

GRADUA: Industria Teknologiaren Ingeniaritza

# GRADU AMAIERAKO LANA

## *HONDAKINEN ANALISI TERMOGRABIMETRIKOA*

**Ikaslea:** Achutegui, del Valle, Ainhoa

**Zuzendaria:** López, Urionabarrenechea, Alexander

**Ikasturtea:** 2017-2018

**Data:** Bilbo, 2018, ekaina, 19



GRADUA: Industria Teknologiaren Ingeniaritza

# GRADU AMAIERAKO LANA

## **HONDAKINEN ANALISI TERMOGRATIMETRIKOA**

### **1. DOKUMENTUA – MEMORIA**

**Ikaslea:** Achutegui, del Valle, Ainhoa

**Zuzendaria:** López, Urionabarrenechea, Alexander

**Ikasturtea:** 2017-2018

**Data:** Bilbo, 2018, ekaina, 19



## Laburpena

Gradu Amaierako Lan honek, pirolisi eta oxidazio prozesu konbinatu batean pirolisi-tenperaturak, oxidazio tenperaturak eta oxidazio denborak duten eragina aztertzen ditu, haien balio optimoak lortuz, karbono zuntzez indartutako polimeroen (CFRP) hondakinetatik zuntzak berreskuratzeko asmotan. Horretarako, Airbus konpainiak utzitako CFRP hondakin ondua eta konposizio ezaguna duen epez kanpoko *preprega* hainbat pirolisi eta oxidazio prozesutatik igaro da, analisi termograbitrikoan oinarrituz.

Optimizazioa Esperimentuen Diseinuen Teoriako  $2^k$  erabateko diseinu faktoriala erabiliz burutu da eta beraz, eredu matematikoan adierazitakoa jarraituz, zehaztu beharreko faktore bakoitzaren bi maila aukeratu dira, balio minimo eta maximoa. Balio horien arteko konbinazioak eginez, kasu honetan, hiru faktoreekin zortzi konbinazio, konbinazio bakoitzari dagokion saiakera esperimentalak egin da. Saiakera horietatik lortutako emaitzak izanda, hots, bakoitzaren pisu galera ezaguna izanda, analisi matematikoa garatu da.

Emaitzak erakusten dute pirolisi tenperatura dela eragin gutxien duen faktorea, beste bien eragina nabarmenki handiagoa izanik. Halaber, material bakoitzaren karbono zuntzak berreskuratzeko balio optimoak esperimentalki frogatu dira.

*Hitz gakoak: pirolisia, karbono zuntzez indartutako polimeroak, berreskurapena, optimizazioa*

## Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo estudiar la influencia de la temperatura de pirolisis, temperatura de oxidación y tiempo de oxidación de un proceso combinado de pirolisis y oxidación, obteniendo los valores óptimos de dichos factores, con el fin de recuperar las fibras de desechos de polímeros reforzados con fibras de carbono (CFRP). Para eso, desechos de CFRP curado y de un *prepreg* caducado de una composición conocida cedidos por Airbus han sido sometidos a varios procesos de pirolisis y oxidación, basándose en el análisis termogravimétrico.

La optimización ha sido llevada a cabo con el diseño factorial completo  $2^k$  perteneciente a la Teoría de Diseño de Experimentos y, por consiguiente, siguiendo lo expresado en el modelo matemático, se han elegido dos niveles de cada factor a concretar, el máximo y el mínimo. Con la combinación de dichos valores, en este caso, con tres factores ocho combinaciones, se ha ejecutado un ensayo para cada combinación. Una vez obtenidos los resultados de dichos ensayos, esto es, conocido la pérdida de peso de cada uno, se ha desarrollado el análisis matemático.

Los resultados muestran que el factor menos relevante es el de la temperatura de pirolisis, siendo los otros dos remarcablemente más influyentes. Igualmente, los valores óptimos obtenidos para recuperar las fibras de carbono han sido demostrados experimentalmente.

*Palabras clave: pirólisis, polímeros reforzados con fibras de carbono, recuperación, optimización*

## Abstract

The aim of this project is to study the influence of the pyrolysis temperature, oxidation temperature and oxidation time of a combined pyrolysis and oxidation process, obtaining the optimal values for aforesaid factors, in order to recover the fibers from carbon fiber reinforced polymer (CFRP) scrap. Cured CFRP scrap and expired prepreg of a known composition from Airbus have been tested for some pyrolysis and oxidation processes, based on the thermogravimetric analysis.

The optimization has been carried out with the  $2^k$  full factorial method belonging to the Theory of the Design of Experiments and, consequently, following the mathematic model, two levels for each specified to be factor have been chosen, the maximum and the minimum. Making use of the combination of aforementioned values, in this case, with three factors eight combinations, one test for each combination has been performed. Once the results for said tests have been obtained, that is to say, once the weight loss of each one is known, the mathematical analysis has been carried out.

The results show that the least relevant factor is the pyrolysis temperature, whereas the other two are shown to be remarkably more influential. Additionally, the obtained optimum values to recover the carbon fibers have been proven experimentally.

*Key words: pyrolysis, carbon fiber reinforced polymers, recovery, optimization*

## Taulen zerrenda

Taula 1.Zenbait materialen propietateen konparaketa .....	12
Taula 2. Birziklapen metodoen berreskurapena .....	22
Taula 3.Parametroen puntako balioak .....	33
Taula 4.Konbinazio taula .....	40
Taula 5. Efektuen kalkulua.....	43
Taula 6.Konposizioaren kalkulua.....	44
Taula 7.FCCA balio optimoen berrespena .....	56
Taula 8.FCPM21 balio optimoen berrespena.....	56
Taula 9. Balio teoriko optimoak.....	57
Taula 10.Barne-orduak.....	59
Taula 11.Amortizazioak .....	59
Taula 12.Gastuak.....	60
Taula 13.Aurrekontu totala .....	61
Taula 14.Babes- eta kontingentzia-plana .....	64

## Irudien zerrenda

Irudia 1. CFRPak hegazkinetan. Airbus A350 XWB egitura.....	11
Irudia 2. CFRP eskariaren bilakaera(Sauer et al., 2017) .....	17
Irudia 3. Birziklapen moten eskema.....	19
Irudia 4. FCCA hondakin ondua .....	33
Irudia 5.FCPM21 prepreg hondakina.....	33
Irudia 6.TGA701 ekipoen barrualdea analisi baten ostean .....	34
Irudia 7.TGA701 ekipoa .....	35
Irudia 8. TGA701 ekipoen fluxu diagrama .....	36
Irudia 9.Gantt-en diagrama .....	38
Irudia 10. Efektuen matrizea .....	42
Irudia 11. FCCA efektuen balioak .....	45



Irudia 12.FCPM21 efektuen balioak .....	45
Irudia 13. FCCA kubo .....	47
Irudia 14. FCCA Efektu nagusien grafika.....	47
Irudia 15. FCCA Elkarrekintza efektuen grafika .....	48
Irudia 16. FCCA Paretoren diagrama.....	48
Irudia 17. FCCA optimizazio grafika. Minitab .....	49
Irudia 18.FCCA Optimizazioa.Design Expert .....	50
Irudia 19.FCCA Mugalde Grafika .....	50
Irudia 20.FCCA Mugalde grafika 3D .....	51
Irudia 21.FCPM21 kubo grafika .....	52
Irudia 22.FCPM21 efektu nagusiak .....	52
Irudia 23.FCPM21 elkarrekintza efektuak .....	53
Irudia 24. FCPM21 Paretoren diagrama.....	53
Irudia 25. FCPM21 optimizazio grafika .....	54
Irudia 26.Mugalde baldintzak 3D.....	55
Irudia 27.FCPM21 Mugalde Grafika 3D .....	55
Irudia 28. FCCA berreskuratua .....	57
Irudia 29. FCPM21 berreskuratua.....	58
Irudia 30. Arriskuen analisi orokorra .....	63

## Akronimoak

- CFRP: karbono zuntzez indartutako polimeroak
- FCCA: karbono zuntzez indartutako polimero ondu hondakina
- FCPM21: karbono zuntzez indartutako polimero prepreg hondakina
- $T_p$ : pirolisi tenperatura
- $T_o$ : oxidazio tenperatura
- $t_o$ : oxidazio denbora

## Aurkibidea

Laburpena.....	1
Resumen.....	2
Abstract .....	3
Taulen zerrenda.....	4
Irudien zerrenda .....	4
Akronimoak.....	5
Aurkibidea.....	6
1. Sarrera .....	9
2. Testuingurua.....	10
2.1 Karbono zuntzen aplikazioak .....	10
2.2 Karbono-zuntz konpositeen propietateak.....	12
2.3 Karbono-zuntz konpositeen egitura.....	12
2.3.1 Matrisea.....	13
2.3.2 Indargarria .....	14
3. Gaiaren egoeraren azterketa .....	16
3.1 Zuntzen birziklapena .....	16
3.2 Birziklapen metodoak .....	19
3.2.1 Birziklapen termiko motak .....	21
4. Aukeratutakoaren analisia. Pirolisia .....	23
5. Lanaren helburuak eta irispena.....	26
5.1 Helburu orokorrak.....	26
5.2 Helburu espezifikoak.....	26
5.3 Irispena.....	26

6.	Lanaren onurak.....	28
6.1	Ingurumen onurak .....	28
6.2	Onura ekonomikoak.....	28
6.3	Onura sozialak.....	29
7.	Proposatutako irtenbidearen aukeraketa. Oinarritzko diseinua .....	30
8.	Metodologia.....	31
8.1	Deskribapena.....	31
8.1.1	Optimizazio teorikoa .....	31
8.1.2	Aztertutako parametroak.....	32
8.2	Erabilitako materialak .....	33
8.3	Ekipoa .....	34
8.4	Faseak.....	36
8.5	Prozedurak.....	39
8.5.1	Konposite onduaren konposizioaren zehaztapena.....	39
8.5.2	Faktore maximo eta minimoen saiakerak.....	40
8.5.3	Prozedura matematikoa.....	42
8.6	Emaitzak.....	44
8.6.1	Konposite onduaren konposizioaren zehaztapena.....	44
8.6.2	Faktore minimo eta maximoen saiakerak.....	45
8.6.3	Balio optimoen berrespina.....	56
9.	Alderdi ekonomikoak .....	59
9.1	Gastu zuriketa.....	59
9.1.1	Barne-orduak .....	59
9.1.2	Amortizazioa .....	59
9.1.3	Gastuak.....	60
9.1.4	Azpikontratazioak .....	60
9.1.5	Kostu ez-zuzenak .....	60

9.1.6	Aurrekontu totala.....	61
10.	Arriskuen analisia.....	62
10.1	Erabilitako ekipoarekin arazoak (A1) .....	62
10.2	Laborategian arazoak (A2).....	62
10.3	Atzerapenak (A3).....	63
10.4	Datu galera (A4).....	63
10.5	Arriskuen analisi orokorra.....	63
11.	Ondorioak.....	65
12.	Bibliografia .....	66

## 1. Sarrera

Industria Ingeniaritzaren Kimika sailari dagokion Gradu Amaierako Lan honek, industria eta gizartearen beharren ondorio diren karbono zuntzez indartutako polimeroen hondakinetatik zuntzak berreskuratzea du helburu.

Lehenengo eta behin, aztertu den materialaren inguruko ikerketa bat egin da. Materialaren aplikazioetatik abiatuz, haien propietateak aipatu dira, zuntzen birziklapenaren beharra eta horrek suposatzen duen erronka argi azaltzeko asmoz. Puntu horretara helduta, zuntzen birziklapenean eta berreskurapenean sakondu da, lanak aztergai duen ildo jarraituz. Behin zuntz berreskurapen moduak azalduz gero, egokiena aukeratu da.

Hautatutako prozesua oinarritzat hartuta, ikerlan honek dituen helburuak aipatu dira, onurekin jarraituz, horien ingurumen aspektuak eta aspektu sozio ekonomikoa aipatuz.

Zuntzen berreskurapen prozesuaren optimizazioa helburu, prozedura matematiko jakin batean oinarrituz, karbono zuntzez indartutako polimeroen hondakinen analisi termogravimetricoa aurrera eraman da, hainbat entsegu burutuz.

Behin entseguek jarraitu duten prozesua definituz gero, saiakera bakoitzaren emaitzak eskuragarri izan daude, horien analisi matematikoa ahalbideratuz. Analisi hori programa informatikoen bitartez aurrera eraman da, bertatik balio teoriko optimoak lortuz, eta balio horiek berresteko helburuarekin froga esperimentalak aurrera eman da, lortutako emaitzak aurkeztuz.

## 2. Testuingurua

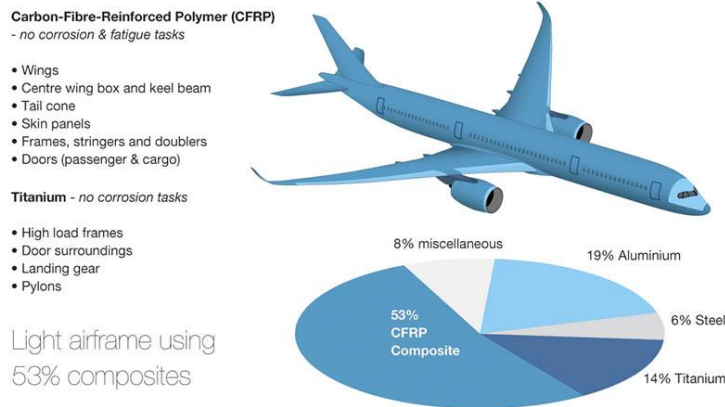
### 2.1 *Karbono zuntzen aplikazioak*

Nahiz eta karbono zuntzaren teknologiak asmatu berriak ez diren, azken urteetan haien erabilerak gorakada handia jasan du. Zuntz horiek ez dira bakarrik erabiltzen; hau da, karbono zuntzak erretxina polimeriko batekin nahasten dira, konpositeak edo karbono zuntzez indartutako polimeroak (*CFRP, Carbon Fiber Reinforced Polymer*) izeneko materialak sortuz. Nahiz eta konposite hitza CFRP-a baino material gehiagotarako erabilia den, definizioz material bat baino gehiagoz osatutako materiala izanik, ikerlan honen norainokoan oinarrituz, CFRP eta konposite hitzak sinonimo bezala erabiliko dira lanean zehar. Aipagarria da zuntzen %95a lan honetan aztergai diren konpositeak sortzeko erabiliak direla(Holmes, 2013).

Karbono zuntzekin osatutako materialak aeronautikan, aerosorgailuetan, automobilgintzan eta eraikuntzan erabiliak dira batez ere(Sloan, 2016). Nahiz eta esandakoarekin industrian bakarrik erabiltzen direla iruditu, ez da zuzena, egunerokotasunean erabiltzen diren produktuetan ere aurkitzen baitira. Zenbakien ideia orokor bat izateko, karbono zuntzez indartutako plastikoen merkatuan oinarrituz, 2017 urtean(Sauer, Kühnel, & Witten, 2017), eskaeraren %30 aeronautika eta industria aeroespazialaren arloan izan zen (nahiz eta salmenta bolumena %60a izan), %22a automobilgintzan, %13a aerosorgailuetan eta %12a kirol eta aisialdi gaitan. Jarraian aplikazioei buruzko azalpen labur bat emango da.

Aeronautikaren arloari dagokionez, konpositeek sektore horretan nahitaezkoak diren bi propietate betetzen dituzte: materialaren arintasuna eta erresistentzia(Quilter, ). Horrez gain, nekearen aurkako eta korrosioaren aurkako erresistentzia altuak eskaintzen dituzte eta optimizazio maila altua baimentzen dute, norabide erresistentzia eta zurruntasuna erraz moldatu baitaitezke. Hegazkin komertzialetan, aipatutako guztiak ekoizpen-kostu altuak konpentsatzen ditu, aireontzien arintasunak epe luzera irabaziak ekartzen baititu, hala nola, erregai erabilpenaren beherapenagatik edo pisu gehiago garraiatzeko ahalmenarengatik; are gehiago, aireontzien mantenu kostua txikitu egiten da(Nayak, 2014). Ikus, adibidez, Airbusen kasua: Airbus A350 XWB hegazkin komertzialak bere estrukturaren %53a CFRP-z egin du(*A350 XWB family*).

Airbusen web orrian irakurri daitekeen bezala, “abantaila hauek (material arinak eta motor mota hobetua) %25 jaitea egiten dute bai operazio kostuei begira baita erregai eta CO2 emisioetan”.



*Irudia 1. CFRPak hegazkinetan. Airbus A350 XWB egitura*

Energia eolikoaren sektorean karbono zuntzak gain beira zuntza ere erabiltzen erabiltzen da. Aeronautikan bezala, pisu-zurruntasun ratio baxua izatea nahitaezkoa da eta, horrez gain, hegalek karga zikloak eta kargen arteko diferentzia handiak jasan behar dituzte. Nahiz eta beira zuntzez egindako hegalek ugariagoak izan, karbono zuntzezko konpositeen garapenari esker, horien erabilerak gora egin du. Horren adibide dira Siemens-Gamesaren (Zamudio) aerosorgailuen hegalek; hegalearen habe nagusia epoxy erretxinaz preinpregnatutako (preprega) karbono eta beira zuntzezko ehun ondu batek osatzen du, kanpoko oskola beira zuntzak osatuta dagoelarik (*Diseño y fabricación. proceso de fabricación y montaje.*; Willett, 2012).

