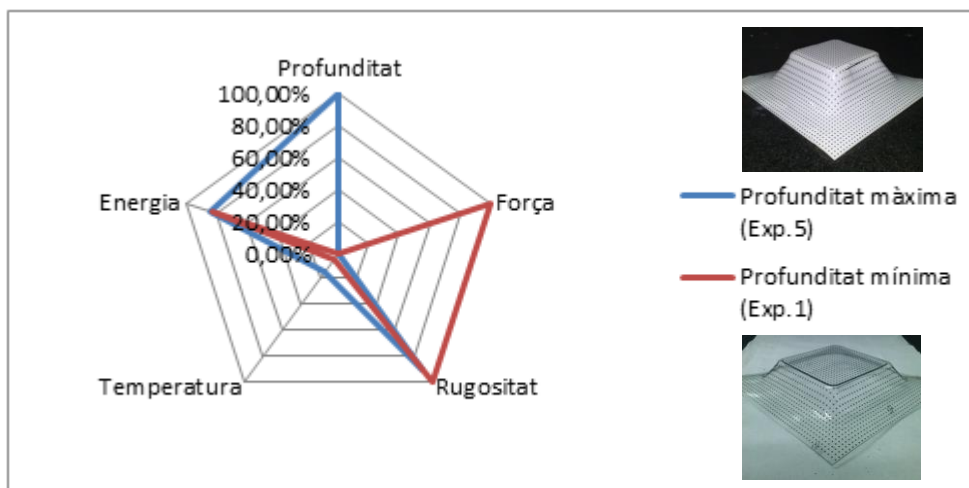


Figura 4.30 Anàlisi dels casos extrems de profunditat en PC

Es fa el mateix anàlisi pel policlorur de vinil i a la Figura 4.31 s'observen els resultats del millor cas d'energia on també s'aconsegueix una bona profunditat al voltant del 90%, però queda penalitzat per una mala rugositat que queda per sota del 60%. La Figura 4.31 correspon al millor cas de rugositat, però com en el cas del policarbonat queden molt penalitzades les altres característiques, tant l'energia com la profunditat al voltant del 30%. Finalment a la Figura 4.33 es mostren els resultats del millor cas de profunditat on també s'obtenen uns valors molts propers al 100 % tant per energia com per rugositat, així que els paràmetres de l'experiment 16 són els millors per PVC.

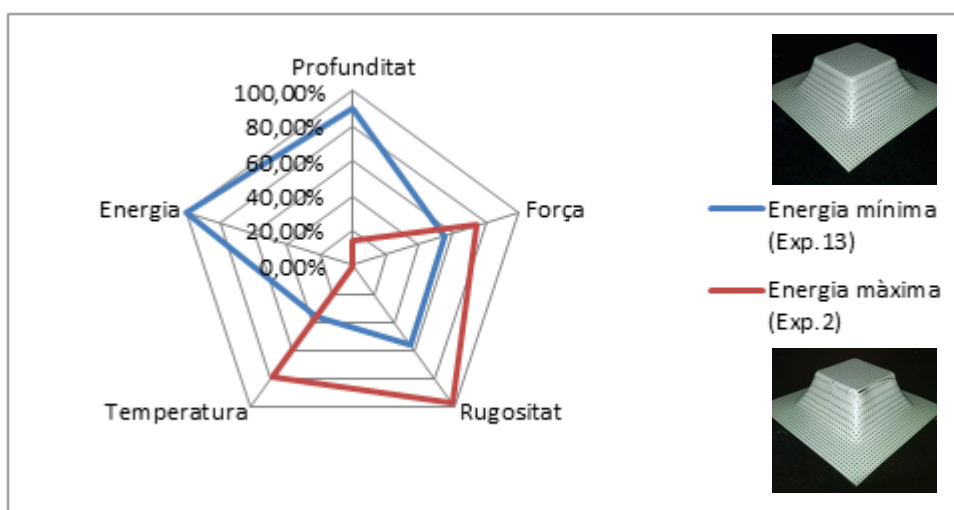


Figura 4.31 Anàlisi dels casos extrems d'energia en PVC

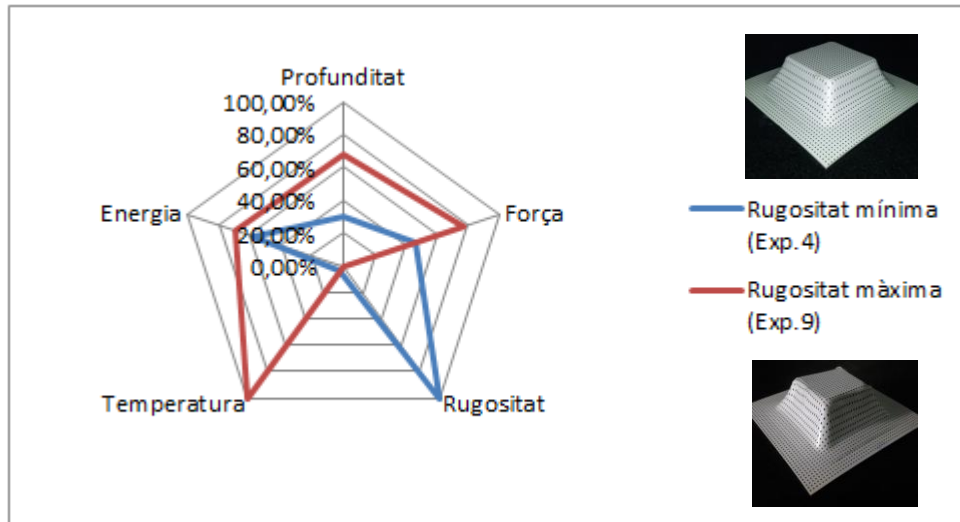


Figura 4.32 Anàlisi dels casos extrems de rugositat en PVC

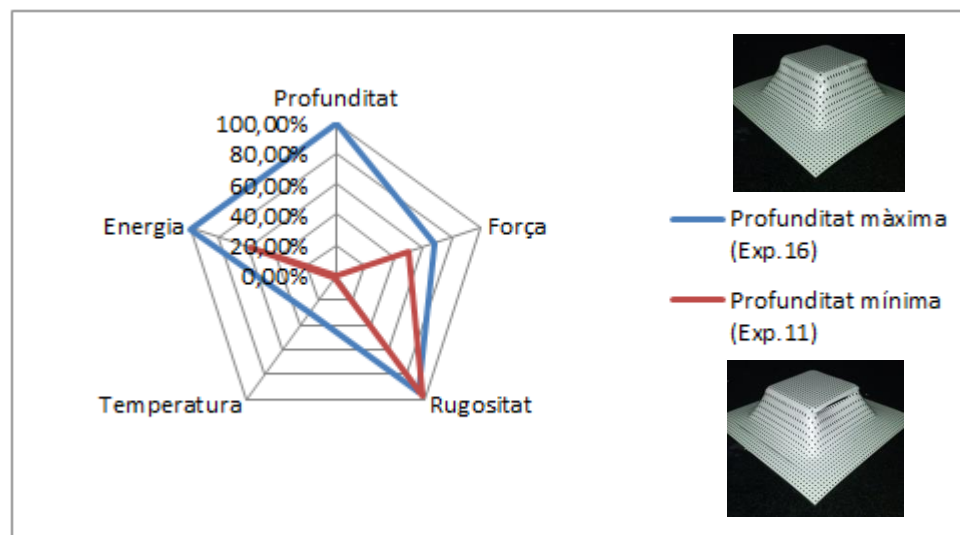


Figura 4.33 Anàlisi dels casos extrems de profunditat en PVC

Els dos experiments que s'obtenen com els millors pels dos materials (experiment 5 pel PC i 16 pel PVC) tenen uns paràmetres de procés molt semblants ja que tenen un pas incremental de 0,5 mm, la velocitat de rotació lliure, l'eina de diàmetre és de 10 mm i l'única diferència és en la velocitat d'avanç que en el cas de l'experiment 5 és de 1500 mm/min i en el cas del 16 és de 3000 mm/min. Les comparativa de les propietats obtingudes per aquests dos experiments es poden veure a la Figura 4.34.

