

Fabrikazio gehigarriaren iraunkortasun-azterketa: materiala aurrezte eta kontsumo energetikoa murriztea

(Sustainability analysis of the additive manufacturing: material and energy consumption saving)

Jon Iñaki Arrizubieta*¹, Olatz Ukar², Marta Ostolaza¹, Aitzol Lamikiz¹,
Naiara Ortega¹

¹ Mekanika Saila, Bilboko Ingeniaritza Eskola, Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU)

² Mekanika, Diseinu eta Industria Antolaketa Saila, Ingeniaritza Fakultatea, Deustuko Unibertsitatea

LABURPENA: Gizakiaren ekintzen ondoriozko aztarna ekologikoaren eragina murriztearen garrantziaren kontzientzia globala hedatuta dago egungo gizartean, baina oraindik beharrezkoa da aurre-rapausoak ematea. Egora horren aurrean, Nazio Batuen Erakundeak 2015ean aurkeztutako Garapen Iraunkorrerako Helburuen artean, industriaren eta berrikuntzaren aldeko apustuaren beharrezana azpimarratu behar da. Ildo horretan, fabrikazio gehigarria materialaren erabilera murriztu eta kontsumo energetiko jasangarriaren alde egiteko aukera ezin hobea da. Beraz, teknologia horrek eskaintzen dituen abantailen azterketa gauzatu da artikuluko honetan, baina betiere ikuspuntu jasangarri batetik eta ohiko teknologiek alderatuz.

HITZ GAKOAK: fabrikazio gehigarria, iraunkortasuna, fabrikazio jasangarria, materiala aurrezte, energia-kontsumoa.

ABSTRACT: In modern society, a global awareness of the need to reduce the environmental footprint arising from the human activity is prevalent. However, it is still necessary to make progress in this matter. In view of this situation, the United Nations set the Sustainable Development Goals in 2015, among which the commitment for the industry, innovation and infrastructure should be further explored. In the same line of thought, Additive Manufacturing offers the possibility to promote a sustainable consumption of material and energy. Therefore, an analysis of the advantages provided by this technology is presented hereby, in which its sustainability in comparison with conventional manufacturing methods is assessed.

KEYWORDS: Additive Manufacturing, sustainability, sustainable manufacturing, material saving, energy consumption.

* **Harremanetan jartzeko / Corresponding author:** Jon Iñaki Arrizubieta, Mekanika Saila, Bilboko Ingeniaritza Eskola, Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU), Torres Quevedo ingeniariaren Plaza 1 (48013 Bilbao). – joninaki.arrizubieta@ehu.eus – <https://orcid.org/0000-0002-6030-4941>.

Nola aipatu / How to cite: Arrizubieta, Jon Iñaki; Ukar, Olatz; Ostolaza, Marta; Lamikiz, Aitzol; Ortega, Naiara (2021). «Fabrikazio gehigarriaren iraunkortasun-azterketa: materiala aurrezte eta kontsumo energetikoa murriztea»; *Ekaia*, ale berezia 2021, 155-171. (<https://doi.org/10.1387/ekaia.22141>).

Jasotze-data: 2020, urriak 15; Onartze-data: 2021, urriak 18

ISSN 0214-9001 - eISSN 2444-3255 / © 2021 UPV/EHU



Lan hau Creative Commons Aitortu-EzKomertziala-LanEratorririkGabe 4.0 Nazioartekoa lizentzia baten mende dago

1. SARRERA

Gizakiak eragin nabarmena sortzen du ingurunean: kutsadura, erregai fosilen errekuntza, baso-soiltzea, gainpopulazioa, etab. Horrelako ekintzek klima-aldaketa, lurzorua higidura, aire-kalitatearen murriztea eta edateko uraren kutsadura dakarte. Horrek guztiak eragina dauka gizakiaren portaeran, eta migrazio masiboak edo borrokak eragin ditzake zenbait baliabide eskuragarri izateko, hala nola edateko ura [1].

Gaur egun, inoiz baino gehiago, gizakiaren ekintzek eragindako azarna ekologikoa murrizteko beharrezko garrantziaren kontzientzia globala dago. Klima-aldaketaren ondorioak nabariak diren mundu honetan, ezinbestekoa da garapen-bide berriak diseinatzea. Gizakiek beren beharrak asetzeko beharrezkoak dituzten baliabideen erabilera egoki eta jasagarria ezinbestekoa da hurrengo belaunaldien edo beste izaki bizidunen etorkizuna arriskuan ez jartzeko [2].

Hala, 2015ean, Nazio Batuen Erakundeak (NBE) Garapen Iraunkorrerako Helburuak (GIH) aurkeztu zituen. Gizabanako guztiarentzat etorkizun hobe eta iraunkorragoa lortzea helburu duen mundu mailako proiektu bat da. Helburuek egungo erronka globalak jorratzen dituzte; besteak beste, pobrezia, genero-berdintasuna, klima-aldaketa, ingurumenaren degradazioa, bakea eta justizia [3]. Hortaz, GIHeK esparru anitzetan esku hartzea dute helburu (ikus 1. irudia), baina guztietan iraunkortasuna da lortu nahi den garapenaren ardatza.



1. irudia. Garapen Iraunkorrerako Helburuak (NBE) [3].

Hori guztia dela eta, gaur egungo ingeniariaren funtsezko erronketa-riko bat 9. GIHarekin bat egin eta industria iraunkorraren aldeko benetako apustua egitea da. Horretarako, beharrezkoa da ikerkuntza bultzatzea eta prozesu industrial arduratsu eta eraginkorren garapena sustatzea.

2. 9. GIHa: INDUSTRIA, BERRIKUNTZA ETA AZPIEGITURAK

Aspalditik ezaguna da ekonomia sendoek industria, berrikuntza eta azpiegitura eraginkorrak behar dituztela. Horietan inbertitzea ezinbestekoa da garapen iraunkorra lortzeko, gizartea ahalduntzeko, egonkortasun sozial handiagoa sustatzeko eta klima-aldaketari aurre egiten dioten kontsumo-ohiturak lortzeko. Ildo horretan, fabrikazio-sektorea garapen ekonomikoren eta enpleguaren eragile garrantzitsua bilakatu da.

Fabrikazio-teknologia aurreratuek funtsezko zeregina betetzen dute, ez bakarrik nazio-ekonomien oparotasuna areagotzeko dagokionez, baizik eta baita Garapen Iraunkorrerako 9. Helburuari dagokionez ere: «industria-berrikuntza eta -azpiegitura». Alabaina, fabrikazio-prozesuak jasangarritasun-ikuspuntuen arabera garatzea erronka konplexua da, besteak beste, enpresek helburu gisa garapen iraunkorra jartzen dutenean, xede hori zuzeneko edo epe laburreko etekinak lortzearekin kontrajarria delako sarritan.

