

Hidrogenoa erregai gisa itsas garraioako barne- errekuntzako motorretan: Jariakinen Dinamika Konputazionaleko simulazioen beharra eta etorkizuneko erronkak

*(Hydrogen as fuel in internal marine transport combustion engines:
need for CFD simulations and future challenges)*

Naiara Romero-Anton*, Gontzal Lopez-Ruiz,
Zalao Azkorra-Larrinaga, Zigor Uriondo-Arrue

Ingenieritza Energetikoa Saila. Bilboko Ingeniaritza Eskola (UPV/EHU)

LABURPENA: Nazioarteko itsas garraioa munduko ekonomiaren bizkarrezurra da, ondasun materialen %70-80 itsasoz garraiatzen baita. Berotegi-efektuko gasen (BEG) emisioei dagokienez, Nazioarteko Itsas Erakundeak (NIE) 2021ean egindako azterlan batek ondorioztatu zuen nazioarteko itsas garraioak munduko CO₂ emisioen %2.89 sortzen zuela eta nazioarteko itsas garraioaren emisioak %130era arte haz daitezkeela 2008. urtekoekin alderatuta. BEG murrizteko itenbide bat karbonorik gabeko erregaia erabiltzea da. Hidrogenoa (H₂) ordezko erregai moduan erabiltzeak BEGen %80-100eko murrizketa dakar. Itsas garraioaren kasuan, diesel-H₂ ziklo dualeko motorrek interesa piztu dute azken urteotan, itsas garraioari nahi duten ibilbideak egiteko malgutasuna ematen diotelako (portuetan hidrogenoa eskuratu ezin bada, diesela erretzen jarraitu ahal duelako ibilbidean zehar), eta aldi berean BEG isuriak murriztu daitezkeelako. Hala ere, H₂-aren errekuntzak zailtasunak ditu. Ikerkuntza-lerro berria izanik, backfire-a (sugararren propagazio azkarra), gar temperaturen eragina, auto-piztea eta detonazioak dira erronka nagusiak, besteak beste. Hori dela eta, ezinbestekoak dira jariakinen dinamika konputazionalaren (JDK) bidezko simulazioak. Lan honetan, diesel-H₂ ziklo dualeko motorretan H₂-ak erregai gisa erabiltzeak dakartzan aukerak aztertzen dira. Horrekin batera, prozesu horiek JDK bidez simulatzeko eta hidrogenoa bezalako erregai berriztagarrien erabilera aztertzen, gaur egun eskuragarri dauden softwareak eta modelizazioaren aldetik dauden erronka nagusiak ere aztertzen dira.

HITZ GAKOAK: JDK, Errekuntza, Barne errekuntza motorrak, ziklo dualeko motorrak, Hidrogenoa.

ABSTRACT: International shipping is the backbone of the world economy. 70-80% of goods are transported by sea. Focusing on greenhouse gas (GHG) emissions, the International Maritime Organization (IMO) concluded in 2021 that international maritime transport accounted for 2.89% of global CO₂ emissions and international maritime transport emissions could grow to 130% compared to 2008. One way to reduce GHG is to use carbon-free fuels. The use of hydrogen (H₂) as alternative fuel reduces GHG by 80-100%. In the case of maritime transport, the dual cycle diesel H₂ engines are of interest, because they provide flexibility to maritime transport by making the routes they want (because if the H₂ cannot be acquired in ports, it can continue burning diesel), while at the same time GHG emissions can be reduced. The combustion of H₂ is difficult because it is a new line of research and we are at the moment of understanding backfire, flame temperature, self-ignition and detonation. Hence, simulations through computational fluid dynamics (CDF) are essential. This work examines the possibilities of H₂, analyses the dual cycle diesel-H₂ engines, and to simulate these processes and study the use of renewable fuels such as hydrogen, analyses the currently available software and modelling challenge.

KEYWORDS: CFD, Combustion, internal combustion engines, dual cycle engines, hydrogen.

* **Harremanetan jartzeko/Corresponding author:** Naiara Romero-Anton; Ingenieritza Energetikoa Saila. Bilboko Ingeniaritza Eskola (UPV/EHU). <https://orcid.org/0000-0001-5044-6391>, naiara.romero@ehu.eus

Nola aipatu/How to cite: Romero-Anton, Naiara; Lopez-Ruiz, Gontzal; Azkorra-Larrinaga, Zalao; Uriondo-Arrue, Zigor (2025). «Hidrogenoa erregai gisa itsas garraioako barne errekuntza motorretan: Jariakinen Dinamika Konputazional simulazioen beharra eta etorkizuneko erronkak», *Ekaia*, 47, 2025, 329-342. (<https://doi.org/10.1387/ekaia.26070>).

Jasoa: urtarrilak 15, 2025; Onartua: otsailak 10, 2025

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



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

1. SARRERA

Nazioarteko itsas garraioa munduko ekonomiaren bizkarrezurra da. Ondasun materialen %70-80 itsasoz garraiatzen da. Datu horri sektorea osatzen duten beste ontzi mota batzuk gehitu behar zaizkio, hala nola petrolio-ontziak, arrantza-ontziak eta bidaiari-ontziak.

Berotegi-efektuko gasen (BEG) emisioetan zentratuta, Nazioarteko Itsas Erakundeak (NIE) 2021ean egindako azterlan batek [1] ondorioztatu zuen nazioarteko itsas garraioak munduko CO₂ emisioen %2.89 zekarrela eta nazioarteko itsas garraioaren emisioak %130era arte haz daitezkeela 2008ko datuekin alderatuz, batez ere munduko itsas merkataritzaren hazkundearen ondorioz. Azken proiektzio horren ondorioz, premiazko neurriak hartu behar dira itsas garraiotik datozen BEGen emisioak ez areagotzeko. Horregatik, NIEk honako helburu hauek ezarri ditu [2]:

1. Berotegi-efektuko gasen %50 murriztea 2050erako, 2008arekin alderatuta
2. Berotegi-efektuko gasen intentsitatea %40 murriztea 2030erako, 2008arekin alderatuta
3. Intentsitatea %70 murriztea 2050erako, 2008arekin alderatuta.