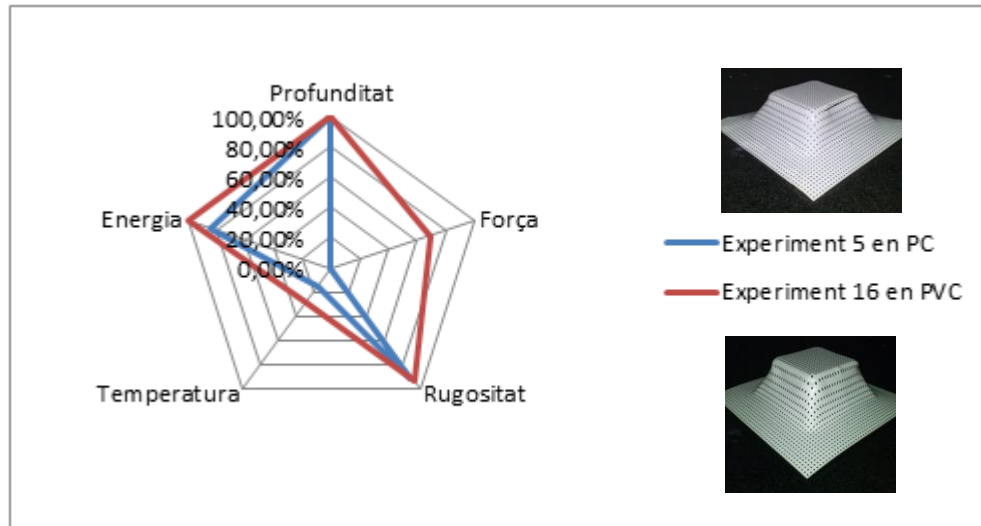


Figura 4.34 Propietats dels millors casos en PC i PVC

Queda clar que pel policlorur de vinil l'estratègia a seguir pels experiments és amb els paràmetres de l'experiment 16, però es vol analitzar quines propietats s'obtenen en policarbonat amb l'experiment 16 perquè milloraria el factor de l'energia i productivitat. Per això a la Figura 4.35 es compara les propietats que s'obtenen, on s'observa que la rugositat és molt semblant i la profunditat disminueix una mica, però es pot considerar acceptable, per tant és millor sempre utilitzar els paràmetres del procés 16 per tots els experiments en aquests dos materials.

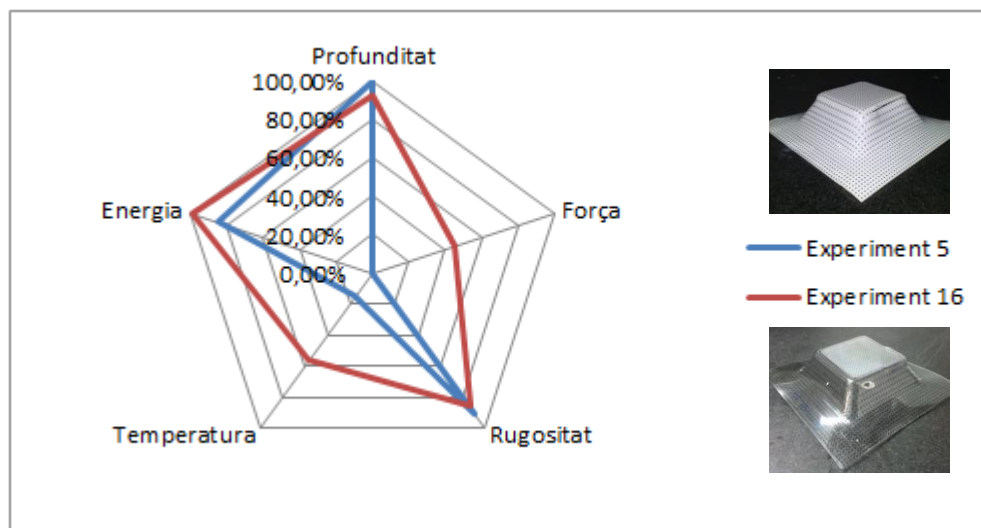


Figura 4.35 Propietats dels experiments 5 i 16 en PC

4.4 Emissions CO₂

En aquest projecte s'ha donat una importància destacada a l'energia consumida durant el procés de producció de les peces, ja que l'energia consumida per la indústria és una quarta part de l'energia total consumida a tot el món. L'energia que més es consumeix a la indústria és l'energia elèctrica, la qual pot tenir diferents orígens de procedència com pot ser de combustibles fòssils, nuclears, o renovables, que totes tenen unes emissions de CO₂ associades, ja que les renovables no tenen unes emissions associades de manera directa però si de manera indirecta, com pot ser el cas de l'energia eòlica la qual per construir un aerogenerador es produeixen emissions de CO₂.

Tenir en compte les emissions de CO₂, en l'actualitat, és molt important ja que s'està treballant mundialment per poder reduir-les perquè causen una contaminació que té efectes negatius per la conservació del medi ambient i de la terra i un dels efectes més importants és l'efecte hivernacle. Un dels plans mundials que reflecteixen la importància de reduir aquestes emissions és el protocol de Kyoto (2005) on hi participen tots els països excepte els Estats Units i el Canadà.

Però no només és important quantificar les emissions de diòxid de carboni derivades de la fabricació de les peces, sinó que també s'ha de tenir en compte l'origen de la matèria primera utilitzada i tots els elements que intervenen des de l'inici fins al final d'un producte. Aquest anàlisi s'anomena l'anàlisi del cicle de vida i té en compte totes les etapes d'un producte: energia consumida i contaminació produïda per l'obtenció de la matèria primera, el transport, la contaminació durant la utilització del producte, la fabricació, els elements secundaris que s'utilitzen durant els processos com poden ser els equips de treball i maquinària i, finalment, el reciclatge o rebuig una vegada s'ha utilitzat. Aquest anàlisi és un estudi molt exhaustiu i és molt complicat aconseguir totes les dades necessàries quantificar punt per punt.

En aquest projecte s'ha considerat l'estudi de diferents parts del cicle de vida de les peces conformades per poder quantificar les emissions de CO₂, on les parts principals que s'han quantificat són: les emissions derivades d'obtenir les xapes de material, és a dir, l'impacte per produir la matèria primera, i les emissions produïdes per l'etapa de conformat. S'ha fet un estudi de les energies mitjanes per cada procés i, finalment, tenint en compte l'estudi realitzat de les estratègies a seguir per la refrigeració, s'ha fet un model de predicció de les emissions que s'obtidrien en funció del temps.

4.4.1 Matèria primera

Per poder calcular les emissions de diòxid de carboni que s'originen amb la fabricació dels dos materials analitzats, policarbonat i PVC, s'ha de conèixer els quilograms de CO₂ que suposen emetre a l'atmosfera per cada quilogram produït de material.

Plastics Europe va realitzar un estudi del cicle de vida per diferents materials plàstics on s'estudia l'energia necessària per produir la matèria primera i les emissions de CO₂ que se'n deriven. Pel cas del policarbonat (Plastics Europe, 2011) indiquen que es necessiten 104,6 MJ/kg PC dels quals només un 0,7 % prové d'energies renovables i la majoria provenen de gas natural seguidament de petroli, i que les emissions de CO₂ equivalents per cada quilogram de policarbonat són de 4,13 kg. Pel cas del policlorur de vinil indiquen que són necessaris 65,86 MJ/kg PVC dels quals només un 0,2 % provenen d'energies renovables i un 70% del petroli i del gas natural repartits equitativament (Plastics Europe, 2006), a més, indiquen que les emissions de diòxid de carboni per cada quilogram de policlorur de vinil produït són de 2,5 kg. Així que el PVC és un material millor energèticament parlant ja que produeix menys emissions de CO₂ i contribueix menys a la contaminació de l'atmosfera.

