

Fabrikazio gehigarri eta digitalizazio bidezko zulagailu aeronautikoaren diseinu optimizazioa

(Optimization of an aeronautical drill design combining AM and digitization)

Jon Iñaki Arrizubieta^{(1)*}, Aitzol Lamikiz⁽¹⁾, Eneko Ukar⁽¹⁾, Naiara Ortega⁽¹⁾, Carlos Galleguillos⁽²⁾

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

(2) CATEC – Centro Avanzado de Tecnologías Aeroespaciales.


LABURPENA: Fabrikazio gehigarri metalikoa, geometria konplexuak, diseinu pertsonalizatuak eta ezaugarri funtzionalei eskerrak, osagai berrien garapenerako prozesurik eta berritzaileenetakoa bihurtu da. Horregatik, lan honetan aeronautikako sektorean erabiliko den zulagailu industrial baten karkasaren diseinua optimizatzeko fabrikazio gehigarriaren gaitasuna aztertu da. Ikerlan honen helburua zulagailuaren tenperatura kontrolatu eta mugako balio onargarrien azpitik mantentzea da, horrela modu jarraituan erabili ahal izateko eta eragiketaren produktibitatea handitzeko. Zulagailuaren portaera aztertu eta diseinua optimizatzeko bere digitalizazioa gauzatu da ANSYS Workbench 2021-R2 softwarearen bidez, eta emaitzen balioztasuna bermatzeko metodologia zorrotza jarraitu da. Lehenengo pausuan, zulagailuaren diseinuan erabiliko diren gainazal mota ezberdinen (laua, erretikularra, giroidea, hegalduna, etab.) portaera analizatu da, bakoitzaren beroa disipatzeko gaitasuna zenbateteko. Ostean, bigarren pausuan, egungo zulagailuaren diseinuaren portaera aztertu eta barruko bero-iturria karakterizatu da. Horrekin guztiarekin, zulagailuaren karkasaren diseinu berri bat proposatu da, funtzionaltasuna mantenduz, baina hozketa gaitasuna hobetuz. Behin diseinu berria erabakita, hauts ohantzeko teknologia bidez (*laser Powder Bed Fusion*, L-PBF) fabrikatu da eta esperimentalki baieztatu da bere funtzionamendu zuzena.

HITZ GAKOAK: Fabrikazio Gehigarria, digitalizazioa, portaera termikoa, optimizazioa, zulagailua, aeronautika.

ABSTRACT: *Metal Additive Manufacturing has established itself as one of the most promising alternatives for the development of new components thanks to its ability to obtain complex geometries, customized designs, and functional characteristics. For this reason, the present work has analyzed the capacity of additive manufacturing to optimize the design of the casing of an industrial drill for aeronautical use. The motivation of the research lies in the need to control the temperature of the drill and keep it below admissible values, which allows its continuous use and thus increase the productivity of the operation. To develop a functional and optimized design, the behavior of the drill is digitized using ANSYS Workbench 2021-R2 software, and to ensure the validity of the digital model, a precise methodology is followed. In the first step, the thermal behavior of the different types of surfaces (flat, reticular, gyroid, lattice, etc.) is characterized to determine the heat dissipation capacity of each of them. Subsequently, in a second step, the thermal behavior of the original drill is simulated to characterize the internal heat source and its thermal behavior. With all this knowledge, a new design of the drill casing is proposed based on the results of the simulations: maintaining the functionality, but improving the cooling capacity. Once the new design is defined, it has been fabricated using laser Powder Bed Fusion (L-PBF) technology and its correct operation has been experimentally validated.*

KEYWORDS: Additive Manufacturing, digitization, thermal behavior, optimization, drilling, aeronautics.

1

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

Nola aipatu / How to cite: Arrizubieta, Jon Iñaki; Lamikiz, Aitzol, Ukar, Eneko, Ortega, Naiara; Galleguillos, Carlos (2023). << Fabrikazio gehigarri eta digitalizazio bidezko zulagailu aeronautikoaren diseinu optimizazioa >>, Ekaia, 46, xx-xx. (<https://doi.org/10.1387/ekaia.25060>)

Jasoa: uztailak 24, 2023; Onartua: abenduak 12, 2023

ISSN 0214-9001-eISSN 2444-3225 / © 2023 UPV/EHU



Obra Creative Commons Atribución 4.0 Internacional-en lizentzian dago

1. SARRERA

Industria aeronautikoan barauts bidezko zulaketa-eragiketa mekanizazio-eragiketa garrantzitsuena da eta hegazkin bakoitzaren egituraren milaka zulo egin behar izaten dira torloju eta errematxe bidezko loturetarako [1]. Zulaketa-prozesu horretan, materiala ziri formako sorbazdun erremintarekin harrotzen da eta ildaska helikoidaletatik kanporatzen da txirbil formatuan. Beraietan zeharreko materialaren ebakuazioa konplexua izan ohi da eta marruskadura indarren ondorioz mozketaren indar handiak agertu daitezke, beroa sorraraziz [2]. Gainera, zulo sakonen kasuan bero horren xahutzea konplexua da eta materialaren gainberoketaren ondorioz hondar-tentsioen kontzentrazio-guneak sortzeaz gain, zuloaren hormen akabera txarra eragiten du. Esaterako, Aamir eta lankideek aluminio aleazioen zulaketa-eragiketaren eraginkortasuna eta fabrikaturiko zuloen kalitatea aztertu zuten beraien berrikuspen teknologikoko lanean [3].