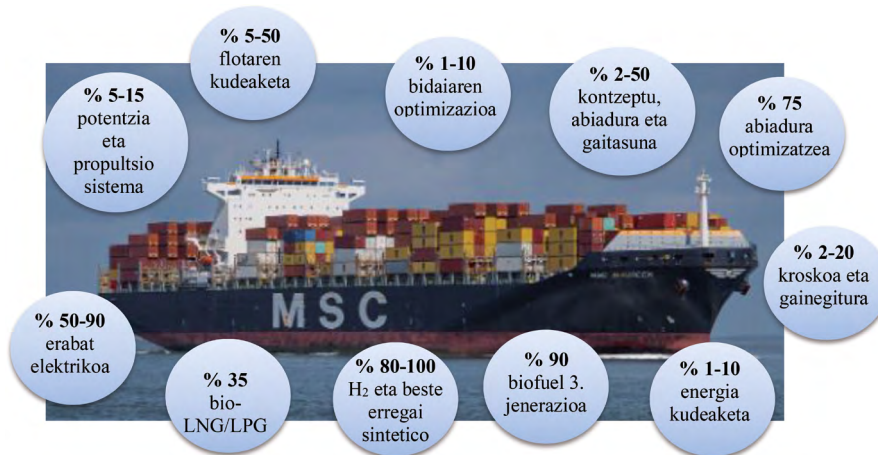
Intentsitatea garraiatutako karga-masaren eta ibilitako distantziaren araberako isurketen kontzeptutzat hartzen da.

NIEk ezarritako helburuak lortzeko, bi dira gauzatu beharreko ekin-tza nagusiak; 1) ontzien **eraginkortasun energetikoa** hobetzea. Bide honetatik energia-kontsumoa murriztea da helburua, adibidez hondar-beroak berreskuratzekeko sistemak erabiltzea eta ordezkio energiak erabiltzea, hala nola haizea (Fletner errotoareak, kometak, belak) eta eguzki-energia (foto-voltaikoa). Baina horiek ez dira nahikoak izango erabateko deskarbonizazioa lortzeko. Horretarako, ezinbestekoa izango da 2) **karbonorik gabeko erregaiak** erabiltzea (konposizioan edo guztizko balantzean, hau da, CO₂ isurketaren balantze neutroan) propulsio-sistemetan, horiek baitira itsasontzietako BEG emisioen iturri nagusia.

Hurrengo irudian, **1. irudian**, BEG isuriak murrizteko itsasontzietan aplikatu daitezkeen soluzio tekniko, operatibo eta berritzaileak laburbiltzen dira. Nabarmendu daiteke hidrogenoa (H₂) ordezkio erregai moduan erabiltzeak BEGen %80-100eko murrizketa ekar dezakeela [3].

Beraz, itsasontzien barne-errekuntzako motor alternatiboen (BEMA) deskarbonizaziorako, hidrogeno berdea etorkizun handieneko ordezkio erregai izango dela aurreikusten da, iturri berriztagarrietatik lor daitezkeelako [4]. Hidrogenoak ziklo dualeko diesel motorren eraginkortasun termikoa hobetu dezake (bi erregai ezberdinen nahasketarekin funtziona de-

zaketen motorrei ziklo dualeko motorrak deritze), sugarraren abiadura handiagoa kontuan hartuta beste erregai gaseoso batzuekin alderatuta [5]. Egiturazko karbonorik ez dagoenez, hidrogenoak erretako konposatu organikoen (UHC) eta karbono monoxidoaren (CO) emisioak nabarmen murriztu ditzake ziklo dualean dauden motorretan [6].



1. irudia. itsasontzietan aplika daitezkeen soluzio tekniko, operatibo eta berri-tzaileak. Arg. Naiara Romero Anton, Pixabay-tik moldatua.

2. HIDROGENOAREN ERREKUNTZA. ERRONKA TEKNOLOGIKOA

Hidrogenoaren errekuntzak berezitasun batzuk ditu: adibidez, backfire arriskua (hots,ugar frontearen propagazio azkarra), gar tenperatura adiabatikoa altua (eta, ondorioz, NO_x emisioen igoera), auto-piztea (self ignition) eta detonazioa. Hori dela eta, ikerkuntzaren arlo desberdinetan errekuntza berezi hau ulertu nahi da. Gainera, H₂-ak erretzeak CO eta CO₂ emisioak murrizten dituenez eta Behe Bero Ahalmen (BBA) altuko erre-gaia denez, erregai fosil konbentzionalen ordeztu hidrogenoa erabiltzeak, %100ean hidrogenoa erabiliz edo hidrogeno-eduki aldakorra duten erregai fosil-hidrogeno nahasketak kontsideratuz, arreta berezia piztu du ikerkun-tza-lerro ezberdinetan.

Hidrogenoaren errekuntzaren berezitasunak hobeto ulertzeko, azpiko taulan erakusten ditugu hidrogenoaren, metanoaren (gas naturalaren osagai nagusia), propanoaren eta dieselaren propietateak, baldintza estekiometrikoetan eta presio atmosferikoetan.

1. taula. Hidrogeno, metano, propano eta diesel erreagaien errekuntza-propietateak eta propietate fisioak.

