

Fabrikazio gehigarri eta digitalizazio bidezko zulagailu aeronautikoaren diseinu-optimizazioa

Optimization of an aeronautical drill design combining AM and
digitization

Jon Iñaki Arrizubieta*¹, Aitzol Lamikiz¹, Eneko Ukar¹,
Naiara Ortega¹, Carlos Galleguillos²

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

² CATEC – Centro Avanzado de Tecnologías Aeroespaciales

LABURPENA: Geometria konplexuei, diseinu pertsonalizatuei eta ezaugarri funtzionalei eskerrak, osagai berrien garapenerako prozesurik eta berritzaileenetakoa bihurtu da fabrikazio gehigarri metalikoa. Horregatik, lan honetan aeronautikako sektorean erabiliko den zulagailu industrial baten karkasaren diseinua optimizatzeko fabrikazio gehigarriaren gaitasuna aztertu da. Ikerlan honen helburua zulagailuaren temperatura kontrolatu eta mugako balio onargarrien azpitik mantentzea da, horrela modu jarraituan erabili ahal izateko eta eragiketaren produktibitatea handitzeko. Zulagailuaren portaera aztertu eta diseinua optimizatzeko, haren digitalizazioa gauzatu da ANSYS Workbench 2021-R2 softwarearen bidez, eta emaitzen balioetasuna bermatzeko metodologia zorrotzari jarraitu zaio. Lehenengo pausuan, zulagailuaren diseinuan erabiliko diren gainazal mota ezberdinen (laua, erretikularra, gyroidea, hegalduna, eta abar) portaera analizatu da, bakoitzaren beroa disipatzeko gaitasuna zenbatesteko. 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 ohanzeko teknologia bidez (*laser Powder Bed Fusion*, L-PBF) fabrikatu da eta esperimentalki baieztatu da haren 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.*

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

Nola aipatu / How to cite: Arrizubieta, Jon Iñaki; Lamikiz, Aitzol; Ukar, Eneko; Ortega, Naiara; Galleguillos, Carlos (2024). «Fabrikazio gehigarri eta digitalizazio bidezko zulagailu aeronautikoaren diseinu-optimizazioa». *Ekaia*, 46, 2024, 327-339. (https://doi.org/10.1387/ekaia.25060).

Jasotze-data: 2023, uztailak 24; Onartze-data: 2023, abenduak 12.

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



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

1. SARRERA

Industria aeronautikoan barauts bidezko zulaketa-eragiketa da mekani-zazio-eragiketa garrantzitsuena, eta hegazkin bakoitzaren egituran 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. Haietan zeharreko materialaren ebakuazioa konplexua izan ohi da, eta marruskadura-indarren ondorioz, mozketa-indar handiak ager 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 haren lankideek aluminio aleazioen zulaketa-eragiketaren eraginkortasuna eta fabrikaturiko zuloen kalitatea aztertu zuten beren 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 automatizatzeko 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, mozketa-parametroen denbora errealeko adaptazioa eskaintzen duten ekipoak. Haien 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 bereziki aeronautikan. Loturetarako zuloen fabrikaziorako aeronautikan gehien erabiltzen den prozesua zulaketa axiala da, eta «ohiko zulaketa» izena ematen zaio. Prozesua ezaguna den arren, sarritan kontrolatzeko zaila izaten da, eta ez da erraza emaitzen fidagarritasuna bermatzea beti. Txirbilaren ebakuazioa arlo industrialeko arazo nagusietakoa da. Diametroaren kontrola, bizarra eta gainazaleko zimurtasuna ere ohiko erronkak dira [6]. Iovkov eta haren 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 ohi-koak dira eta diseinu horien bideragarritasuna lortzeko sarritan aukerarik onena Fabrikazio Gehigarria (FG) da. Izan ere, FGak fabrikazioa industria-erlazio askotan irauli du. Laser bidezko Hauts Ohantzearen Fusioa, inge-

lesezko *laser Powder Bed Fusion* (PBF-LB) industria aeronautikoan eta medikuntzan dagoeneko onartua izan da, material anitzekin lan egiteko duen gaitasunagatik eta eskaintzen duen diseinu-malgutasunagatik [8]. FG prozesuek, ordenagailuz diseinaturiko ereduaren oinarrituz, *Computer Aided Design* (CAD) *model*, hiru dimentsioko piezak materiala geruzaz geruzaz gehituz fabrikatzen dituzte. FGak, diseinutik edo eredutik abiatuz, geometria konplexudun osagaien fabrikazio zuzena ahalbidetzen du inolako erre-minta garestiak erabili gabe, adibidez, matrizeak eta puntzioak bezalakoak.

