

# Olatu-kanal baten balioztatze esperimental eta konputazionala

(Experimental and computational validation of a wave flume)

*Iñigo Bidaguren\**, *Urko Izquierdo*, *Lander Galera*, *Iñigo Albaina*,  
*Gustavo Adolfo Esteban*, *Ander Aristondo*, *Alberto Peña*, *Jesús María Blanco*

Ingeniaritza Nuklearra eta Jariakinen Mekanika Saila, Bilboko Ingeniaritza Eskola, UPV/EHU

**LABURPENA:** BiMEP-Biscay Marine Energy Platform- eta Mutriku Wave Energy Plant-eko azpiegiturretan itsas energiaren inguruko ikerkuntza egiten da, itsas baldintza errealean. Bilboko Ingeniaritza Eskolako Fluidoaren Mekanikako laborategian dagoen olatu-kanala ( $12.5 \times 0.6 \times 0.7$  m, luzera  $\times$  zabalera  $\times$  sakonera) azpiegitura horietan izaten diren baldintzak erreproduzitzeko gai da, eskala txikiago batean. Olatu-kanal horrek, pistoi motako olatu-sorgailu bat erabiliz, olatu monokromatikoa eta pankromatikoa mota desberdinekin lan egiteko aukera eskaintzen du. Ultrasoniak erabiltzen dituzten zenbait zundak ur-gainazalaren desplazamendu bertikala neurtzen dute, eta tankearen amaieran kokatuta dagoen hondartzak, parabola-formadunak, olatuaren energia disipatzen du horren islapena murriztuz. «Reynolds Averaged Navier Stokes» (RANS) ekuazioetan oinarritutako zenbakizko modelo bat sortu da Star-CCM+ kode komertziala erabiliz, gainazal askean gertatzen diren fenomenoak simulatzeko. Zenbakizko modelo horren balioztatzea aurkezten da artikulu honetan, sakonera, olatu-altuera, uhin-luzera eta periodo desberdinak bateratuta eta egindako esperimentu sortarekin konparatuta. Emaitza guztiak fluxu potentzialaren teoriatik lortutako emaitza analitikoekin batera aztertuko dira. Lan honetan aurkezten diren esperimentuek kanal horren eraginkortasunaren mugak ezartzen dituzte, olatuen soruntzari, hedapenari eta suntsipenari dagokienez. Etorkizunean egingo diren ikerkuntza-lanetako parametroak ezartzeko ere balioagarria izan da lan hau: egitura flotagarrien eta olatuen arteko interakzioa, olatu energiaren bihurtgailuak eta ainguratze- eta amarradura-sistemak aztertuko dira.

**HITZ GAKOAK:** olatu-kanala, zenbakizko olatu-kanala, olatuen balioztatzea, BiMEP, itsas energia berriztagarriak.

**ABSTRACT:** A wave flume of  $12.5 \times 0.6 \times 0.7$  m (length  $\times$  width  $\times$  height) able to reproduce the ocean conditions of the most representative research facilities in the Basque Country (BiMEP-Biscay Marine Energy Platform and Mutriku Wave Energy Plant) has been installed at the laboratory of Fluid Mechanics of the Faculty of Engineering in Bilbao. This new facility has the capacity of producing a wide range of monochromatic and panchromatic waves by a piston-type wavemaker. Several ultrasonic wave probes measure the surface elevation, and the wave energy is dissipated in a passive parabolic beach in order to diminish significantly the reflection along the flume. A numerical model based on Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS) equations has been developed to represent the turbulence and Eulerian Volume of Fluid (VOF) unsteady approach in STAR-CCM+ CFD code to track the evolution of the free surface. This numerical model has been validated with the corresponding experimental campaign covering a wide range of depths, wave heights, wavelengths and periods. The results are analysed together with the analytical solution coming from the potential flow theory. The experiments carried out in the present work establish the operational limits of the wave flume in terms of wave generation, propagation and extinction, defining the operational range of future experimental and computational campaigns where wave interaction with floating structures, wave energy converters and mooring systems will be studied.

**KEYWORDS:** wave flume, numerical wave flume, wave characterization, BiMEP, renewable marine energy.

\* **Harremanetan jartzeko / Corresponding author:** Iñigo Bidaguren, Ingeniaritza Nuklearra eta Jariakinen Mekanika Saila, Bilboko Ingeniaritza Eskola, UPV/EHU. Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU), S Torres Quevedo Enparantza 1 - 48013 Bilbo, Bizkaia. Euskal Herria. – i.bidaguren@ehu.eus – <https://orcid.org/0000-0001-5180-6686>.

**Nola aipatu / How to cite:** Bidaguren, Iñigo; Izquierdo, Urko; Galera, Lander; Albaina, Iñigo; Esteban, Gustavo Adolfo; Aristondo, Ander; Peña, Alberto; Blanco, Jesús María (2020). «Olatu-kanal baten balioztatze esperimental eta konputazionala»; *Ekaia*, ale berezia 2020, 95-107. (<https://doi.org/10.1387/ekaia.21107>).