	Hidrogenoa	Metanoa	Propanoa	Diesela
Dentsitatea (kg/m³)	0,080	0,64	1,71	833-881
BBA (kJ/kg)	119.950	50.020	46.360	42.800
Sukoitasun muga airean (%Bol.)	4-75	5-15	2-10	0,7-5
Gar tenperatura adiabatikoa (K)	2.380	2.226	2.267	2.375
Pizte energia minimoa (MJ)	0,02	0,29	0,30	—
Gar abiadura maximoa (cm/s)	200	40	40	30

Lau erregaietatik hidrogenoa elementurik arinena izanik, dentsitate nahiko baxua du beste erreagai gaseosoekin alderatuta. Horren ondorioz, presio handiagoak egin behar dira tankeetan biltegitratzeko (normalean 700 bar-etan biltegitratu), edo tankearen bolumen handiagotu, eta horrek hidrogenoaren biltegitratzea zailtzen du. Halaber, masa unitate bakoitzeko bero-ahalmen handiagoa du (bikoitza baino gehiago); beraz, masa kopuru bererako, energia bikoitza lortzen da. Bestalde, hidrogenozko sugarrak hautemateak zailtasunak dakartza, igortzen duen erradiazioa batez ere tarte infragorriko espektroan 0.76 - 100 μm gertatzen baita, giza begiak detektatu ezin duen baliotetan, alegia [7] (tarte ikusgarria 0.40 - 0.76 μm da). Hori dela eta, sugarra detektatzeko teknologia berriak garatu beharko dira, hidrogeno bidezko errekuntza-prozesuen kontrola eta segurtasuna ziurtatzeko.

Bestalde, sugarraren tenperatura adiabatikoa metanoarena eta propanoarena baino handiagoa da, eta horrek NO_x termikoen sorrera bultzatzen du Zeldovichen mekanismoaren bidez [8].

Sukoitasun-mugei dagokienez, jakina da hidrogenoaren tarte zabalagoa dela, eta diseinuaren aldetik abantailak dituela; izan ere, hidrogeno-aire nahasteak berehala pizteko gaitasuna izango dute tarte zabalago batean, erre gabeko erreagai frakzioak saihestuz. Hala ere, desiragarriak ez diren tokiko pizteak ere eragin ditzake, batez ere aurrez nahastutako eta partzialki aurrez nahastutako erreigailuetan, non errekuntza-ganberan sartu aurretik errekuntza-aire nahasketa bat dagoen [9]. Sarrerako hodietan edo aurre-nahasketa egiten den eremuan puntu beroak baldin badaude, hidrogenoaren sukoitasun-muga zabalagoak eta pizteko behar duen energia baxuak piztea eragin dezake. Horrek kalte itzulezinak eragin ditzake erregai osoan, leherketa-arrisku handiarekin batera.

Testuinguru honetan, CO_2 isuriak murrizteko eta erreagai fosilen murriztasuna murrizteko helburuarekin, errekuntza-sistemetan hidrogenoaren erabilpenak ikerketa-eremu berri bat ireki du.

Azken urteotan argitaratutako ikerketek erakutsi dute erreagai fosilekin lan egiteko diseinatutako errekuntza-sistemetan hidrogenoa erabiltzeak al-

daketak ekar ditzakeela sugarraren egonkortasunean, bero-transferentzian eta NO_x emisioetan, aipatu diren ezaugarri fisikoengatik (sukoitasun-muga zabalagoak, gar laminarraren abiadura handiagoa —backfire arriskua— eta sugar-tenperatura adiabatiko handiagoa, besteak beste) [10]-[14].

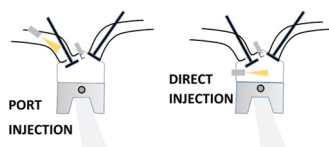
Hidrogeno-teknologia industria-aplikazioetan ezartzeari begira, ezin da baieztatu hidrogenoa modu orokortuan erabil daitekeenik errekuntza-sistema guztietan. OBS Business Schoolen 2023ko [15] txostenak bideragarritasun teknikoak eta ekonomikoak aztertu ondoren, ondorioztatu zuen ez duela zentzurik hidrogenoa erabiltzeak elektrizitatea edo beste teknologia batzuk (tenperatura ertain-baxuetan bero-ponpak, esaterako) erabil daitezkeen aplikazioetan [16][17]. Hala ere, aurreikusten da hidrogenoa lehiakorra izan daitekeela tenperatura altuak behar dituzten errekuntza-sistema egonkorretan [18][20] (labe industrialak) edo garraio astunetako errekuntza- eta propultsio-sistemetan, itsas garraioan, adibidez [21][22]. Hortaz, esan daiteke hidrogenoa ez dela errekuntza-sistema guztietan erabiltzeko alternatibarik egokiena. Aipatutako txostenak eta ikerkuntza-lanek ondorioztatu bezala, hidrogenoaren sorkuntzak, garraioak eta biltegitratzeak, erregai berezi honen erabilpena elektrifikatu ezin daitezkeen aplikazioetara mugatuko du.

Beraz, hidrogenoaren ordezkapen partzial edo osoak aipatutako sektoreetan dauden gaur egungo errekuntza-sistemetan izango lukeen eragina ikeritza ezinbestekoa da, batez ere barne-errekuntzako motor alternatiboetan.