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, haiei 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 bertsuarekin, Yun eta haren lankideek aluminiozko hozketa-hodien diseinua optimizatu zuten eredu matematiko bidez, eta gero FG bidez fabrikatu zituzten [14]. Aipatu beharra dago, era berean, Modrek eta haren lankideek TPMS motako egitura erretikulatuak erabili dituztela beroa xahutzeko gainazalak diseinatzeko [15].

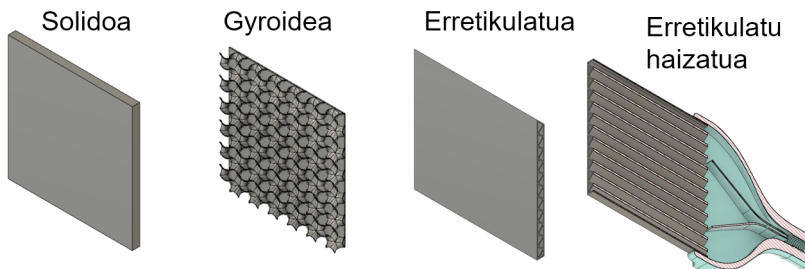
Bestalde, materialaren alferrikako erabilera saihesten du beharrezkoa ez den lekuetatik kenduz geometria konplexuen erabilerari eskerrak, kontuan izanda FGan geometria konplexuen fabrikazioak ez dakarrela ez kostuaren ez prozesuaren konplexutasuna handitzea. Horren adibide gisa, historikoki ohiko fabrikazio 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 karka-

sak 60 °C-ko tenperatura gaintzen 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 errearen portaera bere baliokide digitalarekin alderatu da.

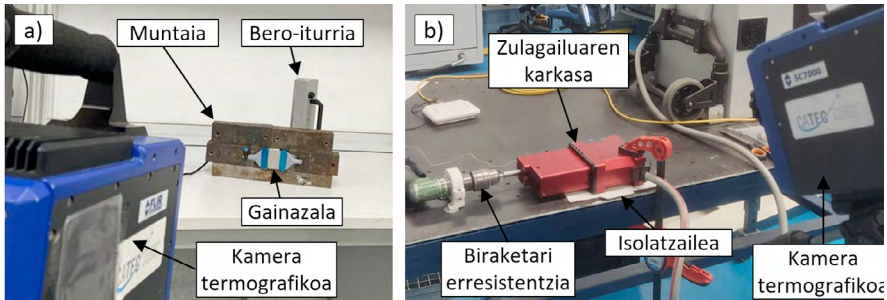
2. METODOLOGIA

Zulagailuaren karkasaren portaera digitalizatu ahal izateko, lehendabizi haren portaera nolakoa den zehaztu behar da. Horregatik, lehenengo pausu bezala, zulagailuaren karkasaren lodiera bereko Scalmalloy-zko 3 lagin fabrikatu dira, $50 \times 50 \times 3$ mm³ dimentsiokoak, eta 1. irudian erakusten diren lau egoeretan aztertu da haien 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 tenperatura 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.