Jasoa: 24 iraila, 2019; Onartua: 11 azaroa, 2019

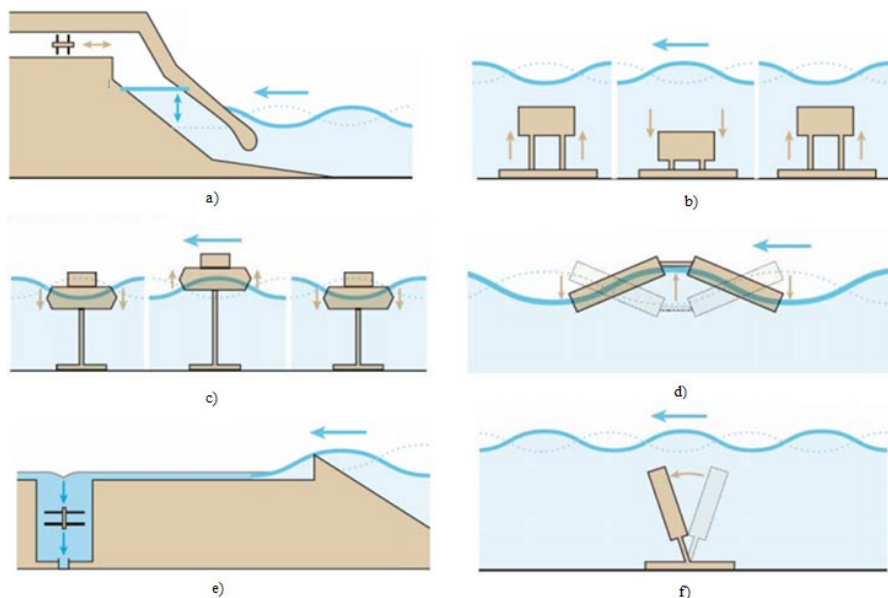
ISSN 0214-9001 - eISSN 2444-3255 / © 2020 UPV/EHU



Obra hau Creative Commons Atribución 4.0 Internacional-en lizentziapean dago

## 1. SARRERA

Energia-iturri berriztagarri eta jasangarrien erabilera dela eta, ar-  
dura handia dago gaur egun. Energia ekoizteko dauden aukera guztien ar-  
tean gutxi batzuek bakarrik betetzen dute esanahi biak: berriztagarria (be-  
rriztu daitekeena) eta jasangarria (epe luzera erabili daitekeena iturria  
agortu gabe edo ingurumenari kalte larriak eragin gabe) [1]. 2018. urtean  
mundu osoan sortutako elektrizitatearen % 26 iturri berriztagarrietatik eto-  
rri zen [2]. Energia berriztagarrien artean, itsas energiak (mareak, olatuak,  
itsas korronteak eta itsas aerosorgailuak) 42.619 GWh sortu zituen 2016an,  
19.252 MW potentzia instalatua izanik [3]. Sortutako energia horren % 97  
itsas aerosorgailuei dagokien arren, itsas olatuen energia ere etorkizun han-  
diko aukera bat da [4, 5], aipatutako baldintzak, berriztagarritasuna eta ja-  
sangarritasuna, betetzen baititu. Olatu-energiaren potentziala erraldoia da,  
eta energia garbi, seguru eta epe luzerakoa bermatzen du. Azpimarragarria  
da nola herrialdeen, politikarien, industriaren eta, noski, zientziaren inte-  
resa handitzen ari den energia-iturri horren inguruan. Egun, garapen tekno-  
logikoan dago kokatuta arreta, olatu-energiaren bihurgailu (OEB) eragin-  
korrenaren bila [6].



**1. irudia.** Olatuen energia sortzeko oinarritzko sorgailuak: a) ur-zutabe oszila-  
korra, b) Arkimedesen efektua, c) Gorputz flotatzailea erreferentzia finkoarekin,  
d) Gorputz flotatzailea erreferentzia mugikorrarekin, e) Gainezkabidea, f) Egitura  
oszilakorra.

Momentu honetan, printzipio fisiko ezberdinetan oinarritutako zenbait gailuren saiakuntzak (1:1 eskalan) egiten ari dira itsaso zabalean kokatutako instalazioetan [7]. Oinarri fisiko askoren artean, 1. irudian agertzen diren ideiak dira orokorrean erabiltzen ari direnak. Hala ere, oraindik lan handia dago, etengabea, laborategi-mailako ikerkuntzan gailu horien eraginkortasuna aztertzeke eta hobetzeko.

