

Adimen Artifizialaren eragina kontrolaren esparruan

(Impact of artificial intelligence in the field of control)

Mikel Larrea Sukia* Aritz Etxebarri Coello

UPV/EHU-Gipuzkoako Ingeniaritza Eskola

Eloy Irigoyen Gordo, Lucia Iturbe Rey

UPV/EHU-Bilboko Ingeniaritza Eskola

LABURPENA: Adimen artifizialak kontrolaren esparruan duen eraginari buruzko ikuspegi bat eman nahian sortu da lan hau. Kontrol-teknika klasikoak alde batera utzi gabe, kontrol adimentsua zer esparrutan zabaltzen den aztertu dugu, horretarako ikuspegi akademikoa eta industrialia uztartuz. Adimen konputazionalako zenbait teknika azaldu, eta haien aplikazio-esparrua aztertu dugu, kontrol-arazoak ebaztean egiten den aplikazioaren adibide argigarriak emanez. Gaur egun, adimen artifizialean oinarritutako aurrerapen teknologikoen hazkunde esponontziala nabarmena den unea, horrek ingeniartzan eta konputazioaren zientzian duen eragina azaldu dugu.

HITZ GAKOAK: Adimen artifiziala, kontrola, identifikazioa, optimizazioa, industria-prozesuak.

ABSTRACT: *This work was born with the objective of providing a view on the impact of Artificial Intelligence in the field of control. Without abandoning classical control techniques, the area in which Intelligent Control is deployed is analyzed, combining the academic and industrial approach. The different techniques of Computational Intelligence are explained and their scope is indicated, with illustrative examples of their application in the resolution of control problems. At a time when the exponential growth of technological advances based on Artificial Intelligence is evident, its influence on Engineering and Computer Science is explained.*

KEYWORDS: *Artificial Intelligence, Control, Identification, Optimization, Industrial Process.*

* **Harremanetan jartzeko / Corresponding author:** Mikel Larrea Sukia, UPV/EHU-Gipuzkoako Ingeniaritza Eskola. Europa plaza, 1 (20018 Donostia). – m.larrea@ehu.eus – <https://orcid.org/>

Nola aipatu / How to cite: Larrea Sukia, Mikel; Irigoyen Gordo, Eloy; Iturbe Rey, Lucia; Etxebarri Coello, Aritz (2025). «Adimen Artifizialaren eragina kontrolaren esparruan». *Ekaia*, ale berezia 2025, 203-227. (<https://doi.org/10.1387/ekaia.26345>).

Jasotze-data: 2024, maiatzak 23; Onartze-data: 2024, ekainak 28.

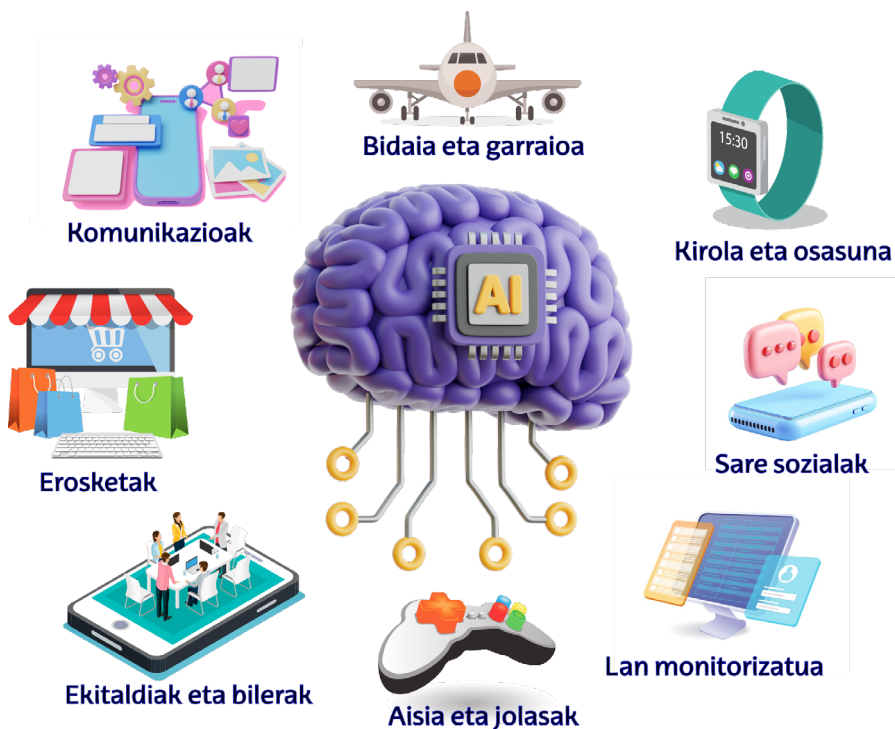
ISSN 0214-9001 - eISSN 2444-3255 / © UPV/EHU Press 2025



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

1. SARRERA

Duela gutxi heldu da gurera adimen artifiziala, baina argi dago luza-roan izango dugula gure artean. Dagoeneko denok jabetu gara horretaz, gure gailu mugikorrak erabiltzen ditugunean, edozein tresna informatikori kasu egiten diogunean edo gure ingurukoekin ditugun elkarrekintzetan.



1. irudia. Adimen artifiziala gure bizitzan. Jatorria: VectorPortal eta FreePik.

Bizitza erraztuko digun tresna aurreratutzat hartu behar da adimen artifiziala. Jakina, bai zuzenean, bai zeharka, haren erabilera errespetatu beharreko auzi etiko eta moralen menpe egon behar da, eta sekula ez litzateke pertsonen pribatasuna urratu behar haien baimenik gabe.

Baina adimen artifiziala ez da gauza berria gure munduan, eta are gutxiago ingeniartzaren edo informatikaren arloan. Adimen artifizialaren teknikan oinarritutako garapenak duela hamarkada batzuetatik hona aplikatu dira, eta zientziak egindako ekarpen ugarietan barneraturik egon da. Ingeleseztan Machine Learning delako ikasketa automatikoa giza portaeraren arazoiketa eta dedukzioa modu sintetikoan erreproduzitzen duten teknika anitzen bidez gauzatzen da, eta teknika horiek egunero erabiltzen ditu-

Kontrol-teknika klasikoen eta adimen konputazionalaren bat-egitetik sortu zen kontrol adimentsuaren arloa. Pisu espezifiko handia hartu du automatikaren eta kontrolaren esparruan, eta horren erakusgarri da Automatikaren Espainiako Batzordean (CEA) [1] badagoela kontrol adimentsuaren arloko talde tematiko bat. Batzorde horrek Espainiako zenbait unibertsitateko irakasle eta ikertzaileak biltzen ditu, zentro eta enpresa teknologikoetako zientzialariez gain. 2004an sortu zen kontrol adimentsuaren taldea, eta ibilbide luzea eta esperientzia handia bildu du garapen zientifiko-teknikoak lantzen. Garapen horiek adimen konputazionalako tekniketan oinarrituriko emaitzak eta aplikazioak eskaintzen dituzte askotariko sektoreetan, hala nola industrian, zerbitzuetan, medikuntzan edo energian. Kontrol adimentsuaren talde tematikoaren barruan, sinergiak sortu dira unibertsitateetako ikerketa-taldeen artean (haietako bat dugu UPV/EHUko Kontrol Adimentsuaren Ikerketa Taldea [2]). Elkarlan horren emaitzetako bat teknologia-zentro berrien sorrera bultzatzea izan da; adibidez, Teknologia, Energia eta Jasangarritasunerako Ikerketa Zentroa (CITES) [3]. Huelvako Unibertsitatean kokatua dago zentro hori, eta teknikari eta zientzialari talde handi batek osatzen du. Horrez gain, nazio mailako hainbat unibertsitate-tako ikertzaileekin lankidetzan aritzeko aukera ematen du.