Amb les dades mostrades d'emissions de CO₂ per cada quilogram de material, es necessita saber el volum de cada xapa utilitzada en els experiments i la seva densitat per obtenir les emissions totals les quals es poden veure a la Taula 4.25.

Taula 4.25 Emissions de CO₂ per cada xapa

Material	Gruix (m)	Dimensions (m)	Volum (m ³)	Densitat (kg/m ³)	Pes (kg)	Emissions (kg CO ₂ /kg)	Emissions totals (g CO ₂ /xapa)
PC	0,0015	0,15x0,15	0,0001125	1200	0,1350	4,13	557,55
	0,0020		0,0001500		0,1800		743,40
PVC	0,0015		0,0001125	1400	0,1575	2,50	393,75
	0,0020		0,0001500		0,2100		525,00

4.4.2 Fabricació

Dins de l'etapa de fabricació s'hi poden distingir tres factors d'emissions diferents, el que és provocat per la utilització del lubricant, l'energia elèctrica consumida durant la preparació de la peça i l'energia elèctrica consumida durant el procés de conformat.

Pel que fa al lubricant dins de la fitxa tècnica no s'especifica com contribueix a les emissions de CO₂ la seva obtenció, només especifica que és biodegradable, per tant és més ecològic que altres. De totes maneres, la quantitat de lubricant que s'ha utilitzat per tots els

experimentos és molt semblant, així que el valor obtingut d'emissions de CO₂ totals serà més baixa perquè falta aquesta dada, però al ser constant en tots els experiments no afecta per la interpretació dels resultats.

Per la fase de preparació de la peça només s'ha tingut en compte el temps que es tarda a col·locar la peça a l'utilitatge i després tornar-la a treure per poder posar la següent, en aquest cas no s'ha tingut en compte el consum d'energia que es produeix en el moment d'engegar i parar la màquina perquè és un valor poc important en comparació amb els altres, per altre banda també s'ha descartat perquè no se sap els experiments que es realitzaran des de que s'engega la màquina fins que es para, així que s'haurien de repartir les emissions de CO₂ derivades de l'engegada entre tots els experiments realitzats. Pel temps de preparació de la xapa dependrà de l'habilitat de l'usuari ja que es fa manualment, però es considera un temps aproximat de 3 minuts on s'està treballant a l'etapa descrita anteriorment com a standby i tenint en compte que el pitjor dels casos s'està treballant amb la refrigeració engegada es pot veure a la Taula 4.15 que la intensitat mitjana treballant sense rotació, que és la mateixa que en l'estat de standby, és de 5,04 A, la qual en termes de potència suposen 2985,5W, per tant l'energia total consumida és de 537,39 kJ.

Les emissions de CO₂ com a conseqüència del consum elèctric que es produeixi durant la preparació i conformació de la peça depenen del proveïdor d'energia. A l'annex B, extret de la Comissió Nacional d'Energia (CNE), es poden veure diferents subministradores elèctriques que treballen a Espanya on s'especifica l'origen de tota l'energia que subministren. En el cas del taller del GREP el subministrador d'energia elèctrica és ENDESA ENERGIA S.A. on s'observa que els orígens de l'energia estan bastant repartits amb un pes proper al 20 % per energies renovables, cicles combinats de gas natural, carbó i nuclear, per tant aquests quatre orígens representen aproximadament el 80 %. Per poder calcular aquestes emissions derivades de la producció d'energia ha sorgit un indicador anomenat CES (Carbon Emissions Signature) (Anghinelli et al. 2011) que es calcula amb l'equació .

$$CES = \eta(112C + 49N + 66P) \quad (\text{Eq. 4.1})$$

On:

- η és un coeficient diferent per cada país i en el cas d'Espanya s'utilitza el valor 0,34 (Anghinelli et al. 2011).
- C, N i P són, respectivament, els percentatges de carbó, gas natural i petroli utilitzats per la producció d'energia.

Amb els percentatges mostrats a l'annex B corresponents a la companyia ENDESA ENERGIA S.A. (Carbó 18 %, gas natural 20,3 % i petroli 2,9 %) s'obté que el CES per la subministradora d'energia del GREP és de 10,89 kg CO₂/GJ. Amb totes aquestes dades ja es poden calcular les emissions derivades del l'instant de preparació que són 5,85 g de CO₂ i les que es produeixen per la fabricació es poden veure a la Taula 4.26.

Taula 4.26 Emissions emeses durant el conformat en PC i PVC

Experiment	PC		PVC	
	Energia (kJ)	Emissions (g CO ₂)	Energia (kJ)	Emissions (g CO ₂)
1	3098,27	33,74	4048,76	44,09
2	10454,59	113,85	13684,58	149,03
3	2532,09	27,57	3202,95	34,88
4	5395,91	58,76	6768,07	73,70
5	2915,69	31,75	2985,5	32,51
6	3069,40	33,43	3372,47	36,73
7	4764,18	51,88	5140,87	55,98
8	2419,88	26,35	2752,6	29,98
9	4112,44	44,78	5478,86	59,66
10	6598,00	71,85	8794,79	95,78
11	6163,03	67,12	6689,61	72,85
12	8787,83	95,70	12046,27	131,18
13	1527,74	16,64	1784,16	19,43
14	6603,17	71,91	8703,51	94,78
15	3658,48	39,84	4232,19	46,09
16	1620,28	17,64	1856,29	20,21

4.4.3 Emissions totals dels experiments

Amb totes les dades que s'han calculat ja es poden calcular les emissions totals de tots els experiments i poder analitzar els resultats. A la Taula 4.27 es mostren les emissions totals per tots els experiments, on en els dos materials coincideixen que el millor experiment és el 16 i el pitjor és el 12. Des del punt de vista de paràmetres de fabricació es confirma tot el que s'ha comentat fins ara, ja que el 16 és l'experiment més ràpid que es pot efectuar i el 12 el més llarg, per tant com més llarg sigui el procés més energia es consumeix i més emissions es produeixen.

L'element nou que apareix, és la gran influència que té el gruix en les emissions de CO₂. Fins ara, el gruix no representava un paràmetre molt important pel consum d'energia, però ara es veu que és molt important en les emissions de CO₂ a causa de les emissions que es deriven de la producció de material, així que com més volum tingui la xapa més emissions

provocarà, per tant, des d'un punt de vista energètic el millor es conformar les peces amb el menor gruix possible. Es pot veure que pels dos materials el fet d'augmentar el gruix 0,5 mm les emissions de CO₂ augmenten un 33%.

Taula 4.27 Emissions totals per PC i PVC

Expe rime nt	PC				PVC			
	Emissió xapa (g CO ₂)	Emissió preparació (g CO ₂)	Emissió fabricació (g CO ₂)	Emissió total (g CO ₂)	Emissió xapa (g CO ₂)	Emissió preparació (g CO ₂)	Emissió fabricació (g CO ₂)	Emissió total (g CO ₂)
1	557,55	5,85	33,74	597,14	393,75	5,85	44,09	443,69
2	557,55		113,85	677,25	393,75		149,03	548,63
3	743,40		27,57	776,82	525,00		34,88	565,73
4	743,40		58,76	808,01	525,00		73,70	604,55
5	743,40		31,75	781,00	525,00		32,51	563,36
6	557,55		33,43	596,83	393,75		36,73	436,33
7	743,40		51,88	801,13	525,00		55,98	586,83
8	557,55		26,35	589,75	393,75		29,98	429,58
9	557,55		44,78	608,18	393,75		59,66	459,26
10	743,40		71,85	821,10	525,00		95,78	626,63
11	557,55		67,12	630,52	393,75		72,85	472,45
12	743,40		95,70	844,95	525,00		131,18	662,03
13	743,40		16,64	765,89	525,00		19,43	550,28
14	557,55		71,91	635,31	393,75		94,78	494,38
15	743,40		39,84	789,09	525,00		46,09	576,94
16	557,55		17,64	581,04	393,75		20,21	419,81

Un altre element destacat que es pot observar a la Taula 4.27 és la gran importància que té el material en les emissions de CO₂, ja que les emissions que es deriven de l'obtenció de la matèria primera suposen entre un 70 i un 95 % de les emissions totals, així que el factor més important serà l'elecció del material a utilitzar per conformar les peces. Veient la comparació del material, des del punt de vista energètic, la millor opció és conformar les peces amb el policlorur de vinil ja que per un gruix de xapa de 1,5 mm les emissions disminueixen un 41,6 % respecte les emissions produïdes per l'obtenció del policarbonat. Per tant, es pot concloure que si el PVC reuneix les propietats mecàniques adients per l'aplicació que es desitja és sens dubte la millor opció.