Itsas olatuez baliatzen diren energia-iturrien ikerkuntzan, teknologia-heldutasun maila (THM) baxuekin ari garenean (1 eta 4 artean), bi tresna erabiltzen dira batez ere: (i) simulazioak eta (ii) olatu-kanaletan edo -andeleatan egindako saiakuntzak. Lehenengok zenbakizko metodoak erabiltzen dituzte gertatzen diren fenomeno fisikoak gidatzen dituzten ekuazioak ebazteko. Nabarmendu beharra dago [8]-n proposatzen den teknologiaren garapenaren ibilbidea THM eta teknologia-jarduera mailaren (TJM) mendekotasuna. Beraz, [9]-n azaldu bezala, THM altuagoetara jo baino lehen, aurretik TJM altuagoa lortzea komenigarria izan daiteke, fidagarritasun handiko zenbakizko modeloak erabiliz, adibidez. Lan honetan fluidoaren dinamika konputazionala (ingelesez, CFD) erabili da (aurrerago azalduko dira erabilitako xehetasun gehiago). Honela, lan-baldintza, itsaso-egoera eta gailu ezberdinen ia mugarik gabeko azterketa egin daiteke kostu erlatibo baxu batekin. Bigarrenek, hau da, olatu-kanaletan edo -andeleatan egindako saiakuntzek, olatuak sortzeko eta haien garapena eta ondorioak aztertzeke gai diren instalazioak erabiltzen dituzte, non, orokorrean, eskala txikiago baten egiten diren saiakuntzak. Horretarako, Keulegan-Carpenter antzekotasuna ezartzen da normalean, itsasoan jarriko diren gailuen maketen eta olatuen arteko efektuak erreproduzitzeko. Antzekotasun-baldintza hori Froude-ren eta Strouhal-en zenbakien aldibereko antzekotasuna betetzearen baliokidea da. Bi tresnak (simulazioak eta olatu-kanaletan saiakuntzak) proiektuen hastapenetan erabiltzen dira, denbora zein dirua aurrezteko, eta diseinuaren inguruan egon daitezkeen zalantzak argitzeko. 1:1 eskalako portaera ikusi nahi denez, ordenagailuan sortutako modelo konputazionala eskala txikian egindako saiakuntza esperimentalekin balioztatzen da. Kostu aldetik oso eraginkorra da. Gerora, modeloa fidagarria denean, eskala handiago batan simulatzeko prest egongo gara, antzekotasun-baldintzak erabiliz [10]. Beraz, CFD teknikak erabili ahal izango dira OEB bat benetako eskalan aztertzeke, eta, horrela, gailuaren optimizazioan lan egin daiteke, haren fabrikaziora iritsi baino lehen.

Zenbait unibertsitatek eta ikerkuntza-zentrok eraiki dituzte beren laborategietan olatu-kanalak edota -andelak, itsasoko energia-iturri berriztagarrien garapena bultzatzeko; horrek instalazio mota hauen garrantzia adierazten du. Lisboako Instituto Superior Tecnico-n, adibidez, OEBetan erabiltzeko aire-turbina birradiala diseinatu eta frogatu dute. Ondoren, itsasoan benetako eskalan izan duen portaera BIMEPen [11] ikusi da

duela gutxi. Horrez gain, beste zenbait lan egin dira ur-zutabe oszilakorreko OEBen inguruan, [12-15] adibidez. Aalborg Unibertsitatean, olatuekin interakzioan jarduten duten egitura flotagarrien amarraduren diseinua, azterketa eta optimizazioa egin da [16]. Laborategi berean, OEB eta haize-turbina flotagarrien hidrodinamikaren modelizazio numeriko eta esperimentalak ere egin da [17]. UCC-University College Cork, LABIMA Maritime Engineering Laboratory eta École Centrale Nantes-eko SEMREV ari dira, beste askoren artean, olatu-kanalak edota -andelak erabiltzen, energia berriztagarriaren sorkuntzan ikerkuntza-lan garrantzitsuak aurrera eramateko.

Artikulu honetan, Euskal Herriko Unibertsitateko Bilboko Ingeniari-tza Eskolan, Fluidoek Mekanikako laborategian jarritako olatu-kanalaren karakterizazioa eta balioztatzea aurkeztuko dira. Hau da, alde batetik, kanal horretan olatu desberdinak egiteko ahalmenaren azterketa, Le Mehaute grafikoen deskribatzen diren limiteen arabera [18]; beste alde batetik, sortutako olatuak simulatzeko gai den modelo konputazionalaren balioztatzea, eta, azkenik, emaitza esperimental, konputazional eta teorikoen (olatu-teoriaren arabera) konparaketa hirukoitza. Beraz, lan honetan, kanalean sor daitezkeen olatuak simulatzeko ahalmena eta olatu-teoriarekin duten elkarrekotasuna aurkeztu dira.