5. irudia. Kontrol adimentsua: erakundeak eta taldeak. CEA; GT-CI; GICI; CITES.

Baina zein dira kontrol adimentsuaren moduko arlo batek hartzen dituen konpetentziak? Esan genezake ikerketa eta garapen zientifiko guztien oinarri diren funtsezko bi ikerketa-ildo daudela:

- Adimen konputazionalaren bidez sistema dinamiko edo estatikoak aztertzea eta modelizatzea.
- Adimen konputazionalaren tekniketan oinarritutako kontrol-egiturak diseinatzea, egokitzea eta hobetzea.

Kontrol adimentsuaren esparruan erabiltzen diren eta adimen konputazionalaren eremuaren barnean diren teknikak xehetasun handiagoraz azalduko ditugu hurrengo ataletan. Era berean, soluzio praktikoko eguneratuak aurkeztuko ditugu, interes zientifiko handiko ekarpenak direnak eta kontrol

automatikoaren teknika tradizioaletatik haratago doazenak. Ikusiko dugun bezala, teknika horiek hainbat eremutan erabili dira azken urte hauetan.



6. irudia. Kontrol adimentsua: azterketa-ildoak. Jatorria: Freepik eta unDraw.

Kontuan izan behar da kontrol adimentsua ez dela sortu berri den ikerketa-esparru bat. Izan ere, ildo horretako lehen lan zientifikoak 1970eko hamarkadan egin ziren, ordenagailuak agertu ondoren (7. irudia) —ikus Mandaniren lana [4], 1974an argitaratua, logika lausoarekin (ingelesezko Fuzzy Logic) diseinatutako lehen kontrolagailuari buruzkoa—, edo 1980ko hamarkadan, Takagi-Sugenoren lanarekin lotuta [5], non sistemak identifikatzeari, modelizatzeari eta kontrolatzeari buruzko gaiak sakonki jorratu ziren. Lehen lan haiek berrikuspen zientifiko askotan jaso dira, hala nola Izquierdo eta Izquierdok [6] argitaratutako «Mamdani Fuzzy Systems for Modelling and Simulation: A Critical Assessment» lanean. Era berean, 1990eko hamarkadan, berebiziko garrantzia hartu zuten neurona-sare artifizialekin egindako lanek, hala nola Narendrak [7] 1990ean dinamika konplexuak zituzten sistemen identifikazioaren eta kontrolaren garapenean egindakoek.

Denboran hurbilago daukagun historiak erakusten digu soluzio eragin-korragoak, zehatzagoak eta erabilgarriagoak lortzeko bidean hazkunde esponentziala izaten ari dela kontrol adimentsua. Izan ere, adimen konputazionalerako proposamen eta teknika berriak kontrol adimentsuaren esparruan txertatu dira. Horren frogar da industria-sektorean kontrol adimentsua erabiltzen duten lan kopuruaren bilakaera, [8] lanean ikus daitekeen bezala.



7. irudia. Industria-iraultza. Jatorria: Freepik.

2. AUTOMATIKAREN ETA KONTROLAREN ARLOARI APLIKATUTAKO ADIMEN ARTIFIZIALEKO TEKNIKAK

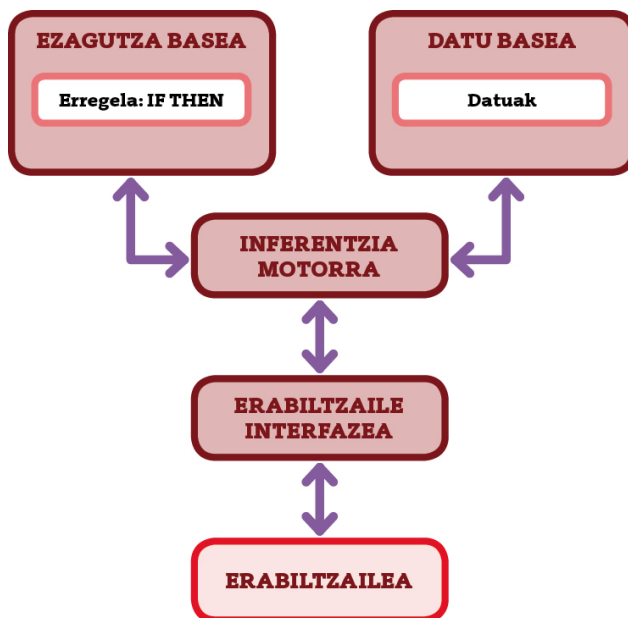
Jarraian, automatikaren eta kontrolaren arloan agertu diren adimen artifizialaren esparruko teknikak aurkeztuko ditugu. Lehenik, haren printzipioetara hurbiltzen ahaleginduko gara, informazio hori irakurlearen esku jartzeko. Ondoren, teknika horiek hainbat kontrol-arazo nola konpondu dituzten erakusten duten adibide batzuk azalduko ditugu. Horrez gain, teknika bakoitzari lotutako ikertzaile garrantzitsuenetako batzuk aipatuko ditugu.

2.1. Sistema adituak (Expert Systems)

Prozesuak eta sistemak automatizatzeko garaian, kontuan izan beharko litzatekeen aldagai oso garrantzitsu bat da sistemaren funtzionamenduaren ezagutza. Ezagutza hori, aurretiko ezagutzaren eta egunerokoaren erabileraren poderioz lortzen dena, gizaki adituek barneratu eta metatzen dute. Gizaki adituek arazoak ingurune konplexu, ziurgabe edo zehaztugabeetan konpontzeko duten gaitasuna oso ezaugarri desiragarria da berrerabiltzeko edo transferitzeko, eta hori ia ezinbestekoa da gizaki adituek sistemaren ezagutza sakona dutenean. Transferentzia horri ekin ahal izateko, sistema adituak garatu ziren joan den mendeko 70eko hamarkadan [9], nahiz eta 50eko hamarkadaz geroztik bazeuden ideia batzuk.

Sistema aditu bat honako elementu edo fase hauek osatzen dute: eza-
gutza eskuratzeko fasea, inferentzia-motorraren fasea eta erabiltzaile-inter-

fazearen fasea. Elementu horiek eta haien arteko erlazioak 8. irudian ageri dira.