Industriako esparrutik aldentuz, karbono zuntzak egunerokotasunean erabiltzen diren produktuetako bat kirol-gaiak dira. Besteak beste, golf makilak, bizikletak, erraketak eta surf taulak aurki daitezke (*The markets: Sports and recreation.* 2014). Betidanik erabili izan diren metalekin alderatuz, arinak eta iraunkorrak izateaz gain, produktuaren diseinuaren malgutasuna eta arintasuna baimentzen dute, kirolariaren errendimendurako erabakigarria izan daitekeena.

## 2.2 *Karbono-zuntz konpositeen propietateak*

Aurretik aipatu diren sektoreetan karbono zuntzeko konpositeak erabiltzen dira, horien abantaila nagusia zurruntasun eta erresistentzia altua eskaintzea delarik, arintasuna bermatuz (Johnson, ); adibidez, altzairu herdoilgaitzarekin alderatuz, elastikotasun modulu oso antzerakoa daukate, baina dentsitatea 4,6 bider altuagoa da. Horrez gain, CFRP-ek haustura tentsio altua, korrosioarekiko erresistentzia altua eta espantsio termiko baxua eskaintzen dituzte. Datu horiek ondorengo taulan behatu daitezke (Callister, 2007a). Konpositeen beste abantailetako bat ekoizteko orduan daukaten moldagarritasun handian datza, tamaina handiko pieza konplexuak modu eraginkorrean sortzea ahalbidetuz (*Innovative composite engineering. what is carbon fiber?*).

Taula 1. Zenbait materialen propietateen konparaketa

	$\rho(\text{g/cm}^3)$	E(GPa)	Haustura-tentsioa(GPa)
<b>Altzairu heldoilgaitza (304 aleazioa)</b>	8.00	193	515
<b>Aluminioa(1100 aleazioa)</b>	2.17	69	90
<b>Modulu altuko karbono zuntz-epoxi matricea(Vf=0.60)</b>	1.7	220	760

## 2.3 *Karbono-zuntz konpositeen egitura*

Aurreko propietateak lortzeko, konpositeek bi material daukate, material bakoitzaren propietateak oso desberdinak direlarik. Konbinatzean, ordea, elkarren osagarri egiten dira, propietate bikainak lortuz. Horrela, propietateak konpentsatu egiten dira, material bakoitzaren onurak dituen konposite bat eratuko da, material bakoitzaren ahulguneak saihestuz. Konpositeak osatzen dituzten material horiek matricea eta indargarria bezala ezagutzen dira. Matricea zati polimerikoa da, eta indargarria zuntzek osatzen dute.



### 2.3.1 Matrizea

Matrizearen helburuak hainbat dira: zuntzak elkar lotzea, materialari aplikatzen zaizkion kargak zuntzetara transferitzea, zuntzak konpositeak jasan ahal dituen erasoetatik babestea (urradura mekanikoa, erreakzio kimikoak) eta pitzadura-hedapenerako muga gisa jardutea.

Matrizearen erretxina bi motakoa izan daiteke: termoeonkorra edo termoplastikoa.

Polimero termoeonkorrek, ikerlan honetan aztertu direnak, ontze prozesu bat jasaten dute, prozesu hori itzulezina izanik. Ontzea bero transferentzia edo erradiazioaren bitartez egiten da, normalean presio altuetan. Materialaren konposizioari esker, ondu baino lehen hainbat modutan aurki daiteke, hala nola solido bigun edo likido moduan, eta etapa honetan erretxina eta zuntzak nahasten dira; ontzean materialak erreakzionatu egiten du, solido moduan geratuz. Ontze prozesuaren ondoren, erretxina uretan disolbaezina eta urtuezina da, eta beraz material onduak gainazal gogor eta erresistente bat osatzen dute. Material termoeonkorren artean epoxi erretxina, binil esterra edo erretxina fenolikoak aurkitzen dira. Epoxiak dira polimero erabilienak, konpositeen %90 baino gehiagotan erabiliak izanik(Allen, 2008). Aipatu behar da polimero termoeonkorrek beste gehigarri batzuk izan ahal dituztela, adibidez ontze prozesurako katalizatzaileak.

Polimero termoplastikoak, aldiz, temperatura eta presio zehatz batzuetan urtzeko eginda daude, horrela zuntzekin nahastu daitezke eta ostean hozte prozesu baten bitartez, solidifikatu. Polimero termoplastikoen artean polietilenoa, polipropilenoa eta poliamida aurkitzen dira. Mota horietako konpositeak erraz birziklatzen dira, konposita berotzean erretxina urtu egiten baita, eta beraz zuntzetatik banatu daiteke, edo birmoldatu(Pickering, 2010). Polimero termoeonkor zein termoplastikoak, konposite onduak gain, *preprega* ekoizteko erabil daitezke(Chapter 4. matrix characterization. 2002). *Preprega* partzialki ondutako erretxina batekin aurreinpregnatutako zuntz indargarria da, eta zuzenean moldeatu eta ondu egiten da, azken forma lortuz.

Hala ere, material erresistentea lortzeko, kontuan izan behar da zuntzaren eta erretxinaren arteko lotura-indarrak handiak izan behar direla, zuntz-erazketa minimizatzeko, eta horregatik funtsezkoa da zuntz eta erretxinaren arteko portaera aurrez aztertzea, konposita erresistentea izan dadin(Andjelic, 2014; Callister, 2007b).

Bestalde, esan behar da matrizearen konposizioa garrantzitsua den bitartean, ez dela azkeneko emaitzan eragina duen puntu bakarra. Zuntzen propietateak, zuntz-erretxina bolumen ratioak, zuntzen geometria eta orientazioak eta, arestian aipatu bezala, bien arteko adhesioa, erabakigarriak izango dira(Callister, 2007b).

### 2.3.2 Indargarria

Konpositearen erresistentzia altua izateko, zuntzak egitura zehatz bat jarraitzea beharrezkoa da, kanpoko kargak ahalik eta hoberen jasateko. Egitura horren barruan zuntzek batak besteekiko duten orientazioa, zuntzen kontzentrazioa eta haien banaketa sartzen dira. Horrez gain, zuntzaren luzera ere kontuan izan behar da, zuntzak luzera minimo bat ez badu, ez direlako konpositearen erresistentzia eta zurruntasuna bermatuko. Luzerari dagokionez, hurrengo bereizketa egiten da: zuntz jarraiak, non luzera luzera kritikoa baino askoz handiagoa den (normalean  $l > 15l_k$ ), eta ez-jarraiak edo motzak. Orientazioari dagokionez puntako bi kasu emango dira: zuntzen luzetarako ardatza paraleloki lerrokatuta egotea edo guztiz ausazkoa izatea. Orokorrean, zuntz jarraiak lerrokatuta egoten dira, ez-jarraiak orientazioa ausazkoa edo partzialki lerrokatuta egon ahal diren bitartean. Zuntz jarraien kasuan konpositearen propietateak aztertzen diren norabidearen arabekoak dira, hau da, anisotropikoak dira. Zuntz ez-jarrai baina lerrokatuen kasuan, elastikotasun modulua eta haustura tentsioa murriztu egiten dira, %90 eta %50 inguruan, hurrenez hurren. Zuntzak ez-jarraiak direnean eta ausazko orientazioetan daudenean, indargarririk gabeko materialekin alderatuta propietateak hobeak dira, elastikotasun modulua eta haustura tentsioa zuntzaren bolumen portzentajearekin hazten direlarik.

Hala ere, kontuan izan behar da lerrokatutako zuntzen konpositeetan indargarria eraginkorra dela beti ere aplikatutako karga lerrokatuta dagoen bitartean; karga hori perpendikularra bada, indargarririk egongo ez balitz bezalako portaera aurkeztuko du. Horregatik, materialak jasan behar duen karga norabide bakarrekoa baino gehiagokoa denean, orientazio desberdineko geruzak bata bestearen gainean jartzen dira, konposite laminarrak osatuz. Konposite laminar horietan, normalean zuntz ez-jarraiak erabiltzen dira, orientazio aleatorioetan, zuntz lerrokatuekin konparatuz eraginkortasuna txikiagoa den arren (bosten bat txikiagoa), ekoizpen aldetik askoz errentagarriagoa delako. Konpositeak ekoizteko pultrusioa edo harizpi bobinatua erabiltzen dira, prepeg ekoizpenaz gain. Aipatutako guztiak zuntz berreskuratuen aplikazioetan lagundu dezake, hurrengo atalaren ildoan izango dena.

Jarraian, zuntzen berreskurapenari ekin baino lehen, karbono zuntzen azalpen labur bat emango da, aurrerago azalduko denaren oinarri moduan. Hitz gutxitan esateko, karbono zuntzak 5-10  $\mu\text{m}$  diametroko harizpiz osatutako zuntz sintetikoak dira, gehienbat karbono atomoz osatuak. Atomo horiek kristal mikroskopikoen bidez elkar lotuta daude, zuntzaren luzetarako ardatzarekiko paraleloki lerrokatuta daudelarik. Kristalean lerrokatzeak zuntza oso gogorra egiten du, batez ere haien tamaina murrizterako.

Zuntzak ekoizteko, aitzindari izeneko material sintetiko gordinak erabiltzen dira (%96 kasuetan poliakrilonitriloa-PAN-, beste kasuetan rayona edo brea), karbono atomoz lotutako molekula kate luzeak dituzten polimero organikoak direnak. Aitzindari horietatik karbono zuntzak egiteko hiru pausu jarraitzen dira: egonkortzea, karbonizazioa eta gainazaleko tratamendua (Newcomb, 2016). Lehenengo, PAN zuntz aitzindariak egonkortu egiten dira oxidazio prozesu bati esker, 200-300°C artean, eta horrela termoplastikoa den PAN termoeogonkor bihurtzen da. Hurrengo pausua karbonizazioa da, non aurretik lortutako zuntzak 1000-1700°C artean berotuak diren, atmosfera inerte batean. Azkenik, zuntzak gainazal-tratamendu bat jasotzen dute, matrizearekiko adhesioa hobetzeko.

Esandako guztia oinarritzat hartuta, hurrengo atalean zuntzen birziklapena aztertzeraz pasatuko da.

### 3. Gaiaren egoeraren azterketa

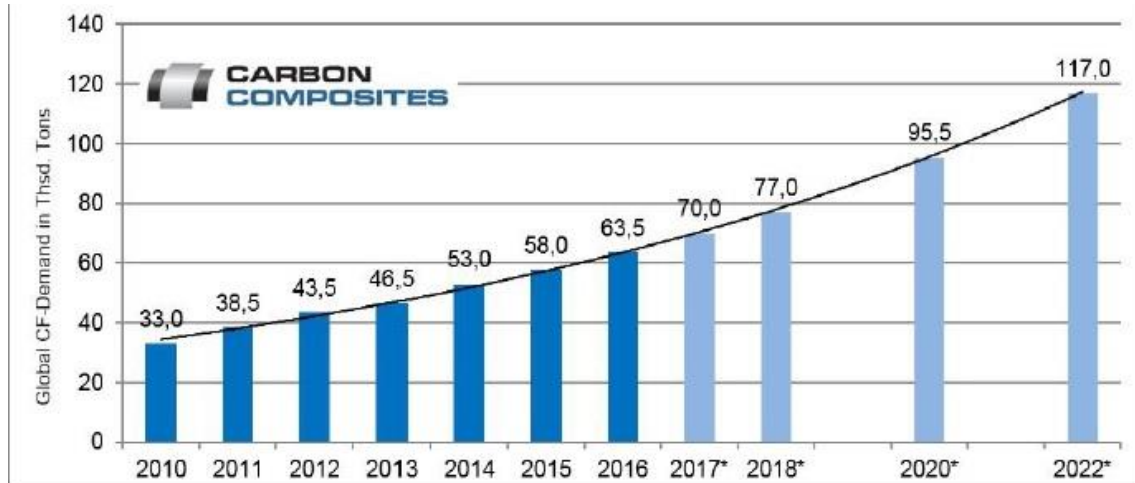
#### 3.1 Zuntzen birziklapena

Zuntzen birziklapena bultzatzen duten zergatien artean zuntz berrien ekoizpen kostua, ingurumen eta energia-inpaktu altua eta ekoizpen bolumenaren ahalmenaren mugapenak daude. Hala ere, zuntz birziklatuen erabilera saihesten duten zergatien artean, haien kalitate baxuagoa edo birziklapenaren kostu altua daude. Dena dela, muga horiek zuntzen berreskurapen prozesu eraginkor bat garatuz gainditu daitezke. Atal honetan, gaur egungo birziklapenaren egoera ikusiko da.

Lehenengo eta behin, zuntzen birziklatze beharra aztertuko da. CFRPen etorkizunari begira, urteko %10-13 inguruko eskaera igoera aurreikusten da, azken urteetan eman den bezala (Holmes, November-December 2014; Kühnel & Kraus, 2016). 2016 urtean 63.500 tona izan zen eskaera globala, eta joera hori jarraituz gero, 2022 urterako 117.000 tonatik gorakoa izan daiteke merkatuaren eskaria (ikus Irudia 2. CFRP eskariaren bilakaera (Sauer et al., 2017)). Bestalde, kontuan izan behar da ekoizpen prozesuan hondakin kopuru handia sortzen dela, produktutako bolumenaren %30erainokoa izan ahal delarik (Rybicka, Tiwari, Alvarez Del Campo, & Howarth, 2015), eta beraz ekoizpenean soilik produzitzen den hondakin kantitatea oso handia izango litzateke. Gainera, karbono zuntzez egindako produktuen bizi bukaera ere kontuan hartu behar da, 2-40 urte bitartekoa izaten dena; adibide bezala, 2030 urterako Europa eta Estatu Batuetako 6000-8000 aireontzi komertzial haien bizi bukaerara helduko dira, urteko 3000 tona CFRP hondakin sortuz (Meng, McKechnie, Turner, Wong, & Pickering, 2017). Gaur egun, aireontzi erabilgaitz horiek “aireontzi kanposantuetan” pilatzen dira (Aerogeneradores: Las palas averiadas o en desuso, un riesgo para el medio ambiente. 2014).

Gainera, aipagarria da gainontzeko sektoreen eboluzioa konstantea den bitartean, automobilgintzaren eskaeran gorakada nabaria aurreikusten dela 2022 urterako, sektore aeronautikoarena gaindituz (Sauer et al., 2017). Datu hori erabilgarria izan daiteke,

automobilgintzatik sortutako produktuen bizi-zikloa ez baita aerosorgailuen sektoretik sortutako bezain luzea eta hondakin kopuru oso handia epe ertain batean sortu baitaiteke.



Aurrekoa esanda eta, nahiz eta konpositeen hondakin kantitate eta motei buruz dagoen informazioa gehiegi ez izan, argi geratzen da CFRPen ekoizpena eta hondakinen kantitatea hazi egingo dela, eta beraz beharrezkoa dela haien kudeaketa egokia ematea, birziklapena aukera ekonomikoena eta ekologikoena izanik. Gaur egun, konpositeen hondakinen zati handiena hondakindegietara bota edo erraustu egiten da.

Hortaz, zuntzen birziklatzeak onura hirukoitza izango du: lehenengo, hondakinen pilaketa

*Irudia 2. CFRP eskariaren bilakaera(Sauer et al., 2017)*

ekidituko da, bigarren, zuntz iturri bat izan daiteke etorkizunean emango den CFRP eskaerara bermatzeko eta hirugarren, zuntzak ekoizteko energia kostu txikiagoa duen prozesu bat izan daiteke, zenbait operazio pausu saihesten baititu(Dong, Azzaro-Pantel, & Cadene, 2018). Beraz, ekonomikoki bideragarria izan daiteke. Hala ere, zuntzen berreskurapena konplexua da, matrize eta indargarriaren loturarengatik; gainera, berreskuratutako zuntzen egokigarritasuna ez da zuntz berrien bera, eta horrek produktu berriak sortzeko momentuan erronka handia suposatzen du. Horrez gain, kontuan izan behar da bizi erabilgarriaren bukaeratik datozen hondakinetan karbono zuntz eta erretxinaz gain beste material batzuk aurki daitezkeela, adibidez metalak, beraz hori

kontuan izan beharko da mota horretako hondakinak birziklatzeko prozesu bat garatzean. Puntu hauek kontuan izanda, birziklatze horren egoera aztertuko da.