## **2. OLATU-KANAL ESPERIMENTALA (OKE)**

Kanalean olatuak sortzeko Delta-ASDA software komertziala erabiltzen da; Delta AC (ASDA-A2 seriekoa) serboeragingailua eta serbomotorra kontrolatzen ditu. Serbomotorra, K serieko eragingailu lineal bati dago lotuta (KM60-10), zeinek uretan partzialki murgilduta dagoen pala bati eragiten dion. Beraz, serbomotorraren mugimendu birakorra palaren desplazamendu lineal batean eraldatzen da, olatuak sortzeko erabiltzen den desplazamenduan, hain zuzen ere. Softwareak mugimendu azeleratu-dezeleratu sinusoidal bat agintzen dio palari olatuak sortzeko. Ur-gainazaleko mugimenduaren datuak jasotzeko bi zunda ultrasoniko erabiltzen dira (Pepperl+Fuchs UC500-L2-I-V15 modelo), eta horiek, espresuki LABVIEW-n [19] sortutako programa batek kontrolatzen ditu. Programa horrek ur-gainazal askearen desplazamendua ( $\eta$  [m]) denboraren mende ( $t$  [s]) jasotzen du, datuak jasotzen diren denbora-tartea  $\Delta t = 10$  [ms] izanik. Deskribatutako ekipamenduaren ezaugarri nagusiak 1. taulan zehazten dira:

**1. taula.** Serbomotorraren (goian), eragingailu linealaren (erdian) eta zunda ultrasonikoen (behean) ezaugarri nagusiak.

ASDA-A2 serbomotorra (ECMA-C2080-7RS)					
Potentzia (kW)	Momentua (N·m)	Momentu maximoa (N·m)	Abiadura (bira/min)	Abiadura maximoa (bira/min)	Errotorearen inerti momentua ( $\cdot 10^{-4}\text{kg}\cdot\text{m}^2$ )
0,75	2,39	7,16	3000	5000	1,13
Eragingailu lineala (KM60-10)					
Markoaren neurria (mm)	Torloju aitzinamendua (mm)	Indar maximoa (kN)	Abiadura, bira/min maximoetara (mm/s)	Karga dinamikoa (kN)	Momentu maximoa sarreran (N·m)
60	10	3,0	833	6,8	6
Zunda ultrasonikoak (UC500-L2-I-V15)					
Balio-tartea (mm)	Eremu itsua (mm)	Bereizmena (mm)	Erantzun-atzerapena (ms)	Tentsioa (V DC)	Irteera mota (mA)
35-500	0-35	Ebaluazio-tartea/3200	50	10-30	4-20

Delta-ASDA softwarea erabiliz, palaren anplitudea ( $A_p$  [m]) eta periodoa ( $T$  [s]) zehaztu daitezke palaren desplazamendua sortzeko. Informazio horrekin eta erabilitako ur-sakonerarekin, sortutako olatuen ezaugarriak bereiz daitezke: olatuaren abiadura ( $c$  [m/s]), uhin-luzera ( $\lambda$  [m]), periodoa ( $T$  [s]) eta altuera ( $H$  [m]). Bai laborategiko esperimenduak bai ordenagailuan egindako simulazioak ur-sakonera ( $h$  [m]) desberdinekin egin dira ( $h$  [m] = 0,3, 0,4 eta 0,5), pistoi motako olatu sorgailua anplitude eta periodo desberdinekin lan eginez ( $1,0 < A_p$  [mm]  $< 54,0$  eta  $0,87 < T$ [s]  $< 2,02$ , hurrenez hurren).

Esperimenduak egiteko erabilitako OKEaren luzera 12,5 m da, zabalera 0,60 m eta sakonera 0,70 m. Egitura altzairu herdoilgaitzez egindakoa da eta kanalaren paretak tenplatutako kristalezkoak. Lehen zunda olatu-sorgailutik 6,0 m-ra kokatuta dago; puntu horretan olatua guztiz garatuta dagoela onar daiteke. Hurrengo zunda aurretik 30 cm-ra jarri da, [20]-n deskribatzen diren irizpideen arabera. Kanala hiru atal desberdinetan bereiz daiteke: olatuen sorgailua, olatuen hedapen-eremua eta olatuen suntsipen-eremua. Azken hau forma parabolikoa eta 1,5 m-ko luzera dituen hondartza bat da, eta bere altuera eta angelua doitzeko aukera ematen du.



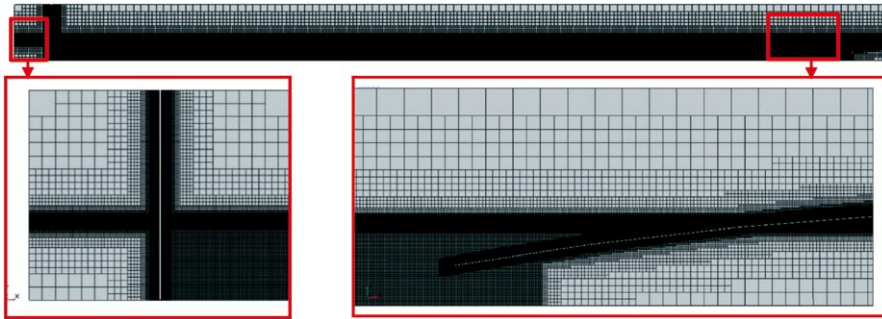
**2. irudia.** Goian OKEaren eskema goitik ikusita. Erdian: OKEaren ikuspegi orokorra. Behean (ezkerretik eskuinera): olatu-suntsipenerako sistema, zunda ultrasonikoak eta pistoi-motako olatu-sorgailua.