Zulaketa-eragiketa eskuz edo modu erdi-automatikoan egin daiteke zulaketa-makina edo aitzinapen automatikoko zulaketa-unitate bitartez. Alabaina, aeronautikako eskakizun eta araudi zorrotzei erantzuna eman ahal izateko [4], Airbus bezalako fabrikatzaileek zulaketa-prozesua automatizatze joera dute; zulo kopuru handiak perdoi estuekin fabrikatu ahal izateko. Norabide horretan, eragiketa jakinetarako bereziki diseinaturiko zulagailuen erabilera ez da arraroa, barauts anizkoitzekoak esaterako, eragiketaren guztizko denbora murrizteko eta errentagarritasuna irabazteko. Bestalde, zulaketa inteligentea ere garatu da, hots, mozketaren parametroen denbora errealeko adaptazioa eskaintzen duten ekipoak. Beraiek zulaketaren modelizazioan eta prozesuko aldagaien bilakaera aurreikustean oinarritzen dira: biraketa-abiaduraren araberako ebaketa-indarrak, bihurtura-momentua, energia-kontsumoa, ... Horrela, zulaketa-parametroak denbora errealean doitzeko aukera eskaintzen dute[5].

Zulaketa-prozesu askotarikoak erabiltzen dira industrian, eta berezi aeronautikan. Loturetarako zuloen fabrikaziorako aeronautikan gehien erabiltzen den prozesua zulaketa axiala da eta “ohiko zulaketa” bezala deitzen zaio berari. Prozesua ezaguna den arren, sarritan kontrolatzeko zaila izaten da eta emaitzen fidagarritasuna bermatzea beti ez da erraza. Txirbilaren ebakuazioa arlo industrialeko arazorik eta nagusienetakoa da. Diametroaren kontrola, bizarra eta gainazaleko zimurtasuna ere ohiko erronkak dira [6]. Iovkov eta lankideek zulaketan jatorri termikoko hondar tentsioen ondoriozko akatsak murrizteko barautsen hozketa- eta lubrifikazio-sistemaren hobekuntza proposatu zuten prozesuaren eraginkortasuna handitzeko [7].

Zulaketa-prozesua hobetzeko geometria konplexuko diseinuak ohikoak dira eta diseinu horien bideragarritasuna lortzeko sarritan aukerarik hoberen Fabrikazio Gehigarria (FG) da. Izan ere, FGak

fabrikazioa industria-arlo askotan irauli du. Laser bidezko Hauts Ohantzearen Fusioa, ingelesezko *laser Powder Bed Fusion* (L-PBF) industria aeronautikoan eta medikuntzan dagoeneko onartua izan da material anitzekin lan egiteko duen gaitasunagatik eta eskaintzen duen diseinu malgutasunagatik [8]. FG-prozesuek ordenagailuz diseinaturiko ereduan oinarrituz, *Computer Aided Design (CAD) model*, hiru-dimentsiotako piezak materiala geruzaz geruza gehituz fabrikatzen dituzte. FGak diseinu edo eredutik abiatuz geometria konplexudun osagaien fabrikazio zuzena ahalbidetzen du inolako erreminta garestiak, matrize eta puntzoiak bezalakoak, erabili gabe.

FGaren abantaila nagusia industria aeronautikoan osagaien diseinu optimizazioarekin erlazionatuta dago, osagaien pisua babez beste %35 eta %65 bitartean murriztu baitezake [9]. NASAko ikerketen arabera, aeronautikan FGaren inplementazioak erregaiaren kontsumoa %4,9an murriztuko duela aurreikusten da eta NO_x-en igorpena %8,3an [10]. Murrizketa horien atzean, FG bidez fabrikatu daitezkeen erlauntza egiturak, ezaugarri bionikodun egiturak eta egitura erretikulatuak daude, beraiei eskerrak hegazkinaren portaera hobetu baitaiteke. Gainera, FG-teknologiek abantaila ugari eskaintzen dituzte, hala nola, produkzioan zeharreko hondakinen murrizpena, osagai bateratuen fabrikazioa pauso bakarrean eta pieza bakarren pertsonalizazioa [11].

Ohiko fabrikazio teknologiek alderatuz, FGak osagaien birdiseinatzea ahalbidetzen du, funtzio jakin baterako bereziki optimizatu daitezkeelarik. Esaterako, Siemens-ek argitaraturiko artikuluan beroa xahutzeko geometriak FG bidez nola optimizatu daitezkeen azaltzen du [12]. FGaren dohainak osagaien optimizazio termikorako ikertu izan dira aurretiaz. Hala nola, Nair eta Lalek FGa erabili zuten zirkuitu elektronikoetan sortzen den beroa xahutzeko helburuarekin geometria optimoak fabrikatzeko [13]. Helburu beretsuarekin, Yun eta lankideek aluminiozko hozketa-hodien diseinua optimizatu zuten eredu matematiko bidez eta gero FG bidez fabrikatu zituzten [14]. Aipatu beharra dago ere, Modrek eta lankideek TPMS motako egitura erretikulatuak erabili dituztela beroa xahutzeko gainazalak diseinatzeko [15].