3. DIESEL-HIDROGENO ZIKLO DUALA

Diesel-hidrogeno ziklo dualak barne-errekuntzako motor alternatiboetan (BEMA) hainbat abantaila ditu gaur egun gertatzen ari den deskarbonizazio-etaparen hastapenean. Alde batetik, ontziek ez dituzte beti ibilbide berberak egiten; hortaz, ontziak edozein ibilbidetan ibiltzen jarrai dezaakeela ziurtatu behar da, erregai nahikoa dutela ziurtatuz. Alde horretatik, gaur egun hidrogenoaren hornidura mugatuta dago, batez ere prozesu industrialetan erabiltzen baita, eta ez erregai gisa. Horrez gain, gaur egun ekoizten den hidrogenoa hidrokarburo fosiletatik dator gehienbat. Horrekin, ondoriozta daiteke epe labur-ertainean portuetako hidrogeno berdearen hornidura mugatuta egongo dela (hidrogeno grisa bada, eraginkorragoa da berotegi-efektudun gasen —BEG— isurketen ikuspegitik diesela erabiltzea). Hortaz, ontziak hidrogenoa bakarrik erabiltzen duten motorrak balitu eta hidrogenoa lortzeko aukerarik ez balu, ontziak ezin izango luke bere ibilbidea jarraitu. Horrek esan nahi du hidrogenoa soilik erabiltzen duten motorrak izatea ez dela inola ere erakargarria izango itsasontzien jabeentzat, geldialdi operatiboa gertatzeko arrisku handiegia dakarrelako. Arazo hori saihesteko helburuarekin, diesel-hidrogeno ziklo dualeko funtzionamendua planteatzen da BEMA duten ontzietan.

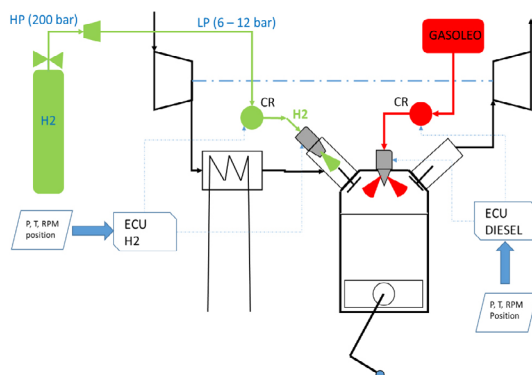
Diesel-Hidrogeno ziklo duala ikertu beharreko irtenbidea da. Hasteko, hidrogenoaren injekzioa konpresio bidez piztutako motorretan (diesel motor izenez ezagutzen direnak) nola egingo den definitu behar da. Hemen bi dira ikertzen diren alternatiba nagusiak: 1) zeharkako injekzioaren bidez airearen onarpen-portuan (PFI, Port Fuel Injection) edo 2) zilindroan egingako zuzeneko injekzioaz (DI, Direct Injection). Ikus **2. irudia**.



2. irudia. PFI eta DI injekzioen eskema. Arg. Naiara Romero Anton.

Bhagat *et al.*-k [23] aurkeztutako berrikuspen bibliografikoan ikus daitekeen bezala, ikerketa gehienak PFIren aukeran zentratzen dira. Ikuspuntu mekanikotik, PFI aldaketa DI aldaketa baino askoz errazagoa da. DI kasuan motorraren kulataren diseinua aldatu behar da, horrek dakartzan zailtasunekin, motorraren kulata erabat birdiseinatu behar baita askotan. Hori dela eta, DIren erreferentziak ingeniari-tza-enpresa handien eskutik datoz batez ere. Ingeniari-tza horietan, gainera, emaitzen informazio mugatua dago, batez ere produktua-ren garapenera bideratutako motorren fabrikatzaileentzat egindako azterketak direlako, eta ez ikerketa eta dibulgaziorako helburu zientifikoekin egindakoak.

Hurrengo irudian, **3. irudian**, artikulua-ren egileak ikertzen dauden itsa-soko diesel motor komertzialari dagokion diesel-H₂ ziklo dualeko BEMA-ren eskema ikus daiteke. Aipatzekoa da motorrari dagozkion neurketa entseguak Portugaleteko Nautika eta Itsasontzi Makineria eskolako (Bilboko Ingeniari-tza Eskola) instalazioetan egiten direla.



3. irudia. itsasontzietan aplika daitezkeen soluzio tekniko, operatibo eta berri-tzaileak. Arg. Naiara Romero Anton.

Motor honetan onarpen-portuan hidrogenoaren injekzioa mekanizatu eta egokitu da (PFI), ziklo dualeko motorra bihurtzeko. Ziklo dualeko motorrak injekzio elektronikoko bikoitza dute, bat dieselaren injekzioa kontrolatzeko eta bestea H_2 -aren injekzioa kontrolatzeko: **3. irudiko** «ECU» dira. Bi injekzio elektronikoko daudenez, kudeaketa elektronikoko duala beharrezkoa da. Bukatzeko, H_2 eta diesel erregaien hornidura dago. Proiektu honetan, H_2 -a 200 bar-etan dauden botila presurizatuen bidez elikatzen da. Ikerketaren hauen helburua ziklo dualeko funtzionamendua ezaugarritzea da, eta batez ere honako hauek dira aztertu beharreko aldagaiak:

1. Hidrogeno-frakzio ezberdinen eragina diesela ordezkatzeko
2. Frakzio ezberdinentzat motorraren eta errekuntzaren portaera aztertzea:
 - a) errekuntza-presioa
 - b) errekuntza askatutako beroa
 - c) gas-isuriak (NO_x , CO, CO_2)
 - d) motorraren errendimendu energetikoa.
3. Motorraren funtzionamendu-parametroen eragina:
 - a) Injekzioaren atzerapen-aurrerapenak izan dezakeen eragina
 - b) Operazio puntuaren (karga) eragina

Ziklo dualeko motorrei buruzko ikerketa garrantzitsuenek CO eta CO_2 isuriak nabarmen murriztu direla erakutsi dute. Hala ere, adierazi behar da H_2 sartzeak, kasu askotan, NO_x isurien maila nahi gabe handitzea ekarri duela [24]-[26]. Bestalde, karga baxuko baldintzetan NO_x emisioak gutxitu egin direla erakusten duten ikerketak daude, karga ertain eta handiko egoeretan igoera txiki batekin [27]-[29]. Eraitza horiek iradokitzen dutenez, hidrogenoa erregai osagarri gisa sartzeak ez du beti isurien murrizketaren alderdi espezifiko horretan hobekuntza esanguratsua eragiten, motorraren baldintza operatibo berezien arabera baita. Hori dela eta, Jariakinen Dinamika Konputazionalaren (JDK) bidezko simulazioak erabiltzea ezinbestekoa da diesel-hidrogeno ziklo dualean errekuntza ulertzeko.