8. irudia. Sistema adituaren elementuak.

Ezagutza eskuratzeko fasean, ezagutza aditua formalizatzen da, eta, horretarako, ezagutza- basea delakoa sortzen da. Prozesu horretan, elkarriketak, oharrak eta dokumentazioaren analisisa sartzen dira, erregela eta gertakari garrantzitsuak ondorioztatzeko. Erregela horiek baldintza eta ondorio jakin batzuk dituzte, konputagailu batean azkar programatu eta exekutatu ahal izateko [10]. Jarraian, ur-depositu baten tenperatura kontrolatzeko sor daitezkeen erregelak adieraziko ditugu, adibide gisa. Kasu honetan, uraren tenperatura 50°C eta 75°C artean mantendu nahi da.

```

IF temp_depositu < 50 AND berogailu_egoera == itzalia
THEN piztu_berogailua
    
```

```

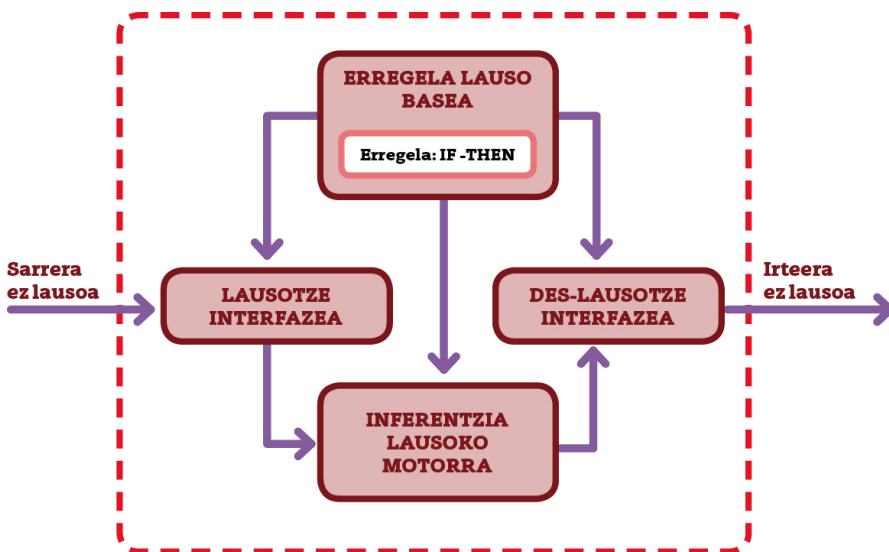
IF temp_depositu >= 75 AND berogailu_egoera == piztua
THEN itzali_berogailua
    
```

Behin ezagutza eskuraturik, inferentzia-motorraren fasea hasiko litza-teke. Hala, une oroko datuei eta eskuragarri daudenei erregela logikoak aplikatzen zaizkie, ondorioak ateratzeko, eta egin daitezkeen ekintzen proposamenak egiten zaizkio erabiltzaileari. Horretarako, etengabe ebaluatzen

dira erregeletan ezarritako baldintzak, eta dagozkion ekintzak gauzatzen ditu baldintza horiek betetzen direnean. Aurreko adibidearekin jarraituz, deposituko ura 40°C-ra eta berogailua itzalita badaude, erregelen ebaluazioak berogailua aktibatzea eragingo du. Horrela, ura berotzen hasiko da. Erregelak etengabe ebaluatzen dira, eta, urak 75°C-ko tenperatura gainditzen badu eta berogailuak piztuta jarraitzen badu, berogailua itzaltzea eragingo du inferentzia-motorrak.

Azkenik, erabiltzailearen interfazearen fasean, sistemaren eta erabiltzailearen arteko elkarrekintza ahalbidetzen da. Interfaze horretan, erabakiak hartzeko aukera ematen dion informazio garrantzitsua aurkezten zaio erabiltzaileari. Gainera, datuak eta informazioa sartzeko aukera ere ematen dio erabiltzaileari. Ur-deposituaren tenperatura kontrolatzeko adibideari helduz, erabiltzailearen interfazeak aukera emango luke, adibidez, tenperatura-mugak aldatzeko, egungo tenperatura ikus teko, ezar litezkeen alarma-sistemak kudeatzeko, etab.

Sistema adituen alorreko ikertzaile garrantzitsuenetako bat David Heckerman da, Microsoft Research-eko langilea bera (Google Scholar).



9. irudia. Logika lausoko sistemen oinarritzko arkitektura.

2.2. Logika lausoa (Fuzzy Logic)

Logika lausoak [11] multzo lausoak erabiltzen dituen ikuspegiari egi-ten dio erreferentzia. Multzo lausoak erabiltzeari esker, kontzeptu zehaz-
tugabeak irudikatu eta manipula daitezke (zer da prozesu baten tenperatura

altua edo baxua izatea?). Ziurgabetasuna matematikoki adierazteko aukera ematen duen logika mota bat da, eta horrek mundu errealeko fenomenoak modu errealistagoan modelizatzeko aukera ematen du. Erregelatan oinarritutako sistema adituekin alderaturik, teknika horrek baditu zenbait antzekotasun, baina erregelak ziurgabetasunez deskribatzeko aukera ematen du multzo zehaztugabeak gehituta, erregela argi eta zehatzen multzo bat erabili ordez.

Logika lausoaren oinarritzko elementuak 9. irudian ikus daitezke.

- Lausotze-interfazea: sarrerak prozesatzen ditu (balio argi eta errealetan daudenak), logika lausoko sisteman aplikatu ahal izateko.
- Erregela lausoen oinarria: logika lausoen oinarritutako erregelak eta sarrera prozesatuak aplikatzen ditu. Erregelak if-then sententzia lausotetan oinarrituta daude, eta honako egitura hau dute: «**If** *aurrekaria proposamena* **then** *ondorioa proposamena* ». Aurrekari eta ondorioen formaren arabera, logika lausoko bi sistema mota bereizten dira:
 - Hizkuntza-eredua: bai aurrekaria eta bai ondorioa hizkuntza-proposamen lausoak dira.
 - Takagi-Sugeno eredua: aurrekaria hizkuntza-proposamen lauso bat da, eta ondorioa, aldiz, partaidetza-funtzio bitar bat.
- Inferentzia lausoko motorra: irteerak ondorioztatzen ditu, horretarako sarrerak eta ezarritako erregela lausoak erabiliz.
- Deslausotze-interfazea: inferentzia lausoko motorraren irteerak logika lausoko sistemaren irteeretara (balio argi eta errealek) bihurtzen ditu.

Sistema adituen atalean aipatutako ur-deposituaren tenperatura-kontrolaren adibide bera erabiliz, hemen deskribatzen diren bezalakoak izan litezke logika lausoko erregelak:

```
IF temp_depositu IS txikia
THEN berogailuaren_potentzia_igo

IF temp_depositu IS altua
THEN berogailuaren_potentzia_jaitsi
```

Lausotze-fasea egiteko, honako partaidetza-funtzio hauek proposa daitezke:

- Tenperatura baxua, partaidetza-funtzioaren honako proposamen hau eginez:

$$baxua(tenperatura) = \max(0, \min(1, (50 - tenperatura)/25)),$$

esan nahi du 25°C baino gutxiago dagoenean «1» dela partaidetza (erabat baxua) eta 50°C-tik gora «0» (ez baxua).