Jasangarritasun-helburu horiek guztiak lortzeko jomugarekin, lekuan lekuko gobernuak plangintza ugari argitaratu dituzte, betiere herrialdeen arteko koordinazioa bilatuz. Ildo horretan, Eusko Jaurlaritzak Garapen Jasangarri-rako 2030 Agenda argitaratu du, EAEko egoerara egokitu. Agenda horretan, industriaren berrikuntza lortzeko ikerkuntzaren, berrikuntzaren eta teknologiararen alde egitearen garrantzia azpimarratzen da, eta arreta berezia eskaini behar zaio fabrikazio aurreratuari [4]. Testuinguru horretan, fabrikazio gehigarria (hemendik aurrera, FG) etorkizuneko fabrikazio eta ekoizpen jasangarriagoen garapena ahalbidetuko duen fabrikazio-prozesua dela uste da.

Alabaina, Garapen Iraunkorrerako Helburuen garrantzia bere osotasunean ulertzeko, ezin da ekintza-eremu bakoitza bere aldetik aztertu, baizik eta, gizarte iraunkorragoa lortzeko, arlo guztietan aldi berean aurrera egin beharra dago. Esaterako, industriako berrikuntzak ekoizpen eta kontsumo arduratsua lotu beharko ditu — 12. GIHa, hain zuzen —, eta fabrikazio-prozesuak hondakinen sorrera murriztu. FGaren kasuan, baliabideak modu eraginkorrean erabiltzen dira; materiala beharrezkoa den tokian soilik gehitzen da, eta, erabili gabeko ia material guztia iragazte-sistema batetik igaro ostean, berriro erabil daiteke. Hortaz, FGa prozesu ezin hobea da egungo ekoizpen-eredu linealetik eredu zirkularrera igarotzeko.

Gainera, lekuan behar diren produktuak fabrikatzea ahalbidetzen duenez, FGak lekuko produkzioa bultzatzen du, eta inklusio sozial, ekonomiko

eta politikoa ere sustatzen ditu. Hurbileko fabrikazioari esker, produktu eta osagai aurreratuak egiteko edo erosteko kostua murriztu egiten da, eta konponketa merkeagoak eta errazagoak ahalbidetzen. Horregatik, 2. irudian erakusten den bezala, FGak 1. GIHaren (pobrezia murriztea), 8. GIHaren (lan duina eta hazkunde ekonomikoa), 5. GIHaren (genero-berdintasuna) eta 10. GIHaren (berdintasuna) alde egiten du.



2. irudia. Fabrikazio gehigarriaren bidezko aurrerakuntza Garapen Iraunkorren helburuetan. Egileek [5]-etik moldatuta.

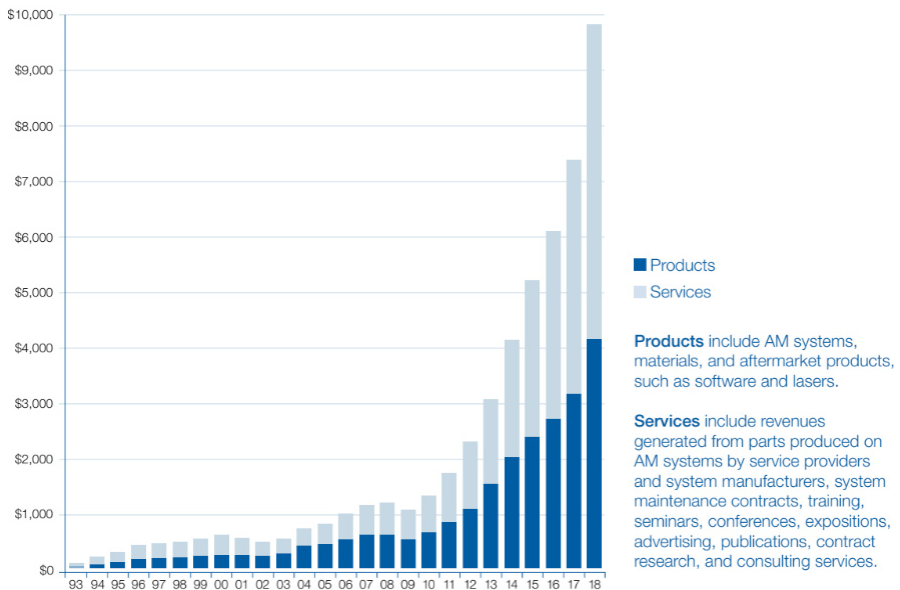
Ikerketa guztiek adierazten dute FGaren erabiltzaile eta aplikazio kopurua modu jarraituan haziko dela hurrengo hamarkadetan, orokorrean, eta bereziki metalei aplikatutakoan, hots, industria teknologikoagoa, modernoagoa eta ekonomian pisu handiagoa duena sustatuko du. FGaren aplikazioak baliabideen eta lehengaien erabilera eraginkorragoa ahalbidetzen du industria-eredu tradizionalekin konparatuz; horregatik, 9. GIHa (Industria, berrikuntza eta azpiegiturak) lortzeko prozesu giltzarria izan daiteke, diseinu konplexuko eta funtzionaltasun optimoko osagaien fabrikazioa ahalbidetzen baitu.

Hala ere, oraindik bide luzea dago egiteko industriak FGaren potentziala bere osotasunean aprobetxa dezan. Batez ere, material berrien garapena eta prozesuen hobekuntza beharrezkoak dira, bezeroen eskakizunei arazoizko prezioan eta modu jasangarrian erantzun ahal izateko. Horrela bakarrik izan daiteke FGa ohiko fabrikazio-prozesuen alternatiba eta 2030 Agendaren helburuak lortzeko erreminta erabilgarria.

3. INDUSTRIAREN ETA BEREZIKI FABRIKAZIO-ARLOAREN GARRANTZIA

Mundu mailako merkatua aztertuz gero, baldintza sozioekonomikoen eta kanpo-eragileen aldaketak direla eta, fabrikazio gehigarriaren zenbakiak modu esponenzialean hazi dira azken 10 urteetan. *World Economic Forum*eko (WEF) datuen arabera, 2010ean, fabrikazio gehigarriak, ekipoen salmenta zein zerbitzu eratorriak barne harturik, 1.500 milioi dolarreko baino zertxobait gutxiagoko merkatu-kuota zeukan [6]. Alabaina, merkatu-kuota horrek 9.800 milioi dollarrak gainditu zituen 2018an, hots, merkatu horren urteroko hazkuntza % 70ekoa izan da azken hamarkadan (ikus 3. irudia).