Egun badaude zuntzen birziklapena aztertzen dauden enpresak, baita birziklapen sistemak inplementatu dituztenak. Espainian hurrengo urteetan aerosorgailu hegala erabilgaitzen kopurua handitu egingo da (Aerogeneradores: Las palas averiadas o en desuso, un riesgo para el medio ambiente.2014; Palas de aerogeneradores: Un residuo emergente ante el final de su vida útil que la compañía EDP renovables pretende reciclar.2017); horri aurre egiteko, R3fiber sistema diseinatu da, zeinen helburua karbono eta beira zuntzak birziklatzea den, erretxina kenduz. Hala ere, berreskuratutako zuntz horiekin zer egingo den ez da oraindik zehaztu. Aeronautikaren arloan, Airbus moduko enpresak ere birziklatze metodo efizienteetan sakontzen daude. Airbusek berak 2020-2025 bitarterako ekoizpen-hondakinaren %95a birziklatze kanaletatik bideratzea du helburu, %5a sektore aeroespazialerako berrerabiliz (*An airbus working group sets out a composites recycling roadmap.*). Halaber, konpainia batzuk, hala nola ELG Carbon Fibre (Erresuma Batua) eta CFK Valley Stade Recycling (Alemania), CFRPa birziklatzen dute komertzialki teknika termiko-kimiko desberdinetan oinarrituz (Job et al., 2016).

Lehen aipatu bezala, zuntzen ekoizpenean hondakin asko sortzen dira, material preinpregnatuetan ekoiztutako bolumenaren %30-50 bitarterainokoa izanik. Beraz, zuntzak berreskuratu eta berrerabiltzeko prozesu errentagarri bat topatuz gero, zuntzak produzitzen dituzten fabriketan bertan haien transformazioa eman daiteke, enpresarentzako interesgarria bihurtuz eta garraio kosteak minimoan mantenduz.

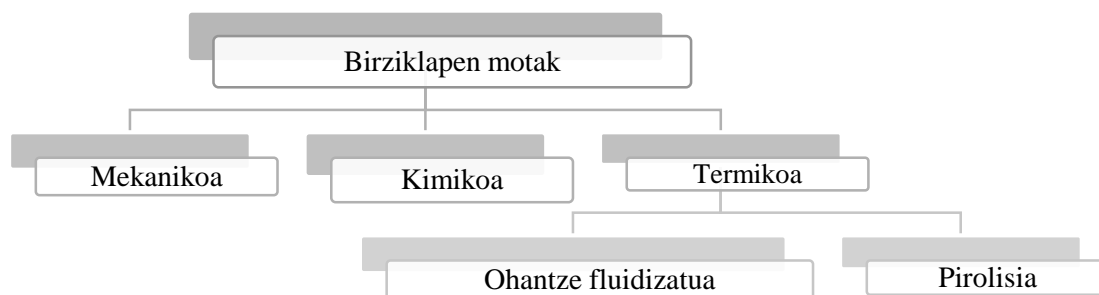
Zuntz berreskuratutako hainbat erabilera izan ditzake: zuntz berria bezala erabili (harekin zuzenean lehiatuz), egungo materialekin lehiakorrek diren material berriak garatu edota egun dauden materialen propietateak hobetu (Pickering, Liu, Turner, & Wong, 2016). Horregatik, konposita bideratu nahi den merkatuaren arabera, zuntzak bete beharko dituen baldintzak desberdinak izango dira, eta alderantziz; berreskuratutako zuntzen propietate mekanikoei eta zuntz bolumenak horien aplikazio eremuak mugatuko dituzte. Lehen begiratuan, zuntz berria eta birziklatuen arteko propietateak ez dirudite oso bestelakoak; zurruntasun eta zeharkako elastikotasun moduluak desberdintasun hutsalak izatera heldu daitezke, beti ere berreskurapen motaren arabera. Berreskuratuen forma, ordea, laburra eta irregularra da eta, horren ondorioz, zuntza tratamendurako eta prozesaketarako beste etapa batzuetatik pasatu beharra dago.

Beraz, ingurumen ikuspuntutik beharrezkoa da prozesu hauek guztiak kontuan izatea zuntzak berreskuratzeko orduan, eta zuntz berrien inpaktuarekin alderatzea, desberdintasun erreal bat dagoela konprobatzeko. Horretarako, zuntza duen produktuaren bizi-zikloaren analisia egin daiteke, produktuaren ingurumen-inpaktua neurtuko duena, lehengaiaren prozesamendutik hondakinen kudeaketaraino. Aurretik egindako ikerketetan ikusi da automobil-aplikazioetan zuntz birziklatuak onurak ekartzen dituztela, bestelako materialekin alderatuta (aluminioa, zuntz berriak) produkzioan erabilitako energia txikiagoa baita, eta ibilgailuen gasen emisioa ez baita hazten, material arinak izaten jarraitzen baitute (Meng et al., 2017). Dena den, ikerlan honek ez duenez gai hori barne hartuko, ez da gehiago sakondu.

Aurrez esandakoa abiapuntutzat hartuta, hurrengo pausua birziklatze metodo desberdinak aztertzea da, metodo bakoitzaren abantaila eta desabantailak aztertuz eta, horretan oinarrituz, birziklatzeko erabiliko den metodoa aukeratzea.

### 3.2 Birziklapen metodoak

Karbono zuntzak berreskuratzeko hiru modu nagusi daude (Giorgini et al., 2015): mekanikoa, kimikoa eta termikoa. Segidan hiruren arteko konparaketa egingo da, eta hautatutako aukera justifikatuko da. Hurrengo eskemak jarraian datorren informazioa antolatzen lagunduko du.



#### Irudia 3. Birziklapen moten eskema

Berreskurapen mekanikoa berrerabilpenerako soluzio sinpleena da: materiala osorik txikitzen da, erretxina eta zuntza bereizi gabe. Prozesu honetatik ematen den material birrindua konpositeetarako betetze errefortzu (*filler reinforcements*) bezala edo eraikuntza arloan erabili

ohi da(Pimenta & Pinho, 2014). Nahiz eta prozesuaren soiltasunarengatik lehen begiratuan oso erakargarria iruditu, konpositeetatik hautsak lortzeko erabili beharreko energia kantitatea handia da, berreskuratutako zuntzak oso txikiak dira eta egiturak kalteak jasaten ditu. Gainera, zuntzetan erretxina zatiak egoteak, konposite berriak modu egoki batean sortzea ekiditen du. Beraz, zuntz berreskuratuen propietate mekanikoak nabarmenki kaltetzeaz gain, aplikazio oso mugatuak dituzte modu honetan birziklatutako zuntzek eta, horrenbestez, amaierako produktuaren balioa oso txikia da karbono zuntz banatuekin alderatuta. Konklusio bezala esan daiteke berreskurapen mekanikoa ez dela aukera egokia, aplikagarritasuna ez delako nahi beste zabala. Beraz, baieztatu daiteke zuntzen berreskurapena egokia izateko matrize eta zuntza bereizten dituen prozesu bat beharrezkoa dela, horrela zuntzen luzera, orientazioa eta erresistentzia mantentzeko.

Prozesu kimikoaren bitartez berreskuratutako zuntzetan, prozesu termikoetan gertatuko den bezala, zuntza bera eta erretxina bereiztu egingo dira. Prozedura kimikoetan bereizketa hori erreakzio kimiko bitartez ematen da, *solvolysis* moduan ezagutzen dena, erretxina deskonposatzeko disolbatzaileak erabiliz(Lauzé, 2014). Prozedura hori jarraituz, zuntzak propietate oso onak erakusten dituzte, baina prozesuan erabilitako disolbatzaileak ingurumenarekiko kaltegarriak izaten dira. Horrek, ingurumenarentzako metodo kaltegarriena izateaz gain, prozesuaren garestitzea ekartzen du, eta ekonomikoki bideraezina egiten du. Prozesu kimikoen artean badago disolbatzaile moduan fluido superkritikoak erabiltzen dituen metodo bat. Fluido superkritikoen abantaila konposatu organikoak disolbatu ditzaketela da, baldintza atmosferikoetan kaltegarriak ez diren bitartean; baina fluido superkritiko horiek lortzeko muturreko baldintzak eman behar dira, kostu altua suposatzen dutelarik. Hala ere, teknologia hau ez dago oso garatuta, eta laborategi-eskalan bakarrik frogatu da(Melendi-Espina, Morris, Turner, & Pickering, 2016).

Azkenik, metodo termikoak aztertu dira, egun berreskurapen mota ugarietak eta efizienteenak direnak. Metodo mekanikoekin alderatuz, termikoetan zuntzak berreskuratuko dira, eta beraz amaierako produktuaren balioa nabarmenki altuagoa da. Gainera, metodo termikoak ez dira ingurumenarekiko kaltegarriak, metodo kimikoak diren bezala. Ingurugiroaren aldetik, beraz, berreskurapen termikoa da aukerarik hoberena. Nolanahi ere, zuntz berreskuratuen propietateak aztertu beharko lirateke orokorrean hoberena den prozesua zehazteko. Berreskurapen termikoaren barruan bi aukera nagusi daude: pirolisia eta ohandze fluidizatua. Hurrengo azpiatalean bi prozesu horiek aztertuko eta alderatuko dira.



### 3.2.1 Birziklapen termiko motak

Lehenengo eta behin, ohantze fluidizatuaren azalpen orokor bat emango da. Ohantze fluidizatuaren helburua matrizea zuntzetatik banatzea da, horretarako prozesu termiko oxidatzaile bat erabiliz. Ohantze fluidizatua hurrengoan oinarritzen da: errektore batean, goranzko gas-korronte bero batek esekiduran jartzen ditu ohantzean dauden partikulak, adibidez silize hondarra, horrela fluido baten portaera erakutsiz. Aldi berean, konposite hondakinak sartzen dira errektorerara. Gas-korrontea oxidatzailea da eta horrela erretxina oxidatu egiten da, urraduraz lagunduta, zuntzak matrizetik askatuz. Zuntzak gas fluxuaren bitartez errektoretik ateratzen dira(*elutriation*)(Pickering, 2010). Gas-fluxua zikloi edo beste solido-gas bereizketa metodo batetik pasaratzen da, zuntzak eta gasa bereizteko. Lortzen den gasa guztiz oxidatu daiteke eta energia bero moduan berreskuratuz(Meng et al., 2017).

Aipatu behar da hasierako materialetan konposatu kutsatuak agertzekotan, hau da, zuntza eta erretxina ez diren beste osagairik egotekotan, konposatu organikoak lurrundu egiten direla, gas korrontearekin errektoretik ateraz, eta konposatu ez-organikoak ohantzean geratzen direla, silize hondarretik bereizketa baimenduz(Nicolais & Pisanova, 2012). Beraz, iturri desberdinetatik datozen konposite hondakinak tratatzeko onuragarria izan daiteke.

Prozesu honen abantaila nagusia ingurumenarentzako kaltegarriak diren produktuak sortzen ez dituela da eta errekuntzatik energia berreskuratuz daitekeela. Baina, beste alde batetik, esan behar da amaierako zuntzen propietateak ez direla berrerabilpenerako egokiak(Pimenta & Pinho, 2010), gas oxidatzailearen presentzian ematen diren temperatura altuengatik eta hondar fluidizatuaren urraduragatik.

Pirolisian, bestalde, zuntzen banaketak bi pausu nagusi ditu: lehenengoan, hondakin zatiak oxigenorik gabeko atmosfera batean berotzen dira-pirolisia-, erretxinaren zati bat deskonposatuz eta beste zati bat karbono pirolitiko bihurtuz, eta bigarrenean oxigenoa duen atmosfera batean berotzen dira, lehenengo pausuan geratu diren erretxina arrastoak (karbono pirolitikoa) zuntzaren gainazaletik guztiz desagertuz. Nahiz eta berreskuratutako zuntzen propietate mekanikoak zuntz berrienak baino kaxkarragoak diren, konposite berriak sortzeko nahikoa egokiak dira. Beraz, haien aplikagarritasuna zabala da. Prozesu honen zailtasun handiena pirolisiaren parametroak ondo zehaztea da; pirolisi ostean zuntzean geratzen den erretxina apurraz desegin behar da,

zuntzetan gainazal uniforme lortzeko. Horretarako oxidazioa ematen da, baina gehiegizko oxigeno kantitate batek oxidazio hori lar handia egingo luke, zuntza bera errez eta ondorioz propietateak kaltetuz. Hala ere, pirolisia industria arloan erabili den metodoa da, berreskuratutako zuntzen kalitatea oso ona izan baitaiteke eta ingurumenarekiko duen inpaktua baxua baita. Gainera, prozesuan sortzen diren gasak aprobeztatu daitezke, adibidez prozesuaren energia eskaera asetzeko (Lauzé, 2014; López Urionabarrenechea et al., 2016). Prozesu honen desabantaila nagusia prozesuaren parametroak oso zehatzak izan behar direla da, zuntzen propietateak ez kaltetzeko, eta horrek prozesuaren diseinua konplexuago bihurtzen du. Badago pirolisiaren aldaera bat, laginak berotzeko mikrouhinak erabiltzen direna. Mikrouhinek ahalbidetzen dute materiala barrutik berotzea, horrela energia transferentzia azkarra izanez, eta energia aurreztuz (Oliveux, O. Dandy, & Leeke, 2015). Hala ere, ez da mikrouhinen pirolisian sakonduko.

Esandako guztiarekin, ondorioztatu daiteke pirolisia dela karbono zuntzak berreskuratzeko metodorik egokiena. Hau esanda, ikerlan honek jarraitu duen pirolisia prozesuan sakonduko da hurrengo ataletan, orain arte argitaratu diren ikerlanak gainbegiratzuz eta informazio horretaz baliatuz, eta jarraian aurrera eraman den prozesuan sakonduz. Aurreko birziklapen moten laburpena eskaintzen da ondorengo taulan.

Taula 2. Birziklapen metodoen berreskurapena

Metodoa		Abantailak	Desabantailak
Mekanikoa		·Prozesuaren soiltasuna	·Erretxina eta zuntza bereizi gabe ·Energia kantitate handia ·Egituran kalteak ·Zuntz ez-garbiak ·Aplikazio oso mugatuak
Kimikoa		·Propietate egokiak	·Ingurumenarekiko kaltegarria ·Prozesu garestia
Termikoa	Ohantze fluidizatua	·Ingurumenarekiko kaltegarria ez ·Energia berreskurapena	·Propietate ez egokiak
	Pirolisia	·Propietate egokiak ·Ingurumenarekiko kaltegarria ez ·balio gehituko gasak berreskuratu	·Prozesua parametrizatzeko konplexua

#### 4. Aukeratutakoaren analisia. Pirolisia

Pirolisi bidezko karbono zuntzen berreskurapenaren inguruan ikertu izan da jada, beraz aurrez aurrez izan diren azterlanen analisia burutu da, lanaren oinarri eta/edo abiagunetzat hartuz. Atal honetan gai horri buruz aurrera eraman diren hainbat ikerlan aipatuko dira, eta aurrera eraman den ikerlanerako aipagarriak diren aspektuetan sakondu da.

Pirolisi eta oxidazio bidez zuntzak berreskuratzeko prozesuan hainbat parametro bereiz daitezke: pirolisi tenperatura, pirolisi denbora, oxidazio tenperatura, oxidazio denbora, erabiliko diren gasen fluxuak, etab. Faktore horiek prozesua definitzen dute, eta beraz azkeneko emaitzan eragina dute. Prozesuak, lehen aipatu bezala, bi urrats nagusi ditu: lehendabizi, lagin zatiak pirolisi prozesu bat jasan du, hau da, oxigenorik gabeko atmosfera batean berotu da, konpositean dagoen erretxinaren zati handi bat gas eta lurrun bihurtuz eta beste bat karbonizatuz, eta ondoren, oxigenoa duen atmosfera batean, geratu den frakzio solidoa berotu da, eta horrela azken erretxina apurrak desagertu dira.

Aurretik egindako ikerketa batean(Giorgini et al., 2015), epoxi erretxinaz egindako konpositeak aztertu dira, prepregak zein onduak. Aurrera eramango den ikerlanean ere bi material mota horiek erabili dira, pirolisia aplikatuz, aipatutako ikerketan bezala, eta horregatik da hain interesgarria.

Aipatutako ikerketan, CFRP hondakinek tenperatura desberdinetan pirolisi prozesu bat jasaten dute eta oxidazioa 500 eta 600°C-tan aztertzen da, aurrez zehaztutako oxidazio denbora desberdinekin. Gainera, pirolisi prozesuan sortutako gasak aztertzen dira eta zuntz berreskuratuak ebaluatzen dira, zuntz berrieekin konparatuz. Pirolisiaren tenperatura zehazteko zuntzen entsegu dinamiko bat egin da eta, emaitzetan oinarrituz, aztertu den tenperatura tartea 450-600°C-tan zehaztu da, eta 20-30 minutuko egonaldi denbora. Beste ikerketa batean, aipatzen da pirolisi tenperatura 500-550°C bitartean egon behar dela zuntzen egokigarritasuna bermatzeko(Oliveux et al., 2015).