— Tenperatura altua, partaidetza-funtzioaren honako proposamen hau eginez:

$$altua(tenperatura) = \max(0, \min(1, (tenperatura - 50)/25)),$$

edo gutxiago dagoenean «0» dela (ez altua) partaidetza eta 75°C-an «1» (erabat altua).

Deposituko ura 40°C-an dagoenean, erregelen ebaluazioak emaitza hau ematen du: «baxua» izateko «0.4»-ko partaidetza-balioa du, eta, «altua» izateko, «0» partaidetza-balioa. Hala, berogailuaren potentzia intentsitate ertainarekin handitzen da eta ura berotzen hasiko da. Berriz ebaluatzean, deposituko uraren tenperatura 70°C ingurukoa izanik, erregelen ebaluazioak emaitza hau ematen du: «baxua» izatea baliogabea da («0»-ko partaidetza-balioa) eta «altua» izateak «0.8»-ko balioa du. Hori dela eta, potentziaren intentsitatea murriztu egiten da, baina ez erabat. Hala, berogailuaren potentzia pixkanaka doitzea lor daiteke bat-bateko aldaketak saihestuz eragite-seinalean. Azkenik, deslausotze fasean, balio erreal batera eramaten du inferentzia lausoko motorrean lortutako berogailuaren potentziaren intentsitatea.

Sistemen ingeniariartzaren eta automatikaren arloan, logika lausoaren erabilera kontrolatzaile gisa edo kontrolatu beharreko sistemaren eredu gisa erabiltzean zentra daiteke (sistema aditueta jada aztertu diren kasuez gain, hala nola gainbegiratzea). Lehenengo kasuan, sistema nahi den egoerara eramateko erabiliko den kontrol-ekintza sortzeaz arduratzen da. Bigarren, aldiz, sistemaren erantzun dinamikoa identifikatu eta hurbiltzeko erabiltzen da elementu lausoa, informazio hori behar duten kontrol-estrategietan erabili ahal izateko. Bi erabilera horiek logika lausoak hurbiltzaile unibertsal izatearen ondorio dira [12]. Hurbiltzaile unibertsal bat gai da multzo trinko baten barnean dagoen edozein funtzio jarraitu erreal doitasun arbitrarioz hurbiltzeko. Propietate hori oso erabilgarria da sistemak modelatzeko, sistema horren dinamika definitzeko aukera ematen baitu, nahiz eta sistema horri buruz daukagun informazioa lausoa edo osatugabea izan.

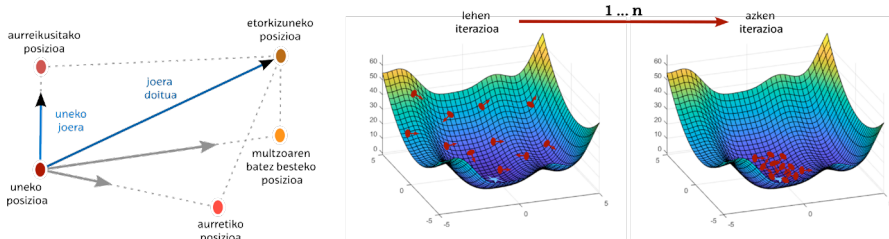
Neurona-sare artifizialekin batera, logika lausoa da sistemen sarrera/irteeren bidez sistemak modelatzeko teknikarik ezagunenetakoa bat. Sareekin alderatuz, esan daiteke logika lausoarekin lortzen den irudikapena gardenagoa dela, erabiltzen diren erregelen interpretagarritasun linguistikoa-gatik.

Logika lausoaren alorreko ikertzaile garrantzitsuenetakoa bat Ronald R Yager da, zeinak Iona College-n lan egiten baitu (Google Scholar).

Algoritmo genetikoaren alorreko ikertzaile garrantzitsuenetakoa bat Kal-yanmoy Deb da, Michigan State University-ko langilea bera (Google Scholar).

2.3.2. Partikula multzo bidezko optimizazioa (*Particle Swarm Optimization-PSO*)

Partikula multzo bidezko optimizazioa txori edo arrain taldeen portaera sozialean oinarritzen den algoritmo ebolutiboa da [14]. Teknika honek soluzio hautagaien populazio bat sortzen du; hautagai horiek partikula dute izena, eta bilaketa-espazioan mugitzen dira. Partikulen mugimendua ordura arte aurkitutako soluziorik onena duen partikulari jarraituz gertatzen da. Partikulek posizioak doitzen dituzte, beren posizio ezagunenaren eta taldean ezagutzen den posizio onenaren arabera. 11. irudian, optimizazio-arazo baten bilaketa-gainazal bat ikus daiteke. Gainazal horretan, partikulak ezartzen dira, eta haien mugimenduak soluzio optimoa bilatzeko balio du.



11. irudia. Arazoaren bilaketa-azalera eta partikulak.

Partikula multzo bidezko optimizazioaren alorreko ikertzaile garrantzitsuenetakoa bat Carlos A. Coello da, Mexikoko CINEVESTAV-Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional-eko langilea (Google Scholar).

2.3.3. Inurrien kolonia bidezko optimizazioa (*Ant Colony Optimization*)

Inurrien kolonia bidezko optimizaziorako algoritmoa inurriek elikagaiak bilatzeko [15] izaten duten portaeran dago oinarritua. Inurriak feromonen bidez komunikatzen dira; feromonak elikagai-iturrietarako bideetan askatzen dituzte, biderik laburrena aurkitzeko helburuarekin. Hala, feromona gehien duten bideek gainontzekoek baino lehentasun handiagoa dute. Inurrien kolonia bidezko optimizazioan, prozesu hori errepikatzen da, hau da, inurri artifizialek feromonak uzten dituzte bideetan, optimizazio-arazoak konpontzeko. Arrasto horrek, errealitatean bezala, badu lurruntze-fak-

dituen bilaketak direla eta. Dena den, gero eta ikerketa gehiagok erakusten dute algoritmo ebolutiboen bilaketa eraginkorra dela.