Metalaren fabrikazio gehigarrian fokua jarriz, *3D Hubs* atariak zenbatetsi zuen 2014an gutxi gorabehera FGaren guztiko merkatuaren % 10 metalari zegokiola (400 milioi dolar inguru) eta, hortaz, gainontzeko % 90a erretxinen eta polimeroen aplikazioei. Aldiz, 2018an, FGaren merkatuaren barneko metalaren kuota % 17raino igo zen (1.600 milioi dolar inguru), eta hurrengo urteetan gero eta garrantzi handiagoa izango duela espero da, fabrikazio gehigarriaren merkatu-kuotaren % 25-30 eskuratu arte.



3. irudia. Fabrikazio gehigarriaren merkatutik eratorritako irabaziak, ekiposalmentaren eta zerbitzu-eskaintzaren artean bereizirik [7].

Hala eta guztiz ere, aurrez aipaturiko WEF iturriaren arabera [6], 2018. urtean, mundu mailako fabrikazio-sektorearen irabazien % 0,0765 besterik ez zuen adierazi FGak. Datozen urteetan FGaren garrantzia haztea espero den arren, haren aplikazioa merkatu-hobi zehatzetara bideratuta egongo dela espero da, bereziki balio erantsi handiko piezen fabrikaziora eta konponketara.

Mundu mailako zenbakietatik Espainiako estatukoetara jauzi eginenez gero, 2016an FGaren sektorean lan egiten zuten enpresen irabaziak 60-70 milioi euro bitartean zenbatu ziren. EAEko enpresek estatu mailan duten garrantzia nabarmentzeko, enpresen erdiak baino gehiago EAEkoak direla azpimarratzea besterik ez dago [8]. Gainera, enpresa horiek bildu eta ordezkatzan dituen erakundeak, ADDIMAT, Donostiako Miramon Parke Zientifiko eta Teknologikoan dauka egoitza.

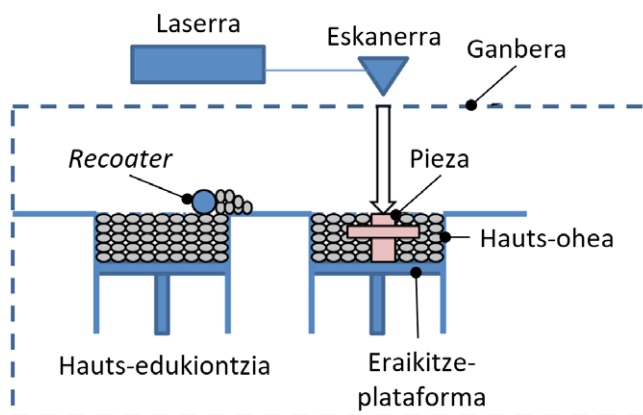
EAEn sektore horrek duen garrantzia ikusirik, egungo fabrikazio-teknologiaren artean etorkizun hurbilean garapen-gaitasun handiena izan dezakeen teknologia izendatu du Eusko Jaurlaritzak fabrikazio gehigarria. Gainera, Eusko Jaurlaritzak argitaratu berri duen 2020ko Euskadiren Agenda Digitalean, fabrikazio adimenduna lortzeko beharrezkoak diren oinarritzko zazpi teknologiaren artean sailkatua izan da FGa [9]. Horren ildora, EAEn fabrikazio gehigarriaren inguruko gune bat sortu da Basque Digital Innovation Hub sarearen barnean [10]. Gune horren helburua agente zientifikoek —hau da, ikerkuntza-zentroek— eta ETEen arteko elkarlana bultzatzea eta EAEko gaitasun teknologikoari probetxua ateratzea da.

4. FABRIKAZIO GEHIGARRIAREN JASANGARRITASUNA

4.1. Fabrikazio gehigarriaren oinarriak

ISO/ASTM 52900:2015 arauaren arabera, fabrikazio gehigarria (FG) piezak eraikitzeko 3D eredutik abiatu eta geruzaz geruza materiala gehitzean datzan prozesua da, txirbil-harroketara eta -konformaketarako prozesuei kontrajartzen zaiona [11]. Aipaturiko arauak biltzen dituzten prozesuen artean, lau dira material metalikoak ekoizteko gai direnak: ingelesez *Binder Jetting* (BJ), *Sheet Lamination* (SL), *Direct Energy Deposition* (DED) eta *Powder Bed Fusion* (PBF) deritzenak, hain zuzen. Gaur egungo industrian, laser bidezko PBFa (L-PBF) pieza metalikoen fabrikazioan nabarmenki errotu den teknologia da. Zehazki, geometria konplexuko eta errendimendu handiko aplikazioetarako piezen ekoizpenean erabiltzen da gehienbat, eta sorta txikiko produktiorako baliatu ohi da. Beraz, L-PBFaren aplikazio adierazgarrienak aeronautika, automobilgintza eta medikuntza dira [12].

PBF prozesuaren oinarria energia-iturri baten bidez hauts metalikoa urtu eta horren ostean solidotze selektiboa egitea da [13]. PBF sistema honako elementu hauek osatzen dute (ikus 4. irudia): energia-iturria (L-PBFaren kasuan, laserra), laser-izpia bideratzen duen eskaneatze-sistema, eraikitze-plataforma, hauts metalikoaren edukiontzia, eta hautsa era homogeneoan banatzeko sistemak (*recoater*-ak) [14]. Era horretan, alde aurretik plataforman kokaturiko hauts-ohearen eremu jakin bat urtzen du laserrak, eta eremu hori CADaren geometriaren arabera definitzen da. Behin geruza batean laserrarekin urtu beharrekoa urtu denean, plataforma jaisten da, eta jarraian hautsgeruza gainjartzen zaio hauts-oheari, 25-50 μm bitarteko altuerakoa, *recoater*aren bidez [15]. Prozesu hori behin eta berriz errepikatzen da, pieza osoa eraiki arte. Azkenik, L-PBF prozesua atmosfera geldoa bermatzen duen ganbera batean jazotzen da. Horretarako, gas geldoak erabili ohi dira; adibidez, argoia.



4. irudia. L-PBF sistemaren osagaiak.