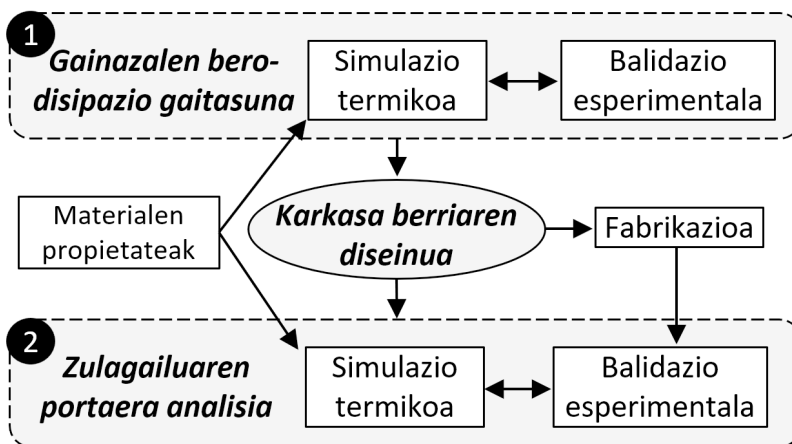
Beroketa- eta hozketa-zikloa Flir Orion SC7000 kamera termografikoa-ekin grabatu da, aldiuneko eremu termikoaren irudia eskuratzeko. Horrela, datu esperimentalak eta simulazioak alderatuz, kasu bakoitzeko konbektzio-koefizientea finkatu ahal izan da, hots, gainazal bakoitzak beroa xahutzeko duen gaitasuna. 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, lehenbizi zulagailua karkasa gabe martxan jarri da eta kamera termografikoaren bidez motorrak sortzen duen beroaren ondoriozko tenperatura 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, haren portaera aztertu da. Karkasa berriaren hozketa-gaitasuna hobetzeko, barneko aireztapen-sistema izango du, eta horretarako FG bidez eskuratutako egitura erretikulatuak erabiliko dira. Horregatik, haizaturatua den eta haizaturatua ez den egoerak aztertuko dira. Azpiko 3. irudian, ikerlanean jarraitu zaion 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 taldearentzat [17], eta ohiko aluminioarekin alderatuz (AlSi10Mg) eroankortasun termikoa pixka bat baxuagoa izan arren, askoz propietate hobekak eskaintzen ditu scandioaren gehikuntzagatik: kontuan izan behar da karkasaren analisi erresistentea ikerlan honen irismenetik kanpo gelditzen dela. Scalmalloy-a bere FG-ko egokitasunagatik aukeratu da, akatsik gabeko geometria konplexuen inprimaketa ahalbidetzen duelako. Azpiko 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 espezifikoa [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	

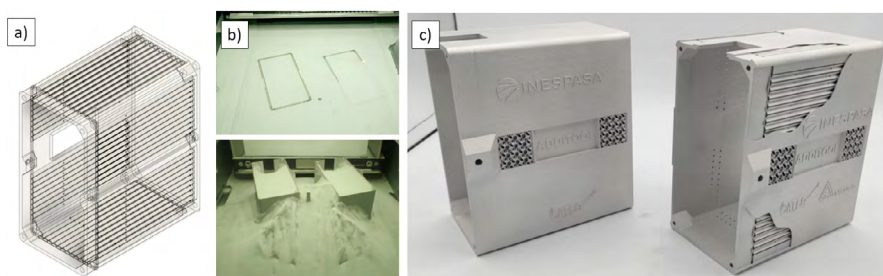
Material horren aukeraketa bere arintasunean, pisu espezifikotik txikian eta eroankortasun termiko altuan oinarrituta egin da, zulagailuaren karkasarako hautaketa ezin hobea egiten dutenak.

4. KARKASA BERRIAREN DISEINUA ETA FABRIKAZIOA

Karkasa berriak hozketa-gaitasun hobea izateko, barnetik aireztatu egon behar du. Horretatik, karkasaren 3 mm-ko hormak, jatorriz so-

lidoak zirenak, erretikulatu bihurtuko dira (ikus 3. irudia (a)). Diseinu-aldaketa horrek dakarren konplexutasuna dela medio, hauts ohandzedun fabrikazio gehigarria erabiltzea erabaki da, SLM teknologian oinarritua, hain zuzen.

Erabilitako makina Renishaw-ren RenAM 500E izan da, eta Scal-malloy aleazioa aukeratu da gehitze-materialtzat hauts formatuan. Inprimaketa-prozesuan bereizmen ona izateko 30 mikrako lodieradun geruzetan inprimatu da materiala. 3. irudia (b)-n erakusten da nolako den SLM fabrikazio-prozesua. Ikus daitekeen bezala, bi karkasa fabrikatu dira aldi berean, eta bukatu ostean piezak hauts-ohatzetik nola ateratzen diren bereiz daiteke. Azkenik, 3. irudia (c)-n bukatutako bi karkasa erakusten dira. Ezkerrekoa funtzionala da, simulazioen balioztapenerako erabili dena, eta eskuinekoa erakusleihu bezala fabrikatu da, zeren eta hozketako geometria erretikulatuak nolakoak diren erakusteko mozketak bi baititu.