2.4. Neurona-sare artifizialak (Artificial Neural Networks)

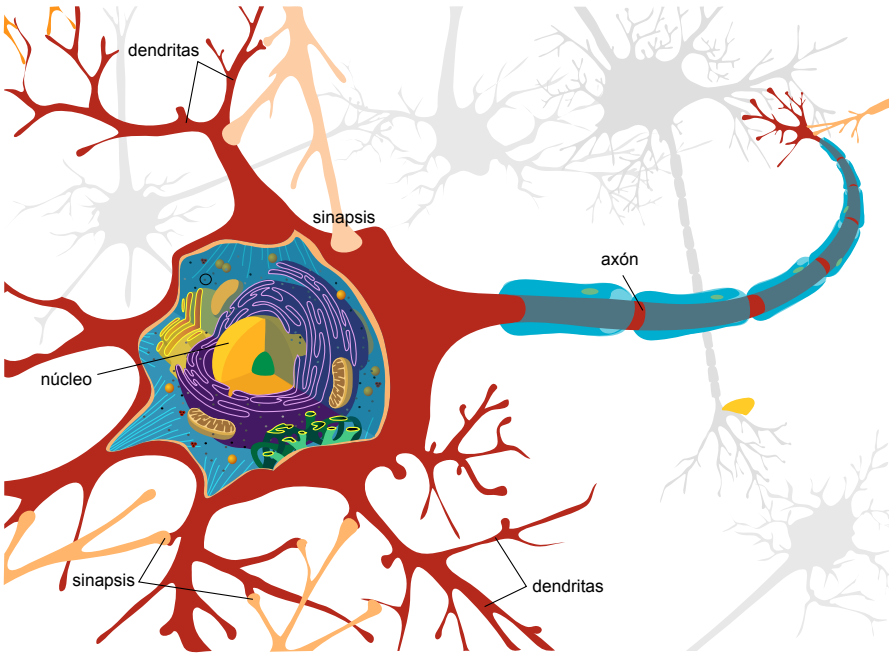
Neurona-sare artifizialak giza garunaren egituraren funtzionamenduan oinarritutako eredu konputazionalak dira. Neurona erreale baten funtzionamendua zehatz-mehatz azaldu gabe, interesgarria da neurona erreale eta artifizialen arteko antzekotasunak aztertzea. 13a irudian neurona erreale bat eta haren zati nabarmenenak azaltzen dira. Lehen irudi horri kontrajarrita, neurona baten eredu artifiziala ikus daiteke 13b irudian.

Neurona erreale bat hiru elementu nagusik osatzen dute: nukleo edo soma batek, dendritek eta axoi batek. Soma zelula-gorputza bera da, eta estimulu elektrikoak prozesatzen ditu (nerbio-pultsuak ere esaten zaie). Estimulu elektriko horiek beste neurona batzuetatik datoz (edo zelula muskularretatik edo guruinetatik, neurona motaren arabera), dendrita izeneko adar txiki bidez. Seinaleak prozesatzen amaitu ondoren, somak seinale bat igortzen die beste neurona batzuei (edo giharrei edo guruin-zelulei), axoi izeneko adarkatze handiago baten bidez.

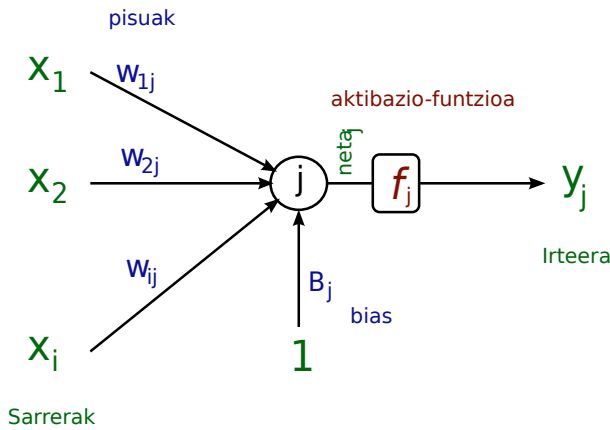
Neurona errealearekin alderatuz, neurona artifizialak sarrera batzuk jasotzen ditu ($x_1, \dots, x_i, 1$), pisuen eta biasen bidez haztatzen direnak (W_{ij} eta B_j , hurrenez hurren). Seinale horiek guztiak neuronan batzen dira (edo biderkatu, erabilitako neurona-sare motaren arabera), eta aktibazio-funtzio (f) baten bidez irteera bat (y) lortzen da. Neurona-sarea sortzeko, geruzatan taldekatzen dira neuronak, eta, geruza bakoitzean, neurona kopuru ezberdina egon daiteke. Orokorrean, sarrera-geruza bat, erdibideko geruzak eta irteera-geruza bat izaten ditu neurona-sareak, eta haien artean konexio haztatuak (pisuak) erabiltzen dira neurona-geruzen artean seinaleak transmititzeko. Konexio haztatu horiek modu iteratiboan —entrenamenduan— doitzen diren balioak dira. Entrenamendu horrek sarrera-/irteera-patroiak ikastea eta egokitzea ahalbidetzen du, eta, hala, informazio konplexua prozesatzeko ahalmena hartzen dute.

Neurona-sare artifizialen arkitektura aldatu egin daiteke sakonerari (geruza kopurua), zabalerari (neurona kopurua geruza bakoitzeko) eta konektibitateari (neuronen arteko konexioak) dagokienez, eta hainbat motatakoak sor daitezke, hala nola berrelikaduradun neurona-sareak eta neurona-sare konboluzionalak. Sare horiek hainbat arlotan erabili ohi dira; adibidez, irudien ezagutza, hizkuntza naturalaren prozesamenduan edo sistemen/funtzioen identifikazioan. Batik bat arazo konplexuak konpontzeko aldakortasuna eta ahalmena erakusten dute.

Aurretik esan dugun bezala, neurona-sare artifizialek hurbiltzaile unibertsalaren propietatea dute [16], eta horrek bultzatu du gehienbat teknika hori erabiltzea sistemen ingeniartzaren eta automatikaren arloan [7].



(a) Neurona erreala (jatorria: Wikipedia)



(b) Neurona artifiziala

13. irudia. Neurona errealaren eta neurona artifizialaren elementuen deskribapena.

Neurona-sareen alorreko ikertzaile garrantzitsuenetako bat Yann LeCun da, Facebook-eko langilea (Google Scholar).

3. ERABILERA-KASUAK

Kontrol adimentsua urteetan zehar bizirik eta aktibo egon den ikerketa-arlo bat da. Mundu osoan zehar unibertsitate eta ikerketa-zentro ugari daude, eta haietan guztietan kontrol-estrategien proposamen berriak lantzen jarraitzen dute. Adimen konputazionalako teknikan oinarrituta, proposamen asko daude gaur egungo literaturan. Gainera, interesa handitu egin da; izan ere, aurrerapen teknologikoei esker, karga konputazional handiagoa ezar daiteke lehen teknika tradizionalen bidez konpontzen ziren kontrol-arazoak konpontzeko. Aurrerapen horien bidez, problemak ebaztea lortu da ikuspegi holistikoa batetik —problemak sinplifikatu beharrean—, eta teknika aurreratuenak kontrol-maila baxuetara proiektatu dira (makinak, sentoreak eta eragingailuak). Horren frogarria gisa, kontrol adimentsuaren esparruko aurrerapen akademikoaren adibide batzuk aurkeztuko ditugu jarraian, industria-aplikazioen adibide praktikoez gain. Amaitzeko, adimen konputazionalaren teknikak erabiltzen dituzten soluzio industrial batzuk ere aurkeztuko ditugu atal honetan.