### 3. ZENBAKIZKO OLATU-KANALA (ZOK)

Efektu fisikoak bi dimentsioko (2D) modelo konputazional batekin simulatu dira (softwarea: STAR CCM+ v12.06), sakoneraren arabera neurri desberdinetako elementuak erabiltzen dituen sare bat erabiliz. Sarearen hiru bolumen bereizi dira: olatu-sorgailuaren inguruko bolumena, hondartzaren ingurukoa eta ur-gainazal askearen ingurukoa. Eremu horietako fisika hobeto zehazteko zelda txikiagoak erabili dira. Palaren mugimendua simulatzeko eta gainazal askearen mugimendua jasotzeko erabiltzaileak sortutako funtzioak programatu dira.

ZOKak eta OKEak geometria berdin-berdina dute, OKEaren simulazioa egin ahal izateko eta ZOKaren balioztatzea lortzeko (ikusi 3. irudia). Simulazioa egiteko erabili diren modelo fisikoen artean honakoak aipatu beharra dago:  $k-\epsilon$  turbulenzia-modeloa, denborarentzako eskema implizitu iragankorra eta aire- eta ur-faseen elkarrekintza kontuan hartzen duen *Volume of Fluid* (VOF) modeloa [21]. Honekin batera, aztertutako kasu bakoitzaren arabera, sarea egokitu da. Esan bezala, palan, gainazal askean eta hondartzan elementuen tamaina txikiagoa erabili da (2,7, 3,3 eta 1,5 mm-koa, 0,3, 0,4 eta 0,5 m-ko sakoneretarako, hurrenez hurren). Beste eremuetan elementuen tamaina handiagoa izan da. Horrela, 0,3 m-ko sakone-

ran, sareak 328.297 elementu ditu; 0,4 m-koan, 389.292, eta 0,5 m-koan, 788.005.



**3. irudia.** Goian: ZOKaren ikuspegi orokorra,  $h = 0,3$  m-rako sare konputazionala. Behean: garrantziko eremuen xehetasuna: pala (ezkerrean) eta hondartza (eskuinaldean).

Olatu-kanalaren atalik garrantzitsuenetariko bat palaenez, honen inguruko sarearen azterketa sakonagoa egin da. Gainazal horren  $y^+$ -a begiratu da, eta 2. taulan aurkezten diren balioak lortu dira, palarekin kontaktuan dagoen fluidoaren arabera (airea, ura, gainazal askea):

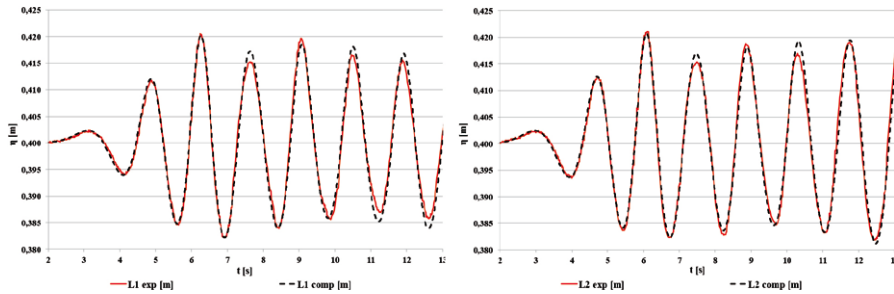
**2. taula.** Hormaren  $y^+$  balioen tarteak.

Hormaren $y^+$ balioen tarteak	
Elementuen itxura erlazioa	0,78-0,95
Hormaren $y^+$ (Airearekin)	0,05-1,00
Hormaren $y^+$ (Urarekin)	0,7-4,0
Hormaren $y^+$ (Gainazal askearekin)	4-18

#### 4. EMAITZAK

Egindako esperimentu sorta Le Méhauté-ren grafikoan oinarrituz zehaztu da. BiMEP eta IH Cantabriak [22]-n argitaratu duten bezala, BiMEP itsas zabaleko instalazioan izaten diren itsas baldintzak Airy-k garatutako teoria lineala [23] eta Stokes-ek garatutako teoria ez-lineala [24] erabiliz deskriba daitezke; kasu bietan, ur-sakonera ertaineko eta handiko eremuetan. Hala ere, lan honetan aurkezten diren emaitzek ez dituzte BiMEPeko itsas baldintzak bakarrik betetzen, baizik eta eremu lineal eta ez-linealaren barruan gertatzen diren beste itsas baldintza batzuk ere. Behin esperimentu baten ur sakonera finkatzen denean,  $T$  eta  $A_p$  kalkulatu dira,

horiek baitira esperimentu bakoitzeko aldagaiak. Bai esperimentalki zein simulazioetan lortutako ur-gainazalaren desplazamenduko emaitzak denborearen mendekoak dira. 4. irudian, OKEa eta ZOKa erabiliz lortutako gainazal askearen desplazamenduaren konparaketa aurkezten da.