4. JDK MODELIZAZIOA EGITEKO AUKERAK

Hidrogenoaren errekuntza azken hamarkadan indarra hartu duen ikerketa-arloa denez, alde esperimentalean saiakerak egin aurretik, beharrezkoa da jariakinen dinamika konputazionala aplikatzea (JDK, ingelesez CFD, computational fluid dynamics), motorrean egon daitezkeen back-fire-a, gar-tenperatura, auto-piztea eta detonazioa alde aurretik aztertzeko. Horrez gain, JDK simulazioek ikasketa parametrikokoak eta diseinuen opti-

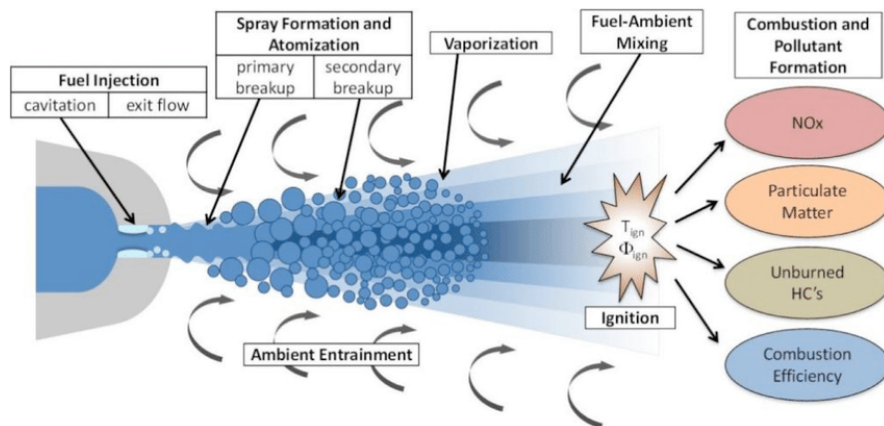
mizazioak egitea ahalbidetzen du, neurtzeko zailak diren aldagaien bilakaera aztertzearekin batera.

4.1. JDK simulazioak barne-errekuntza motorretan

JDK bidezko kalkuluen oinarrian, Navier-Stokesen ekuazio diferentzialen zenbakizko metodoen bidezko ebazpena dago. Horretarako, kontsideratutako sistema fisikoa (kasu honetan, jariakinak betetzen duen pistoi-zilindroen sistema) elementu diskretuetan banatu behar da, eta domeinuaren sarea (mesh) osatu. Ekuazio diferentzialak diskretizatzeko metodo horrek ikuspuntu eulerrari jarraitzen dio, espazioko puntu finkoetan aldagaien eboluzioa aztertuz. Horrela, elementu diskretu bakoitzean masaren, energiaren eta momentuaren kontserbazio-ekuazio diferentzialak zenbakizko metodoen bidez ebazten dira, espezie kimikoen eta eskalar errektiboen garraioarekin batera.

Antzeman daitekeen bezala, mota honetako simulazioak konplexuak dira, errekuntza, bero-transferentziari eta erreakzio kimikoei dagozkien fase anitzeko fluxu turbulentu errektiboei lotuta daudelako. Horretarako, beharrezkoa da injekzio-modeloen eragina aztertzea eta fase anitzeko fluxu (likido-gas trantsizioa) horien tratamenduari buruzko alderdiak aztertzea. Bestalde, aipatzekoa da fase anitzeko simulazio hauetan spray-tantatxoan jarraipena ikuspuntu lagrangiarrari jarraituz egiten dela, hots, tanta bakoitzaren posizio-bektorea ebatziz. Horrek simulazioak eta erabili beharreko modeloen konplexutasuna handitzen du.

Hurrengo irudian, **4. irudian**, ikus daitezke diesel-spray batean gertatzen diren fenomeno fisikoak eta horiek modelatzeko beharrezkoak diren modeloen adibideak.



4. irudia. Diesel-spray batean gertatzen diren fenomeno fisikoak eta beharrezkoak diren modeloak [30]. Arg. CC BY 4.0.

BEMA motorrek, JDKaren bitartez simulatzeko, beste konplexutasun bat dute. BEMak mugimenduan daude, hedapen- eta konpresio-prozesuei jarraitzen diete, eta sarrerako eta irteerako balbulen irekiera-itxiera mugimenduekin konbinatzen dira. Hori dela eta, motorraren birabarkariaren angeluaren arabera (ingelesez, crank angle, CA) egoera bakoitzean simulazioan parte hartzen duen domeinua edo sare diskretizatua desberdina da. Beraz, JDKan definitzen den sareak mugimenduan egon behar du (sare dinamiko), CA bakoitzean domeinua desberdina delako, eta horrek simulazioak zailtzen ditu. Simulazio horiek egin ahal dituzten software erabilienak honako hauek dira (guztietan fluxu turbulentua bolumen finituen metodoa erabiliz ebazten da, aipatutako sare dinamikoa erabiliz):