4.4.4 Predicció de les emissions

Amb tots els resultats presentats al llarg d'aquest apartat 4 s'ha conclòs que la millor opció pel conformat de les peces, tant des del punt de vista energètic com de les propietats mecàniques obtingudes a les peces, són els paràmetres de l'experiment 16, és a dir, un pas incremental de 0,5 mm, un diàmetre d'eina de 10 mm, una velocitat d'avanç de 3000 mm/min, la velocitat de rotació lliure i un gruix de xapa de 1,5 mm. I finalment, amb l'apartat 4.4.3 s'ha vist que la millor opció, degut a les emissions de CO₂, és utilitzar el PVC. Així que s'elabora un model de predicció de les emissions per aquestes característiques de conformat.

Ja que l'estratègia a seguir és sempre fer els experiments amb la rotació lliure es pot recuperar la informació de l'apartat 4.2 on a la Taula 4.14 es pot veure que la intensitat mitjana durant la fabricació sense rotació i amb la refrigeració engegada és de 5,04 A i amb la refrigeració parada és de 4,37 A. Observant la Taula 4.15, es pot extreure que al seguir l'estratègia de fer els experiments amb la rotació parada de manera consecutiva la refrigeració està engegada un 65,14 % del temps i està parada l'altre 34,46 % restant. S'ha de tenir en compte que durant l'etapa de preparació, en el cas en que la rotació és lliure, hi ha el mateix consum que durant l'etapa de fabricació, així que també es poden aplicar els percentatges de temps en que la refrigeració està engegada i parada. Per tant, sabent les emissions de CO₂ derivades de la producció de la xapa de PVC de 1,5 mm, que en el cas de la rotació lliure el consum en l'etapa de preparació i de fabricació són les mateixes, es pot fer un model de predicció d'emissions de CO₂ en funció del temps del procés de conformat.

Les intensitats mitjanes de 5,04 A i 4,37 A es tradueixen en termes de potència a 2985,5 W i 2588,62 W, respectivament. Així que es pot calcular la part fixa de les emissions derivades de la preparació, que com s'ha establert anteriorment es considera d'un temps de 3 minuts, així que, amb els percentatges de refrigeració, consumirà durant 117,25 segons una potència de 2985,5 W i durant els 62,75 segons restants una potència de 2588,62 W, les quals provoquen unes emissions, respectivament, de 3,81 g CO₂ i 1,77 g CO₂. A aquesta part fixa de la preparació se li ha de sumar la part fixa de la matèria primera de PVC per la xapa de 1,5 mm que és de 393,75 g CO₂, així que la part fixa coneguda de l'equació de predicció és de 399,33. A la part fixa s'hi hauria de sumar el lubricant però no s'ha pogut obtenir la dada d'emissió, així que es deixarà en funció d'aquesta. En cada experiment s'utilitzen uns 30 mL de lubricant i la densitat d'aquest és de 1130 kg/m³, per tant s'utilitzen 33,9 g de lubricant a cada experiment. D'aquesta manera es deixarà la quantitat de lubricant utilitzat en funció del paràmetre de g CO₂/g lubricant representat amb una x.

La part variable correspon a la part de fabricació i només va en funció del temps que tardi la peça a conformar-se. Sabent les dades de potència per cada mode de fabricació, els percentatges de temps i les emissions derivades del consum energètic la part variable del mode de fabricació amb la refrigeració engegada és $0,0212 \cdot t$ i la part variable de quan es treballa sense refrigeració és $0,0097 \cdot t$. Per tant l'equació final de predicció és l'equació 4.2.

$$\text{Emissions (g CO}_2\text{)} = 399,33 + 33,9 \cdot x + 0,0309 \cdot t \quad (\text{Eq. 4.2})$$

5 RESUM DEL PRESSUPOST

Considerant el muntant referent al cost del material i cost de mà d'obra per executar les tasques necessàries per la realització de l'anàlisi energètic de deformació incremental de xapa en materials polimèrics el total del pressupost ascendeix a 11329,95 € (ONZE MIL TRES-CENTS VINT-I-NOU AMB NORATA-CINC CÈNTIMS).

Girona, 4 de setembre de 2014

Aleix Lleget Novell

6 CONCLUSIONS

Aquest projecte s'ha centrat en l'anàlisi energètic del procés d'*Incremental Sheet Forming* (ISF), més concretament en la seva variant *Single Point Incremental Forming* (SPIF), sobre els materials polimèrics, concretament en el policarbonat (PC) i el policlorur de vinil (PVC). Per poder dur a terme aquest anàlisi s'ha hagut de dissenyar un sistema de mesura del consum d'intensitats per tal de poder determinar les energies consumides en el procés. Així que, un cop dissenyat el sistema de mesura elèctrica, es va realitzar un disseny d'experiments per poder identificar quins són els paràmetres més influents en el consum energètic del centre de mecanitzat adaptat per aplicar ISF i aprofitant els resultats de consum d'energia també s'ha realitzat un estudi de les emissions de CO₂ per determinar l'empremta ambiental del procés. Per complementar el projecte, paral·lelament a l'anàlisi energètic, s'han enregistrat temperatures, forces, rugositats i profunditats dels experiments per tal de buscar un compromís entre el consum energètic i les bones propietats de les peces acabades. Les principals conclusions que s'han extret del projecte es comenten a continuació.

Primerament, amb els gràfics de consum de potència s'ha pogut determinar que si es fa un anàlisi del procés des de que s'engega el centre de mecanitzat fins que es para s'identifiquen quatre estats diferents de treball, el primer estat és quan s'engega l'ordinador i el control numèric, el segon quan s'habiliten els eixos del centre de mecanitzat i es referencien els eixos i peça, seguit de l'estat de fabricació, el qual és el més important en quant a consum, i, finalment, s'arriba a l'estat de parada. Gràcies als gràfics també s'ha pogut identificar que aquest centre de mecanitzat consta d'una unitat refrigeradora que s'activa en funció de la temperatura del capçal de l'eina i, per tant, no és un factor que es pot controlar en quin moment s'activarà, només s'ha identificat que el fet d'engegar-se comporta un salt en el consum de potència d'uns 400 W i que si els processos que es duen a terme al centre de mecanitzat són sempre amb rotació lliure està al voltant del 65 % del temps activada i si tots fossin amb rotació gairebé ho està el 100 % del temps.

Pel que fa als paràmetres de procés que afecten al consum d'energia durant el procés de fabricació s'ha identificat que el material, el gruix de la xapa i el diàmetre de l'eina no influeixen, en canvi, la velocitat de rotació de l'eina, la velocitat d'avanç i el pas incremental afecten d'una manera determinant. Pel cas de la velocitat de rotació de l'eina augmenta el consum d'energia perquè augmenta el consum d'energia degut a l'activació del motor que dona la rotació i perquè augmenta el temps de procés. Pel cas de la velocitat d'avanç i el

pas incremental, augmenta el consum perquè com més baixos són més temps dura el procés i això comporta l'augment del consum d'energia.