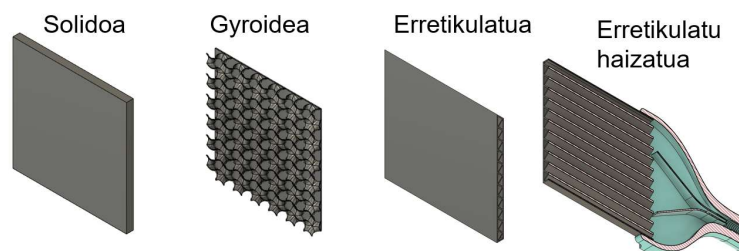
Bestalde, materialaren alferrikako erabilera saihesten du beharrezkoa ez den lekuetatik kenduz geometria konplexuen erabilerari eskerrak, kontuan izan FGan geometria konplexuen fabrikazioak ez dakarrela kostuaren ez prozesuaren konplexutasuna handitzea. Horren adibide gisa, historikoki ohiko fabrikazio bidez egin izan den hegazkin bateko euskarriaren pisua %64an murriztea lortu da, %32 material aldaketari eskerrak eta %32 diseinu optimizazioagatik [16].

Horrekin guztiarekin, CATEC-ek bere instalazioetan muntatua duen eta beroketa arazoak dituen zulagailu industrialaren diseinua optimizatzea erabaki da. Zulagailuak modu jarraituan lan egiterakoan

gainberotu egiten dela baieztatu da, 50 minutuko lanaldiaren ostean zulagailuaren karkasak 60 °C-tako temperatura gainditzen baitu. Hortaz, aldizkako hozketarako geldialdiak beharrezkoak dira eta horrek produktibitateari kalte egiten dio. Diseinu berrirako FGa erabiltzea erabaki da, aurretiaz azaldu bezala geometria askatasuna eta materialaren erabilera optimoa eskaintzen baitu. Gainera, diseinuko prozesua errazteko, zulagailuaren portaera termikoa digitalizatu da eta simulazioen emaitzetan oinarrituz diseinu hobetu bat proposatu da. Azkenik, fabrikazio gehigarriak eskaintzen duen diseinu askatasunari eskerrak, zulagailuaren karkasa optimizatua fabrikatu da eta osagai errealaren portaera bere baliokide digitalarekin alderatu da.

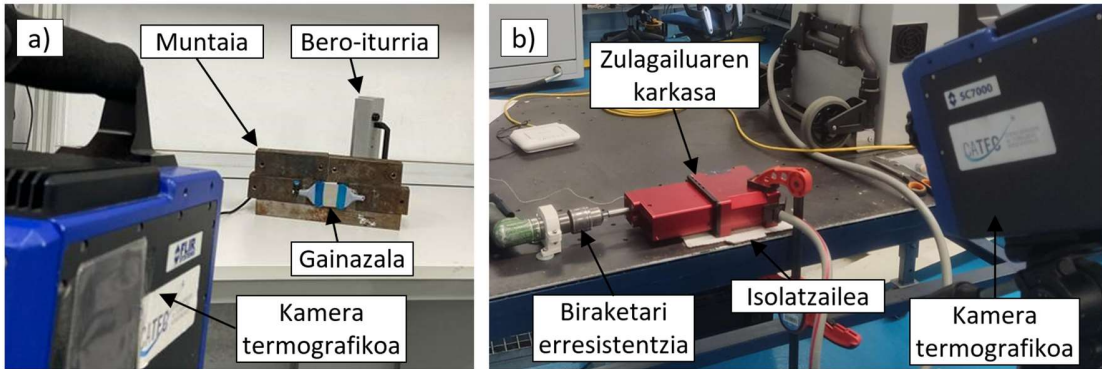
2. METODOLOGIA

Zulagailuaren karkasaren portaera digitalizatu ahal izateko, lehendabizi bere portaera zelakoa den zehaztu behar da. Horregatik, lehenengo pausu bezala zulagailuaren karkasaren lodiera berdineko Scalmalloy-zko 3 lagin fabrikatu dira, 50x50x3 mm³ dimentsiokoak, eta 1. irudian erakusten diren lau egoeretan aztertu da beraien funtzionamendua: solidoa, Gyroidea, erretikulatua eta erretikulatu haizatua. Kasu guztietan xaflaren atzeko aldean kokaturiko halogenozko lanpara batekin laginak giro tenperaturatik 85 °C-ko tenperaturara berotu dira, ikusi 2. irudia(a), eta behin temperatura horretara iritsita, lanpara itzali eta laginaren hozketa zikloa aztertu da. Lanparak laginaren atzeko aurpegian sartzen duen beroa erradiazio bezala modelizatu da eta 3,200 W/m²-ko balio dauka.



1. irudia. Aztertutako gainazalen CAD irudiak.

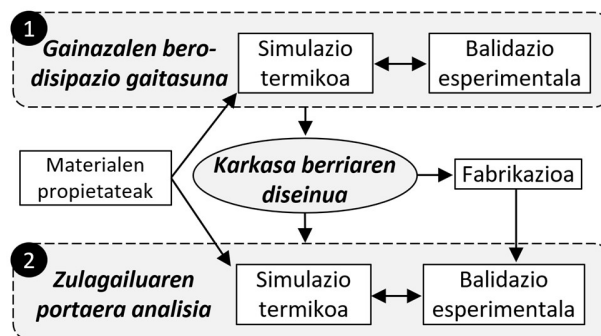
Beroketa- eta hozketa-zikloa Flir Orion SC7000 kamera termografikoarekin grabatu da, aldiuneko eremu termikoaren irudia eskuratzeko. Horrela datu esperimental eta simulazioak alderatuz, kasu bakoitzeko konbekzio-koefizientea finkatu ahal izan da, hots, gainazal bakoitzak beroa xahutzeko duen gaitasuna. Simulazioetarako Ansys Workbench 2021-R2 softwarea erabili da, denboraren menpeko simulazio termiko iragankorrak korritu direlarik.