Hondar solidoari dagokionez, material onduetan pisu galera txiki bat ematen da pirolisi temperatura 450°Ctik 600°C-ra igotzean. Hala ere, materialak hornitu dituen enpresak esandako erretxina kantitatearekin konparatuz, ez da totala; hau da, pirolisiaren pausuarekin ez da erretxina guztia deskonposatzen. Hori horrela bada ere, ikerketan aipatzen da enpresaren batezbestekoa prepregetakoa dela, eta materialak ontzean erretxina frakzioa txikitu egiten da hutsean jasandako trinkotze eta ontzearen ondorioz. Gainera, material onduak erlatiboki lodiak dira, materialen barnean difusio arazoak sortu ahal izanik, barne geruzetako erretxinaren pirolisia zailduz, eta horrela hondakin solidoen frakzioa areagotuz. Prepregetan, material onduetan bezala, pisu galera txiki bat ematen da tenperatura igotzean. Guzti hau baliogarria izan daiteke aurrera eraman den ikerlanerako, emaitzetan agertu ahal diren gora beheren azalpen bat ematen baitu.

Zuntzen gainazaletik karbono hondakina kentzeko beharrezkoa da oxidazio prozesu bat diseinatzea. Pausu hau 500 eta 600°Ctan eman da. Oxidazio egonaldi denborari dagokionez, esaten da 500°C-tan 40 minutu behar direla karbono pirolitiko, *char*, guztia desagertzeko, 600°C-tan denbora hori 20 minutura murrizten delarik. Ikerketan aipatzen da egonaldi denbora luzeagoak ez dituztela zuntzen gainazalak kaltetzen, baina haien diametroa txikitzen dela. Zuntzetan kalteak egon diren ebaluatzeko, horien gainazalak analizatu dira, propietate mekaniko eta elektrikoak gainazalaren egoeran eragin zuzena baitute.

Prepregak aztertu diren beste ikerketa batean (Meyer, Schulte, & Grove-Nielsen, 2009), pirolisi temperatura 550°C baino altuagoa denean aldaketarik ematen ez dela konprobatu da; hots, nahiz eta lagina 900°Cra berotu beti ematen da *charraren* sorkuntza. Pirolisiaren egonaldi denborari dagokionez, erakusten da tenperatura baxuetan (400°C) pisu galera ematen dela lehenengo 30 minutuetan. Tenperatura 600°Ctik gora igotzean, berriz, pisu galera maila berean gelditzen da. Beraz, ez da beharrezkoa pirolisian egonaldi denbora luzeak (30 minutu baino gehiago) eta 600°Ctik gorako tenperaturak erabiltzea. Oxidazioari dagokionez, 500-600°C arteko tenperaturan eman behar dela zehazten da, 500°Ctan egonaldi denbora 2 ordukoa edo gehiagokoa izan behar delarik, eta 600°Ctan zuntzak kaltetzeko arriskua agertzen delarik. Hala ere, ikerketa honek ez ditu prozesuaren parametro optimoak guztiz argi uzten. Aipatutako bi ikerlanetan oinarrituz, hurrengo esan daiteke:

1) Pirolisi temperatura optimoa 450-600°C artean dago

2)Pirolisi denbora minimo bat baino luzeagoa bada(20-30 minutu), ez du eraginik

3)Oxidazio tenperatura optimoa 500-600°C artean dago

4)Oxidazio egonaldi denbora 20-40 minutu tartean dago

## 5. Lanaren helburuak eta irispena

### 5.1 Helburu orokorrak

Hauk dira proiektu honen helburu orokorrak:

- Karbono zuntzak berreskuratzeko pirolisi eta oxidazio prozesu konbinatu baten optimizazioa
- Karbono zuntzen erabateko berreskurapen prozesuan ekarpena, pirolisiaren optimizazioa burutuz

### 5.2 Helburu espezifikoak

Aipatutako helburu orokorrak betetzeko, hainbat helburu espezifiko lortu behar dira:

- Pirolisi prozesuan aukeratutako faktore bakoitzak duen eragina zehaztea
- Pirolisi prozesuaren optimizaziorako balioak zehaztea, material bakoitzarentzat
- Balio optimo teorikoen froga esperimentalak burutzea
- Emaitza teoriko eta esperimentalen konparaketa egitea

### 5.3 Irispena

Proiektu honen abiapuntua aurrez argitaratutako ikerlanetan dago. Pirolisi bidezko berreskurapenaren inguruan hainbat ikerketa egin dira eta, beraz, horien ezagutza batuz, proiektu honen garapena ahalbideratu da. Ikerlan honetan, karbono zuntzez indartutako polimeroen hondakin desberdinak erabiliz, horien pirolisi eta oxidazio faktoreen balio optimoak lortu dira, horretarako analisi termogravimetricoan oinarrituz. Lortutako emaitzak tratatzeko, Esperimentuen Diseinuen Teoriaz baliatu da, horrela balio teoriko optimoak lortuz. Azkenik,

## 1. Dokumentua - MEMORIA

balio horiek erabiliz, esperimentalki frogatu da prozesu osoaren egokigarritasuna. Ikerlan honetatik jaso dena, hortaz, pirolisi eta oxidazio prozesuaren zehaztapena da.

## 6. Lanaren onurak

Ikerlan hau zuntzen berreskurapenak suposatzen duen prozesu guztian ekarpen bat da. Horrekin esan nahi da, helburu nagusia zuntzen berreskurapen totala duen proiektu baten zati bat dela, prozesuaren zati hori zehaztuz edo bere diseinua erraztuz. Beraz, ikerlan honek material konposatuen birziklapenaren arloan ezagutza hedatzea baimenduko du. Hala ere, proiektuak begi bistakoak diren onura zabalagoak izango ditu, karbono zuntzen birziklapena orokorrean begiratzen bada.

### 6.1 Ingurumen onurak

Aurretik argi utzi den bezala, zuntzez osatutako materialen erabilerak gorantza egingo du eta hondakinen pilaketa emango da. Ingurumen aldetik irtenbide hori kaskarra da; horregatik, hondakin horiei bigarren bizi bat ematea beharrezkoa da. Horretarako, materialak nola birziklatu ahal diren aztertzea funtsezkoa da, eta baita birziklatu horien kalitatea produktu berriak sortzeko onargarria izatea. Lan honetan, zuntz berreskurapen prozesuan oinarritzekoak diren hiru parametro optimizatu dira eta modu esperimentalean berretsi dira, berreskurapen prozesuaren zehaztapena burutuz.

### 6.2 Onura ekonomikoak

Ingurumen onurekin gogorki lotuta, onura ekonomikoak emango dira. Enpresa munduari begira, ikerlan honetan aukeratutako berreskurapena diseinatzean, prozesua hasieratik hasi beharrez, zehaztu behar dituzten baloreen oinarri bat aurkitu ahal dute lan honetan. Horrek, enpresari ikerkuntza lanak erraztuko dizkio, eta lan honek barne hartzen ez dituen beste alderdi batzuetan zentratu ahal izango dira, adibidez ekipo industrialen aukeraketan edo langileen segurtasunean.

Beste alde batetik, birziklatze prozesuari esker zuntzen hornikuntza egonkor bat bermatu daiteke, zuntz berriak sortzea baino merkeagoa delarik. Gainera, zuntz berriak egiteko behar den energia kantitatea birziklatzean erabilitakoa baino askotaz handiagoa da, energia inpaktu handia duten



ekoizpen pausu asko saihesten baitira. Proiektu honen helburuetatik at geratzen da onura ekonomikoen analisi zehatz bat egitea baina, erreferentziatzko datu bezala esan daiteke karbono zuntz berrien merkatuko kostea 47-55€/kg-koa dela eta propietate berdintsuak dituen zuntz birziklatuarena 11-16€/kg-koa(Dong et al., 2018). Energia kostuari dagokionez, CO<sub>2</sub> emisioen baliokidea eginez, ia 30.000kg CO<sub>2</sub> igorriko lirarteke karbono zuntz berri tona bat ekoizteko; birziklatuetan, ostera, ez da 4.000kg CO<sub>2</sub>-ra heltzen. Orokorrean, baieztatu daiteke enpresaren errentagarritasuna bermatzen duela(Gehr, ).

### 6.3 *Onura sozialak*

Ingurumen onurek eta onura ekonomikoek onura sozialak inplikatuak dituzte. Gaur egun gero eta hondakin gehiago sortzen dira, eta horregatik hurrengo hamarkadetarako beharrezkoa izango da ahalik eta gehien birziklatu eta berrerabiltzea. Hondakin mota bakoitzaren tratamendua (berrerabilpena, birziklapena, etab.) desberdina den heinean, konpositeen birziklapenak mota horretako hondakinen kudeaketan laguntzen du, eta horrek gizarte guztiarengan era positiboan eragiten du.

## 7. Proposatutako irtenbidearen aukeraketa. Oinarrizko diseinua

Aurreko ataletan argi utzi den bezala, pirolisia izango da zuntzak berreskuratzeko aukeratutako metodoa. Beraz, prozesua optimizatzea da helburua, horretarako zenbait pausu jarraituz. Atal honetan, optimizazioaren deskribapen orokor bat egingo da, metodologia atalean prozedura eta fase guztiak zehazki azalduko direlarik.

Gainetik azalduz, prozesuaren hiru parametro hartu dira kontuan eta parametro horien balio optimoak lortu dira. Horretarako, erabateko  $2^k$  analisi faktoriala metodo matematikoa erabili da. Metodo horren oinarria, k parametro optimizatzen saiakera kopuru minimoa egitean datza, eta azken emaitzak erakusten du, ekuazio baten bidez, parametro bakoitzak azken emaitzan nola eragiten duen. Ekuazio hori izanda, software matematiko bat erabiliz, balio optimoak lortu dira.

Balio optimo horiek lortutakoan, enpirikoki konprobatu da helburua bete dela, hau da, berriro erabiltzeko moduan dauden zuntzak berreskuratu direla.

Laborategian egin diren entsegu guztiak analisi termogravimetricoan oinarrituz eraman dira aurrera; hau da, laborearen tenperatura eta atmosfera kontrolatuz, laginen masa galera neurtu da momentu oro. Horrela, programatutako fase desberdinetako masa galera eta analisi bakoitzaren grafikoa lortu dira.

Metodologia atalean, jarraitu diren faseak eta prozedurak xehetasunez azaldu dira, egindako kalkulu eta lortutako emaitzez gain.

## 8. Metodologia

### 8.1 *Deskribapena*

#### 8.1.1 *Optimizazio teorikoa*

Pirolisi prozesuaren optimizazioa *erabateko 2<sup>k</sup> diseinu faktorialean* oinarrituz egin da, Esperimentuen Diseinuaren Teoriaren parte dena, ostean *gainazal erantzunen metodologia* aplikatuz. Aukeratutako metodo matematikoaren helburua da, ahal den esperimendu kantitate txikiena eginez, aurkitu nahi diren balio optimoak lortzea (Ferré, 2003).

Erabateko 2<sup>k</sup> diseinu faktorialak k faktore horiek erantzunean duten eragina erakusten du, haien arteko elkarrekintza adieraziz. Horretarako, faktore bakoitzaren bi maila bakarrik erabiltzen dira (aurrerago zenbatetsiko diren balio minimo eta maximoa), eta aurrera eramaten diren saiakuntzak faktore bakoitzek besteekin izan ahal dituzten konbinazio guztiak aztertzen dituzte.

Birziklapen termiko mot atalean aipatu da pirolisi eta oxidazio prozesuan hainbat parametro esanguratsu daudela. Lan honetan hiru dira optimizatu nahi diren faktoreak (K=3), parametro horiek prozesua definituko duten adierazgarrienak izanik. Prozesuak pirolisi etapa bat eta oxidazio etapa bat ditu, eta etapa bakoitzean tenperatura eta denbora jakin bat egoten da labean, atmosfera kontrolatu batean, beraz horrek dira optimizatu behar diren parametroak. Parametro horien aukeraketa hurrengo azpiatalean justifikatu da. Emaitzak izanda, erabateko 2<sup>k</sup> diseinu faktoriala jarraituz, hiru faktoreak funtzionatzat dituen ekuazio bat idatzi ahal da.

Puntu honetara helduta, helburua ekuazio horren eta lortu nahi den pisu galeraren arteko ebaketa ikusi nahi izango da. Hori gainazal erantzunen metodoa (RSM) erabiliz egin da baina, bi faktoreekin gertatzen ez den bezala, hiru faktore izanda ezin da ekuazioa espazio tridimentsionalean irudikatu. Hori hobeto azaltzeko bi faktoreekin nola izango litzatekeen erakutsiko da. Bi faktore izanda, emaitzekin lortutako ekuazioa hiru dimentsiotako grafiko batean ikusi ahalko litzateke, ardatzetako batean emaitza eta beste bietan aukeratutako faktoreak jarritz,

eta horrek gainazal bat sortuko luke. Bestalde, lortu nahiko litzatekeen emaitza (kasu honetan, lagin bakoitzari dagokion erretxinaren pisu-ehunekoa) ere grafiko berean irudituko litzateke, emaitzaren ardatzarekiko perpendikularra den planoan irudikatuz. Horrela, begi bistaz ikusiko litzateke bien arteko ebaketa non dagoen, eta lerro hori izango litzateke faktoreentzako balio optimoak adieraziko lituzkeena. Hiru faktorekin, ordea, ezin da grafikorik egin, baina matematikoki problema ebatz daiteke (Sánchez, 2011). Beraz, programa matematiko sinple bat erabiliz, emaitza optimoa kalkulatu da. Hala ere, iruzkin bezala esan behar da  $2^k$  diseinu faktorialaren mugapenak direla eta, ezin dela errore esperimentalak kalkulatu.

### 8.1.2 Aztertutako parametroak

Aurretik aipatu da hainbat parametro zehaztu behar direla karbono zuntzen berreskurapen pirolitikoaren aurrera eramateko. Hasiera batean, lau parametro izango lirateke adierazgarrienak (pirolisi tenperatura, pirolisi denbora, oxidazio tenperatura, oxidazio denbora) baina, aurreko argitalpenetan oinarrituta, baieztatu daiteke pirolisi denbora ez dela erabakigarria; hitz gutxitan esanda, beharrezkoa da materiala atmosfera pirolitikoan denbora minimo batez egotea, baina denbora horretatik aurrera ez du zuntzetan eraginik. Kasu honetan, nahikoa da lagina berotuz doan heinean emandako tenperatura igoerarekin, hots, ez da lagina denbora jakin batez eta tenperatura jakin batean atmosfera pirolitikoan mantentenduko. Beraz, egonaldi denbora pirolitikoaren ez da parametro moduan hartu. Beste hiru parametroei dagokienez, aurreko argitalpenak hartu dira erreferentziatzat, gaiaren egoeraren azterketan azaldutakoan oinarrituz.

Lehenik eta behin, pirolisi tenperaturari dagokionez, aurreko argitalpenetan 400-600°C bitartean dagoela aipatzen da. Oxidazioaren etapari dagokionez, tenperatura eta denbora tarte bat zehaztu behar da. Tenperatura zehaztuz, esan daiteke 500-600°C tartean dagoela balio optimoa. Denbora tarteak 0-120 minutu artean zehaztu da. Hala ere, aire fluxua zehaztu behar da. Horretarako, lehendabizi lagin bakoitzaren erretxina kopurua zehaztu da, hori izango baita kendu nahi den zatia. Horretarako, Carbonizaion-In-Nitrogen metodoa erabili da. Emaitzak izanda, estekiometriaren bidez kalkulatu da zein izan behar den erretxina hori deskonposatzeko behar den aire kantitatea; aire kopurua eta denbora tarteak aukeratuta izanik, beharrezko aire fluxua kalkulatu da.

Puntu honetara iritsita, ezagunak dira hiru parametroen tartekak, eta saiakuntzak egiteari ekingo zaio. Argi ikusteko, aurretik zehaztutako parametroen tartekak hurrengo taulan erakusten dira.

Taula 3. Parametroen puntako balioak

Pirolisi Temperatura (°C)		Oxidazio temperatura(°C)		Oxidazio denbora(min)	
400	600	500	600	0	120

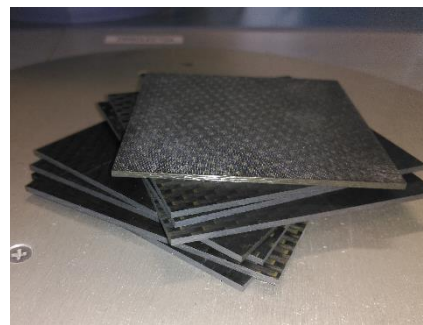
## 8.2 Erabilitako materialak

Ikerlan honetan bi konposite desberdin aztertu dira. Alde batetik, Airbusen hondakina den konposizio ezaguneko noranzko bakarreko prepreg bat erabili da. Beraz, ezaguna da lortu nahi den masa-galera. Prepreg hori epez kanpoko da, hortaz, konpositeen ekoizpenean sortzen diren hondakinen adierazgarria da. Ikerlanean izen honekin sailkatuko da: FCPM21.

Bestalde, konposite hondakin ondua erabili da, Airbusek utzitakoa dena ere bai. Konposite horren konposizioa ez da ezaguna, beraz konposizio hori zehaztu beharra dago. Horretarako, konposite termoeonkor baten karbono zuntz kopurua zenbatesteko nitrogeno atmosferako karbonizazio metodo bat jarraitu da (Wang, Ning, Vaidya, Pillay, & Nolen, 2015), aurretik aipatu bezala. Prozedura hori hurrengo azpiatalean azaldu da. Ikerlanean izen honekin sailkatuko da: FCCA.