En quant a paràmetres de qualitat de la peça obtinguda en el procés de conformació, s'ha pogut observar que els paràmetres que fan que augmenti la temperatura durant la fabricació fan que la força necessària per deformar la xapa sigui menor, cosa que es favorable a l'hora del procés, però el paràmetre que més influeix en que augmenti la temperatura és la velocitat de rotació de l'eina i aquesta penalitza la rugositat i la profunditat assolida. S'ha considerat que les propietats més importants són la rugositat i la profunditat màxima assolida i per analitzar quins paràmetres de procés afavoreixen a aquestes dos propietats s'ha realitzat un anàlisi estadístic ANOVA i s'ha ponderat els resultats en percentatges per tal de poder determinar-ho. Finalment, amb l'anàlisi realitzat, s'ha obtingut que els millors paràmetres de procés amb un bon compromís entre les propietats mecàniques i l'energia són una velocitat d'avanç de 3000 mm/min, un diàmetre d'eina de 10 mm, un pas incremental de 0,5 mm i la velocitat de rotació lliure. Pel cas del policarbonat, aquests paràmetres esmentats donen molt bones propietats mecàniques i milloren el consum d'energia, però encara s'obtenen millors propietats mecàniques amb una velocitat d'avanç de 1500 mm/min, però així es penalitza el consum d'energia, per tant s'hauria de fer una valoració de les propietats que es volen obtenir però es considera que són adequades les que s'obtenen amb la velocitat d'avanç de 3000 mm/min.

Finalment, les emissions de CO₂ depenen de la fabricació i de l'obtenció de la matèria primera. Per les emissions derivades de la fabricació les més favorables són com menys energia es consumeixi, però s'ha pogut comprovar que és molt més important les emissions derivades de l'obtenció del material, conclouent que pels dos materials estudiats és millor utilitzar el policlorur de vinil i com menys gruix tingui la xapa menys emissions se'n deriven.

Girona, 4 de setembre de 2014

Aleix Lleget Novell

7 RELACIÓ DE DOCUMENTS

Aquest projecte es compon de següents documents:

- Document 1. Memòria i annexos a la memòria.
- Document 2. Pressupost.

8 BIBLIOGRAFIA

- Ambrogio, G., Costantino, I., Denapoli, L., Filice, L., Fratini, L., Muzzupappa, M. (2004) Influence of some relevant process parameters on the dimensional accuracy in incremental forming: a numerical and experimental investigation. *Journal of Materials Processing Technology* 153-154:501-507.
- Ambrogio, G., Denapoli, L., Filice, L., Gagliardi, F., Muzzupappa, M. (2005) Application of Incremental Forming process for high customised medical product manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 162-163:156-162.
- Ambrogio G, Filice L, Manco G (2008) Warm incremental forming of magnesium alloy AZ31. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 57:257-260.
- Anghinelli, O., Ambrogio, G., Di Lorenzo, R., Ingarao, G. (2011) Environmental Costs of Single Point Incremental Forming. *Steel Research International*, p 525-530.
- Bagudanch, I. (2011). Disseny dels elements constitutius per adaptar un centre de mecanitzat de control numèric a la tecnologia ISF. Projecte final de carrera
- Duflou, J.R., Callebaut, B., Verbet, J., De Baerdemaeker, H. (2007). Laser assisted incremental forming: formability and accuracy improvement. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol 56(1), pp. 273-276.
- Emmens, WC., Sebastiani, G., Boogaard, a H van den (2010) The technology of Incremental Sheet Forming—A brief review of the history. *Journal of Materials Processing Technology* 210:981-997.
- Fiorentino, A., Attanasio, A., Marzi, R., Ceretti, E., Giardini, C. (2011). On forces, formability and geometrical error in metal incremental sheet forming. *International Journal of Materials and Product Technology*, vol. 40(3-4), pp. 277-295.
- Franzen, V., Kwiatkowski, L., Martins, P.A.F., Tekkaya, A.E. (2008), Single point incremental forming of PVC, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, no. 1, pp. 462-469.
- Fratini, L., Ambrogio, G., Lorenzo, R. Di, Filice, L., Micari, F. (2004) Influence of mechanical properties of the sheet material on formability in single point incremental forming. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 53:207-210.
- Ingarao, G., Vanhove, H., Kellens, K., Duflou, J.R. (2014). A comprehensive analysis of electric energy consumption of single point incremental forming. *Journal of Cleaner Production*, vol. 67, pp. 173-186.
- Jeswiet, J., Hagan, E (2002). Rapid proto-typing of a headlight with sheet metal. *Proceedings of NAMRC*, may 2002. Issue MR02-205 pp. 1-6.
- Jeswiet, J., Micari, F., Hirt, G., Bramley, A., Duflou, J., Allwood, J. (2005) Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 54:88-114.

- Le, V.S., Ghiotti, A. & Lucchetta, G. (2008), Preliminary Studies on Single Point Incremental Forming for Thermoplastic Materials, Proceedings of the 11th ESAFORM Conference on Material Forming.
- Lupiañez, J. (2012). Estudi medi ambiental del centre de mecanitzat Kondia HS1000 quan s'utilitza com a màquina de ISF. Projecte final de carrera.
- Marques, T.A., Silva, M.B., Martins, P.A.F. (2012). On the potential of single point incremental forming of sheet polymer parts. International Journal of Advanced Manufacturing Technologies, vol. 60, pp. 75-86.
- Martins, P.A.F., Kwiatkowski, L., Franzen, V., Tekkaya, A.E. & Kleiner, M. (2009), Single point incremental forming of polymers, CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 58, no. 1, pp. 229-232.
- Park J, Kim J, Park N, Kim Y (2009) Study of Forming Limit for Rotational Incremental Sheet Forming of Magnesium Alloy Sheet. Metallurgical and Materials Transactions A 41:97-105.
- Plastics Europe: Polyvinylchloride PVC (Emulsion Polymerisation). Eco-profiles of the European Plastics Industry. Brussels, April 2006.
- Plastics Europe: Polycarbonate PC. Eco-profiles and environmental product declarations of the European Plastics Manufacturers. Brussels, March 2011.
- Silva, M.B., Alves, L.M. & Martins, P.A.F. (2010), Single point incremental forming of PVC: Experimental findings and theoretical interpretation", European Journal of Mechanics, A/Solids.
- Zambrano, J. (2013). Incremental Sheet Forming utilitzant policarbonat. Projecte final de carrera.
- Zhang, Q., Guo, H., Xiao, F., Gao, L., Bondarev, a. B., Han, W. (2009) Influence of anisotropy of the magnesium alloy AZ31 sheets on warm negative incremental forming. Journal of Materials Processing Technology 209:5514-5520.

9 GLOSSARI

9.1 Abreviacions

ANOVA: Analysis of Variance. Anàlisi estadístic que permet identificar els paràmetres o factors que tenen més influència sobre una determinada resposta.

CES: Carbon Emissions Signature. Quantitat de CO₂ que s'emet quan es produeix una energia o material.

CNC: Control Numèric Computeritzat.

CNE: Comissió Nacional de l'Energia.

DOE: Design of Experiments (disseny d'experiments).

GREP: Grup de Recerca d'Enginyeria de Producte, Procés i Producció.

ISF: Incremental Sheet Forming. Tecnologia de conformat incremental de xapa.

SPIF: Single Point Incremental Forming. Variant del procés de ISF que no requereix l'ús de matriu.

TPIF: Two Point Incremental Forming. Variant del procés de ISF que utilitza una matriu total o parcial construïda amb materials de baix cost.

PVC: Policlorur de vinil.

PC: Policarbonat.

POM: Polioximetilè o també anomenat poliacetal.

HDPE: Polietilè d'alta densitat.

PA: Poliamida.

AC: Corrent alterna.

DC: Corrent contínua.

USB: Universal Serial Bus, connexió de la targeta d'adquisició de dades a l'ordinador.

SA: Societat Anònima.

9.2 Símbols

S: Velocitat de rotació de l'eina en rpm.

Ø: Diàmetre de l'eina en mm.

Δz: *Depth step* (profunditat de baixada en mm). Permet definir el pas incremental de la trajectòria de l'eina.