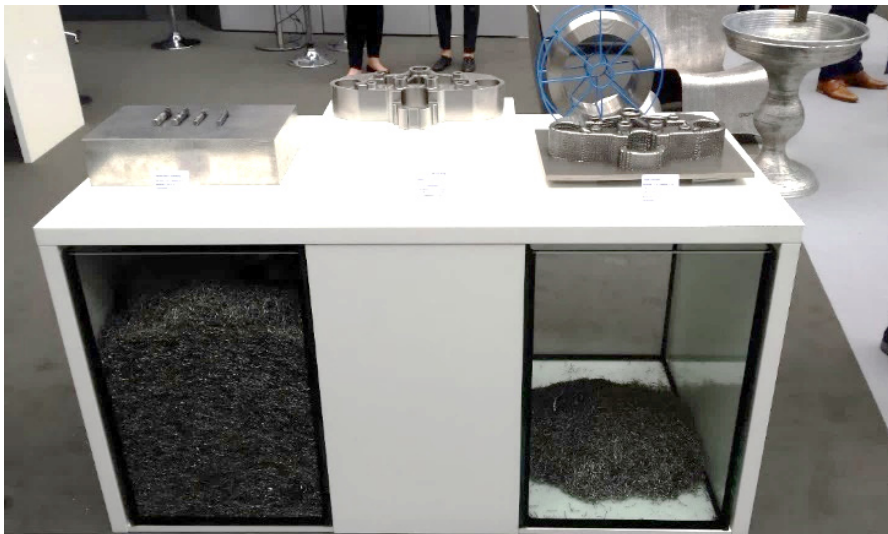
L-PBF prozesuak abantaila ugari ditu. Alde batetik, material anitzen eta guztiz dentsoak diren piezen prozesatze-gaitasuna; bestetik, perdoi dimentsional estuak, 0,1 mm-tik beherakoak, eta zehaztasunezko galdaketa-rekin alderagarriak diren propietate mekanikoko piezak fabrikatzeko ahalmena [16].

4.2. Fabrikazio gehigarriaren abantailak

Fabrikazio gehigarriak fabrikazio-modu berri bati ireki dizkio atak, eta diseinu-askatasuna eta konplexutasun handiko piezen fabrikazioa ahalbidetzea dira teknologia horren arrakastaren giltzarri. Alabaina, egungo gizartean fabrikazio-teknologia baten etorkizuna bermatzeko, haren jasangarritasuna eta ingurunearekiko bideragarritasuna ziurtatu beharra dago.

Berriki egindako ikerketa batean, fabrikazio gehigarria teknikoki prozesu garbia eta ingurunearentzako jasagarria dela erakusteko, honako bost ezaugarri hauek azpimarratu zituzten [17]:

- **Lehengaien erabilera eraginkorra.** Bukaerako pieza eskuratzeko fabrikazio-prozesuan zehar sortzen den hondakin kantitatea, mekanizazioarekin eta halako ohiko teknologiek alderatuz, murriztu egiten da (ikus 5. irudia). Gainera, FGko prozesuan erabiltzen ez den materiala tratatu eta berrerabil daiteke; hortaz, hondakin gutxiago sortzen da. Gainera, lehengaia beti formatu berean erabiltzeak —hauts-formatuan— beharrezkoak diren material-biltegiak sinpletzea dakar.



5. irudia. EMO 2017ko azokan Gefertec-en postuan ateratako argazkia: FGari esker txirbil gutxiago sortzen dela ikusteko adibidea.

- **Produktuen diseinu-optimizazioa.** FGko prozesuek, diseinua egokitzeko gaitasuna eskaintzeaz gain, material gutxiago erabiltzea dakarte: indarrak transmitituko ez diren piezaren guneetan materiala arindu, eta produktuen bukaerako pisua gutxitzen dute.
- **FG prozesuaren berezko izaera:** FGak energia kantitate handiak erabiltzen dituzten fabrikazio-prozesuak —hala nola forjaketa— baztertzeko gaitasuna dauka. Gainera, fabrikazio-prozesuan erabili beharreko tresneria murrizten denez, ez da beharrezkoa tresnerian inbertsio handirik egitea.

- **Hornitze-katearen sinplifikazioa:** FGko prozesuen izaera digitala dela medio, FGko ekipoak bukaerako bezeroarengandik hurbilago koka daitezke, eta distantziatik kontrolatu. Hortaz, hornitze-kateak sinplifikatu egiten dira; hala, 0 km-ko fabrikazioa lortzen da, eta bi-tarteko biltegi- eta garraio-logistikak gutxitzen dira.
- **Produktuaren iraupena luzatzea:** FGa piezen konponketarako edo xehetasun berriak gehitzeko erabil daiteke. Horrela, FGak piezen iraupena luzatzen du, eta fabrikazio jasangarriagoa eskaintzen.

Aipatu bezala, fabrikazio gehigarriak abantailak izan arren, ezin dira baztertu prozesu horrek ingurumenari begira dituen arriskuak. Piezen fabrikazioan erabiltzen diren hauts-formatuko lehengaiak oso kutsakorrak izan daitezke; ez bakarrik ingurumenaren jasangarritasunaren ikuspuntutik, baizik eta baita langileen osasunarenetik ere. Gainera, sortzen diren hondakinen tratamendua konplexua da, eta haien aurreko esposizio jarraituak osasun-arazoak ekar ditzake babes-neurri egokiak hartzen ez badira. Hauts-formatuko material metalikoa erabiltzeak langileen osasunean eta ingurumenean izan ditzakeen ondorioak Arrizubietak eta lankideek aztertu zituzten, berrikuspen-lan batean [18].

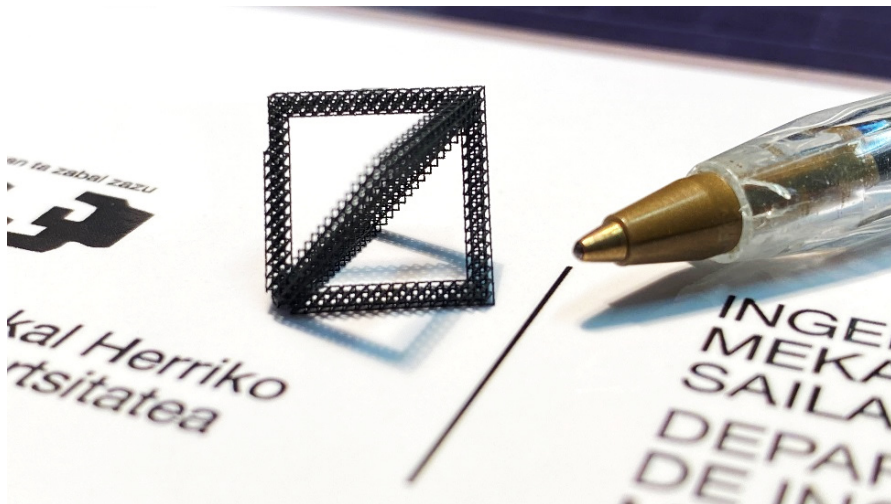
Beraz, fabrikazio gehigarria jasangarria dela baieztatu aurretik, faktore guztien balantzea egin beharra dago, eta kasu bakoitzean aztertu beharko da ea FGak ingurumenean inpaktu txikiagoa duen ala ez, orain arte erabili izan diren fabrikazio-prozesuekin alderatuz.