Irudia 5. FCPM21 prepreg hondakina

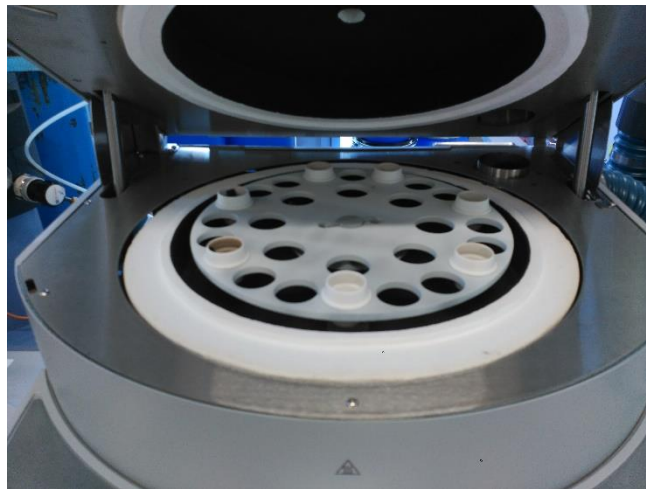


Irudia 4. FCCA hondakin ondua

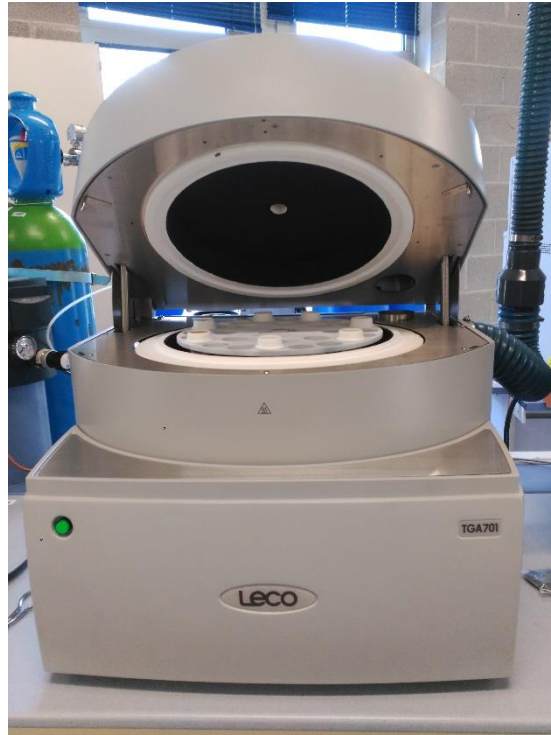
### 8.3 Ekipoa

Ikerlaneko entsegu guztiak egiteko LECO TGA701 analizatzaile termograbimetricoa erabili da, zeinekin material organiko, ez-organiko eta sintetikoen termograbimetriak egin ahal diren. Masa galera neurtzen du, temperaturaren funtzio bezala, atmosfera kontrolatu batean. Tresna labe batez eta ordenagailu batez osatuta dago.

Ekipoak 19 arragorentzako lekua du, erreferentziako arragoa deritzona beti barruan dagoelarik (ikus beheko irudiak). Arrago bakoitzean 0,5-5g arteko lagina jarri daiteke. Analisia hasi baino lehen, erabiliko diren arragoak (krisolak) sartzea eskatzen da, hutseko masa neurtzeko. Horren ostean, ekipoak laginak sartzeko abisatzen du, karrusela automatikoki kontrolatuz. Laginen hasierako masa neurtu ostean, programatutako analisiari ekingo zaio. Lagin bakoitzaren pisu galera monitorizatzen da, eta pausu bakoitzaren amaieran haren balioa ematen du.



*Irudia 6. TGA701 ekipoaren barrualdea analisi baten ostean*

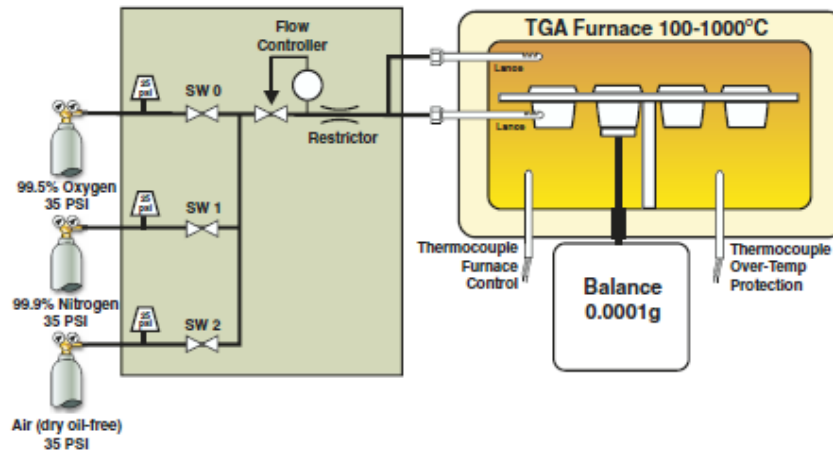


*Irudia 7.TGA701 ekipoa*

Analisiaren programazioa Microsoft Windowserako prestatuta dagoen software baten bitartez egin da. Programan jarraitu beharreko pausuak sartzen dira, bakoitzaren tenperatura, tenperatura-malda eta atmosfera zehaztuz. Atmosferari dagokionez, programak fluxu predeterminatu batzuk ditu, baxuena 3.5 lpm (litro minutuko) izanik. Halaber, pausu bakoitzak beste aldagai batzuk ere baditu, behar izatekotan erabiltzeko. Interesgarriak dira egonaldi denbora eta denbora maximoa; lehenengoak, lagina tenperatura batera heltzean zenbat denboraz egon behar den adierazten du, eta bigarrenak pausu baten denbora maximoa adierazten du, besterik adierazi ezean, laginak masa-galeran egonkortasuna, parametro bezala adierazi behar dena, lortu arte ez baita hurrengo pausura pasatuko.

Pausu bakoitzaren amaierako balioak zelan kalkulatu diren ere adierazi beharra dago. Horretarako, lortu nahi diren balioen ekuazioak idatzi behar dira, aukeratutako pausuen arabera.

Hurrengo fluxu-diagraman erakusten da ekipoa nola funtzionatzen duen:



*Irudia 8. TGA701 ekipoareen fluxu diagrama*

Erabili diren gasak nitrogenoa eta airea dira, azken hau sistema pneumatikoarentzako ere erabiliz. Ekipoareen baldintzak direla eta, airearen purutasun minimoa %99,5ekoa izan behar da, lehorra eta oliorik gabekoa. Kalitatezko airea behar denez, aire botila ekipora konektatu da.

#### 8.4 Faseak

Ikerlan honen zati esperimentalak lau fase nagusitan banatu daiteke.

Lehenengo fasean, laginen prestaketa eta karakterizazioa egin da. Laginak arragoetan jartzeko beharrezko neurrietan ebaki dira, eskuz. Gainera, lagin onduaren karbono zuntz zenbatekoa neurtu da. Beraz, fase honen helburua, lagin bakoitzaren erretxina frakzioa zehaztea da, helburu nagusirako funtsezkoa dena.

Bigarren fasean, balio maximo eta minimoen konbinazioen saiakuntzak egin dira. Saiakuntza horiek zortzi izan dira, eta azken emaitza konbinazio bakoitzerako masa galera da. Emaitza horiekin hurrengo faserako beharrezkoak diren datuak lortu dira.

Hirugarren fasea matematikoa da. Ikusi da faktore bakoitzaren eragina azken emaitzan eta balio optimoak kalkulatu dira.



## 1. Dokumentua - MEMORIA

Laugarren fasean balio optimo horiek enpirikoki berretsi dira. Ikusi da zuntzen berreskurapena, begi bistaz, egokia den edo ez.

Hurrengo orrialdean, Gantt-en diagrama erakusten da, proiektuaren aurre planifikazioa eta faseak aurkezten dituelarik.

# 1. Dokumentua - MEMORIA

	Jarduera	Hasiera	Amalera	ots.-1	mar.-4	apl.-4	mai.-5	eka.-5
	Proiektuaren hasiera							
1	Proiektuko akordioak	19-2-18	28-2-18	█				
2	Proiektuko azalpenak	20-2-18	1-3-18	█				
	Proiektua definituta							
3	Materialaren prestaketa	1-3-18	15-3-18	█				
4	Dokumentazioa	1-3-18	30-6-18	█				
5	Karakterizazioa	15-3-18	20-3-18	█				
6	Puntako entseguak	25-3-18	1-6-18		█			
7	Kalkuluak	8-6-18	20-6-18				█	
8	Optimizazioaren berrestea	25-6-18	25-6-18					█
	Proiektuaren amaiera							
9	Lana idatzi	1-3-18	27-6-18	█				
10	Zuzenketak eta baiezkua	18-6-18	28-6-18					█

Irudia 9. Gantt-en diagrama

## 8.5 *Prozedurak*

### 8.5.1 *Konposite onduaren konposizioaren zehaztapena*

Karbono zuntz konposizioa zehazteko CIN (Carbonization-In-Nitrogen) metodo bat erabili da, argitaratutako artikulu batean aztertzen dena (Wang et al., 2015). Halaber, metodo hori ASTM D3171-15 norma oinarritzen da (ASTM D3171 – 15. standard test methods for constituent content of composite materials.). Metodo horren bidez materialaren frakzio polimerikoa neurtzea lortu da. Metodo horretan bi material erabili dira, konpositea eta erretxina. Erabilitako erretxina purua eta konpositeko erretxina berdinak izan dira, bestela emaitzak ez lirateke fidagarriak izango. Kasu honetan, matrizearen erretxina RTM6 izan da, beraz hori izango da erabili dena.

RTM6 erretxina osagai bakarrekoa da, gasgabetua eta erretxinaren transferentziazko moldaketarako (RTM) zehazki diseinatua izan da (*HexFlow® RTM 6.*), industria aeroespazialerako baldintzak betez, gainazal kalitate onak eta forma konplexuak fabrikatzea ahalbidetuz, pieza kopurua murriztuz. Erretxina hori, sektore aeroespazialean RTM bidez fabrikatzen diren piezak egiteko estandarra da, bai Europa bai Estatu Batuetan, beraz nahiko ohikoa da.

Metodora bueltatuz, karbono zuntz lagina nitrogenozko atmosfera batean karbonizatu egiten da, temperatura altuetan (400-600°C), erretxina puruarekin batera. Karbono zuntzak ez dira oxidatzen, atmosferan oxigenorik ez dagoelako; erretxinaren zati bat, aldiz, deskonposatu egiten da eta beste bat karbonizatu egiten da, bai erretxina purua eta baita konpositearen matrizeko erretxina. Erretxina puruaren karbonizazioa neurtuz, erretxinaren karbonizazio portzentajea kalkulatu ahal da, eta horren bidez konpositeko erretxina edo, beste era batera esanda, karbono zuntz kantitatea zehaztu daiteke. Erretxinaren karbonizazio indizea (CR, 0-1 arteko balioa izango duena), non  $m_r$  krisolean geratzen den erretxina hondakinaren masa eta  $m$  erretxina laginaren hasierako masa diren, horrela kalkulatzen da:

$$CR = m_r / m \quad (1)$$

Konpositearen karbono zuntz edukia,  $W_f$ , hurrengo ekuazioarekin kalkulatzen da, non  $M_r$  krisolean geratzen den konpositearen masa den,  $M$  konposite laginaren masa den, eta  $CR$  aurreko pausuan lortu den karbonizazio indizea den.

$$W_f = \frac{(M_r - (M \times CR))}{(M \times (1 - CR))} \times 100 \quad (2)$$

Entseguak LECO TGA-701 ekipoa egin dira, erretxina eta konpositearen bakoitzeko hiru lagin aztertuz, lagin bakoitzak 0,5 g izanez. Labea 400°C berotu da nitrogenozko atmosferan eta laginak 60 minutuz mantendu dira tenperatura horretan. Karbonizazioaren ostean laginak hozten utzi dira, eta masa giro-tenperaturan neurtu da.

#### 8.5.2 Faktore maximo eta minimoen saiakerak

Aurretik esan bezala, faktore bakoitzaren puntako balioen konbinazio guztien entseguak egin behar dira, eta haien emaitza pisu galera (edo karbono zuntz kantitatea) da, ehunekoetan adierazita.

Zortzi konbinazio hauek begiesten dira:

Taula 4. Konbinazio taula

T pirolisi (°C)	T oxidazio (°C)	t oxidazio (min)
400	500	0
600	500	0
400	600	0
600	600	0
400	500	120
600	500	120
400	600	120
600	600	120

Entseguak bi pausu nagusi ditu. Lehenengo pausuan nitrogenozko atmosfera bat sortu da, eta beroketa malda 3°C/min-koa izan da, edozein kasutan. Nitrogeno fluxu baxua (3.5 lpm) ipini da. Pausu horren bukaeran, laginak jasan duen pisu galera ezaguna da. Pausu honen ostean, zuntzek karbonozko arrastoak erakusten dituzte. Bigarren pausuan, airezko atmosfera bat jarri da, karbono horren errekuntza emateko. Bigarren pausu horren fluxua eta denbora erlazionatzeko, konpositeko *char* guztia oxidatzeko beharrezkoa den oxigeno kantitatea kalkulatu da.

Oxigeno kantitate hori estekiometria erabiliz lortu da, eta hurrengo kalkuluetan oinarritzen da. Aipatu behar da erretxina kantitatea CIN metodoa erabiliz lortu dena dela baina kalkulu horiek 8.6.1 atalean erakusten direla.

$$0,5 \text{ g lagin} \times \frac{36,549 \text{ g erretxina}}{100 \text{ g lagin}} \times \frac{10 \text{ g erre behar}}{100 \text{ g erretxina}} = 0,0174 \text{ g erretxin erre behar dira} \quad (3)$$

Suposatu da sortzen den *char* guztia karbonoa dela:

$$0,0174 \text{ g C} \times \frac{1 \text{ mol C}}{12 \text{ g C}} \times \frac{1 \text{ mol O}_2}{1 \text{ mol C}} \times \frac{32 \text{ g O}_2}{1 \text{ mol O}_2} = 0,0464 \text{ g O}_2 \quad (4)$$

Sei arragoi jarri dira batera gehienez:

$$0,0464 \text{ g O}_2 \times 6 = 0,2784 \text{ g O}_2 \text{ behar dira totalean erretxina guztia erretzeko} \quad (5)$$

$$0,2784 \text{ g O}_2 \times \frac{1 \text{ mol O}_2}{32 \text{ g O}_2} = 0,0087 \text{ mol O}_2 \quad (6)$$

Estekiometriarengatik:

$$pV = nRT; \quad 1 \text{ atm} \times V \text{ L} = 0,0087 \text{ mol} \times 0,082 \text{ atm.L}/(\text{mol.K}) \times 873 \text{ K} \quad (7)$$

$$V = 0,632 \text{ L O}_2 \text{ (600°Ctan neurtuta, aztertutako tenperatura maximoa dena)}$$

25 gradutan, neurtuko den tenperatura:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad (8); \quad V_2 = 298 \text{ K} \times \frac{0,632 \text{ mol}}{873 \text{ K}} = 0,212 \text{ L O}_2 \quad (9)$$

Airearen konposizioa honako da: %79 N<sub>2</sub> %21 O<sub>2</sub>

$$0,212 \text{ L O}_2 \times \frac{100 \text{ L aire}}{21 \text{ L O}_2} = 1,009 \text{ L aire} \quad (10)$$

Kontuan izanda ekipoak baimentzen duen fluxu minimoa 3,5 L/min dela, fluxu hori nahikoa da erretxina guztia oxidatzeko.

Beste alde batetik, kontuan izan behar da pirolisi tenperatura eta oxidazio tenperatura berdinak ez direnean, hau da, lau kasuetatik hiru kasuetan, tarteko beroketa edo hozte hori nitrogeno edo aire atmosferan egingo den aukeratu behar da. Hoztearen kasuan (500°C-tik 400°C-tara), nitrogenoa erabili da. Tenperatura igoera dagoenean, aldiz, ez dago argi zein izango den aukerarik egokiena, eta beraz bai aire bai nitrogeno atmosferan egin dira entseguak. Emaitzak begiratzuz erabaki da zein den atmosfera egokiena.

### 8.5.3 Prozedura matematikoa

Aurreko ataleko entseguen emaitzak izanda, analisi matematikoari ekin ahal zaio. Atal honetako helburua, azken emaitzan faktore bakoitzak duen eragina ikustea da, eta baita bakoitzaren balio optimoa lortzea.