3.1. Akademia (ikerkuntza)

Akademiaren munduan kontrol adimentsuaren arloan egindako garapenei dagokienez, behe mailako eta goi mailako kontrol-garapenak bereiz daitezke.

Behe mailako kontrola prozesuaren osagaiekin zuzenean kontaktuan dagoen geruza teknologikoari dagokio: makina-erremintak, kaptadoreak eta seinale anitzeko sentoreak, bai eta eragingailuak ere, zeinek kontrol-jarraitbideak aipatutako makinetara eramaten baitituzte manufaktura-prozesuan zehar. Maila horretan, denbora- eta sendotasun-eskakizunak eta akatsakiko tolerantziaren eskakizunak berebiziko garrantzia dute egindako kontrol-estrategietan. Hori dela eta, hainbat ikerketa-lerro daude irekiak, non eremu globaleko kontrol-teknikak eremu lokalera proiektatzetik eratorritako arazoekin lan egiten den.

Goi mailako kontrola, berriz, kontrol-estrategiei dagokie. Halakoetan ez dago maila baxuko sentore eta eragingailurik, maila altuago batean lan egiten baitute. Kontrol-estrategia horiek hainbat parametro hartzen dituzte kontuan, hala nola prozesuaren produktibitatea, manufaktura-planten energia-gastuak, edo etorkizuneko ekoizpena hobetzeko intereseko aldagai jakin batzuen proiektzioa. Gainera, maila horietara datu kopuru izugarria iristen da aldi berean, eta datu horiek modu eraginkorrean prozesatu behar dira, instalazioan edo prozesu industrialean jardueraraino baten plangintza egitea eta programatzea ahalbidetzen duen informazio guztia atera ahal izateko.

Jarraian, behe eta goi mailako kontrol-eremuekin lotutako adibide batzuk zerrendatuko ditugu:

Behe mailako kontrola

- **Sistemak identifikatzea:** gai honek industriako prozesu eta sistemak identifikatzea eta modelizatzea lantzen du. Hori lortzeko, kontrol adimentsuko estrategiak aztertzen eta garatzen dira, bai soluzio estatikoetan, bai dinamikoetan. Mota honetako adibide bat [17] lana da, non sarrera/irteera anitzeko sistema ez-lineal baten eredu bat lortzen den logika lausoa erabiliz. Beste adibide interesgarri bat [18] da, non neurona-sare batekin 3PRS robot baten zinematika zuzeneko arazoaren konputazio-denbora hobetzea lortzen den.
- **Kontrolatzaile adimentsuak:** azken hamarkadetan, prozesuan esku hartzen duten baina helburu orokorragoekin maiz erabiltzen diren kontrol-estrategiak loratzen ari dira. Era horretako garapenen adibide gisa, [19] lana aipa daiteke, non adimen konputazionalaren teknikan (algoritmo genetikoak barne) oinarritutako tresnek lagundutako kontrol prediktiboko estrategia bat denbora errealean erabiltzea proposatzen den. Era berean, oso interesgarria da [20] liburua, non garatzen baita neurona-sare bidez egin daitekeen kontrolatzaile sorta bat. Azkenik, logika lausoarekin egin diren proposamenetako bat azpimarratzearren, [21] lana aipa daiteke, non diseinuz egonkorra den logika lausoko kontrolagailu ez-lineal bat diseinatzeko metodologia aurkezten duten.
- **Kontrolagailuen diseinua eta sintonizazioa lineaz kanpo (off-line):** kontrol-teknika honek ibilbide luzea du, baina adimen konputazionalaren teknikekin hobetu eta indartu da, eta proposamen aurreratu berriak sortu dira. Ildo horretako lehen adibideetako bat [22] lana da, zeinean sistema adituak erabiliz PID kontrolagailuak doitzen diren. Ildo bera baina algoritmo ebolutiboekin proposatzen dute [23] lanean, kasu horretan, gainera, askotariko helburuak erabiliz.

Goi mailako kontrola

- **Optimizazioa:** prozesu industrial orok, produktiboagoak, eraginkorragoak eta seguruagoak izateko, produkzioa eta erabilitako baliabideak optimizatzea eskatzen du. Horregatik, kontrolaren arloan ahalegin handia egiten ari dira aspalditik. Gaur egun, optimizazioaren eta heuristikaren arloko planteamendu teorikoak aztertzen eta garatzen ari dira akademiaren munduan, industria-prozesuen eguneroko arazoei irtenbide praktikoak eskaintzeko. Alde horretatik, oso lan in-

teregarria da [24]; izan ere, energia-sare adimentsuak maneiatzeko optimizazio aldagai anitz aztertzen dituzte, ekonomikoak barne. Hala, energia-sare horiek maneiatzeko kontrol prediktibo bat proposatzen dute.

- **Erabakien kudeaketa:** erabakiak hartzea oso lotuta dago industriako hobekuntza-prozesuekin. Gainera, erabaki horiek ekoizpen-prozesuekin eta kontrol-sistemekin loturik badaude, ezinbestekoa da erabakiak konputazionalki hartzea, helburu anitzeko arazoak planteatzen baitira. Erabakietan laguntzeko proposamen bat [25] lanean aurkitu daiteke. Bertan, n-dimentsioko Pareto frontea irudikatzeko lanabes bat proposatzen dute, hartara erabakien kudeaketan laguntza izateko.
- **Prozesuetako adierazle sentikorren iragarpena:** ekoizpen-prozesu bati buruz informazio asko neur badaiteke ere, egia da informazio hori aztertzeko konplexutasuna esponenzialki hazten dela. Goi mailako kontrol-prozesu batean, beharrezkoa da neurtutako aldagaiak aztertzea, garrantzitsuak direnak aukeratzea, ezagutzen ez direnak auresatea, prozesuan izan daitezkeen failak aurreikustea, ekintza zuzentzaile, prebentibo eta prediktiboak planifikatzea, ekoizpen-prozesuan ahalik eta eraginkortasun handiena lortzeko. Ildo horretan, [26] lanak bilaketa zabal bat eskaintzen du, datu ugariren fusioa eginez eta adimen artifizialeko teknikak aztertuz industria-prozesuen barruan iragarpenak egiteko.

3.2. Industria (aplikazioa)

Ördek eta beste egile batzuek 4.0 eta 5.0 industrien egungo egoerari buruz egindako azterlanean [8], hainbat industria-arlotan erabiltzen diren adimen konputazionalako teknikak sailkatzen dituzte. Datozen ataletan azalduko ditugu arlo horiek, eta, ondoren, kontrol adimentsuko zer teknika erabiltzen den azalduko dugu.

3.2.1. *Materialak hautatzea eta propietateak iragartzea*

Adimen konputazionalako algoritmoek sistema tradizionalak ordeztuko eta hobetzeko aukera ematen dute; izan ere, produktuaren egoeran eta fabrikazio-baldintzetan oinarritutako prozesu-parametroak aurreikusten dituzte.