4.3. Fabrikazio gehigarria, hondakin-sorrera murriztearen giltzarria

FGko prozesuak teknologia garbitzat jotzen dira askotan; izan ere, beharrezkoa den materiala besterik ez da erabiltzen piezak fabrikatzeko. Horri esker, material-hondakinak zeharo murriztu daitezke fabrikazio-prozesu tradizionalekin alderatuta [19]. Are gehiago, FGko prozesuen arloan, gaurkotasun handiko eztabaida da ea fabrikazio-zikloak ingurumenean duen inpaktua murrizteko ahalmena ote duten teknologia gehigarriek. Zenbait egileren arabera, L-PBF prozesuak, zehazki, abantaila ugari ditu fabrikazio-prozesu tradizionalen aldean, ez soilik ingurumenarekiko inpaktua murriztearen ikuspuntutik, baizik eta, oro har, jasangarritasunaren zentzuan [20].

Materialen erabilera murrizteari dagokionez, adibide ugari aurkitu daitezke literaturan, hala nola S. Torres-Carrillo eta lankideek turbina-palei buruz argitaratutako lana [19]. Ikerketa-lan horren arabera, Inconel 718 superaleaziozko pieza L-PBF bidez fabrikatzerakoan 19 kg lehengai aurreztu zituzten, hots, guztizko materialaren % 28,4; berotegi-efekturako potentziala 7.325,29 kg CO₂ baliokidetik 4.517,92 kg CO₂ baliokidera murriztu zen. Gaur egun, badira materiala aurrezte eta piezen pisua murriztea sus-

tatzeko teknika zehatzak; sare-egiturak (ingelesezko *lattice structures*) edo optimizazio topologikoa, kasurako [21]. Erreminta horiek FGa are lehiakorragoa izatea ahalbidetzen dute; izan ere, fabrikazio-prozesu tradizionaletan ezin dira sarritan aplikatu, muga geometrikoak direla eta.



6. irudia. L-PBF bidez fabrikatutako sare-egiturak.

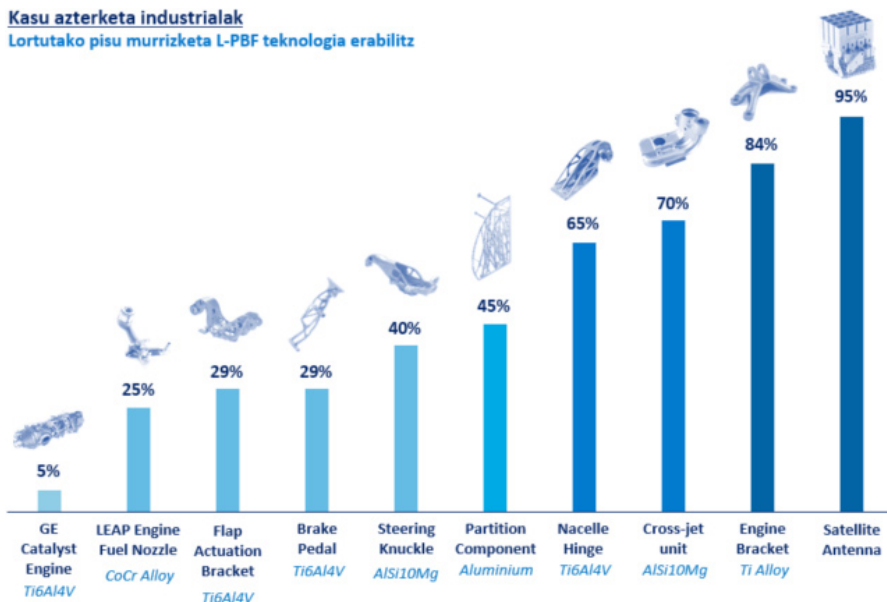
Sare-egitura erresistentzia handiak baina masa-proportzio txikiak dituzten egiturak diseinatzean datza [21]. Hala, kubo solido bat egin ordez, sare-egiturak baliatuz eta piezaren erresistentzia mantenduz, 6. irudiko ordezkoko pieza ekoitz daiteke L-PBF bidez, fabrikazio-prozesu tradizionalen aldean pisua nabarmen murriztuz. I. Floresek eta lankideek Corvette automobil baten balazta-sistema sare-egiturak erabiliz eraiki zuten L-PBF bidez, eta pisua % 52,5 murriztea erdietsi zuten [22]. Sare-egiturek bioinspiratutako produktuak diseinatzea ere ahalbidetzen dute, hots, abaraska-, hezur- edo banbu-egiturak piezen diseinuan barneratuz [22]. H. Zhang-ek eta lankideek egindako ikerketa-lanean, probak egin zituzten hiru egitura bioinspiraturarekin, eta, 0,037 kg-ko egitura solido batetik abiatuz, 0,01 kg-ko sare-egiturak lortu zituzten [22].

Optimizazio topologikoa, bestalde, piezak jasan behar dituen egitura-kargetatik abiatuz osagaiaren diseinu geometrikoa masa-murrizketaren arabera optimizatzean datzan metodo matematikoa da [23]. FGko prozesuek eskaintzen duten askatasun geometrikoari esker, tresnaren potentziala ustia daiteke. Optimizazio topologikoa asko erabiltzen da aeronautikan eta automobilgintzan, baina, esan bezala, fabrikazio-prozesu tradizionalen bidez ezin zaio behar besteko probetxua atera, datxezkien muga geometrikoak di-

rela eta [23]. L-PBFaren bidez, ordea, pisu-murrizketari dagokionez hobekuntza nabarmenak lor daitezke optimizazio topologikoaren bidez; beraz, lehengaien ustiapen eraginkorragoa ere erdiets daiteke. Literaturan adibide ugari aurkitu daitezke ikusteko nola erdiesten den materiala nabarmen aurrezte optimizazio topologikoari eta L-PBFari esker; pisua % 51 [23] eta % 20 [24] murriztea lor daiteke, betiere piezen propietate mekanikoei eragin gabe.