Aurretik lortutako emaitzak, kasu honetan, lagin bakoitzaren pisu-galeraren balioa, haien artean konbinatu dira, egindako entsegu beste informazio emateko. 8 entsegu egin direnez, 8 datu daude: bataz bestekoa, hiru efektu nagusi, bi faktoreen arteko elkarrekintzako hiru efektu, eta hiru faktoreen arteko elkarrekintza efektu bat (Ferré, 2018). Eragiketa horiek hurrengo *efektuen matrizean* ikusi ahal dira:

	<b>Batazbestekoa</b>	<b>T<sub>p</sub></b>	<b>T<sub>o</sub></b>	<b>t<sub>o</sub></b>	<b>T<sub>p</sub> x T<sub>o</sub></b>	<b>T<sub>p</sub> x t<sub>o</sub></b>	<b>T<sub>o</sub> x t<sub>o</sub></b>	<b>T<sub>p</sub> x T<sub>o</sub> x t<sub>o</sub></b>
1	+	-	-	-	+	+	+	-
2	+	+	-	-	-	-	+	+
+	+	-	+	-	-	+	-	+
4	+	+	+	-	+	-	-	-
5	+	-	-	+	+	-	-	+
6	+	+	-	+	-	+	-	-
7	+	-	+	+	-	-	+	-
8	+	+	+	+	+	+	+	+

Irudia 10. Efektuen matrizea

Efektuen matrizea aurreko atalean ikusi den entseguen matritzetik deduzitzen da. Batezbestekoaren kasuan + zutabe bat da, baina bi faktoreen arteko elkarrekintzan, haien arteko biderketaren zeinua hartzen da kontuan. Azkeneko zutabea ere, hiru faktoreen elkarrekintza, haien arteko biderketa eginez lortzen da. Matrize honek ez du ezer balioztatzen, efektuak kalkulatzeko nola konbinatu behar diren bakarrik aurkezten du. Hori kontuan izanda, efektuen kalkulura pasa daiteke, beheko taulan ikus ahal dena:

*Taula 5. Efektuen kalkulua*

Batezbestekoa	$b_o$	$( + y1 + y2 + y3 + y4 + y5 + y6 + y7 + y8 ) / 8$
$T_p$	$b_{T_p}$	$( - y1 + y2 - y3 + y4 - y5 + y6 - y7 + y8 ) / 4$
$T_o$	$b_{T_o}$	$( - y1 - y2 + y3 + y4 - y5 - y6 + y7 + y8 ) / 4$
$t_o$	$b_{t_o}$	$( - y1 - y2 - y3 - y4 + y5 + y6 + y7 + y8 ) / 4$
$T_p \times T_o$	$b_{T_p \times T_o}$	$( + y1 - y2 - y3 + y4 + y5 - y6 - y7 + y8 ) / 4$
$T_p \times t_o$	$b_{T_p \times t_o}$	$( + y1 - y2 + y3 - y4 - y5 + y6 - y7 + y8 ) / 4$
$T_o \times t_o$	$b_{T_o \times t_o}$	$( + y1 + y2 - y3 - y4 - y5 - y6 + y7 + y8 ) / 4$
$T_p \times T_o \times t_o$	$b_{T_p \times T_o \times t_o}$	$( - y1 + y2 + y3 - y4 + y5 - y6 - y7 + y8 ) / 4$

Elementu bakoitzaren azken balioak zer eragin duen 8.6 atalean aztertu da. Hurrengo ekuazioa lortzen da:

$$y = b_o + b_{T_p} \mathbf{x}_{T_p} + b_{T_o} \mathbf{x}_{T_o} + b_{t_o} \mathbf{x}_{t_o} + b_{T_p \times T_o} \mathbf{x}_{T_p} \mathbf{x}_{T_o} + b_{T_p \times t_o} \mathbf{x}_{T_p} \mathbf{x}_{t_o} + b_{T_o \times t_o} \mathbf{x}_{T_o} \mathbf{x}_{t_o} + b_{T_p \times T_o \times t_o} \mathbf{x}_{T_p} \mathbf{x}_{T_o} \mathbf{x}_{t_o} \quad (11)$$

Efektuen matrizean ordena batean agertu arren, saiakuntzak ez dira ordena horretan egin behar. Horren arrazoia faktore baten efektua nahitaezkoa den beste efektu batekin nahastean oinarritzen da, eta horrek azken emaitzetan joera bat markatzea.

## 8.6 *Emaitzak*

Orain arteko ordena errespetatuz azalduko dira lortutako emaitzak.

### 8.6.1 *Konposite onduaren konposizioaren zehaztapena*

Aurretik azaldutako prozedura jarraituz honako emaitzak lortu dira (ikus Eranskineko I. atala):

*Taula 6. Konposizioaren kalkulua*

	M krisol ( $m_c$ ) (g)	M krisol hondakin ( $m_{cr}$ ) (g) (Giro Tenperaturan)	M lagin ( $m$ ) (g)	CR	KZ edukia ( $W_f$ ) (% masa)
FCCA_1	21,3734	21,7188	0,5123		63,9904
FCCA_2	20,9500	21,2723	0,4798		63,7167
FCCA_3	21,1341	21,4350	0,4545		62,6455
ERRETXINA_1	21,5591	21,6082	0,5002	0,09816	
ERRETXINA_2	21,3914	21,4399	0,5032	0,09638	
ERRETXINA_3	22,2630	22,3078	0,4907	0,09130	

CR batezbestekoa: 0,09528

Karbono zuntz edukia ( $W_f$ ) batezbestekoa: 63,5%

Nahiz eta ezin den aurrekoaren moduan beste material batekin konprobatu, erabilitako erretxina desberdina baita, jakina da ehuneko horren inguruan izaten dela konpositeen karbono zuntz ehunekoa. Beraz, metodo honekin lortutako emaitza (%63,5 Karbono Zuntza, %36,5 erretxina) ontzat eman da.



8.6.2 Faktore minimo eta maximoen saiakerak

Azpian material bakoitzerako lortutako efektuen balioak erakusten dira (ikus Eranskineko II. atala).

$b_0$	54,60
$b_{TP}$	-5,05
$b_{TO}$	-18,22
$b_{to}$	-24,45
$b_{TP \times TO}$	6,32
$b_{TP \times to}$	2,21
$b_{TO \times to}$	-14,68
$b_{TP \times TO \times to}$	-1,12

Irudia 11. FCCA efektuen balioak

$b_0$	62,38
$b_{TP}$	-4,20
$b_{TO}$	-10,93
$b_{to}$	-11,59
$b_{TP \times TO}$	5,44
$b_{TP \times to}$	3,28
$b_{TO \times to}$	-2,39
$b_{TP \times TO \times to}$	-4,00

Irudia 12.FCPM21 efektuen balioak

Bi kasuetan,  $b_0$  balioak errendimendua, kasu honetan, pisu galera, zer baloreren inguruan aldatzen den adierazten du.

Efektu nagusien balioak,  $b_{TP}$ ,  $b_{TO}$  eta  $b_{to}$  negatiboak dira, kasu guztietan. Ikerlan honetan, laginen pisu galera ikertzen denez, negatibo zeinu horrek pisua galtzen dela esan nahi du. Hau da, efektu nagusiek eragin positiboa dute, nahi den helburua (pisu-galera) betetzen delako. Horregatik, temperatura eta oxidazio denbora altuetan zeinua negatiboa da, eragina pisu-galera handiagoa izatea baita. Puntako balioak bakarrik aukeratu beharko balira, hiru faktoreen balio maximoak

hautatu beharko lirateke pisu-galera maximoa izateko. Gainera, zenbakiak begiratu, balio absolutu handiena duena da pisu-galera handiagoa ekartzen duena.

Bi faktoreen arteko elkarrekintzaren efektuak begiratu, bi kasuetarako balioak nahiko desberdinak dira, eta beraz ezin da orokortu. Balio horiek binaka aztertu behar dira; eragina azaltzeko,  $b_{T_p \times T_0}$  hartuko da, material onduan, esate baterako.

Alde batetik, pirolisi tenperatura igotzean, pisu-galera handiagoa dela kontuan izan behar da ( $b_{T_p} = -5,05$ ). Hala ere, oxidazio tenperatura maximoa igotzean, pisu galera hori % -11,37ra heldu da, eta minimoa jaistean % 1,27 igo da pisua, hots, ez da pisurik galtzen.

Era berean, oxidazio tenperatura igotzearen eragina pirolisi tenperaturaren arabera izango da, eta beraz oxidazio tenperaturaren efektua ere interpretatu behar da. Efektu nagusia  $b_{T_0} = -18,22$  da, eta beraz, honek esan nahi du orokorrean hobe dela tenperatura altuak erabiltzea. Balio handiak esan nahi du, kasu guztietan hobe izango dela oxidazio tenperatura balio maximoak erabiltzea.

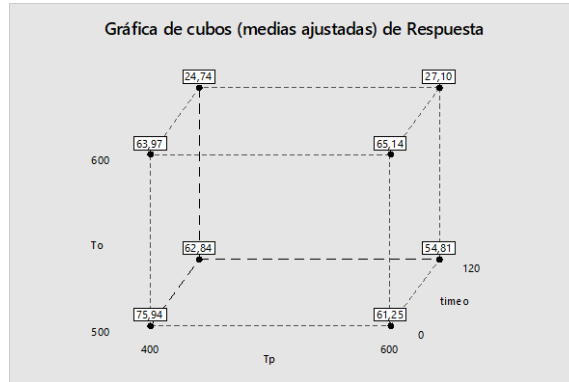
Analisi hori hiru efektuetarako egin daiteke, pausu berdina jarraituz.

Hiru faktoreen elkarrekintzaren efektuak adierazten faktore bat zer mailara arte den beste bi faktoreen elkarrekintzaren arabera. Prepregaren kasuan ikusten da balioa efektu nagusien antzerakoa dela, eta beraz hiru efektuak nahiko elkar-dependenteak izango direla.

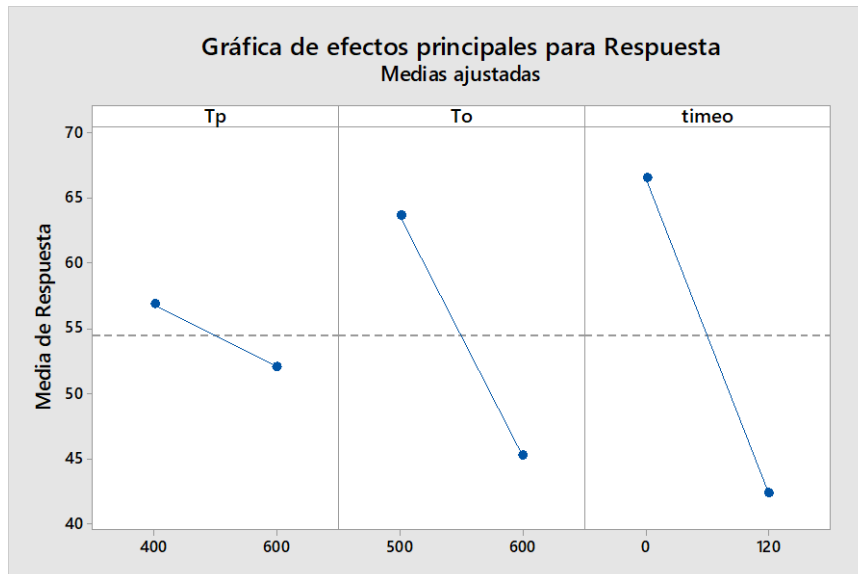
Orain arte egin diren kalkuluak Excel programarekin egin dira, haien sinpletasunarengatik, oinarriko eragiketak baitira. Analisi sakonago bat egiteko, oster, Minitab eta Design Expert programak erabili dira. Programa horiek jada badituzte  $2^k$  erabateko diseinu faktorialaren algoritmoak, eta beraz programan entseguetatik bildutako datuak sartu beharko dira eta eskuratu nahi diren datuak eskatu. Programazio matematikorik egin behar gabe, nahi diren emaitzak azalduko dira.

# 1. Dokumentua - MEMORIA

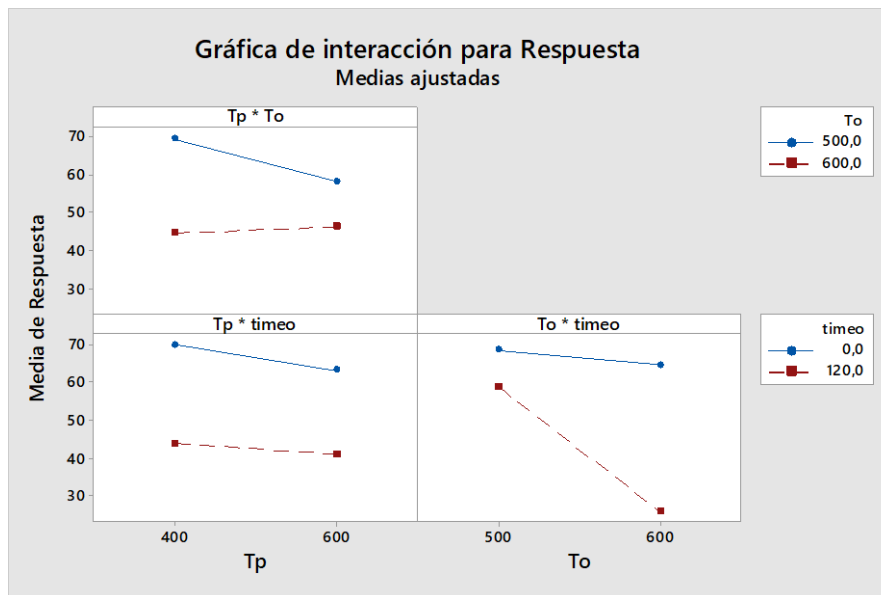
Lehenengo eta behin konposite onduari (FCCA) dagozkion emaitzak aztertuko dira. Konprobatu da Excelean kalkulaturako efektuak eta programak kalkulaturakoak berdinak direla. Grafika interesgarri hauek lortu dira:



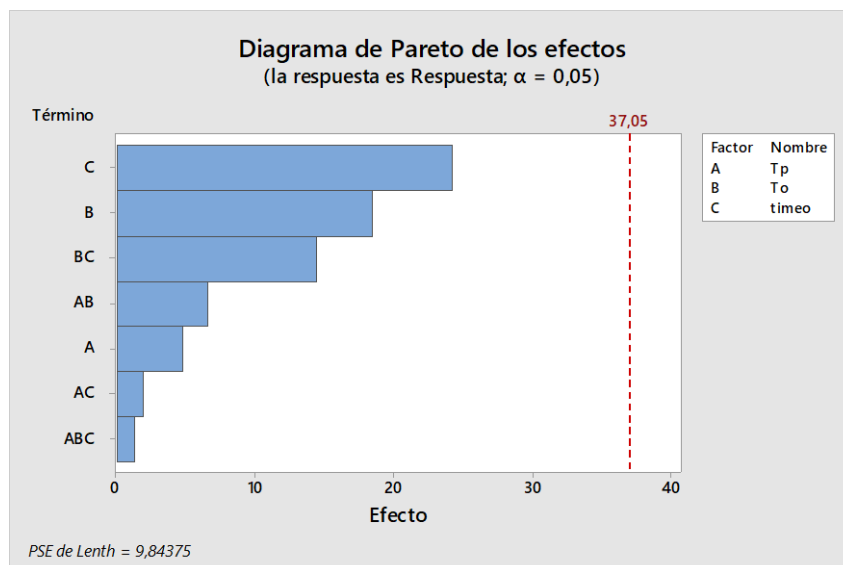
Irudia 13. FCCA kubo



Irudia 14. FCCA Efektu nagusien grafika



Irudia 15. FCCA Elkarrekintza efektuen grafika



Irudia 16. FCCA Paretoren diagrama

12 irudiak puntako balioetako emaitzak erakusten ditu. Ez du aurrez ezezaguna izan den datu berririk gehitzen, baina emaitzak argi ikusten laguntzen du. 13. eta 14.irudietan kalkulaturako efektuen balioak adierazten dira. Malda handiagoa den heinean, faktorearen eragina handiagoa da. Beraz, grafikoa bakarrik begiratuta, jakin daiteke oxidazio tenperatura eta denboraren eragina, pirolisi tenperaturarena baino askoz handiagoa dela. Gainera, aurretik lortutako efektuen balioekin bat eginez, ikusten da maldak negatiboak direla, eta horrek esan nahi du pisu galera handiagoa dela. Elkarrekintzen grafikoetan faktore bakoitzaren puntako balioak ikusi ahal dira,

## 1. Dokumentua - MEMORIA

eta kasu horietako bakoitzean duten eragina. Kasu guztietan, emaitzak ehunekotan adierazten dira, eta pisu galera balioesten dute. 8. Irudiak adierazten du efektu bakoitzak azken emaitzan duen eragina, aurretik kalkulaturako balio numerikoekin bat eginez.