Δh: *Scallop height* (altura de cresta en mm). Permet definir el pas incremental de la trajectòria de l'eina.

Δθ: Pas incremental angular constant en graus. Permet definir el pas incremental de la trajectòria de l'eina.

Fmax: Força màxima durant el conformat mesurat en N.

Zmax: Profunditat màxima que s'assoleix en el conformat mesurat en mm.

Ra: *Average roughness* (rugositat mitjana en μm). Rugositat obtinguda a les peces conformades.

T: Temperatura assolida durant el conformat de les peces mesurada en °C.

ANNEXOS

A APARELLS UTILITZATS

En aquest apartat es descriuran alguns dels els aparells utilitzats al llarg del present projecte de manera més detallada que en la memòria.

A.1 Centre de mecanitzat Kondia HS 1000

El centre de mecanitzat mostrat en la següent imatge, es troba en les instal·lacions que del GREP (Grup de recerca en enginyeria de producte, procés i producció) a la Universitat de Girona, concretament les instal·lacions del grup al parc científic d'aquesta.



Figura A.1 Centre de mecanitzat Kondia HS 1000

El centre de mecanitzat Kondia HS1000 (Figura A.1), és un centre de mecanitzat amb fusell vertical. Aquest fusell a part de tenir el moviment rotatori de l'eina, també disposa de moviment horitzontal i vertical, moviments segons l'operari es troba mirant l'aparell. Aquests moviments estan disposats en els eixos x i z, respectivament. La taula de treball que es pot observar a la Figura A.1, on es fixarà el material sobre el que es realitzarà la operació corresponent, disposa de moviment en l'eix y, és a dir, en profunditat.

El comandament d'aquest centre de mecanitzat, es realitza mitjançant un control numèric computeritzat (CNC), aquest cas de la marca Fidia.

Les característiques d'aquest centre de mecanitzat, permeten operar amb una velocitat de rotació de fins a 24000 rpm i amb uns avanços de 24000 mm/min, disposant d'un volum de treball de 1000x600x510 mm en funció dels tres eixos principals, comentats anteriorment. Els capçals acoblats al fusell, són del tipus HSK 63 A segons normativa DIN 69893-A.

A.2 Taula dinamomètrica Kistler 9257B

La taula dinamomètrica Kistler és utilitzada per a obtenir els valors de les forces en els tres eixos x, y i z, la qual està fixada sobre la taula de treball del centre de mecanitzat, i a sobre de la taula, es fixarà el suport que contindrà la xapa sobre la que es realitzarà el procés.



Figura A.2 Taula dinamomètrica Kistler

La representació de les forces mesurades per la taula es fa mitjançant el software DaqView. Aquestes dades són guardades dins un ordinador en un fitxer .bin, el qual s'obre amb el software anteriorment esmentat. Aquest software permet observar l'evolució de les forces amb el temps un cop ha acabat l'adquisició. Una altra funció molt útil d'aquest programa és la de convertir les dades a altres formats per poder així treballar amb les dades utilitzant altres programes per al seu anàlisi.

A la Figura A.3 es pot veure una captura de pantalla del software funcionant alhora de prendre mesures.

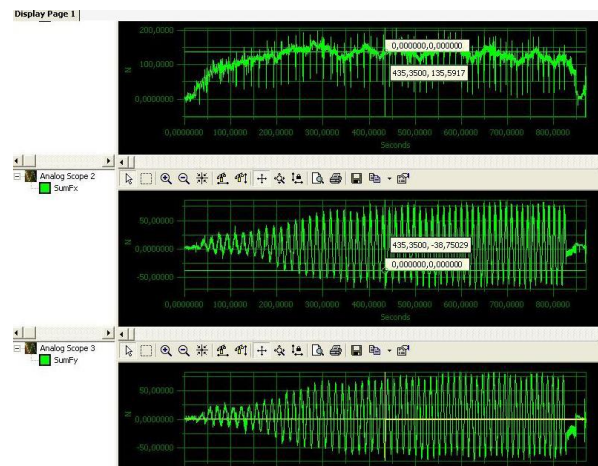


Figura A.3 Exemple representació de les forces durant el procés

A.3 Targeta d'adquisició de dades NI 6008-USB

La targeta d'adquisició de dades utilitzada en el projecte per poder enregistrar les dades a l'ordinador ha estat la 6008-USB de National Instruments la qual consta de quatre entrades i quatre sortides analògiques i digitals, on només s'ha utilitzat una entrada analògica. Per entendre el funcionament intern de la targeta es pot veure el diagrama de blocs a la Figura A.4.

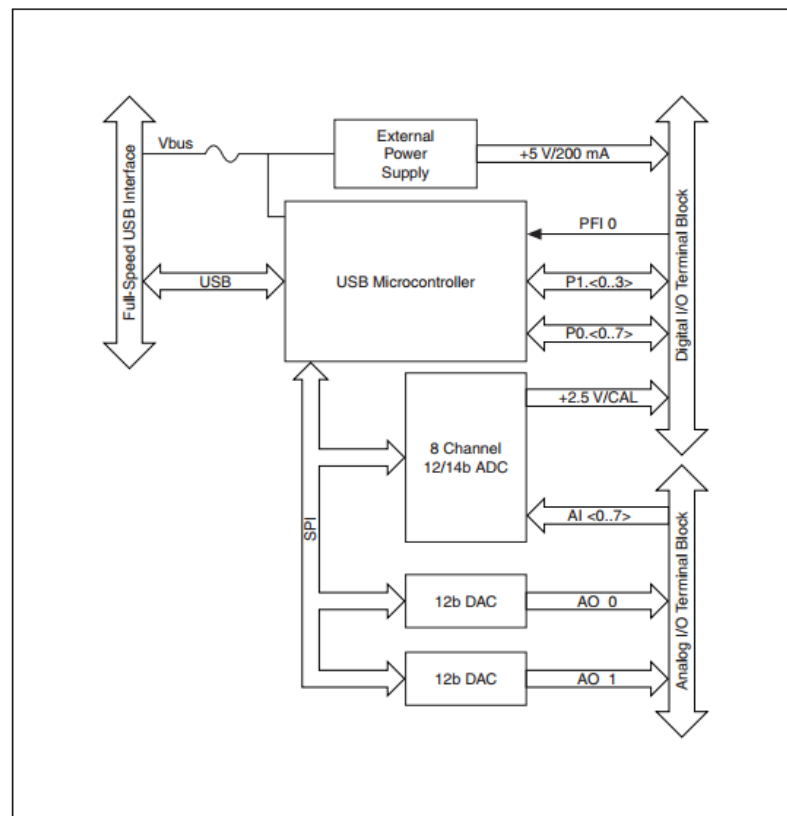


Figura A.4 Diagrama de blocs de la targeta NI 6008-USB

A.4 Transformador de voltatge AmperFlex

Un dels aparells utilitzats més importants en el present projecte és el transformador d'intensitat a una senyal de voltatge per poder fer l'anàlisi energètic, per aquest motiu s'adjunta el seu *datasheet*.