Kasu azterketa industrialak

Lortutako pisu murrizketa L-PBF teknologia erabiliz



7. irudia. L-PBF bidez lortutako pisu-murrizketa. [25], [26], [27] eta [28] lanetako kasu industrialen informazioan oinarrituta.

Hortaz, bistakoa da gaurkotasun handiko teknika horiek L-PBFarekin bateratuz piezen pisua nabarmen murriztu daitekeela eta, ondorioz, lehengaien ustiapena eraginkorragoa eta materialen erabilera arduratsuagoa izan daitezkeela. Dena dela, metodo horiek ez dira ikerketa-kasuetara mugatzen; izan ere, kasu industrial ugari argitaratu dira gaiaren inguruan (ikus 7. irudia).

Aipatzekoa da osagaien pisu-murrizketak ez diola soilik lehengai-aurrezpenari eragiten; izan ere, produktuaren erabilera-fasean ere energia-kontsumoa murriztea ekar dezake; aireontzien kasuan, esaterako. Beraz, FGko prozesuen jasangarritasunaren analisi osoa eta fabrikazio-prozesu tradizionaletik aldaketak egiteko, beharrezkoa da bizi-ziklo osoa kon-tuan hartzea.

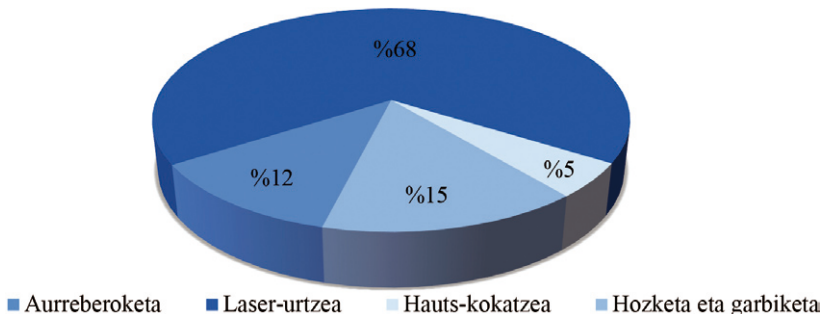
Laburbilduz, bai ikerketa-arloan eta baita arlo industrialean ere, L-PBFaren material-ustiapen jasangarriagorako gaitasuna egiaztatu da, bereziki ohiko fabrikazio-prozesuetan sarritan erabili ezin diren sare-egiturak edo optimizazio topologikoa erabiliz. Bestalde, materialen erabilera optimoari eta hondakin gutxiago sortzeari dagokienez, agerikoa da FGak badiela potentziala industria aeronautikoak eta medikuntza- eta automobilgintza-sektoreek ingurumenean duten inpaktua murrizteko. Edonola ere, prozesuaren jasangarritasuna bere osotasunean aztertzeo, ezinbestekoa da beste zenbait faktoreri erreparatzea, hala nola energia-kontsumoari.

4.4. Fabrikazio gehigarri jasangarriaren bila: kontsumo energetikoaren azterketa

Fabrikazio gehigarriak materialaren erabilera eraginkorraren abantaila dakarren arren, laser bidezko PBF teknologiak, galdaketa eta halako prozesuekin alderatuz, energia-kontsumo espezifiko handiagoak behar ditu. Beraz, prozesu horien jasangarritasuna hobetze aldera, beharrezkoa da haien energia-kontsumoaren azterketa egitea eta kontsumo handiena duten atazek guztizko prozesuan duten eragina murriztea.

L-PBFko teknologian, fabrikazio-prozesuan lau etapa bereiz daitezke: aurreberoketa, hauts-kokatzea, laserrarekin hauts-geruzatik nahi den azalera urtzea (bigarren eta hirugarren etapak behar beste aldiz errepikatzen dira), eta, azkenik, hozketa eta garbiketa. Lau etapa horietatik, bakarrik laserrak parte hartzen duena izenda daiteke produktibo, gainontzekoak ez-produktiboak izanik; hortaz, halakoak murrizteak zuzenean prozesuaren jasangarritasuna hobetzea ekarriko luke.

Fase ez-produktiboen garrantzia hobeto ulertzeko, *Concept Laser M3 Linear* makina hartu da oinarritzat, eta AISI 316L altzairu herdoilgaitza erreferentziako material gisa. *General Electric* konpainiak aurkeztutako datuen arabera, lau orduko fabrikazio-prozesu jarraituaren ostean, 8. irudian erakusten diren prozesu-denborak lortzen dira etapa bakoitzean [29].



8. irudia. Laserra oinarri duten PBF prozesuen denboraren banaketa [30].

Ikus daitekeen bezala, denbora gehien kontsumitzen duen etapa laserrak materiala urtzen dueneko da; beraz, espero zen bezala, hori izango da energia-kontsumo handiena duena. Hala ere, etapa ez-produktiboek denbora guztizkoaren herena baino gehiago betetzen dute, eta, ondorioz, ezin daiteke mespretxatu L-PBF prozesuan duten eragina.

Alabaina, kontuan hartu behar da emaitzak aldakorrak direla fabrikaturiko piezaren tamainaren, erabilitako makinaren eta pieza sortaren arabera. Aldagarritasun hori kontuan hartzeko, beheko taulan alderatu dira zenbait etxe eta teknologiatan oinarritzen diren L-PBFko makinak. Kasu guztietan, bigarren zutabearen adierazten den materialeko pieza bakarrik produzitzeko beharrezkoa izan den potentzia-kontsumoa neurtu da. Gainera, emaitzak alderagarriak izateko, EKE —Energia Kontsumo Espezifikoa— parametroa erabili da, hots, gehitutako material kilogramoko beharrezkoa izan den MJ kopurua.

1. taula. PBFko makinaren potentzia-kontsumoak [31].

Makina	Materiala	Potentzia-kontsumoa [kW]		EKE [MJ/Kg]
		Produktiboa	Ez-produktiboa	
Concept Laser M3 Linear	316L	3,350	0,70	97
MTT SLM 250	316L	1,090	—	83,0 - 108,0
Concept Laser Mlab	Aluminioa	0,790	0,48	309,1 - 533,0
Renishaw AM250	AlSi10Mg	1,166	0,43	566,2

Potentzia-kontsumo balio askotarikoak neurtu diren arren, 1 kW-etik 3,35 kW-erainokoak, adierazgarria da makina batzuetan kontsumo ez-produktiboak produktiboen magnitude-ordena berdinekoak direla, eta *Concept Laser Mlab* makinetan kontsumo produktiboaren erdia baino gehiagoko balioak neurtu direla.