Minitab programarekin jarraituz, ezarri da lortu nahi den balio optimoa %63,49 izango dela, hau da, erretxina guztia kentzeko behar den pisu galera. Minitab programak ondorengo balioak zehaztu ditu:

- Pirolisi tenperatura: 500°C
- Oxidazio tenperatura: 550°C
- Oxidazio denbora 15 minutu



*Irudia 17. FCCA optimizazio grafika. Minitab*

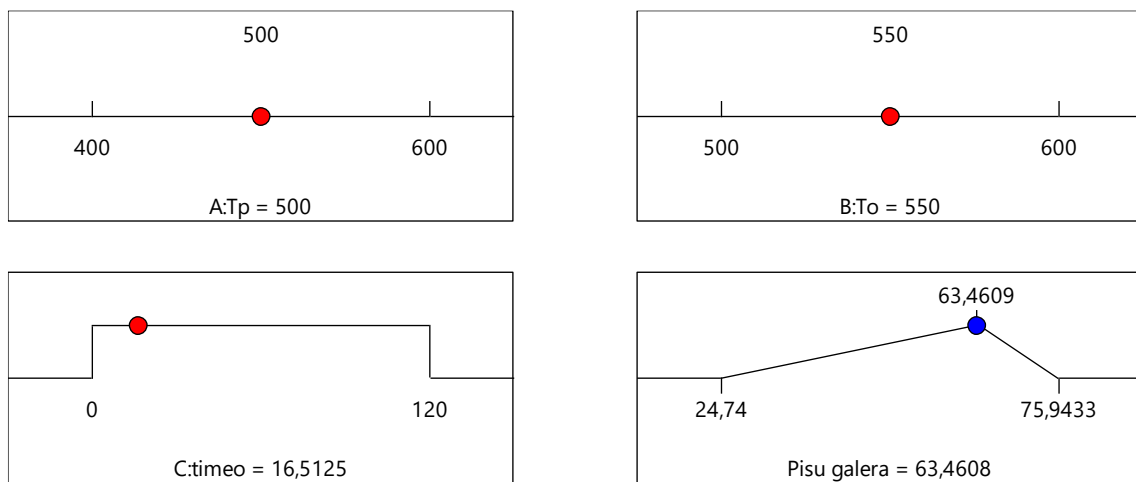
Nahi den balioa lortzeko (%63,49) konbinazio asko daude. Programa honek tenperaturaren bi balio finko hartu ditu eta denbora horien arabera ezarri da. Softwarea dela eta, konbinazio hau bakarrik agertzen da, hau da, ezin da adibidez beste tenperatura batzuk zehaztuz beharrezkoa izango litzatekeen denbora kalkulatu. Design Expert programak, aldiz, aukera hori ematen du.

Programara horretara aldatuz, optimizazio bera egin da, eta esan bezala bi faktoreri ezarritako tartean dauden bi balio emanez, hirugarren faktorearen balioa kalkulatu du. Minitabek

## 1. Dokumentua - MEMORIA

optimizatutako temperaturak ezarriz, frogatu da denbora berdina zehazten duela aukeratutako emaitzarako.

Ikusten da Desgin Expert programa erabiliz oxidazio denbora minutu bat luzeagoa dela. Hala ere, zehaztasun maila hori ez da erabakigarria entsegua egitean, ezin baita hain zehazki denbora neurtu.



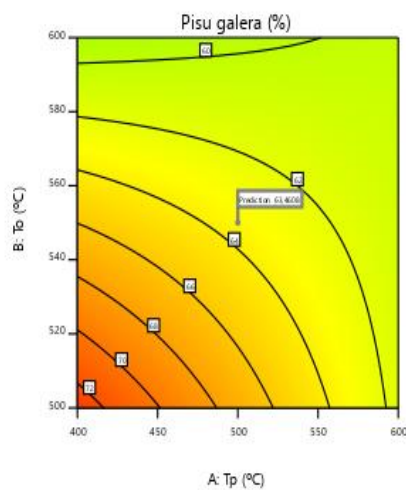
Irudia 18.FCCA Optimizazioa.Design Expert

**Design-Expert® Software**  
 Trial Version  
 Factor Coding: Actual

**All Responses**  
 0  1

X1 = A: Tp  
 X2 = B: To

**Actual Factor**  
 C: timeo = 16,5125



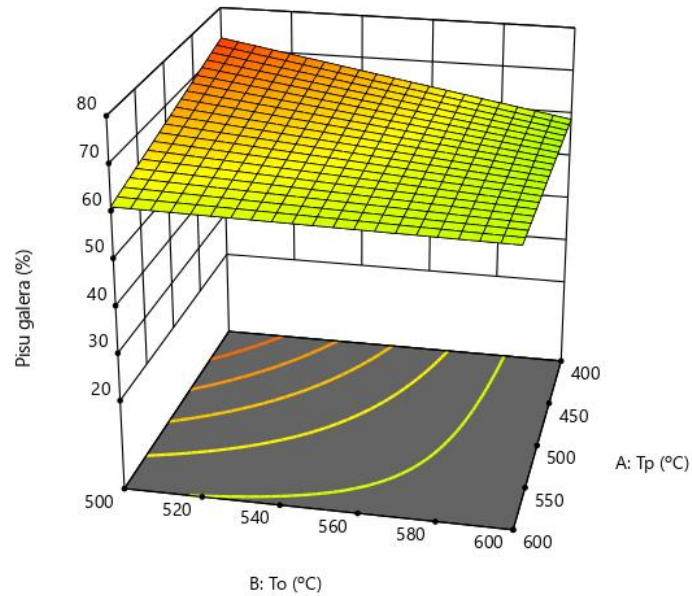
Irudia 19.FCCA Mugalde Grafika

Design-Expert® Software  
Trial Version  
Factor Coding: Actual

Pisu galera (%)  
24,74 75,9433

X1 = A: Tp  
X2 = B: To

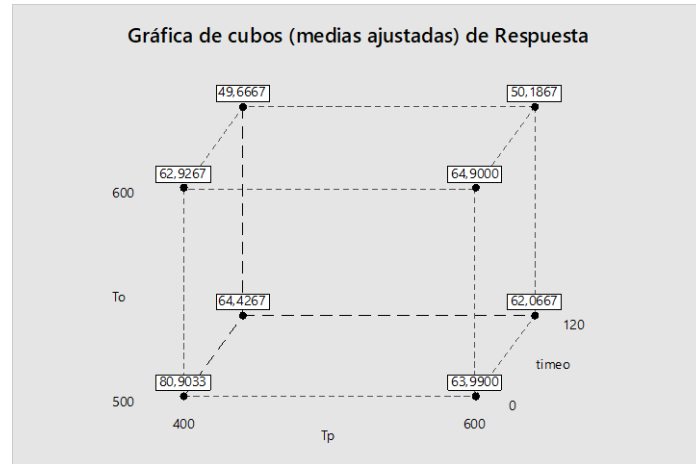
Actual Factor  
C: timeo = 16,51



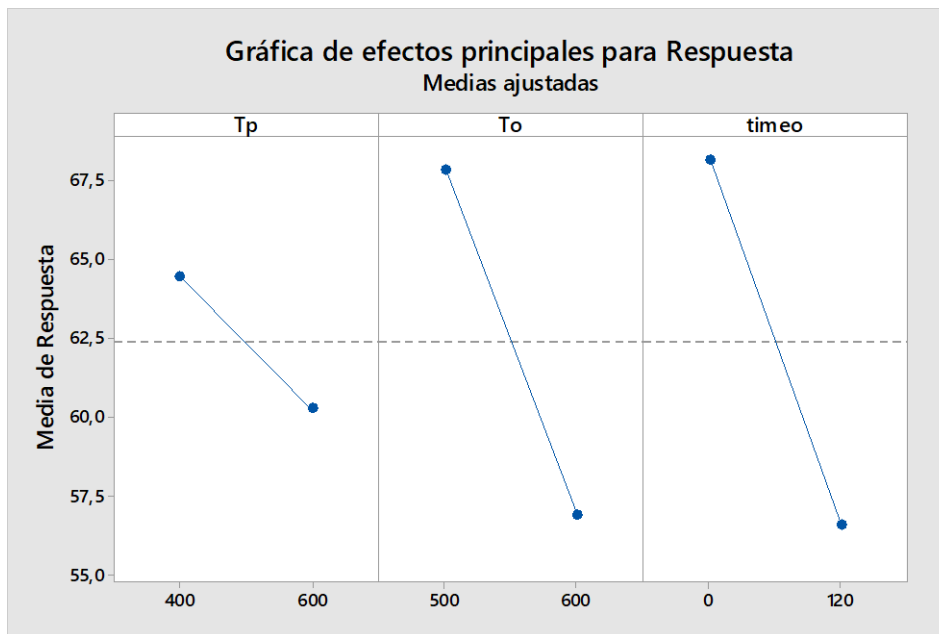
Irudia 20.FCCA Mugalde grafika 3D

Goiko grafikan, ikusi ahal da tenperatura bien araberako pisu galera, denbora optimoan, kurbek adierazita. Grafikoetan ezin dira hiru faktoreak gehi emaitza irudikatu, lau aldagai baitira. Horregatik, grafikoak beti faktoreak binaka hartuz irudikatu behar dira, eta hirugarrena finko eginez.

Material onduaren emaitzak erakutsita, prepreg materialaren emaitzak erakustera pasatu da. Horretarako, aurretik jarraitutako pausuak jarraitu dira.

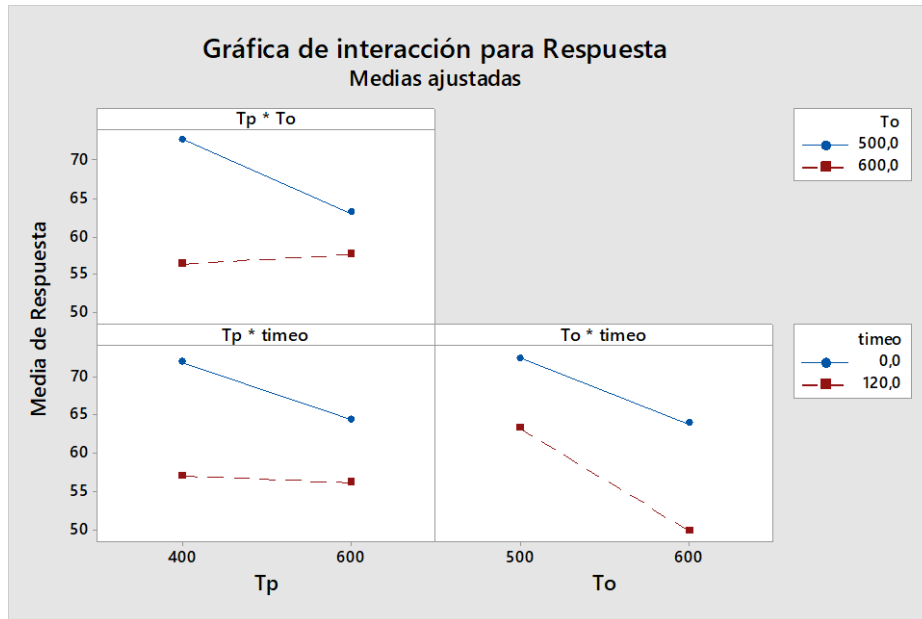


Irudia 21.FCPM21 kubo grafika

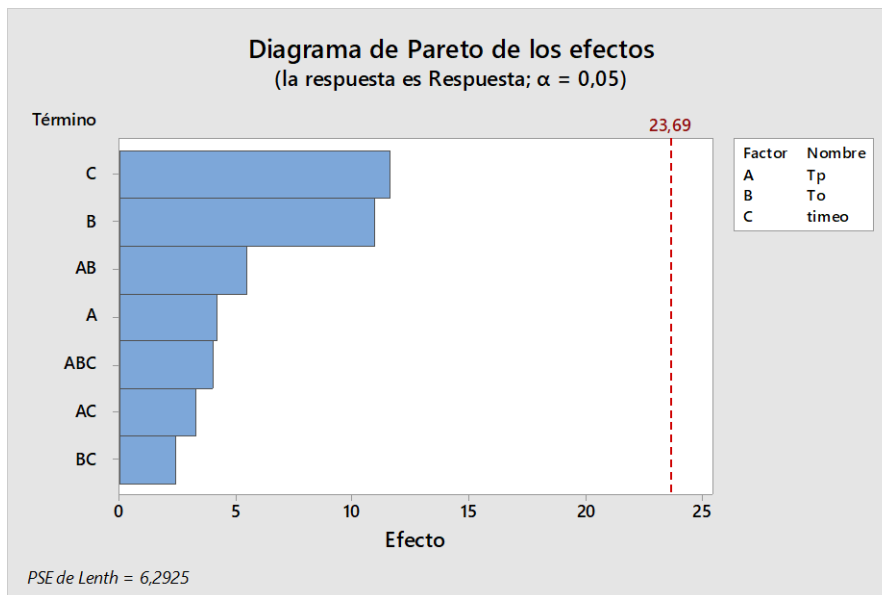


Irudia 22.FCPM21 efektu nagusiak





Irudia 23.FCPM21 elkarrekintza efektuak



Irudia 24. FCPM21 Paretoen diagrama

Aurreko kasuan bezala, pirolisi tenperaturak du malda txikiena, eta beraz faktorerik hutsalena da, Paretoren grafikan konprobatuko den bezala. Oxidazio tenperaturak et denborak, %35,80 eta %40,30-eko kontribuzioa dute azken emaitzan, pirolisi tenperaturarena %5,95-ekoa izanez. Kasu honetan interesagarria da ikustea nola hiru faktoreen arteko elkarrekintza (ABC) bi faktoreena baino handiagoa dela(AC,BC).

Optimizazioa egitean, balio hauek zehaztu dira Minitab-en:

- Pirolisi tenperatura: 500°C
- Oxidazio tenperatura: 550°C
- Oxidazio denbora: 53 minutu




Irudia 25. FCPM21 optimizazio grafika

Lehen jarraitutako prozedura berdinarekin, Design Expert-en optimizazioa egin da. Pirolisi tenperatura eta oxidazio tenperatura Minitaben lortutako optimizazioaren berdina zehaztuta, emaitza bat lortu da nahi den pisu galerarako (%63). Pirolisi tenperatura eta oxidazio tenperatura 500 eta 550ean ezarrita, hurrenez hurren, denbora optimoa 53,61 minutu dela kalkulatu da, Minitaben kalkulatuakoarekin bat eginez.

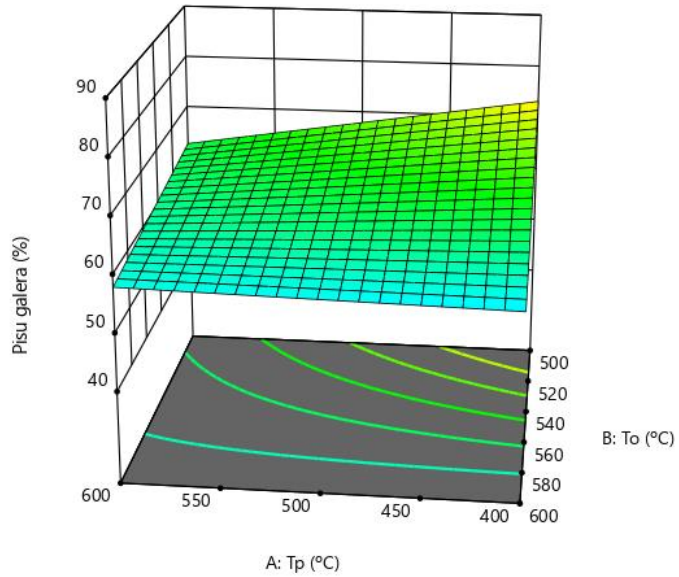
Lehen bezala, grafikoa hiru dimentsiotan irudikatuz:

**Design-Expert® Software**  
**Trial Version**  
 Factor Coding: Actual

**Pisu galera (%)**  
 49,6667  80,9033

X1 = A: Tp  
 X2 = B: To

**Actual Factor**  
 C: timeo = 53,61



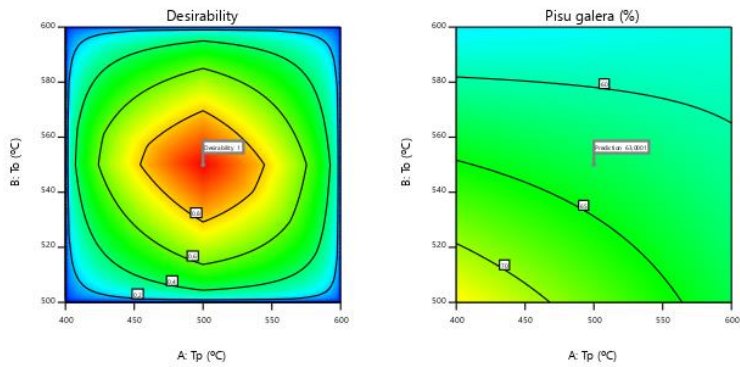
Irudia 27.FCPM21 Mugalde Grafika 3D

**Design-Expert® Software**  
**Trial Version**  
 Factor Coding: Actual

**All Responses**  
 0  1

X1 = A: Tp  
 X2 = B: To

**Actual Factor**  
 C: timeo = 53,6161



Irudia 26.Mugalde baldintzak 3D

Laburki, atal honetan material bakoitzarentzako balio optimoak kalkulatu dira. Hurrengo pausua balio horiek esperimentalki berrestea da.