Sección 7.1
Pag. 2

CARACTERÍSTICAS

CARACTERÍSTICAS

ENTRADA

	MARGEN
Intensidad alterna	<input type="radio"/> 0.1A(AC) 0/0.5A, 1.5A <input type="radio"/> 0.5A(AC) 0/2.5A, 7.5A
Frecuencia	50/60Hz
Sobrecarga máxima continua	150% I nominal
Sobrecarga máxima 1 seg	300% I nominal
Potencia absorbida	0.02VA

SALIDA

Intensidad	4/20mA, 0.20mA, 0.05mA, ... Inversa: 20/4mA, 20/0mA, ...
Capacidad de carga máxima	≤700Ω
Protección	Protección contra inversión de polaridad
Tensión	0/10V, 0/5V, ... Inversa: 10/0V, 5/0V, ...
Capacidad de carga máxima	≥1K
Protección	Protección contra cortocircuitos
Tiempo de respuesta (10...90%)	100ms eg
Rizado máximo	0,1%

AISLAMIENTO GALVÁNICO
ENTRADA/SALIDA/ALIMENTACIÓN AC
2000 VAC

AMBIENTALES

Temperatura de trabajo	-10/+60°C
Temperatura de almacenamiento	-40/+80°C
Tiempo de calentamiento	5 minutos
Coefficiente de temperatura	50 ppm/°C

DOBE y AUTOMÁTICA

	MARGEN
ALTERNA	115/230VAC (automática) 50/60Hz: 100Ω/250VAC
CONTINUA	24VDC (amplio margen): 20...30VDC
Consumo máximo	1,8W

ALIMENTACIÓN

Máximo error global	0,1%
Error de linealidad	0,05%
Deriva térmica	<input type="radio"/> 0,5µA/°C <input type="radio"/> 0,2mV/°C

MULTIRANGO

3 Pasos para rango de intensidad y salida	
1. MODO Inversa/directa switch interno	
2. GRUESO Microswitch rotativo	16 Escalones
3. FINO Ajustable multivuelta	15 Vueltas

Cumple con normas EMC89/36/EEC (compatibilidad electromagnética) y directiva de bajo voltaje 73/23/EEC para ambientes industriales.
Inmunidad a interferencias de acuerdo con EN 50082-1 / EN 50082-2
Emisión de perturbaciones de acuerdo con EN 50081-1 / EN 50081-2

DESCRIPCIÓN

Convertidor de intensidad alterna senoidal en señal analógica normalizada de tensión (0/10V) e intensidad (0-4/50mA). La salida puede configurarse para que evolucione directa o inversamente proporcional a la variación de entrada.

Está protegido cumpliendo normas EMC para aplicaciones industriales.

Dispone de doble alimentación: en alterna AC (100...250VAC) con selección automática, y en continua DC (20...30VDC) con amplios márgenes.

Incorpora una técnica exclusiva de filtro que proporciona una respuesta rápida con muy bajo rizado.

Los rangos de temperatura y de señal de salida se configuran fácilmente y con gran precisión en el frontal, quedando protegidos por una tapa abatible.

La conexión se realiza mediante bornes enchufables codificados, que facilitan el rápido intercambio de módulos sin necesidad de volver a cables, y protegen ante equivocaciones.

FORMATO

Protección	IP20
Clase de combustibilidad V0 según UL94	
Caja Ergonómica. Montaje rápido nail	EN50022
Material Poliamida	PA6.6
Conexión: bornes enchufables por tornillo	
protección equivocación de bornes	codificadores
par de apriete tornillos(M3)	0,5Nm
Cable conexión: ≤2,5mm ² , 12AWG	250V/12A
Peso	175grs

CONFIGURACIONES

Sección 7.1
Pag. 3

Ajustes ESCALA y RANGO de SALIDA

El ajuste de SPAN y CERO se realiza en 3 pasos:

1. Ajuste GRUESO de CERO
1. Ajuste GRUESO de SPAN
1. Ajuste FINO de SPAN



SELECCIÓN INVERSA - DIRECTA

De esta forma configuraremos la salida para que evolucione inversa o directamente proporcional a la variación de entrada.



SELECCIÓN SALIDA ①

0/20mA, 0/5mA, 0/1mA, 4/20mA



Se accede al interior de la tarjeta presionando las pestañas laterales y deslizando el frontal.

Al volver a insertarla, hacerlo en el sentido correcto evitando la pestaña interior de protección.

CALIBRACIÓN

Ejemplo:
Intensidad entrada 0/5A
salida 0/10V

1. Conectar la alimentación (DC ó AC) deseada.
2. Aplicar a la entrada un generador de intensidad alterna, proporcionando las intensidades de calibración, y un instrumento de medida en la salida v ó i deseada.
3. Antes de proceder al ajuste, mantenerlo previamente al menos 15 minutos, para que se establezcan térmicamente el transmisor y el instrumento de medida.
4. Seleccionar en la entrada la señal correspondiente al valor de inicio de escala deseado.
5. Ajustar el INICIO de escala de salida v ó i.

0/5A

15 min.

0A

0A 0V

0,000V

6. Seleccionar en la entrada la señal correspondiente al valor de final de escala deseado.
7. Ajustar el FINAL de escala de salida v ó i.

5A

5A 0 10V

1. Girar el microswitch rotativo de SPAN grueso, seleccionando el valor más próximo.
2. Ajustar al valor exacto con el potenciómetro de SPAN fino.
8. Volver a ajustar el inicio y final de escala, retocando sólo los ajustables de fino, hasta conseguir en la salida la escala deseada.

9,7V

10,000V

CONEXIONADO CONEXIONADO

Sección 7.1
Pag. 4

1 Seguridad en las conexiones. Bornas enchufables codificadas.

Mediante codificadores en las bornas, se protege el convertidor ante cualquier error al enchufar invirtiendo las entradas y salidas.



Facilitan el cableado y el intercambio rápido de módulos.

ALIMENTACIÓN

Alimentación doble AC y DC.
Con amplio rango automático de entrada en AC (100... 250VAC) y en continua 94VDC (90... 30VDC)

⚡ AC ALIMENTACIÓN ALTERNA: 115/230VAC

⊖ DC ALIMENTACIÓN CONTINUA: 94VDC



CONEXIONADO ENTRADA DE SEÑAL

ASLAMIENTO GALVÁNICO

BORNA 1: Entrada a través de trafo/S de intensidad alterna ó entrada directa de hasta 5A(AC)

BORNA 2: Entrada a través de trafo/I de intensidad alterna ó entrada directa de hasta 1A(AC)

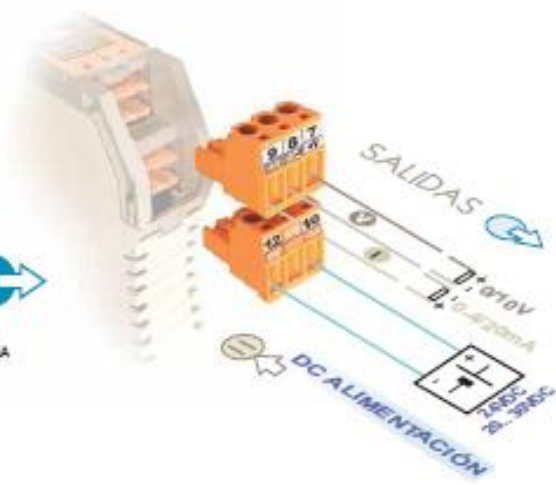
Salida doble, de intensidad (0-4/20mA) y tensión (0/10V) y rangos intermedios fácilmente ajustables.

Puede configurarse de forma que varíe directamente proporcional a la entrada o inversamente (10/0V y 20/4mA).

CONEXIONADO SALIDA



Santa Virgilia 29, local 1A
28033 MADRID
Tfno.: 91 764 21 00
Fax: 91 764 21 32



B ORIGEN DE L'ENERGIA

La CNE dóna la possibilitat a les subministradores elèctriques a participar en el Sistema de Garantia d'Origen i Etiquetat de l'Electricitat per tal de poder assegurar quins són els orígens de l'energia i poder informar als consumidors les energies verdes que s'utilitzen. De la pàgina web de la CNE es pot extreure la taula següent on s'observa el mix d'energies, les emissions de CO₂ i els residus radioactius d'alta activitat de les comercialitzadores.