Erabilera-kasua: laser bidezko fusio selektiboa gehikuntzako fabrikazio-prozesu bat da. Prozesu horretan, hautsezko geruzak bata bestearen gainean jartzen eta urtzen dira, hiru dimentsioko elementuak sortzeko. Laser bidezko fusio selektiborako teknologiak gizakien behaketa eskatzen du propietate egokienak hautatzeko, baita produkzioan material magnetikoak erabiltzen diren bitartean ere. Adimen konputazionalako algoritmoek aukera

bikaina eskaintzen dute, laser bidezko fusio selektiboko prozesuaren parametroak optimizatzeko arazoaren dimentsionaltasuna murrizten baitute.

3.2.2. *Produkzioaren programazioa eta plangintza*

Adimen konputazionalako algoritmoen aplikazioak asko erabili dira manufaktura-industrian lan-antolaketa-ko programazio-sistema konplexuak egituratzeko, eta, are, programazio tradizionalako sistemen mugak gainditu dituzte.

Erabilera-kasua: erdieroaleentzako silizio-olataren fabrikazioa. Adimen konputazionalako algoritmoek datu dimentsional altuak erabiltzen dituzte produkzioaren antolaketa programatzeko eta planifikatzeko. Aldi berean, hainbat helburu hartzen dituzte kontuan, hala nola produkzio-kostuak murriztea, hondakin gutxiago sortzea, lan-karga orekatzea, malgutasuna handitzea, giza ahalegina murriztea eta horrenbestez berrantolaketa-gaitasuna indartzea, edo programazio dinamikoa hobetzea.

3.2.3. *Fabrikazio-prozesuen hautaketa*

Adimen konputazionalako algoritmoek prozesuen hautaketan lagundu dezakete, fabrikazio-prozesuak ebaluatuz, lehengaien eta makinaren erabilera minimizatzeko. Horregatik, ekoizpen-denbora hobetu dezakete, eta energia eta materialen erabilera murriztu. Fabrikazio-sistema baten iraunkortasunaren ebaluazioa ingurumenean, gizartean eta ekonomian oinarritutako metriketan oinarritzen da.

Erabilera-kasua: pieza birakarien mekanizazio-ko erabakiak hartzeko sistema. Helburu, eskakizun eta muga kopurua eta aniztasuna dela eta, honako abantaila hauek lor daitezke fabrikazio-teknologiarik egokiena aukeratzean adimen konputazionala erabiliz: 1) gizakiaren gainbegiratzearen beharra minimizatzeko aukera; 2) malgutasuna, erregeletan oinarritutako softwarearen aldean; 3) parametro desberdin ugari kudeatzea; eta 4) azkarragoa, zehatzagoa eta eraginkorragoa izatea.

3.2.4. *Produkzioaren monitorizazioa*

Produkzioaren monitorizazioan, lanabesen egoera, uneoro fabrikatzen ari den elementuaren egoera eta segurtasuna aztertzen dira. Hiru faktore horietan, lanabesen egoera aztertuko duen sistemen garapena da lehentasuna, produkzio-kateko elementurik garestienak izan ohi direlako.

Erabilera-kasua: ultrasoinu bidez eginiko metalezko soldadura. Helburua egiten diren soldaduren kalitatea handitzea da. Horretarako, fabrikazio-prozesuen kalitatearen monitorizazioa hobetuko duten ezaugarriak hautatu eta parametroak sintonizatu egiten dira.

3.2.5. Kalitatea kontrolatzeko eragiketak

Adimen konputazionalako algoritmoek euskarria eman dezakete kalitatearen kontrolean, eta garapen handia izan da arlo horretan. Kalitatearen kontrol egoki batek ekoizpen-estandarrak eta -parametroak betetzen direla bermatzen du.

Erabilera-kasua: ijezketa-prozesua. Kasu honetan, sentsoreen garapenari esker, prozesuaren informazio zabalagoa dago eskuragarri. Horrek, aldiz, arazoak ere ekar ditzake; esate baterako, seinale zaratatsuen, datu kopuru handien eta matxuren datu falta. Hori kudeatzeko, adimen konputazionalako algoritmoak erabil daitezke, prozesuaren informaziorik esanguratsuena aurkitzeko eta, hartara, kalitate-kontrolerako baliagarri dena esku-ratzeko.

Industria eta aplikazioak kontuan hartzen dituen erabilera-kasuen atala bukatzeko, lehenik, adimen artifiziala modu generikoan erabiltzen duten atalak sailkatu ditugu 1. taulan.

1. taula. Adimen artifiziala industria-kontrolan erabiltzeko aukerak.

Maila baxua Kontrol-begizta/estrategia	Maila altua Kudeaketa optimizatua
Produkzioaren kontrola	Kalitate-kontrola
Prozesuaren aldagaien kontrola	Plangintza
Roboten kontrola	Monitorizazioa
Nabigazioaren eta ibilbideen kontrola	Mantentze prediktiboa
Aldi baterako latentzien kontrola	Logistikoa
Prozesuaren automatizazioaren kontrola	Prozesua optimizatzea
	Produkzio-programazioa
	Ikuskapena eta egiaztapena

Amaitzeko, 2. atalean aurkeztu ditugun adimen artifizialeko teknikak zer prozesu edo arazo industrialetan aplikatu diren laburbiltzen duen taula bat aurkeztuko dugu (2. taula).

2. taula. Erabilera-kasuen adibideak tekniken arabera.

	Erabilera-kasuak
Sistema adituak	— Mahai-tresnak fabrikatzeko artezketa. — Geruza meheko transistoreak dituzten kristal likidozko pantailen osagaien fabrikazioa. — Aluminioa fabrikatzeko presio altuko fundizioa. — Konposite magnetikoetarako laser bidezko fusio selektiboa. — Altzairu herdoilgaitza fabrikatzeko laser bidezko fusio selektiboa.
Logika lausoa	— Altzairu herdoilgaitza fabrikatzeko laser potentzia urtzeko ohantzea. — Olata-fabrikazioa. — Fabrikazio-sistema malgua. — Galdaketa, forjaketa eta AM teknologiak. — Aireontzien osagaien ekoizpena.
Algoritmo ebolutiboak	— Produktu jasangarrietarako helburu anitzeko optimizazioa. — Metalezko fabrikaziorako biraketa. — Arku elektrikoko labea altzairua fabrikatzeko. — Fabrikazio-sistema malgua automobilgintzarako. — Fabrikazio adimentsua.
Neurona-sareak	— Metaletarako gas-arku bidezko soldadura robotikoa. — Zuntz-ordezkatze automatizatua norabide bakarreko konpositearen fabrikaziorako. — Lantegi adimentsuen lan-programazioa. — Orria osatzea. — Erdieroaleentzako wafer-fabrikazioa.