Emaitza horien aurrean, energia-kontsumoaren azterketa sakonagoa egitea erabaki da. Horretarako, *Concept Laser M3 Linear* makina aukeratu da, eta, AISI 316L altzairu herdoilgaitza inprimatzen den kasurako, etapa bakoitzaren kontsumo espezifikoak zenbatetsi dira 100 W-eko laser-potentziarekin lan egiten denerako. Baldintza horietan, eta etapa bakoitzaren iraupena kontuan izanik, energia-kontsumo totalaren balioak eskuratu dira.

Ondorioz, AISI 316L altzairu herdoilgaitzeko piezaren fabrikazioan, 11,03 kWh-eko kontsumoa neurtu da, 97 MJ/kg-ko energia-kontsumo espezifikoarekin. Datu horiekin, eskuraturiko piezak 409,4 g-ko pisua duela eta AISI 316L altzairuaren dentsitatea aintzat hartuz, ondoriozta daiteke fabrikaturiko piezak gutxi gorabehera 51 cm³-ko bolumena izango duela.

2. taula. *Concept Laser M3 Linear* makinaren fabrikazio-prozesuko etapa bakoitzaren energia-kontsumoa.

	Potentzia-kontsumoa [kW]	Iraupena %	Denbora [h]	Energia-kontsumoa [kWh]
Aurreberoketa	2,25	12	0,48	1,08
Laserrarekin urtze-prozesua	3,25	68	2,72	8,84
Hautsa kokatzea	3,45	5	0,20	0,69
Hozketa eta garbiketa	0,7	15	0,60	0,42
Guztira	9,65	100	4,00	11,03

Jakina, aurreberoketa- eta hozketa-etapetako energia-kontsumoa piezaren edo lotearen tamainarekiko independentea da; hortaz, prozesuaren eraginkortasuna handitzeko, ahalik eta pieza gehien aldi berean inprimatzea gomendatzen da. Era berean, hautsa kokatzeko prozesua geruza bakoitzean urtzen den material kantitatearekiko independentea da, eta, beraz, piezak kokatzerakoan ahalik eta altuera txikiena izan dezatela komeni da. Horrela, hauts-kokapeneko eragiketa kopurua murrizten da, eta etapa ez-produktiboak kontsumituko duen denbora gutxitu egingo da guztizko inprimatze-denborarekin alderatuz.

5. ONDORIOAK

Fabrikazio gehigarriaren jasangarritasunean ardazturiko azterketaren ostean, jarraian aipatzen dira ondorioztatutako baieztapen esanguratsuenak:

- EAEko industriari fabrikazio gehigarriak duen garrantzia handitzeko, erakunde publikoen apustu argia dago; izan ere, seguru daude teknologia hori fabrikazio jasangarriagoaren giltzarria izango dela etorkizun hurbilean.
- Fabrikazio gehigarriak abantaila nabarmenak eskaintzen ditu pieza konplexuen fabrikazioan, bereziki aeronautikako, automobilgintzako eta medikuntzako balio erantsi handiko piezen fabrikazioan. Hala ere, kasu bakoitza bere aldetik aztertu beharra dago, fabrikazio gehigarriak ohiko fabrikazio-teknologiekin alderatuz hobekuntzarik eskaintzen duen ala ez erabakitzeko.
- Materialaren erabilera jasangarria bermatzeko, fabrikazio gehigarriaren eta sare-egituraren edo optimizazio topologikoaren erabilera konbinatua erreminta egokia da, eta horren adibide diren kasu industrial ugari aurkitu dira.

- Fabrikazio gehigarriak energia-kontsumo eraginkorra ahalbidetzen duen arren, prozesuan zeharreko etapa ez-produktiboen iraupena murriztu beharra dago. Makinaren eta fabrikatu beharreko piezaren arabera balioak aldakorrak diren arren, etapa ez-produktiboek guztizko denboraren herena baino gehiago iraun dezakete, eta guztizko energia-kontsumoaren % 20 izatera hel daitezke.

ESKER ONA

Ikerlan hau Eusko Jaurlaritzaren Ekonomia Garapen, Jasangarritasun eta Ingurumen Sailak finantzaturiko QUALYFAM proiektuaren (Elkartek KK-2020/45) barruan garatu da. Era berean, eskerrak eman nahi zaizkio Zientzia eta Berrikuntza Ministerioari, I+G+B motako ALASURF - PID2019-109220RB-I00 proiektua finantzatzeagatik.

BIBLIOGRAFIA

- [1] National Geographic, gizakion eragina ingurunean. Online eskuragarri: https://www.nationalgeographic.org/topics/resource-library-human-impacts-environment/?q=&page=1&per_page=25 (Azken sarrera: 2020-10-20).
- [2] Word Wildlife Fund, WWF: larrialdi klimatikoa. Online eskuragarri: https://www.wwf.es/nuestro_trabajo/clima_y_energia/cambio_climatico_y_soluciones/ (Azken sarrera: 2020-10-20).
- [3] Nazio Batuen garapen iraunkorrerako helburuak. Online eskuragarri: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/> (Azken sarrera: 2020-10-20).
- [4] Agenda Euskadi Basque Country 2030. Online eskuragarri: <https://www.euskadi.eus/pdf/2030-agenda-garapen-jasangarria-desarrollo-sostenible-basque-country.pdf> (Azken sarrera: 2020-10-20).
- [5] Project Breakthrough, Additive Manufacturing. Online eskuragarri: <http://breakthrough.unglobalcompact.org/disruptive-technologies/additive-manufacturing/> (Azken sarrera: 2020-10-20).
- [6] FAN Z. eta MEIXNER L. 2020, *White paper: 3D Printing: A guide for Decision-Maker*. World Economic Forum. Online eskuragarri: <https://www.weforum.org/whitepapers/3d-printing-a-guide-for-decision-makers> (Azken sarrera: 2020-10-20).
- [7] WOHLERS, T.T.; CAMPBELL, I.; DIEGEL, O.; HUFF, R. eta KOWEN, J. 2019, *Wohlers Report 2019*, Wohlers Associates. ISBN 978-0-9913332-5-7.
- [8] SEGURA F. 2017, «Euskadi consolida su liderato en el mercado estatal de fabricación aditiva» *Diario Vasco*. <https://www.diariovasco.com/economia/201706/05/euskadi-consolida-liderato-mercado-20170605002619-v.html> (Azken sarrera: 2020-10-20).