**4. irudia.** Esperimentuan eta simulazioan, zundek jasotako gainazal askearen desplazamenduaren konparaketa. Ezkerrean, lehengo zunda (L1), eta eskuinean, bigarrena (L2). Baldintzak:  $h = 0,40$  m,  $A_p = 39,9$  mm eta  $T = 1,43$  s.

4. irudian ikus daitekeen bezala, OKEa eta ZOKa erabiliz lortu diren emaitzak bat datoz bata bestearekin. Ez da desfaserik atzematzen haien artean, eta hori adierazgarri da periodoa eta hedapen-abiadura konstante mantendu direla. Beraz, emaitza arrakastatsuak lortu dira gainazal askearen desplazamenduari dagokionez. Datu guztiak Matlab R2019a erabiliz prozesatu dira. Gainazal askearen desplazamenduaren profilak teoria linealaren edo Stokes-en (2. mailakoa) teoriaren arabera doituak izan dira, eta olatuaren hedapen abiadura  $c$ ,  $\lambda$ ,  $T$  eta  $H$  lortu. Teoria horiek honela definitzen dira:

$$\eta(x,t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t), \quad (2)$$

$$\eta(x,t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) + k \left( \frac{H}{2} \right)^2 \frac{1}{\tanh(kh)} \left( 1 + \frac{3}{2 \sinh^2(kh)} \right) \cos(2kx - 2\omega t) \quad (3)$$

Olatu-profil bakoitza zehazten duten parametroak 3. taulan bilduta daude, non  $H$ ,  $T$ ,  $\lambda$  eta  $c$ -ren balioztatzearen errore erlatiboa eta errore erlatibo teorikoa horrela definitzen diren:

$$x_{errorea} = \frac{X_{esp} - X_{komp}}{X_{esp}} \cdot 100, \quad (4)$$

$$x_{errorea} = \frac{X_{teor} - X_{komp/esp}}{X_{teor}} \cdot 100. \quad (5)$$

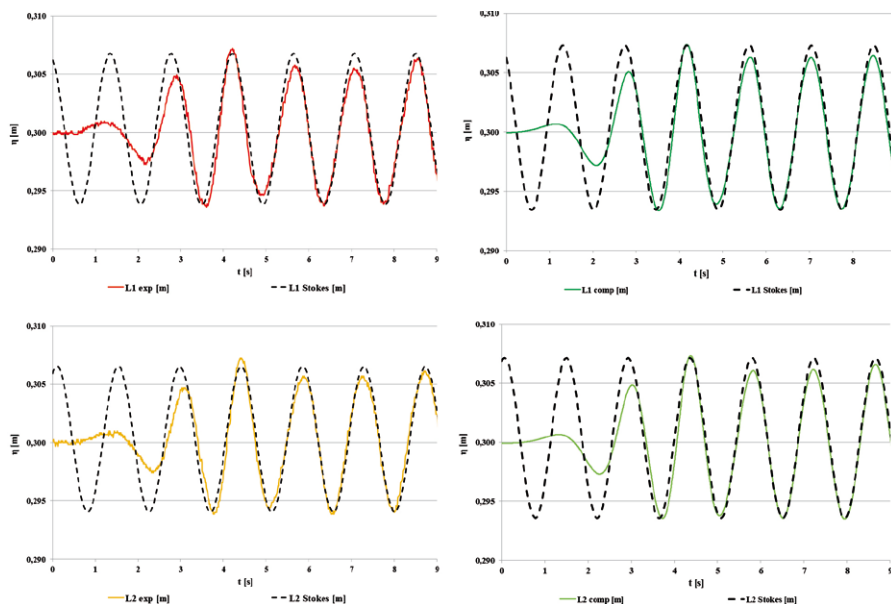


**3. taula.** Palaren mugimenduaren deskribapena. Esperimentalki eta konputazionalki sortutako olatuen ezaugarriak eta balioztatzearen erroreak. OKEaren eta ZOKaren erroreak olatu teorigoaren arabera.