- **AVL:** Komertzialki eskuragarri dagoen softwarea da, eta erabilera orokorra du bai ikerketa-komunitatearen barruan, bai industria-esparruan, bereziki errekuntza-motorren barne-simulazioen esparruan. Erabiltzaile-interfaze intuitibo bat eskaintzen du, simulazioen exekuzioa bizkortzen duena erabiltzailearentzat atsegina den lan-fluxu baten bidez. Software komertziala denez, kostu oso altua dauka eta mugatuta dago motorren ezaugarri bereziak malgutasunik gabe simulatzeko. H_2 -diesel motor duala simulatzeko, arazo asko ditu motor berri horietarako prest ez dagoelako. Injekzio anitzak (etapa ezberdinetan) ezin dira egin. Kodea itxita dago, eta erabiltzaileak ezin dezake manipulatu [31].
- **ANSYS. Forte:** Barne-errekuntzako motorrak eta desplazamendu positiboko konpresoreak simulatzeko fluidoaren dinamika konputazionalako software bat da. Zehatz-mehatz eta eraginkortasunez modela daiteke motorra edo konpresorea azken urteetan gartutako kimika eta domeinu-sareekin. Hona software honen desabantailak: software komertziala denez, kostu oso altua dauka eta mugatuta dago motorren ezaugarri bereziak malgutasunik gabe simulatzeko: adibidez, injekzioa bi etapatan edo zulo-geometria desberdinetatik ematen bada, edo errekuntza-ganbararen forma programak definituta duen estandarraren desberdina bada, ez dago simulatzeko aukerarik, kodea itxita dagoelako eta erabiltzaileak ezin dezakeelako manipulatu [32]. Aipatzekoa da AVLrekin alderatuz malgutasun handiagoa daukala, baino kostua askoz altuagoa da.
- **OpenFOAM.** Kode irekiko JDK software bat da, C++ lengoaiari idatzia, bere diseinu modularragatik ezaguna [33]. Zientziaren adar ezberdinetan eta industriari aplikatutako kasu askotan erabiltzen da. Simulazio-ereduak garatzeko eta pertsonalizatzeko malgutasuna ematen du, eta horrek erraztu egiten ditu kode berriak garatzeko eta ezartzeko lanak, kasu bakoitzari egokituta. Artikuluaren egileek planteatu den ziklo dualeko motorraren simulazioak OpenFOAMen programatutako Lib-ICE [34] liburutegi espezializatuaren bidez egiten dituzte. Beraz, software honen abantailak honako hauek dira:

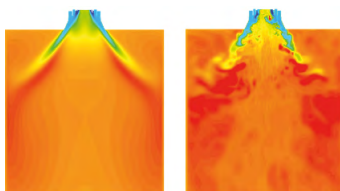
doakoa da eta malgutasuna ematen die erabiltzaileei nahi duten geometria eta berezitasuna aztertzeko.

4.2. Errekuntza-modeloak

JDK bidezko simulazioetan, esan daiteke errekontza turbulentua dela konplexutasun handiena duen prozesua. 3. irudiko spray-aren garapenak tanta likidoen lurruntzea dakar, eta lurrundutako erregaia airearekin nahastean, autopizketa prozesua gertatzen da. Errekuntza turbulentua JDK bidez simulatzeko modelo ezberdinak daude, eta hipotesi ezberdinetan oinarritzen dira. Azken hamarkadetan aurre-tabulatutako *flamelet* modeloetan [35] aurrerapauso nabarmenak egin dira. Modelo hauek hipotesi sinple batean oinarritzen dira: sugar frontea dimentsio bakarreko sugar bilduma bezala ikus daiteke. Hipotesi honen bidez, aldagai termokimikoak aldeztu aurretik tabulatzen dira, ondoren simulazioan zehar fluxu-aldagaiekin balioak berreskuratzeko [36]. Modelo horiei esker, erreakzio kimiko guztiek sortzen duten ekuazio diferentzialen sistemaren ebazpena ekiditen da, eta kostu konputazionala asko jaisten da.

Dena den, hidrogenoaren erabilerak errekontza-modeloen garapenean zailtasun nabarmenak sortu ditu. Izan ere, hidrogenoaren difusibitatea oso baxua da gainerako espezieekin konparatuta. Orain arte garatutako modeloei (flamelet hipotesian oinarritutakoak eta beste batzuk) espezie guztien difusibitatea antzekoa zela jotzen zuten, Lewis zenbakia bat izanik ($Le=1$). Suposizio horrek asko sinplifikatzen ditu ekuazioak, eta kalkulu kostua jaitsten. Hidrogenoaren kasuan, ordea, ikerketa ezberdinek erakutsi bezala [37] [38], $Le=1$ suposizioak emaitzetan eragin nabarmenak sor ditzake.

Azkenik, aipatzekoa da gaur egun BEMA motorretako JDK bidezko simulazioak Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS) modelo turbulentuetan oinarritzen direla. Turbulentzia modelo horiek aldagaien batzuetan besteko balioak ematen dizkigute. Esan daiteke erreallitatean gertatzen dena iragazten dutela, ekuazio zehatzetan iragazki bat erabiliz, kostu konputazionala jaisteko. Horren aurrean, etorkizunean, LES (Large Eddy Simulation) modelo turbulentuak erabiltzea litzateke aproposena, aukera ematen baitu fenomeno turbulentuaren inguruko informazio gehiago lortzeko. Hurrengo irudian, **5. irudian**, RANS eta LES arteko konparaketa ikus daiteke.



5. irudia. RANS eta LES konparaketa [39]. Lizenzia zenbakia irudia erabiltzeko 5963800060851.

5. ONDORIOAK

Nazioarteko itsas garraioak munduko BEGen isurketan duen eragina aztertuta, ezinbestekoa da itsas garraioan aldaketak egitea; BEGak murrizteko irtenbide erakargarriena ordezkoko erregaia erabiltzea da, batez ere H_2 .

H_2 erregai moduan erabiltzeak zentzua dauka, BEGen ikuspuntu bategatik, baldin eta hidrogeno berdea bada, hau da, energia berriztagarrietatik lortua baldin bada. Kasu horretan, karbonorik gabeko erregaia denez, CO eta CO_2 isuriak murriztuko dira. Itsas garraioren kasuan diesel- H_2 ziklo dualeko BEMAk interesa piztu dute, itsas garraioari nahi duten ibilbideak egiteko malgutasuna ematen diotelako, eta aldi berean BEG isuriak murriztu daitezkeelako.