2. irudia. (a) Gainazalen portaera termikoa aztertzeko muntaia eta (b) zulagailuaren beroketa neurtzeko saiakuntza.

Ikerlanaren bigarren pausoa zulagailuak martxan dagoenean sortzen duen beroa zenbatetsi da. Horretarako, lehendabizi zulagailua karkasa gabe martxan jarri da eta kamera termografikoaren bidez motorrak sortzen duen beroaren ondoriozko temperatura igoera neurtu da. Saiakuntzaren luzera 5 minutukoa izan da eta lan-baldintza errealak simulatzeko, zulagailuaren irteerako ardatzean biraketari erresistentzia egiten dion beste zulagailu bat jarri zaio, 2. irudia(b).

Azkenik, zulagailuaren karkasaren diseinu berria fabrikatu eta muntatu ostean bere portaera aztertu da. Karkasa berriaren hozketa-gaitasuna hobetzeko, barneko aireztapen sistema izango du, horretarako FG bidez eskuratutako egitura erretikulatuak erabiliko direlarik. Horregatik, haiztua deneko eta haiztua ez deneko egoerak aztertuko dira. Jarraiko 3. Irudian ikerlanean jarraitu den fluxu-diagrama aurkezten da.



3. irudia. Ikerlanaren fluxu-diagrama.

3. MATERIALEN PROPIETATEAK

Ikerlan honetan Scalmalloy aleazio aeronautikoa erabili da karkasaren fabrikaziorako. Material hau bereziki FG eta 3D inprimaketarako garatuta dagoen aluminioaren aleazioa da scandioz (Sc), aluminioz (Al) eta magnesioz (Mg) osatua dagoena. Scalmalloy-a APWorks-ek garatu zuen Airbus taldearentzako [17] eta ohiko aluminioarekin alderatuz (AlSi10Mg) eroankortasun termikoa pixka bat baxuagoa izan arren, askoz propietate hobeak eskaintzen ditu scandioaren gehikuntzagatik, kontuan izan karkasaren analisi erresistentea ikerlan honen irismenetik kanpo gelditzen dela. Scalmalloy-a bere FG-eko egokitasunagatik aukeratu da, akatsik gabeko geometria konplexuen inprimaketa ahalbidetzen duelako. Jarraiko 1. Taulan Scalmalloy-ren konposizio kimikoa erakusten da eta 2. Taulan material horren propietate termikoak, simulazioetan erabili direnak hain zuzen.

1. Taula Scalmalloy-ren konposizio kimikoa (%pisuan) [18].

	Mg	Sc	Zr	Mn	Si	Fe	Zn	Cu	Ti	O	V	Al
Min	4,00	0,60	0,20	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	Bal.
Max	4,90	0,80	0,50	0,80	0,40	0,40	0,20	0,10	0,10	0,05	0,05	

2. Taula Scalmalloy-ren propietate termikoak.

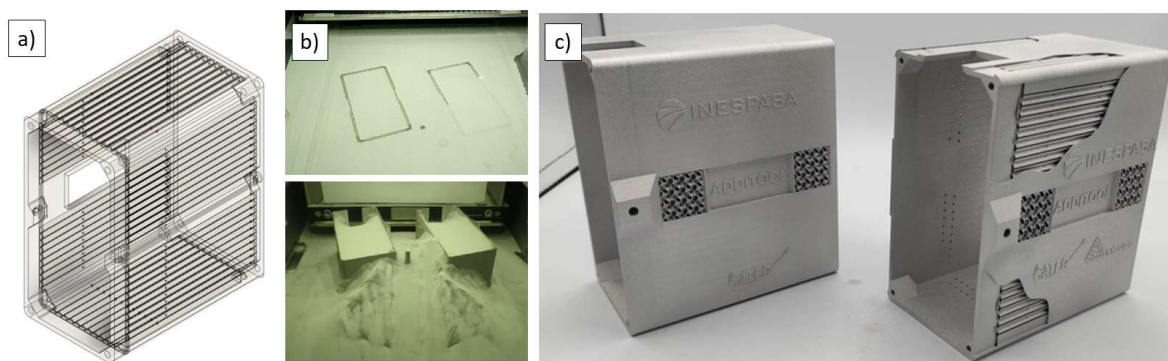
Temperatura	Eroankortasun termikoa [W/(m·K)]	Bero espezifiko [J/(kg·K)]	Dentsitatea [kg/m ³]
25	76,7	850	2.770
50	86,5	860	
100	94,7	890	
150	92,4	870	

Material horren aukeraketa bere arintasuna, pisu espezifiko txikia, eta eroankortasun termiko altuan oinarrituta egin da, zulgailuaren karkasarako hautaketa ezin hobea egiten dutenak.

4. KARKASA BERRIAREN DISEINU ETA FABRIKAZIOA

Karkasa berriak hozketa-gaitasun hobea izateko barnetik aireztatua egongo da. Horretatik, karkasaren 3 mm-ko hormak, jatorriz solidoak zirenak, erretikulatu bihurtuko dira, ikus 3. irudia (a). Diseinu-aldaketa horrek dakarren konplexutasuna medio, hauts ohandun fabrikazio gehigarria erabiltzea erabaki da, SLM teknologian oinarritua hain zuzen.