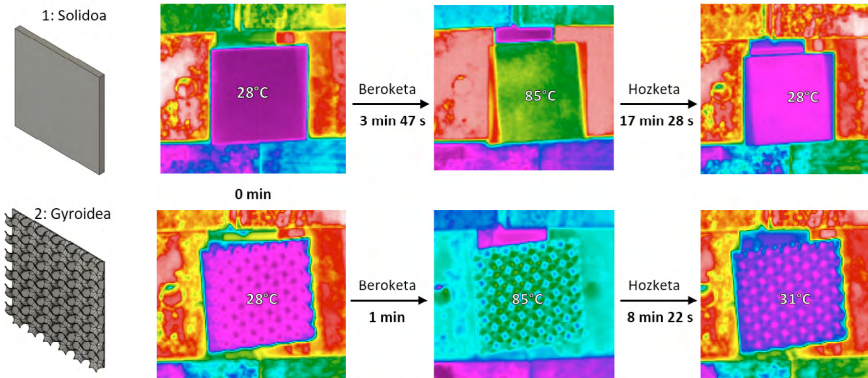
3. irudia. Zulagailuaren karkasa berriaren (a) diseinua burdin-hari ikuspegiari, (b) fabrikazio-prozesua eta (c) bukaerako itxura.

5. EMAITZAK

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

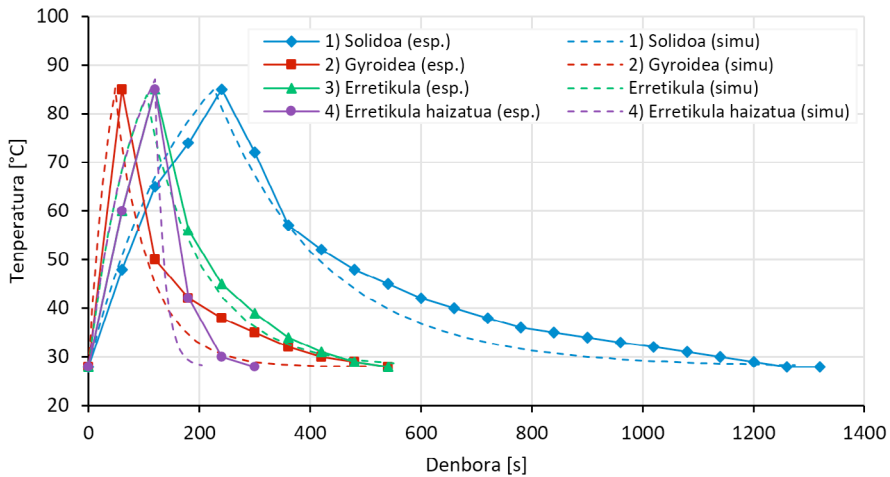
5.1. Gainazalen bero-disipazio gaitasuna

Kamera termografikoaren bitartez, karkasaren laginen beroketa- eta hozketa-zikloak aztertu dira. Ondorengo 4. irudian lehenengo 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, beroketa- eta hozketa-zikloak bizkorragoak dira.



4. irudia. Aztertutako gainazalen CAD irudiak.

Azpiko 5. irudian lau kasuen simulazio eta saiakuntza esperimentalen arteko alderaketa erakusten da. Ikus daitekeen bezala, simulazioak eta errealtateak 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 haren hozketa moteldu egiten du. Hala ere, emaitza hauen errore txikia ikusita, ontzat hartzen dira.



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

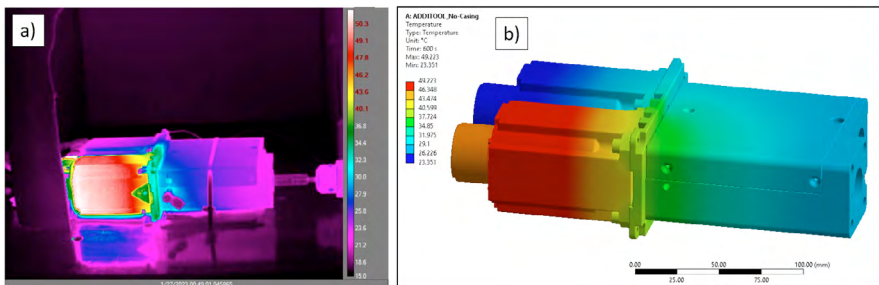
3. taulan aztertutako lau kasuetarako konbekzio-koefizienteak adierazten dira. Lorturiko balioei begiratu gero, hasiera batean harrigarria egin daiteke gyroideak gainazal lauak baino konbekzio-koefiziente baxuagoa izatea. Alabaina, kontuan hartu behar da Gyroidearen azalera efektiboa, $9.218,38 \text{ mm}^2$, solidoaren azalera lau baino askoz handiagoa dela, $2.304,00 \text{ mm}^2$; beraz, nahiz eta definitutako konbekzio-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 [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$]	Nondik atera
Kanpoko naturala	10	Solidoa
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 200 W-tan finkatu da, eta 6. irudian erakusten dira simulazio eta kamera termografikoaren emaitzak azken aldiunerako ($t = 600 \text{ s}$).