Lineala/ Stokes	OKE/ ZOK	Palaren mugimendua				Lortutako olatu-parametroak balioztatze-errore erlatiboak							Errore erlatiboak olatu-teorikoarekin konparatuz			
		h [m]	A <sub>p</sub> [m]	T <sub>plata</sub> [s]	H [mm]	H <sub>errorea</sub> [%]	T [s]	T <sub>errorea</sub> [%]	λ [m]	λ <sub>errorea</sub> [%]	c [m/s]	c <sub>errorea</sub> [%]	H <sub>errorea</sub> [%]	T <sub>errorea</sub> [%]	λ <sub>errorea</sub> [%]	c <sub>errorea</sub> [%]
Stokes	Esp	0,30	0,001	0,87	11,1	-0,8	0,87	-0,3	1,10	2,3	1,27	-0,8	25,9	0,4	1,6	0,1
	Komp				11,2		0,87		1,07		1,28		25,3	0,2	3,8	-0,7
Stokes	Esp	0,30	0,018	1,43	13,7	0,6	1,44	0,8	2,14	0,5	1,58	0,5	8,8	-0,6	2,9	-2,5
	Komp				13,6		1,42		2,13		1,58		5,3	0,2	3,4	-1,9
Stokes	Esp	0,30	0,030	1,24	27,6	5,1	1,24	0,8	1,76	-1,1	1,53	1,4	7,9	-0,6	4,2	-2,9
	Komp				26,2		1,23		1,78		1,51		12,6	0,2	3,1	-1,4
Stokes	Esp	0,40	0,040	1,43	38,1	0,5	1,42	-0,1	2,44	2,4	1,72	-1,4	4,8	0,3	0,7	-0,1
	Komp				37,9		1,43		2,38		1,75		5,2	0,1	3,0	-1,5
Airy	Esp	0,40	0,006	1,43	5,6	-2,9	1,42	-0,2	2,41	0,2	1,73	-0,3	7,0	0,3	2,0	-0,8
	Komp				5,7		1,43		2,40		1,74		4,3	0,0	2,2	-1,1
Airy	Esp	0,40	0,006	2,02	3,9	-4,2	2,03	0,9	3,91	-2,4	1,80	2,7	3,1	-0,6	-4,7	2,8
	Komp				4,0		2,01		4,00		1,75		-0,9	0,3	-7,2	5,5
Airy	Esp	0,50	0,003	1,73	2,9	-2,5	1,75	1,3	3,52	4,1	1,95	-1,2	2,1	-1,1	-3,4	0,9
	Komp				3,0		1,73		3,38		1,97		-0,3	0,2	0,8	-0,3
Stokes	Esp	0,50	0,052	1,43	57,6	0,1	1,43	-0,4	2,64	-1,6	1,85	0,3	4,0	0,0	-0,1	0,1
	Komp				57,5		1,43		2,69		1,84		4,1	-0,4	-1,7	0,4
Stokes	Esp	0,50	0,054	1,64	52,6	-1,5	1,62	-1,2	3,24	3,6	1,89	-3,3	-0,1	1,2	-2,2	2,4
	Komp				53,5		1,64		3,12		1,95		-1,6	0,0	1,5	-0,8

3. taulan ikusten den bezala simulazio eta esperimenteren arteko emaitzen korrelazioa oso ona da. Esperimenteren balioztatzearen erroreak % 5 baino txikiagoak dira; aldiz, errore nabarmenak agertu dira olatu-altuera teorikoekin konparatuta. Hori aurreko lan batean ere [25] hauteman zuten egileek. Taulan agertzen diren parametroak, periodo txikiak, olatu-altuera txikiak edo itsaso-baldintzak sakonera handiko olatuen eremuaren muga ( $h/\lambda > 0,5$ ) neurtzen dira orokorrean.

Behin parametro guztiak kalkulaturik, seinale teorikoa marraztea posible da, (2) eta (3) ekuazioen arabera. Hauek seinale esperimenterekin eta konputazionalarekin aldera daitezke 4. irudian ikus daitezkeen moduan.

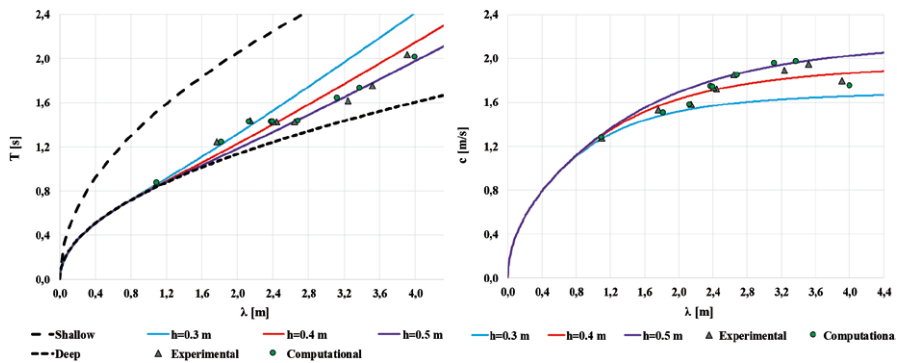


**5. irudia.** Esperimenterekin (ezkerra) eta konputazionalarekin (eskuina) neurtutako gairazal askearen bilakaerak, L1 (goian) eta L2 (behean), bigarren mailako (Stokes) adierazpenarekin doituak. Baldintzak:  $h = 0,30$  m  $A_p = 17,7$  mm eta  $T = 1,43$  s.