Erabilitako makina Renishaw-ren RenAM 500E izan da eta Scalmalloy aleazioa aukeratu da gehitze-material bezala hauts formatuan. Inprimaketa prozesuan bereizmen ona izateko 30 mikrako lodieradun geruzetan inprimatu da materiala. 3. irudia (b)-n erakusten da nolakoa den SLM fabrikazio-prozesua. Ikus daitekeen bezala, bi karkasa fabrikatu dira aldi berean eta bukatu ostean piezak hautsohaztetik nola ateratzen diren bereizi daiteke. Azkenik, 3. irudia (c)-n bukatutako bi karkasa erakusten dira. Ezkerrekoa funtzionala da, simulazioen balioztapenerako erabili dena, eta eskuineko erakusleiho bezala fabrikatu da, hozketako geometria erretikuluatuak nolakoak diren erakusteko mozketak bi baititu.



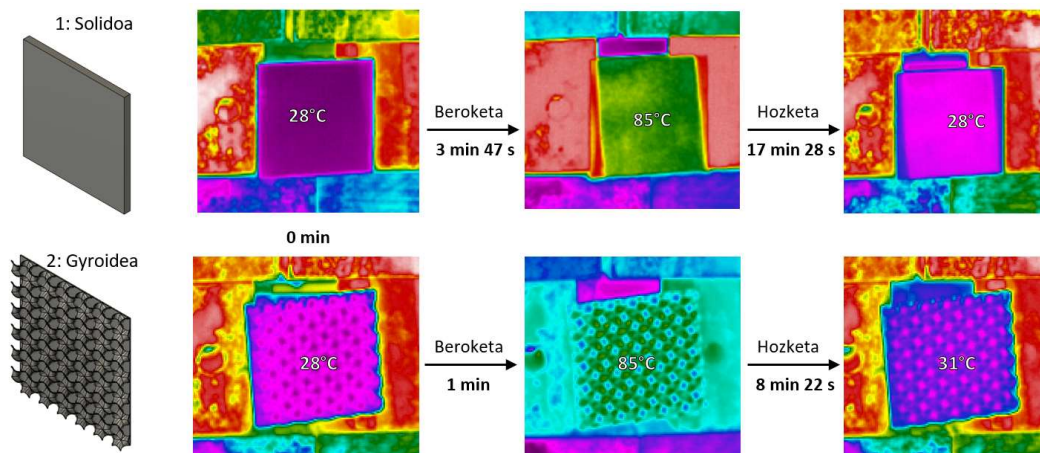
3. irudia. Zulagailuaren karkasa berriaren (a) diseinua burdin-hari ikuspegiari, (b) fabrikazio-prozesua eta (c) bukaerako itxura.

5. EMAITZAK

Ikerlana 3. irudian adierazitako metodologia jarraituz egin denez, emaitzak ere modu horretan erakusten dira.

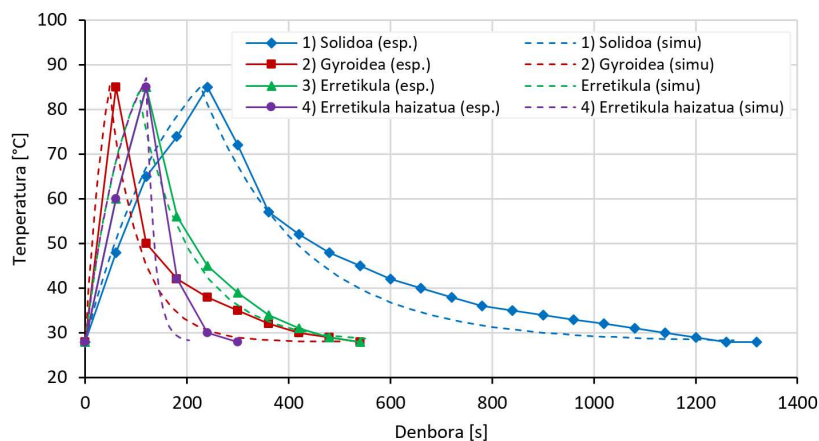
5.1. Gainazalen bero-disipazio gaitasuna

Kamera termografikoaren bitartez karkasaren laginen beroketa- eta hozketa-zikloak aztertu dira. Ondorengo 4. irudian lehengo bi kasuetarako emaitzak erakusten dira (solidoa eta gyroidea). Espero bezala, gyroideak duen gainazal eraginkor handiagoari eta masa txikiagoari eskerrak, inertzia termiko txikiagoa dauka eta hortaz bai beroketa- eta hozketa-zikloak bizkorragoak dira.



4. irudia. Aztertutako gainazalen CAD irudiak.

Jarraiko 5. irudian lau kasuen simulazio eta saiakuntza esperimentalen arteko alderaketa erakusten da. Ikus daitekeen bezala, simulazio eta errealitateak antzeko portaera dute. Beroketaren kasuan emaitza hobekak lortu dira. Izan ere, hozketaren kasuan lagina eusteko erabili den egiturak, 2. irudia (a)-n erakusten denak, laginak baino inertzia termiko handiagoa dauka eta bere hozketa moteldu egiten du. Hala ere, emaitza hauen errore txikia ikusita, ontzat hartzen dira.



5. irudia. Karkasako laginen hozketa esperimental eta simulazioaren arteko alderaketa .