### 8.6.3 Balio optimoen berrespena

Balio optimoak zehaztuta, haien berrespenari ekin zaio. Pausu honen helburua balio teoriko eta esperimentalen artean desberdintasunik dagoen ikustea da eta, egotekotan, zeren ondorio izan daitezkeen aztertzea.

Aurreko atalean lortutako balioekin TGA701 ekipoa egin da lan, aurreko entseguen prozedura berdina jarraituz.

Hurrengoak dira lortutako balioak (ikus Eranskinaren III. atala):

- Material ondua:

*Taula 7.FCCA balio optimoen berrespena*

FCCA	%
1	63,61
2	63,79
3	63,75
<b>Batez bestekoa</b>	<b>63,7</b>

- Preprega:

*Taula 8.FCPM21 balio optimoen berrespena*

FCPM21	%
1	62,46
2	62,76
3	63,13
<b>Batez bestekoa</b>	<b>62,8</b>

Lortu nahi diren emaitzak:

Taula 9. Balio teoriko optimoak

	%
FCCA	63,5
FCPM21	63

Ikusten denez, lortutako balio esperimentalak eta esperotako balio teorikoak oso hurbil daude. Eman diren desberdintasunak saihesteko, beharbada denbora are zehatzago programatu beharko litzateke. Hala ere, aipatu behar da material berdina aztertzean ere beti emango dela desberdintasun txiki bat, ezinezkoa baita materiala berdina izatea. Jarraian zuntz berreskuratuen irudiak ikus daitezke.



Irudia 28. FCCA berreskuratua

## 1. Dokumentua - MEMORIA



*Irudia 29. FCPM21 berreskuratua*

## 9. Alderdi ekonomikoak

### 9.1 *Gastu zuriketa*

#### 9.1.1 *Barne-orduak*

Taula 10.Barne-orduak

Barne-orduak	Denbora(h)	Ordu-tasa(€/h)	Kostua(€)
Ingeniari Juniorra	200	5	1000
Lanaren zuzendaria	10	50	500
<b>GUZTIRA</b>			<b>1500 €</b>

#### 9.1.2 *Amortizazioa*

Amortizazioan erabilitako makinak zein lizentziak hartu behar dira kontuan, baina lizentziak badaudenez jada, ekipoak soilik hartu dira kontuan. Gainera, kostua kalkulatzeko suposatuta da makinak urte osoan 220 egun egiten duena lan (lanegunak), 8 orduz egunean.

Taula 11.Amortizazioak

MAKINERIA	Kopurua	Balioa (€)	Bizitza erabilgarria (urte)	Erabilitako denbora (h)	Kostua (€)
LECO TGA-701	1	30250	10	50	85,94
Balantza	1	1500	8	1	0,11
<b>GUZTIRA</b>					<b>86,05€</b>

### 9.1.3 *Gastuak*

Aztergai izan diren materialak aeronautikaren sektoretik datozen hondakinak dira. Beraz, honen kostua nulua da.

*Taula 12. Gastuak*

MATERIALA	Kantitatea	Aleko kostua	Kostua (€)
Aire sintetikoa	2	110	220
Nitrogenoa	4	100	400
<b>GUZTIRA</b>			<b>620€</b>

### 9.1.4 *Azpikontratazioak*

Ikerlan hau aurrera eramateko ez da beharrezkoa izan azpikontrataziorik egitea. Beraz, atal hau ez da kontuan hartuko.

### 9.1.5 *Kostu ez-zuzenak*

Kostu ez zuzenetan hurrengo faktoreak hartu dira kontuan: uraren erabilera, energia kostua, garbiketa kostua, ekipoen konponketa kostua eta pertsonalaren kostua. Guzti horrek aurretik kalkulaturako kostuen %15ko gehikuntza suposatuko du.

$$\text{Kostu ez-zuzenak} = (1500+86,05+620) \times 0,15 = 330,91\text{€}$$



9.1.6 Aurrekontu totala

Taula 13.Aurrekontu totala

	Kostuak (€)
Barne-orduak	1500
Amortizazioak	86,05
Gastuak	620
Kostu ez-zuzenak	330,91
<b>GUZTIRA</b>	<b>2536,96€</b>

## 10. Arriskuen analisia

Edozein proiektutan bezala, lan honetan badaude arrisku batzuk bere garapena oztopatu edo gelditu ahal dutenak. Proiektu hau amaituta dagoenez arriskuak saihestu direla baieztatu daiteke, baina horretarako beharrezkoa izan da hasieran arriskuen analisi bat egitea.

Arrisku baten analisia egiteko orduan, kontuan izan behar dira arriskuak izan ahal duen inpaktua eta gertatzeko probabilitatea. Jarraian, proiektu honetan eman ahal diren arriskuak aurkezten dira.

### 10.1 Erabilitako ekipoarekin arazoak (A1)

Ikerlana aurrera eramateko erabili den ekipoa bakarra den arren, posible da harekin arazoak aurkitzea, bai *hardware* bai *softwarean*. Arrisku honen inpaktua altua da eta hura emateko probabilitatea ertaina.

### 10.2 Laborategian arazoak (A2)

Proiektuan erabilitako materialak direla eta, laborategian bi arrisku nagusi eman daitezke.

Lehenengoa karbono zuntzak maneiatzean horiek arnastea eta azalarekin kontaktua edo begiekin kontaktua izatea da. Sintomak, edozein kasutan, narritadura tenporal moduan aurkezten dira.

Bigarren arazoa erabiliko den nitrogenoa arnastean datza. Hori gas-ihesa ematen bada gertatu daiteke. Ondorioak ahultasuna, konorte galera eta asfixia dira.

Arrisku horien inpaktua altua da, lanean dagoen pertsonaren baja eman baitaiteke, baina probabilitatea baxua.

### 10.3 Atzerapenak (A3)

Arrazoi desberdinengatik, gertatu daiteke proiektuaren hasierako plangintza ezin jarraitzea eta horrek proiektu osoaren atzerapena suposatzea. Arrisku hau emateko inpaktua ertaina da eta probabilitatea ere ertaina.

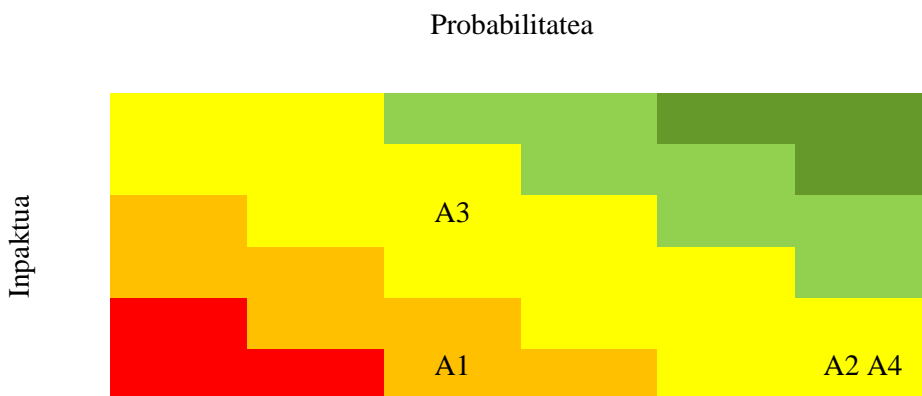
Neurri bezala, beharrezkoa da atal edo fase bakoitzak hartuko duen denbora zehaztea, horrela atzerapen bat gertatzekotan aurreikusi daiteke nolako eragina izan dezakeen.

### 10.4 Datu galera (A4)

Lana egitean, gertatu daiteke garatutako lanaren informazioa edo datuak galtzea. Arrisku honen probabilitatea oso baxua da baina inpaktua oso altua da.

Arriskua ekiditeko, lanaren hainbat kopia leku desberdinetan izatearekin nahikoa da.

### 10.5 Arriskuen analisi orokorra



Arrisku horien aurrean babes-plana eta kontingentzia-plana egitea beharrezkoa da.

Taula 14. Babes- eta kontingentzia-plana

Arriskuaren identifikadorea	Babes-plana	Kontingentzia-plana
A1	·Ekipoak erabili baino lehen hainbat froga egin, modu egokian funtzionatzen duela baieztatu	·Arazoaren kausa bilatu, analisia berri egin ·Teknikaria kontsultatu ·Ekipoaren fabrikatzailea kontsultatu
A2	·Karbono zuntzen kasurako: ·arnasketa: aireztapen egokia, partikuletatik babesteko maskara ·azalarekin kontaktua: eskularruak, mantala, azalik agerian ez eraman ·begiekin kontaktua: babes betaurrekoak	·Karbono zuntzaren kasurako: ·arnasketa: kaltetua leku aireztatu batera eraman. ·azalarekin kontaktua: ur eta xaboiarekin garbitu. Ez igurtzi ·begiekin kontaktua: urarekin garbitu 15 minutuz gutxienez Sintomak jarraitzen badute, laguntza medikoa bilatu
	·Nitrogenoaren kasurako: ·arnasketa: aireztapena, gas-neurgailu alarma sistema	·Nitrogenoaren kasurako: ·arnasketa: kaltetua leku aireztatu batera eraman, atsedena. Arnasketa artifiziala eta laguntza medikoa, beharrezkoak balira
A3	Atal edo fase bakoitza betetzeko denbora aurreikusi	Planifikazioa birmoldatu
A4	Lanaren kopia hainbat lekutan izan	Ikusi posible den berreskuratzea, berriro hasi

## 11. Ondorioak

Ikerlan honen helburu zehaztu den karbono zuntzen berreskurapena pirolisi eta oxidazio prozesu baten bidez posible dela frogatu da, balio optimoak lortuz.

Prozedura esperimentalak eta matematikoa konbinatuz, edozein karbono zuntzez indartutako materialen zuntzen berreskurapenerako balio optimoak lortzea ahalbideratzen duen prozedura aurrera eraman da, horretarako zortzi saiakera soilik eginez.

Lortutako emaitzak begiratu, prozedura fidagarria dela baieztatu daiteke.

Proiektu honetan oinarrituz, hurrengo pausuak hauek lirateke:

- Prozesua eskala industrialera eraman
- Prozesuaren ingurumen inpaktua neurtu
- Prozesuaren analisi ekonomiko bat egin, faktore guztiak kontuan hartuz

## 12. Bibliografia

A350 XWB family., 2018, from <http://www.airbus.com/aircraft/passenger-aircraft/a350xwb-family.html>

Aerogeneradores: Las palas averiadas o en desuso, un riesgo para el medio ambiente.(2014, *Abc*,

*An airbus working group sets out a composites recycling roadmap.*, 2014, from <http://www.airbus.com/newsroom/news/en/2014/05/an-airbus-working-group-sets-out-a-composites-recycling-roadmap.html>

Allen, B. E. (2008). Characterization of reclaimed carbon fibers and their integration into new thermoset polymer matrices via existing composite fabrication techniques. Graduate Faculty of North Carolina State University).

Andjelic, S. (2014). Recycling thermoset composite waste from the aerospace industry. Université du Québec à Montréal).

ASTM D3171 – 15. standard test methods for constituent content of composite materials.

Callister, W. D. J. (2007a). Appendix B. properties of selected engineering materials. *Materials science and engineering: An introduction* (7th ed., )

Callister, W. D. J. (2007b). Ch. 16. composites. *Materials science and engineering: An introduction* (7th ed., pp. 577)

Chapter 4. matrix characterization. (2002). *Composite materials handbook volume 1. polymer matrix composites guidelines for characterization of structural materials* (). U.S.

Department of Defense;:

*Diseño y fabricación. proceso de fabricación y*

*montaje.* <http://www.siemensgamesa.com/es/productos-servicios/aerogeneradores-gamesa/disen-y-fabricacion/proceso-fabricacion-montaje.html>

Dong, P. A., Azzaro-Pantel, C., & Cadene, A. (2018). Economic and environmental assessment of recovery and disposal pathways for CFRP waste management. *Resources, Conservation and Recycling*, 133, 63.

Ferré, J. (2003). Técnicas de laboratorio. ()

Ferré, J. (2018). *El diseño factorial completo* 22

Gehr, M. Recycled carbon fibre: A new approach to cost effective lightweighting. ***Travelling Conference Unterlagen - Fraunhofer IGCV***,

Giorgini, L., Benelli, T., Mazzocchetti, L., Leonardi, C., Zattini, G., Minak, G., et al. (2015). Recovery of carbon fibers from cured and uncured carbon fiber reinforced composites wastes and their use as feedstock for a new composite production. *Polymer Composites. Special Issue: 7th Conference on the Times of Polymers & Composites (TOP)*, 36(6)

HexFlow® RTM 6. [http://www.hexcel.com/user\\_area/content\\_media/raw/RTM6\\_global.pdf](http://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/RTM6_global.pdf)

Holmes, M. (2013). Carbon fibre reinforced plastics market continues growth path (part 1). *Reinforced Plastics*,

Holmes, M. (November-December 2014). Global carbon fibre market remains on upward trend.

*Reinforced Plastics*, 58(6), 38.

*Innovative composite engineering. what is carbon fiber?*, 2018, from

<http://www.innovativecomposite.com/what-is-carbon-fiber/>

Job, S., Leeke, G., Mativenga, P. T., Oliveux, G., Pickering, S., & Shuaib, N. A. (2016).

*Composites recycling: Where are we now?*

Johnson, T. *Understanding CFRP composites*. Retrieved April 02, 2017, from

<https://www.thoughtco.com/understanding-cfrp-composites-820393>

Kühnel, M., & Kraus, T. (2016). *The global CFRP market 2016*

Lauzé, M. (2014). *Recycling carbon fibre reinforced composites: A market environment assessment*

López Urionabarrenechea, A., De Marco Rodríguez, I., Caballero Iglesias, B. M., Gastelu Otazua, N., Hernández Sáinz, A., Adrados López de Viñaspre, A., et al. (2016). *Método para el tratamiento de vapores generados en el proceso de recuperación de fibras de carbono de composites por pirólisis*

*The markets: Sports and recreation*. (2014). <https://www.compositesworld.com/articles/the-markets-sports-and-recreation-2012>

Melendi-Espina, S., Morris, C. N., Turner, T. A., & Pickering, S. J. (2016). Recycling of carbon fibre composites. *Conference: Carbon 2016*, Penn State University, State College, United States.



- Meng, F., McKechnie, J., Turner, T., Wong, K. H., & Pickering, S. J. (2017). Environmental aspects of use of recycled carbon fiber composites in automotive applications. *Environmental Science & Technology*, 51(21), 12727.
- Meyer, L. O., Schulte, K., & Grove-Nielsen, E. (2009). CFRP-recycling following a pyrolysis route: Process optimization and potentials. *Journal of Composite Materials*, 43(9), 1121.
- Nayak, N. (2014). Composite materials in aerospace applications. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 4(9)
- Newcomb, B. A. (2016). Processing, structure, and properties of carbon fibers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 91
- Nicolais, L., & Pisanova, E. (2012). Recycling of carbon fiber composites . Wiley *encyclopedia of composites* ()
- Oliveux, G., O. Dandy, L., & Leeke, G. (2015). Current status of recycling of fibre reinforced polymers: Review of technologies, reuse and resulting properties. *Progress in Materials Science*, 72(61)
- Palas de aerogeneradores: Un residuo emergente ante el final de su vida útil que la compañía EDP renovables pretende reciclar.(2017, *Energia Diario*,
- Pickering, S. J. (2010). Ch.4. thermal methods for recycling waste composites. *Management, recycling and reuse of waste composites* (pp. 65) Woodhead Publishing in Materials.
- Pickering, S. J., Liu, Z., Turner, T. A., & Wong, K. H. (2016). Applications for carbon fibre recovered from composites. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 139(1)

- Pimenta, S., & Pinho, S. T. (2010). Recycling carbon fibre reinforced polymers for structural applications: Technology review and market outlook. *Waste Management*, 31(2), 378.
- Pimenta, S., & Pinho, S. T. (2014). Ch.19. recycling of carbon fibers. *Handbook of recycling state-of-the-art for practitioners, analysts, and scientists* (pp. 269)
- Quilter, A. *Composites in aerospace applications*
- Rybicka, J., Tiwari, A., Alvarez Del Campo, P., & Howarth, J. (2015). Capturing composites manufacturing waste flows through process mapping. *Journal of Cleaner Production*, 91, 251.
- Sánchez, D. I. (2011). Diseño óptimo de laminados en materiales compuestos. aplicación del MEF y el método de las superficies de respuesta.(trabajo fin de máster). Escuela Superior de Ingenieros Universidad de Sevilla).
- Sauer, M., Kühnel, M., & Witten, E. (2017). *Composites market report 2017. market developments, trends, outlook and challenges*
- Sloan, J. (2016). *Carbon fiber 2016 report*
- Wang, Q., Ning, H., Vaidya, U., Pillay, S., & Nolen, L. A. (2015). Development of a carbonization-in-nitrogen method for measuring the fiber content of carbon fiber reinforced thermoset composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 73, 80.
- Willett, H. G. (2012). Characterisation of composites for wind turbine blades. *Reinforced Plastics*, 56(5), 34.