Oraindik, hidrogeno berdea portuetan hornitu ahal izateko, lan handia egin behar da, gaur egun ez baitago azpiegitura sendoa horniketa egonkor bat ziurtatzeko, behintzat portu handienetatik kanpo. Hori dela eta, diesel- H_2 ziklo dualeko BEMAk interes handia sortu dute ikerkuntzaren arloan. H_2 itsasontzietan garraiatzea arazo oso larria da, haren dentsitate energetikoa (kJ/m^3) baxua delako. Adibidez, dieselarekin behar den energia bera hidrogenoaren bidez izateko, itsasontzi batek m^3 gehiago beharko lituzke; beraz, leku gehiago behar da H_2 garraiatzeko. Hori dela eta, interesgarriagoa da NH_3 eramatea eta *cracking* erreaktoreak erabiltzea *carrier* ezberdinetatik H_2 ateratzeko.

Bestalde, H_2 -aren errekuntzak zailtasunak ditu, ikerkuntza-lerro berria delako eta backfire arriskuak, gar tenperatura altuak, auto-pizteak eta detonazioen eragina aztertu beharra dagoelako. Beraz, BEMA batean sar daitekeen H_2 %aztertzeke, H_2 prezioa altua eta H_2 errekuntzak segurtasun aldeetik ekar ditzakeen ondorioengatik, entsegu-bankuan neurketak egiten hasi aurretik, interesgarriagoa da JDK simulazioen bidez azterketa parametrikoak egitea, neurketetan baldintza optimoak ziurtatzeko asmoz.

JDK simulazioak aurrera eramateko software ezberdinak erabil daitezke: esanguratsuenak AVL, ANSYS Forte, eta OpenFoam dira. Ikerkuntza helburuak betetze aldera, ondoriozta daiteke OpenFOAM dela aukerarik onena, ikerkuntzan zein industria-aplikazioetan dohainik erabil daitekeelako. Horrez gain, kode-garapenerako komunitate emankorra dauka: horren adibide da BEMAk simulatzeko liburutegi espezializatua, Lib-ICE [34]. Liburutegi horretan oinarrituta H_2 -diesel ziklo duala simula daiteke erabiltzaileak dituen interes eta berezitasunak kontuan hartuz, software honek ematen duen malgutasunagatik. Kode libre hori erabiltzeak hurrengo urratsak erraztuko ditu, hots, errekuntza modelo berrien garapena, gaur egun garatuta dauden modeloak ez baitaude prestatuta H_2 -aren errekuntza simulatzeko. Ikusi denez, hidrogenoak gar abiadura oso handia du beste erregairekin alderatuta. Horrez gain, difusibitate oso altua dauka, eta $Le=1$ hipotesiak

errore nabarmenak sortzen ditu gaur egungo flamalet errekontza-modeloe-tan. Hortaz, egun Lib-ICE liburutegian dauden modeloak egokitu edo be-riak garatu beharko dira, neurraketa esperimentalekin balioztatuz.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] International Maritime Organization. IMO. Initial IMO Strategy on Reduc-tion of GHG Emissions from Ships. Inf. tec. 2018. url: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDo-cuments/MEPC.304\(72\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDo-cuments/MEPC.304(72).pdf). Eguneratze data: 2024/02/06
- [2] 2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships. <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/2023-IMO-Strategy-on-Red-uction-of-GHG-Emissions-from-Ships.aspx>. Eguneratze data: 2025/01/30
- [3] IMO action to reduce greenhouse gas emissions from international shipping. https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/26620IMO_AC-TION_TO_REDUCE_GHG_EMISSIONS_FROM_INTERNATIONAL_SHIPPING.pdf Eguneratze data: 2024/02/20
- [4] Seyyed Hassan Hosseini *et al.* 2023. «Use of hydrogen in dual-fuel diesel engines». *Progress in Energy and Combustion Science*, **98**, 101100.
- [5] G. NAGARAJAN V. EDWIN GEO y B. NAGALINGAM. 2009. «Experimental In-vestigations to Improve the Performance of Rubber Seed Oil–Fueled Die-sel Engine by Dual Fueling with Hydrogen». *International Journal of Green Energy*, **64**, 343-358.
- [6] N.R. BANAPURMATH, P.G. TEWARI y R.S. HOSMATH. 2008. «Experimental in-vestigations of a four-stroke single cylinder direct injection diesel engine opera-ted on dual fuel mode with producer gas as inducted fuel and Honge oil and its methyl ester (HOME) as injected fuels». *Renewable Energy*, **33**, 2007-2018.
- [7] W. LEE Jolly. Hydrogen. Encyclopedia Britannica. url: <https://www.britan-nica.com/science/hydrogen>. Eguneratze data: 2024/02/06
- [8] YB ZELDOVICH. 1946, «The oxidation of nitrogen in combustion and explo-sions». *Acta Physicochim*, **21**, 577.
- [9] S McALLISTER, J Y CHEN y A C FERNANDEZ-PELLO. 2011. «Fundamentals of Combustion Processes» *Mechanical Engineering Series*. Springer New York.
- [10] PAOLO MAROCCO *et al.* 2023. «Assessment of the role of hydrogen to pro-duce high-temperature heat in the steel industry». *Journal of Cleaner Pro-duction*, **388**, 135969.
- [11] ANDRZEJ GO LDASZ, DOMINIKA MATUSZEWSKA y PIOTR OLCZAK. 2022. «Te-chnical, economic, and environmental analyses of the modernization of a chamber furnace operating on natural gas or hydrogen». *International Jour-nal of Hydrogen Energy*, **47**, 13213-13225..
- [12] MEHMET SALIH CELLEK. 2020. «Flameless combustion investigation of CH₄/H₂ in the laboratory-scaled furnace». *International Journal of Hydrogen Energy*, **45**. 35208-35222.