3. Taulan aztertutako lau kasuentzako konbektzio-koefizienteak adierazten dira. Lorturiko balioei begiratu gero, hasiera batean harrigarria egin daiteke gyroideak gainazal lauak baino konbektzio-koefiziente baxuagoa izatea. Alabaina, kontuan hartu behar da Gyroidearen azalera efektiboa, $9.218,38 \text{ mm}^2$, solidoaren azalera lau baino askoz handiagoa da, $2.304,00 \text{ mm}^2$, beraz, nahiz eta definitutako konbektzio koefizientea gyroidearentzat baxuagoa den, beroa xahutzeko gaitasuna %60an

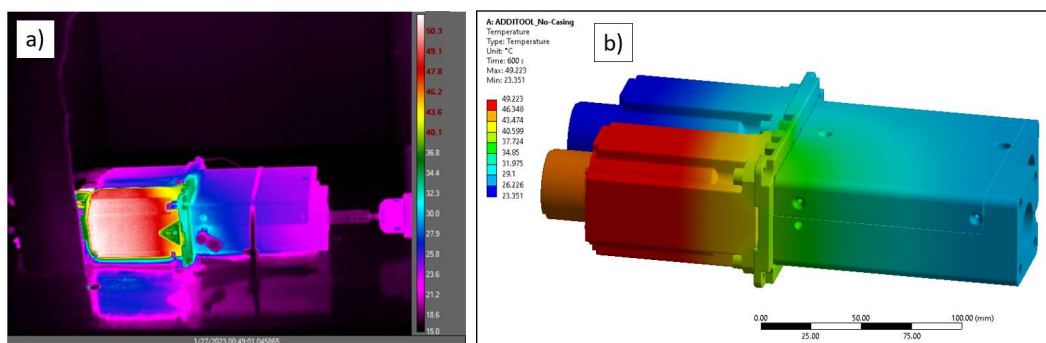
handitzen da gainazal lauarekin alderatuz. Era berean, laginaren bolumenaren, eta hortaz, geometriaren masaren eragina inertzia termikoan aztertu da. Materialaren bolumen txikiagoak hozketa-tasa arinagoak dakartza, eta bero gutxiago metatzen da materialean. Kontuan izan lagin solidoaren, erretikularraren eta gyroidearen bolumena 7.500 mm^3 , $3.389,6 \text{ mm}^3$ eta 1.612 mm^3 direla, hurrenez hurren.

3. Taula Konbekzio koefizienteen laburpena.

	Konbekzio koefizientea [W·m ⁻² K ⁻¹]	Nondik atera
Kanpoko naturala	10	Solida
Kanpoko gyroidea	4	Gyroidea
Barneko naturala	1	Erretikulatua
Barneko behartua	50	Erretikulatu haizatua

5.2. Zulagailuaren barneko bero-iturriaren karakterizazioa

Zulagailu osoaren portaera simulatu aurretik, beharrezkoa da barneko motorrak martxan dagoenean sortzen duen beroa karakterizatzea. Horretarako zulagailuari karkasa kendu zaio, motorra agerian uzteko, eta 5 minutuz martxan jarri da. Prozesu iteratibo baten ostean, bero-iturriaren potentzia 200W-tan finkatu da eta 6. irudian erakusten dira simulazio eta kamera termografikoaren emaitzak azken aldiunerako ($t=600 \text{ s}$).



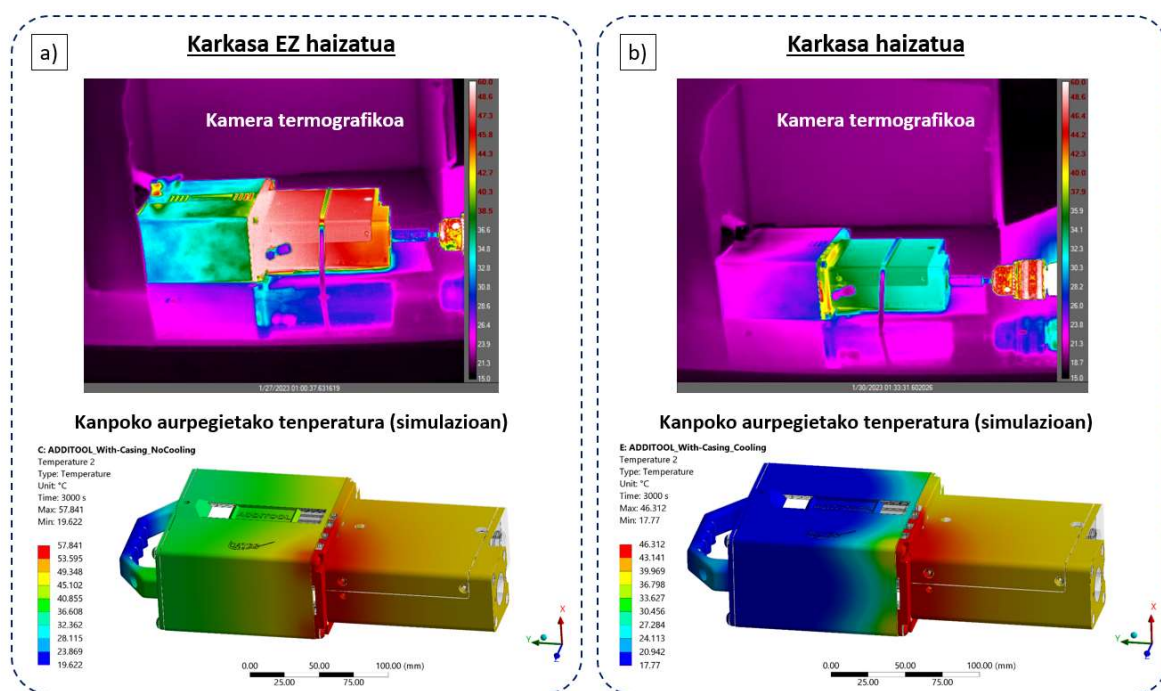
6. irudia. Karkasa gabeko zulagailuaren beroketa, $t=600 \text{ s}$ aldiuneko eremu termiko (a) esperimental eta (b) simulatua.