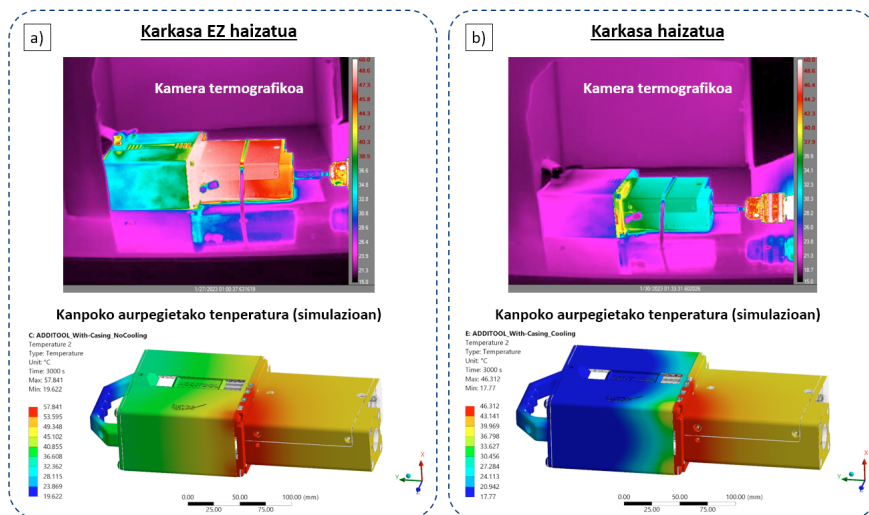


6. irudia. Karkasa gabeko zulagailuaren beroketa, $t = 600 \text{ s}$ aldiuneko eremu termiko (a) esperimental eta (b) simulatua.

5.3. Diseinu optimizatuaren portaera termikoa

Behin zulgailuaren 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. Azpiko 7. irudian karkasaren diseinu berriaren portaera erakusten da aireztatzeko sistema piztu gabe eta piztuta dagoen kasuetan. Simulazioen eta balidazio experimentalaren artean korrelazio oso ona lortu da.

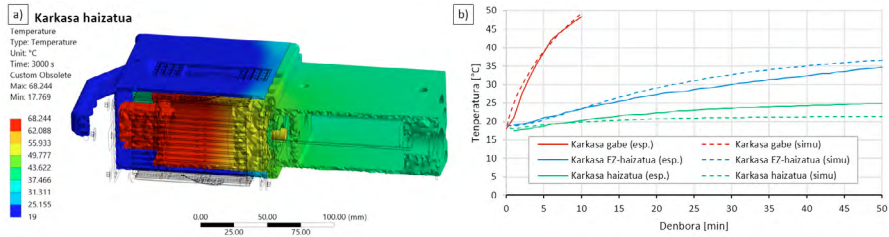
Espero bezala, haizutatuko karkasaren portaera ez-haizatuarena baino askoz hobea da. Gainazaleko gehieneko temperaturak 11 °C-an murriztu dira, eta karkasaren temperatura ez da 20 °C-tik gora igotzen. Kontuan izan haizatu gabeko kasuan karkasaren batez besteko temperaturak 40 °C gainditzen dituela eta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



7. irudia. Saiakuntza experimentalaren 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 temperaturek ia 70 °C gainditzen dituzte, baina, haizutatuko karkasaren diseinuari eskerrak, kanpoko temperatura 20 °C-ren azpitik mantentzen da.

Horrek zulagailuaren eskuzko manipulazioa ahalbidetzen du erabiltzailearentzat inolako arriskurik gabe, eta zulagailua 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 eman zaio fabrikazio gehigarri eta digitalizazio erremintzen 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, baretik haizatuak daudenak hozketa gaitasuna hobetzeko. Horri eskerrak, nahiz eta motorreko tenperaturak 70 °C-ko tenperatura gainditu, karkasaren kanpoko aldea 20 °C-tik 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 berriak ordezkatzeko du, eta fabrikazio gehigarri bidez fabrikatzea erabaki da.

7. ESKER ONAK

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

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., YADAAH, 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 SULLEMAN, 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, HIRTLER 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.