- [9] Euskadiko 2020ko Agenda Digitala, Eusko Jaurlaritza. Online eskuragarri: https://www.euskadi.eus/contenidos/plan_departamental/14_plandep_xileg/es_def/adjuntos/Agenda%20Digital%20de%20Euskadi%202020%20-%20Anexo%202018.pdf (Azken sarrera: 2020-10-20).
- [10] Basque digital Innovation Hub, Fabrikazio Gehigarria. Online eskuragarri: <https://basqueindustry.spri.eus/basque-digital-innovation-hub/fabrikazio-gehigarria/> (Azken sarrera: 2020-10-20).
- [11] ISO/ASTM (2018) 52900:2015 Additive manufacturing – General principles – Terminology. Online eskuragarri: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-1:v1:en> (Azken sarrera: 2020-10-20).
- [12] BERGER, R. 2018. «Focus – Advancements in metal 3D printing». Online eskuragarri: <https://www.rolandberger.com/en/Media/Additive-manufacturing-on-the-brink-of-industrialization-thanks-to-new.html> (Azken sarrera: 2020-10-20).
- [13] AZARNIYA, A. eta lankideak 2019 «Additive manufacturing of Ti-6Al-4V parts through laser metal deposition (LMD): Process, microstructure and mechanical properties». *Journal of Alloys and Compounds*, 804, 163-191.
- [14] ZHANG, Y.; JAROSINSKI, W.; JUNG, Y.G. eta ZHANG J. 2018. *Additive Manufacturing: Materials, Processes, Quantifications and Applications* liburuko 2. kapituluak: *Additive manufacturing processes and equipment*. Butterworth-Heinemann, 39-51, ISBN 9780128121559.
- [15] SUN, S., BRANDT, M. eta EASTON, M. 2017. *Laser Additive Manufacturing: Materials, Design, Technologies, and Applications* liburuko 2. kapituluak: *Powder bed fusion processes: An overview*. Elsevier Ltd, 55-77. ISBN 9780081004333.
- [16] GU, D.; HAGEDORN Y.C.; MEINERS, W.; MENG, G.; SANTOS BATISTA, R.J.; WISSENBACH, K; eta POPRAWA, R. 2012. «Densification behavior, microstructure evolution, and wear performance of selective laser melting processed commercially pure titanium», *Acta Materialia* 60, 3849-3860.
- [17] HAO, L.; RAYMOND, D.; STRANO, G. eta DADBAKHSH, S. 2010. «Enhancing the sustainability of additive manufacturing». *5th International Conference on Responsive Manufacturing - Green Manufacturing (ICRM 2010), Nimbo*, 390-395.
- [18] ARRIZUBIETA, J.I.; UKAR, O.; OSTOLAZA, M. eta MUGICA, A. 2020. «Study of the Environmental Implications of Using Metal Powder in Additive Manufacturing and Its Handling», *Metals* 10(2), 261.
- [19] TORRES-CARRILLO, S.; SILLER, H.R.; CARLOS VILA, C.; LÓPEZ, C. eta RODRÍGUEZ C.A. 2020. «Environmental analysis of selective laser melting in the manufacturing of aeronautical turbine blades», *Journal of Cleaner Production* 246, 119068.
- [20] TEUBLER, J.; WEBER, S.; SUSKI, P.; PESCHKE, I. eta LIEDTKE, C. 2019 «Critical evaluation of the material characteristics and environmental potential of laser beam melting processes for the additive manufacturing of metallic components», *Journal of Cleaner production* 237, 117775

- [21] FLORES, I.; KRETZSCHMAR, N.; AZMAN, A.H.; CHEKUROV, S.; PEDERSEN D.B. eta CHAUDHURIE A. 2020 «Implications of lattice structures on economics and productivity of metal powder bed fusion», *Additive Manufacturing* 31, 100947.
- [22] ZHANG, H.; NAGEL, J.K.; AL-QAS, A.; GIBBONS, E. eta LEE, J. J.-Y. 2018. «Additive Manufacturing with Bioinspired Sustainable Product Desing: A Conceptual Model» *Procedia Manufacturing* 26, 880-891.
- [23] SCHUH, G.; BERGWELER, G.; LICHTENTHÄLER, K.; FIEDLER, F. eta PUENTE REBOLLO S. 2020 «Topology Optimisation and Metal Based Additive Manufacturing of Welding Jig Elements» *Procedia CIRP* 93, 62-67.
- [24] MERULLA, A.; GATTO, A.; BASSOLI, E.; MUNTEANU, S.; GHEORGHIU, B.; POP, M.; BEDO, T., eta MUNTEANU, D. 2019. «Weight reduction by topology optimization o fan engine subframe mount, designed for additive manufacturing production», *Materials Today: Proceedings* 19, 1014-1018.
- [25] SLM Solutions, Case Studies. Success Stories From Our Customers. Online eskuragarri: <https://www.slm-solutions.com/resources/> (Azken sarrera: 2020-10-20).
- [26] GE Additive, Our cursomer stories and additive manufacturing case studies. Online eskuragarri: <https://www.ge.com/additive/stories> (Azken sarrera: 2020-10-20).
- [27] TOMLIN, M., eta MEYER, J. 2011 «Topology Optimization of an Additive Layer Manufactured (ALM) Aerospace Part», *The 7th Altair CAE Technology Conference*.
- [28] MICALLEF, K. 2019 «Airbus Continues to Innovate Bionic Design for Future Sustainable Flights», *Redshift*, online eskuragarri: <https://redshift.autodesk.com/bionic-design/> (Azken sarrera: 2020-10-20).
- [29] General Electric Additive, 2020. Additive Manufacturing. Online eskuragarri: <https://www.Concept-laser.de> (Azken sarrera: 2020-10-20).
- [30] KELLENS, K.; YASA, E.; DEWULF, W. eta DUFLOU, J.E. 2015. «Environmental Assessment of Selective Laser Melting and Selective Laser Sintering» *Going Green – CARE INNOVATION 2010, Viena*.
- [31] KELLENS, K.; MERTENS, R.; PARASKEVAS, D.; DEWULF, W. eta DUFLOU, J. E. 2017. «Environmental Impact of Additive Manufacturing Processes: Does AM contribute to a more sustainable way of part manufacturing?». *Procedia CIRP*, 61, 582-587.