5.3. Diseinu optimizatuaren portaera termikoa

Behin zulagailuaren barneko bero-sorrera eta karkasaren eraikuntzarako geometria-lagin desberdinen portaera termikoa aztertu denean, karkasaren diseinu berria proposatu da. Horma solidoak izan ordez, erretikulatuak izango dira haizatu ahal izateko. 3. irudia (a)-n erakusten da karkasaren

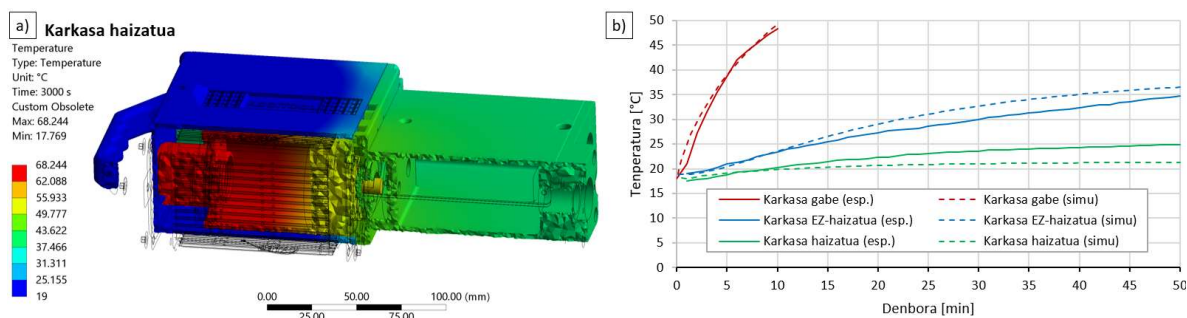
diseinu berria burdin-hari ikuspegian. Diseinu berriaren portaera aurreikusteko simulazio termikoak korritu dira, eta balizko diseinua lortu denean, laugarren atalean deskribatu bezala SLM bitartez fabrikatu eta prototipo hori erabili da simulazioen baliozkotasuna frogatzeko. Jarraiko 7. irudian karkasaren diseinu berriaren portaera erakusten da aireztatze sistema piztu gabe eta piztuta dagoeneko kasuetan. Simulazioen eta balidazio esperimentalaren artean korrelazio oso ona lortu da.

Espero bezala, haizatutako karkasaren portaera ez-haizatuarena baino askoz hobea da. Gainazaleko gehieneko tenperaturak 11 °C-an murriztu dira eta karkasaren tenperatura ez da 20 °C-tik gora igotzen. Kontuan izan haizatu gabeko kasuan karkasaren batez besteko tenperaturak 40 °C-ak gainditzen dituela eta hasierako diseinuaren kasuan denbora tarte berean 60 °C-ak.



7. irudia. Saiakuntza esperimental eta simulazioen arteko alderaketa zulgailua 50 minutuz martxan egon ostean.

Azkenik, 8. irudian diseinu berriko karkasaren zeharkako sekzioa erakusten da 50 minutu lanean egon ostean. Ikus daitekeen bezala, motorreko tenperaturek ia 70 °C-ak gainditzen dituzte, baina haizatutako karkasaren diseinuari eskerrak, kanpoko tenperatura 20 °C-en azpitik mantentzen da. Horrek zulgailuaren eskuzko manipulazioa ahalbidetzen du erabiltzailearentzat inolako arriskurik gabe eta zulgailua modu jarraituan erabili ahal izango da.



8. irudia. (a) Zulagailuaren tenperatura eremuaren zeharkako sekzioa karkasa haizaturen kasurako zulagailua 50 minutuz martxan egon ostean eta (b) simulazio eta saiakuntza esperimentalen arteko alderaketa.

6. ONDORIOAK

Ikerlan honetan zulagailu industrial batean antzemandako beroketa arazoari konponbidea man zaio fabrikazio gehigarri eta digitalizazio erreminten bitartez. Lehendabizi zulagailuaren portaera termikoa aztertu da kamera termografikoaren bidez eta datu horiekin zulagailuaren portaera digitalizatu da: barneko bero-iturriak eta konbekzioagatiko bero-galerak zenbatetsiz.

Zulagailuaren karkasaren diseinu berriak horma erretikulatuak ditu, barnetik haizatuak daudenak hozketa gaitasuna hobetzeko. Horri eskerrak, nahiz eta motorreko tenperaturak 70 °C-etako tenperatura gainditu, karkasaren kanpoko aldea 20 °C-etatik behera mantentzen da 50 minutuko lanaldiaren ostean. Hau da, hasierako tenperatura mantentzeko gaitasuna dauka.