- [13] ARKADIUSZ JAMROZIK, KAROL GRAB-ROGALIŃSKI y WOJCIECH TUTAK.2020. «Hydrogen effects on combustion stability, performance and emission of diesel engine». *International Journal of Hydrogen Energy*, **45**, 19936-19947.
- [14] MARKUS MAYRHOFFER *et al.* 2021. «Assessment of natural gas/hydrogen blends as an alternative fuel for industrial heat treatment furnaces)). *International Journal of Hydrogen Energy*, **46**, 21672-21686..
- [15] M. RUPEREZ CERQUEDA. El hidrogeno verde, burbuja o una realidad energetica? OBS Business School, 2023. url: https://www.obsbusiness.school/sites/obsbusiness.school/files/media_files/Informe%20OBS%20-%20Hidrogeno%20verde%202023_0.pdf?no_link=1. Eguneratze data: 2024/02/07
- [16] ANNA BILLERBECK *et al.* 2024. «The race between hydrogen and heat pumps for space and water heating: A modelbased scenario analysis». *Energy Conversion and Management*, **299**, 117850..
- [17] R D REITZ *et al.* 2020. «IJER editorial: The future of the internal combustion engine)). *International Journal of Engine Research*, **21**, 3-10..
- [18] ADAM J. GEE *et al.* 2023. «Characterisation of turbulent non-premixed hydrogen-blended flames in a scaled industrial low-swirl burner». *International Journal of Hydrogen Energy*, **49**, 747-757.
- [19] SHIH-CHIEH HSIEH y CHIH-JU G. JOU. 2009. «Using hydrogen-rich multifuel to improve energy efficiency and reduce CO2 emission for high-energy furnace». *Environmental Progress & Sustainable Energy*, **28**, 83-88.
- [20] YAN ZHAO, VINCE McDONELL y SCOTT SAMUELSEN. 2020. «Assessment of the combustion performance of a room furnace operating on pipeline natural gas mixed with simulated biogas or hydrogen». *International Journal of Hydrogen Energy*, **45**, 11368-11379.
- [21] DINDHA ANDRIANI y YUSUF BICER. 2023, «A Review of Hydrogen Production from Onboard Ammonia Decomposition:Maritime Applications of Concentrated Solar Energy and Boil-Off Gas Recovery». *Fuel*, **352**, 128900.
- [22] ELSAYED ABDELHAMEED e HIROSHI TASHIMA. 2023. «Experimental study on the effects of methane-hydrogen jet as direct injected fuel in marine diesel engine». *Energy*, **267**, 126569..
- [23] RAM NARAYAN BHAGAT *et al.* 2023. «A review of performance and emissions of diesel engine operating on dual fuel mode with hydrogen as gaseous fuel». *International Journal of Hydrogen Energy*, **48**, 27394-27407.
- [24] MADHUJIT DEB *et al.* 2015. «An experimental study on combustion, performance and emission analysis of a single cylinder, 4-stroke DI-diesel engine using hydrogen in dual fuel mode of operation». *International Journal of Hydrogen Energy*, **40**, 8586-8598.
- [25] H. AN *et al.* 2013. «A numerical study on a hydrogen assisted diesel engine». *International Journal of Hydrogen Energy*, **38**, 2919-2928.
- [26] H. AN *et al.* 2014. «Numerical investigation on the combustion and emission characteristics of a hydrogen assisted biodiesel combustion in a diesel engine». *Fuel*, **120**, 186-194.

- [27] Y. KARAGÖZ *et al.* 2015. «Engine performance and emission effects of diesel burns enriched by hydrogen on different engine loads». *International Journal of Hydrogen Energy*, **40**, 6702-6713..
- [28] H. KOTEN. 2018. «Hydrogen effects on the diesel engine performance and emissions». *International Journal of Hydrogen Energy*, **43**, 10511-10519.
- [29] N. SARAVANAN y G. NAGARAJAN. 2010. «Performance and emission studies on port injection of hydrogen with varied flow rates with Diesel as an ignition source». *Applied Energy*, **87**, 2218-2229.
- [30] KUN LUO *et al.* 2019. «Level set method for atomization and evaporation simulations». *Progress in Energy and Combustion Science*, **73**, 65-94.
- [31] <https://www.avl.com/en/simulation-solutions/ice-simulation>. Eguneratze data: 2024/02/08
- [32] <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-forte>. Eguneratze data: 2024/02/08
- [33] <https://www.openfoam.com/>. Eguneratze data: 2024/02/08
- [34] <http://www.engines.polimi.it/research/index.php.html> Eguneratze data: 2024/02/08
- [35] NORBERT PETERS. 2000. *Turbulent Combustion*. Cambridge Monographs on Mechanics. Cambridge University Press.
- [36] N. PETERS. 1984. «Laminar diffusion flamelet models in non-premixed turbulent combustion». *Progress in Energy and Combustion Science*, **10**, 319-339.
- [37] WANG HAN *et al.* 2021 «Thermal and chemical effects of differential diffusion in turbulent non-premixed H2 flames». *Proceedings of the Combustion Institute*, **38**, 2627-2634.
- [38] ARNE SCHOLTISSEK *et al.* 2015. «A multi-scale asymptotic scaling and regime analysis of flamelet equations including tangential diffusion effects for laminar and turbulent flames». *Combustion and Flame*, **16**, 1507-1529.
- [39] ALASTAIR G *et al.* 2015 « LES and RANS of air and oxy-coal combustion in a pilot-scale facility: Predictions of radiative heat transfer». *Fuel*, **151**, 146-155.