ORIGEN	COMERCIALIZADORA SIN GDO's (*)	ENDESA ENERGIA, S.A.	HIDROCANTABRICO ENERGIA, S.A. UNIPERSONAL	IBERDROLA GENERACION, S.A.U.	FACTOR ENERGIA, S.A	ALPIQ ENERGIA ESPAÑA, S.A.U.
<i>Renovables (Puras + Híbridas)</i>	14,3%	21,9%	45,5%	58,0%	45,4%	18,9%
<i>Cogeneració de Alta Eficiència</i>	1,4%	1,4%	1,4%	5,6%	1,4%	1,4%
<i>Cogeneració</i>	12,4%	11,3%	7,8%	5,3%	7,8%	11,7%
<i>Ciclos Combinados gas natural</i>	22,3%	20,3%	14,1%	9,6%	14,1%	21,1%
<i>Carbón</i>	19,8%	18,0%	12,5%	8,5%	12,5%	18,7%
<i>Fuel/Gas</i>	3,2%	2,9%	2,0%	1,4%	2,0%	3,0%
<i>Nuclear</i>	25,1%	22,9%	15,8%	10,8%	15,9%	23,8%
<i>Otras</i>	1,5%	1,3%	0,9%	0,8%	0,9%	1,4%
Emisiones de CO2 (Kg /kWh)	0,36	0,33	0,23	0,17	0,23	0,35
	E	E	C	B	C	E
Residuos Radiactivos Alta Actividad	0,70	0,63	0,44	0,30	0,44	0,66
(mg/kWh)	E	E	C	B	C	E

ORIGEN	UNION FENOSA COMERCIAL, S.L.	GAS NATURAL COMERCIALI ZADORA, S.A.	GAS NATURAL SERVICIOS SDG, S.A.	NEXUS ENERGIA, S.A.	NATURGAS COMERCIA LIZADORA, S.A.	EGL ENERGIA IBERIA, S.L.
<i>Renovables (Puras + Híbridas)</i>	21,5%	81,1%	81,0%	14,3%	39,9%	100,0%
<i>Cogeneració de Alta Eficiència</i>	7,7%	1,4%	1,4%	1,4%	1,4%	0,0%
<i>Cogeneració</i>	10,4%	2,6%	2,6%	12,4%	8,6%	0,0%
<i>Ciclos Combinados gas natural</i>	18,7%	4,6%	4,7%	22,3%	15,6%	0,0%
<i>Carbón</i>	16,6%	4,1%	4,1%	19,8%	13,8%	0,0%
<i>Fuel/Gas</i>	2,7%	0,7%	0,7%	3,2%	2,2%	0,0%
<i>Nuclear</i>	21,1%	5,2%	5,3%	25,1%	17,5%	0,0%
<i>Otras</i>	1,3%	0,3%	0,2%	1,5%	1,0%	0,0%
Emisiones de CO2 (Kg /kWh)	0,33	0,08	0,08	0,36	0,26	0,00
	E	A	A	E	C	A
Residuos Radiactivos Alta Actividad (mg/kWh)	0,58	0,14	0,15	0,70	0,48	0,00
	E	A	A	E	C	A

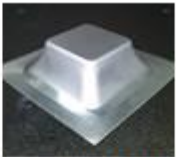

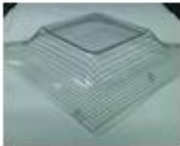
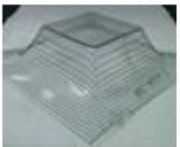
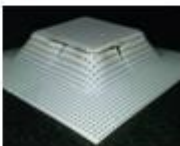
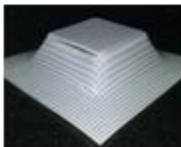
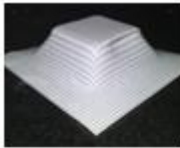

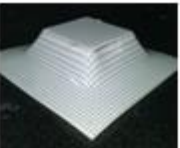

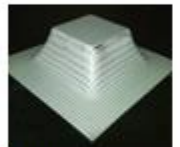

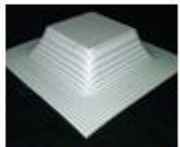
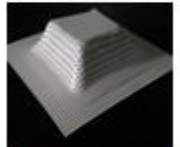
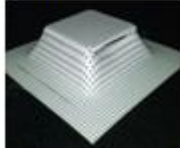
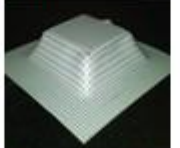
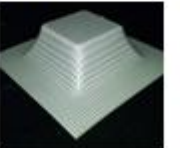
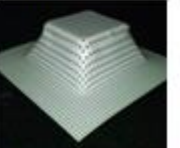
ORIGEN	DERIVADOS ENERGÉTICOS PARA EL TRANSPORTE Y LA INDUSTRIA, S.A. (DETISA)	ENÉRGYA VM GESTIÓN DE ENERGÍA, S.L.U.	E.ON ENERGIA, S.L.	ACCIONA GREEN ENERGY DEVELOPMENTS, S.L.	GESTERNOVA, S.A.	NEXUS RENOVABLES, S.L.
<i>Renovables (Puras + Híbridas)</i>	49,5%	100,0%	50,2%	100,0%	100,0%	100,0%
<i>Cogeneració de Alta Eficiència</i>	50,5%	0,0%	1,4%	0,0%	0,0%	0,0%
<i>Cogeneració</i>	0,0%	0,0%	7,1%	0,0%	0,0%	0,0%
<i>Ciclos Combinados gas natural</i>	0,0%	0,0%	12,8%	0,0%	0,0%	0,0%
<i>Carbón</i>	0,0%	0,0%	11,3%	0,0%	0,0%	0,0%
<i>Fuel/Gas</i>	0,0%	0,0%	1,8%	0,0%	0,0%	0,0%
<i>Nuclear</i>	0,0%	0,0%	14,4%	0,0%	0,0%	0,0%
<i>Otras</i>	0,0%	0,0%	1,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Emisiones de CO2 (Kg /kWh)	0,16	0,00	0,21	0,00	0,00	0,00
	B	A	C	A	A	A
Residuos Radiactivos Alta Actividad	0,00	0,00	0,40	0,00	0,00	0,00
(mg/kWh)	A	A	C	A	A	A

ORIGEN	HIDROELÈCTRICA EL CARMEN ENERGÍA, S.L.	AE3000 AGENT COMERCIALIZADOR, S.L.	COMERCIALIZADORA LERSA, S.L.	ENARA GESTIÓN Y MEDIACIÓN, S.L.	GDF SUEZ ESPAÑA, S.A.U.	SOM ENERGÍA, S.C.C.L.
<i>Renovables (Puras + Híbridas)</i>	22,5%	14,4%	15,1%	55,4%	100,0%	100,0%
<i>Cogeneració de Alta Eficiència</i>	1,4%	1,4%	1,4%	1,4%	0,0%	0,0%
<i>Cogeneració</i>	11,2%	12,4%	12,3%	6,4%	0,0%	0,0%
<i>Ciclos Combinados gas natural</i>	20,2%	22,3%	22,1%	11,5%	0,0%	0,0%
<i>Carbón</i>	17,8%	19,7%	19,6%	10,1%	0,0%	0,0%
<i>Fuel/Gas</i>	2,9%	3,2%	3,1%	1,6%	0,0%	0,0%
<i>Nuclear</i>	22,7%	25,1%	24,9%	12,9%	0,0%	0,0%
<i>Otras</i>	1,3%	1,5%	1,5%	0,7%	0,0%	0,0%
Emisiones de CO2 (Kg /kWh)	0,33	0,36	0,36	0,19	0,00	0,00
	E	E	E	B	A	A
Residuos Radiactivos Alta Actividad (mg/kWh)	0,63	0,69	0,69	0,36	0,00	0,00
	E	E	E	C	A	A

C FOTOGRAFIES EXPERIMENTS

En aquest annex es presenten les imatges dels experiments que més s'han comentat al llarg del present projecte per fer l'anàlisi dels resultats a la Taula C.1.

Taula C.1 Imatges dels experiments més comentats en el projecte

Alumini	 Experiment 3			
Acer	 Experiment 3			
PC	 Experiment 1	 Experiment 2	 Experiment 3	 Experiment 4
	 Experiment 5	 Expeirment 12	 Experiment 13	 Experiment 16
PVC	 Experiment 2	 Experiment 3	 Experiment 4	 Experiment 9
	 Experiment 11	 Expeirment 12	 Experiment 13	 Experiment 16

Girona, 4 de setembre de 2014

Alex Lleget Novell