4. ONDORIOAK

Adimen artifizialari buruz hitz egiten denean, orokorrean, neurona-sareak eta neurona-sare sakonak datoz gehienon burura. Hori horrela izanik, industria-kontrolaren arloari dagokionez, historikoki erabili diren teknika adimentsuen sorta askoz zabalagoa da. Lan honetan, erreminta-kutxa osatu dugu, hau da, sistema adimentsuetatik hasi eta lehen aplikazioak lortu arteko teknikak bildu ditugu, kontuan hartuta logika lausoak eta hurbiltzaile unibertsalaren propietateak kontrolaren esparrura ekarri dituen onura guztiak, algoritmo ebolutiboek arazo konplexuen aurrean ireki dituzten atea eta, azkenik, nola ez, neurona-sare artifizialak, 1990eko hamar-

kadatik kontrol- eta modelatze-esparruan egin diren garapenak barne. Lan honetan, aukera horiek aurkeztu nahi izan ditugu, betiere kontrolaren esparrutik ikusita. Kontrolaren aplikazioetako bat industria izanik, zentzu handia dauka garapen akademikoei soilik ez erreparatzea, baizik eta industrian egin diren garapenak ere ezagutzea, irakurleak ikus dezan zer lan egiten diren kontrol adimentsuaren arloan, bai akademian, bai industrian.

Azkenik, ondorio gisa, esan daiteke adimen artifiziala kontrol-aplikazioetan ere hazten ari dela, gaur egungo aurrerakuntza teknologikoei esker geroz eta arinagoak baitira prozesamendu-karga aldetik.

ESKERRAK

Lan hau Eusko Jaurlaritzak UPV/EHUko Adimen Konputazional Taldeari emandako IT1689-22 laguntzarekin egin da.

Irudi gehienak honako plataforma hauetan eskuragarri dauden doako diseinuei esker sortu ditugu:

- VektorPortal (<https://vectorportal.com/>).
- FreePik (<https://www.freepik.es/>).
- unDrawq (<https://undraw.co/>).
- Flaticon (<https://www.flaticon.com/>).
- IconFinder (<https://www.iconfinder.com/>).
- FreeIcons (<https://freeicons.io/>).

BIBLIOGRAFIA

- [1] «Comité Espanol de Automática - Grupos». URL <https://www.ceautomatica.es/grupos/>
- [2] «Grupo de Investigación de Control Inteligente - UPV/EHU». URL <https://www.ehu.eus/es/web/gici>
- [3] «Centro de Investigación en Tecnología, Energía y Sostenibilidad». URL <https://citesuhu.com/>
- [4] E. MAMDANI. 1974. «Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant», *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, **121**(12), 1585.
- [5] T. TAKAGI eta M. SUGENO. 1985. «Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control», *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, **SMC-15**(1), 116-132.
- [6] S. S. IZQUIERDO eta L. R. IZQUIERDO. 2018. «Mamdani Fuzzy Systems for Modelling and Simulation: A Critical Assessment», *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, **21**(3), 2.

- [7] K. NARENDRA eta K. PARTHASARATHY. 1990. «Identification and control of dynamical systems using neural networks», *IEEE Transactions on Neural Networks*, **1**(1), 4-27.
- [8] B. ÖRDEK, Y. BORGIANNI eta E. COATANEA. 2024. «Machine learning-supported manufacturing: a review and directions for future research», *Production & Manufacturing Research*, **12**(1), 2326526.
- [9] P. JACKSON. 1986. *Introduction to expert systems*, Wokingham, England; Reading, Mass.: Addison-Wesley Pub. Co.
- [10] S. G. TZAFESTAS, A. I. KOKKINAKI eta K. P. VALAVANIS. 1993. «An Overview of Expert Systems», S. TZAFESTAS, editorea, *Expert Systems in Engineering Applications* Orrialdeak. 3-24, Springer, Berlin, Heidelberg.
- [11] L. A. ZADEH. 1965. «Fuzzy sets», *Information and Control*, **8**(3), 338-353.
- [12] L.-X. WANG, 1992, «Fuzzy systems are universal approximators», [1992 *Proceedings*] *IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, Orrialdeak 1163-1170.
- [13] K. DEB. 2001. *Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*, Wiley, google-Books-ID: iwNRAAAAMAAJ.
- [14] R. EBERHART eta J. KENNEDY. 1995. «A new optimizer using particle swarm theory», *MHS'95. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*, Orrialdeak 39-43.
- [15] M. DORIGO eta G. DICARO. 1999. «Ant colony optimization: a new meta-heuristic», *Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation-CEC99 (Cat. No. 99TH8406)*, Bolumena 2, Orrialdeak 1470-1477 Vol. 2.
- [16] K. HORNIK, M. STINCHCOMBE eta H. WHITE. 1989. «Multilayer feedforward networks are universal approximators», *Neural Networks*, **2**(5), 359-366.
- [17] Y.-J. LIU eta S. TONG. 2015. «Adaptive Fuzzy Identification and Control for a Class of Nonlinear Pure-Feedback MIMO Systems with Unknown Dead Zones», *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, **23**(5), 1387-1398.
- [18] A. ZUBIZARRETA, M. LARREA, E. IRIGOYEN, I. CABANES eta E. PORTILLO. 2018. «Real time direct kinematic problem computation of the 3PRS robot using neural networks», *Neurocomputing*, **271**, 104-114.
- [19] J. VALERA GARCÍA, V. GÓMEZ GARAY, E. IRIGOYEN GORDO, F. ARTAZA FANO eta M. LARREA SUKIA. 2012. «Intelligent Multi-Objective Nonlinear Model Predictive Control (iMO-NMPC): Towards the 'on-line' optimization of highly complex control problems», *Expert Systems with Applications*, **39**(7), 6527-6540.
- [20] F. L. LEWIS, F. W. LEWIS, S. JAGANNATHAN eta A. YESILDIRAK. 1999. *Neural network control of robot manipulators and nonlinear systems*, Taylor & Francis, London, open Library ID: OL75885M.
- [21] J. ANDÚJAR eta A. BARRAGÁN. 2005. «A methodology to design stable nonlinear fuzzy control systems», *Fuzzy Sets and Systems*, **154**(2), 157-181.
- [22] K. J. ÅSTRÖM, J. J. ANTON eta K. E. ÅRZÉN, 1986, «Expert control», *Automatica*, **22**(3), 277-286.

- [23] G. REYNOSO-MEZA, X. BLASCO, J. SANCHIS eta M. MARTÍNEZ. 2014. «Controller tuning using evolutionary multi-objective optimisation: Current trends and applications», *Control Engineering Practice*, **28**(1), 58-73.
- [24] A. PAJARES, F. J. VIVAS, X. BLASCO, J. M. HERRERO, F. SEGURA eta J. M. ANDÚJAR. 2023. «Methodology for energy management strategies design based on predictive control techniques for smart grids», *Applied Energy*, **351**, 121809.
- [25] X. BLASCO, J. HERRERO, J. SANCHIS eta M. MARTÍNEZ. 2008. «A new graphical visualization of n-dimensional Pareto front for decision-making in multiobjective optimization», *Information Sciences*, **178**(20), 3908-3924.
- [26] A. DIEZ-OLIVAN, J. DEL SER, D. GALAR eta B. SIERRA. 2019. «Data fusion and machine learning for industrial prognosis: Trends and perspectives towards Industry 4.0», *Information Fusion*, **50**, 92-111.