Gauzak horrela, proposaturiko diseinua balizkoa dela ondorioztatu da eta zulagailuaren etengabeko erabilera ahalbidetuko duela, aurreko diseinuarekin agertzen ziren gehiegizko beroketak saihestuz eta eragiketaren produktibitatea hobetuz. Hortaz, etorkizunean pieza hau garatu den diseinu berriagatik ordezkatuko da eta fabrikazio gehigarri bidez fabrikatzea erabaki da.

ESKER ONAK

Eskerrak eman nahi zaizkio Zientzia eta Berrikuntza Ministerioari, I+G+B motako VERDE - TED2021-130543B-I00 proiektuaren finantzaketagatik.

BIBLIOGRAFIA

[1] AAMIR, M., TOLOUEI-RAD, M., GIASIN, K. eta NOSRATI, A. 2019 «Recent advances in drilling of carbon fiber-reinforced polymers for aerospace applications: a review». *International Journal of Advanced Manufacturing Technologies*, **105** (5–6), 2289 – 2308.

[2] IYER, R., KOSHY, P. eta NG, E. 2007. «Helical milling: an enabling technology for hard machining precision holes in AISI D2 tool steel». *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **47** (2), 205 – 210.

[3] AAMIR, M., GIASIN, K., TOLOUEI-RAD, M. eta VAFADAR, A. 2020. «A review: drilling performance and hole quality of aluminium alloys for aerospace applications». *Journal of Materials Research and Technology*, **9** (6), 12484 – 12500.

[4] M'SAOUBI, R., AXINTE, D., SOO, S.L., NOBEL, C., ATTIA, H., KAPPMAYER, G., ENGIN, S. eta SIM, W.M. 2015. «High performance cutting of advanced aerospace alloys and composite materials». *CIRP Annals*, **64** (2), 557 – 580.

[5] ARAUJO, A.C., LANDON, Y. eta LAGARRIGUE, P. 2021. «Smart drilling for Aerospace Industry: state of art in research and education». *Procedia CIRP*, **99**, 387 – 391,

[6] XU, J., MKADDEM, A. eta EL MANSORI, M. 2016. «Recent advances in drilling hybrid FRP/Ti composite: A state-of-the-art review». *Composite Structures*, **35**, 316 – 338.

[7] IOVKOV, I., BÜCKER, M. eta BIERMANN, D. 2021. «A modified tool design for the drilling of high-performance aerospace materials». *CIRP Annals*, **70** (1), 83 – 86.

[8] CHOWDHURY, S., YADIAH, N., PRAKASH, C., RAMAKRISHNA, S., DIXIT, S., GUPTA, L.R. eta BUDDHI, D. 2022. «Laser powder bed fusion: a state-of-the-art review of the technology, materials, properties & defects, and numerical modelling». *Journal of Materials Research and Technology*, **20**, 2109 – 2172.

[9] AHN, D. G. 2016. «Direct metal additive manufacturing processes and their sustainable applications for green technology: A review». *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, **3**, 381 – 395.

[10] HALLER, B. 2015. «NASA's vision for potential energy reduction from future generations of propulsion technology». *SAE 2015 Aerotech Congress & Exhibition* (No. GRC-E-DAA-TN26301).

[11] AFONSO, F., SOHST, M., DIOGO, C.M.A., RODRIGUES, S.S., FERREIRA, A., RIBEIRO, I., MARQUES, R., REGO, F.F.C., SOHOULI, A., PORTUGAL-PEREIRA, J., POLICARPO, H., SOARES, B., FERREIRA, B., FERNANDES, E.C., LAU, F. eta SULEMAN, A. 2023. «Strategies towards a more sustainable aviation: A systematic review». *Progress in Aerospace Sciences*, **137**, 100878.

[12] Johnson, M., Thilakaratne, S. eta Arora, S. 2021. «How to Design a Heat Sink for Additive Manufacturing». *Siemens, Simcenter*. <https://blogs.sw.siemens.com/simcenter/how-to-design-a-heat-sink-for-additive-manufacturing/> (Sarrera 2023/12/01).

[13] NAIR, V. eta LAL, SR. 2023. «Feasibility assessment of manufacturing of heat sink using additive manufacturing techniques». *Materials Today: Proceedings*, In press.

[14] YUN, M., HSU, W. T., SHIM, D. I., NAM, J., HEO, J. H., SONG, J. Y., ... eta CHO, H. H. 2024. «Design and fabrication of heat pipes using additive manufacturing for thermal management». *Applied Thermal Engineering*, **236**, 121561.

[15] MODREK, M., VISWANATH, A., KHAN, K. A., ALI, M. I. H., eta AL-RUB, R. K. A. 2022. «An optimization case study to design additively manufacturable porous heat sinks based on triply periodic minimal surface (TPMS) lattices». *Case Studies in Thermal Engineering*, **36**, 102161.

[16] GISARIO, A., KAZARIAN, M., MARTINA, F., eta MEHRPOUYA, M. 2019. «Metal additive manufacturing in the commercial aviation industry: A review». *Journal of Manufacturing Systems*, **53**, 124 – 149.

[17] APWORKS. <https://www.apworks.de/scalmalloy> (Sarrera 2023/12/01).

[18] AWD M, TENKAMP J, HIRTNER M, SIDDIQUE S, BAMBACH M, WALTHER F. 2018 «Comparison of Microstructure and Mechanical Properties of Scalmalloy® Produced by Selective Laser Melting and Laser Metal Deposition». *Materials*, **11**(1), 17.