6. irudian T-ren eta c-ren emaitzak aurkezten dira  $\lambda$ -ren mende, esperimenterekin eta zenbakizko simulazioetatik lortutako datuekin, aipatutako Airy-ren eta Stokes-en olatu-teorietatik,  $\lambda$ , T eta h erlazioatuz:

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right), \quad (6)$$

$$c = \frac{gT}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right) = \frac{\lambda}{T} \quad (7)$$



**6. irudia.** Emaizta esperimentalak eta konputazionalak olatuen uhin-luzeraren mende, periodoaren arabera (ezkerrean) eta hedapen-abiaduraren arabera (eskuinean).

6. irudian ikustenenez, OKEaren eta ZOKaren arteko emaitzak oso antzekoak dira. Horrez gain, emaitza teorikotik oso hurbil agertzen dira.

## 5. ONDORIOAK

Euskal Herriko Unibertsitatean, Bilboko Ingeniaritza Eskolako Jaria-kinen Mekanikako laborategian instalatuta dagoen olatu-kanala itsaso-baldintza desberdinetan esperimentuak egiteko diseinatuta dago. Orokorrean olatuekin eta itsasoarekin elkarrekintza duten egiturak eta gailuak eskala txikian probatzeko dago diseinatuta. Itsas energia berriztagarriei dagokienez, Euskal Herrian badago non probatu eta ikertu, itsasoaren baldintza errealean, itsas energiaren bihurtgailuak. Lan honetan aurkeztu den olatu-kanalak horrelako egituretan izaten diren itsas baldintzak erreproduzitu ditzake, laborategi-ekalan. Ezaugarri horiek instalazio paregabe bihurtzen dute olatu-kanala THM baxua duten eskala txikiko prototipoak ikertzeko, probatzeko eta ondorioak lortzeko.

Artikulu honetan aurkeztu diren emaitzek kanalak esperimentu desberdinek behar dituzten baldintzetara egokitzeko duen gaitasuna egiaztatzen dute. Honez gain, esperimentu horiekin, simulazioetan errepikatze ahalmena erakusten da; horrek itsas energia berriztagarriei erlazioa duten azterketa anitz egiteko aukera ematen du.

Etorkizun hurbilean olatu-kanalaren hondartzaren islapena aztertuko da, eta haren koefizienteak lortuko, M. Isaacson *et al.*-ek [20]-n azaltzen duten moduan. Islapenaren azterketa abiapuntu bat izango da beste ikerkuntza batzuk egiteko: flotatzen duten egituren hidrodinamika edo haien ainguratzeko-sistemak, besteak beste.

## 6. ESKER ONAK

Egileek Eusko Jaurlaritzari eskertu nahi diote KK-2016/00031 proiektuan jasotako babeseta eta IT1314-19 ikerkuntza-taldea sustatzea. UPV/EHUri ere eskerrak eman nahi dizkiote, PES17/25 proiektuagatik eta IZO-SGI SGIker sailari eskaini dion laguntza guztiagatik. Eskerrak, baita ere, Europako erakundeek emandako dirulaguntzagatik (ERDF eta ESF) eta Davidi (Mecánica Moderna S.A.).

## 7. BIBLIOGRAFIA

- [1] DINCER I. 2000. «Renewable energy and sustainable development: a crucial review». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **4**, 157-175.
- [2] ENERDATA, 2019. «Global Energy Statistical Yearbook». *Enerdata*.
- [3] IRENA (International Renewable Energy Agency), 2018. «Capacity and Generation (Statistics Time Series)».
- [4] LENEÉ-BLUHM P., PAASCH R., ÖZKAN-HALLER H.T. 2011. «Characterizing the wave energy resource of the US Pacific Northwest». *Renewable Energy*, **36**, 2106-2119.
- [5] BARSTOW S, GUNNAR M, MOLLISON D, CRUZ J. 2008. *The wave energy resource*. Cruz J. (eds.) Ocean Wave Energy. Green Energy and Technology (Virtual Series). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [6] FALNES J. 2007. «A Review of Wave-Energy Extraction». *Marine Structures*, **20**, 185-201.
- [7] FALCÃO AFO. 2010 «Wave Energy Utilization : A Review of the Technologies». *International Journal of Marine Energy*, **14**, 899-918.
- [8] WEBER J. 2012. «WEC Technology Readiness and Performance Matrix-finding the best research technology development trajectory». *Int. Conf. Ocean Energy, Dublin Ireland*.
- [9] PENALBA M, DAVIDSON J, WINDT C, RINGWOOD JV. 2018. «A high-fidelity wave-to-wire simulation platform for wave energy converters: Coupled numerical wave tank and power take-off models». *Applied energy*, **226**, 655-669.
- [10] FALCÃO AFO eta HENRIQUES JCC. 2014. «Model-Prototype Similarity of Oscillating-Water-Column Wave Energy Converters». *International Journal of Marine Energy*, **6**, 18-34.
- [11] CARRELHAS AAD, GATO LMC, HENRIQUES JCC *et al.* 2019. «Test Results of a 30 kW Self-Rectifying Biradial Air Turbine-Generator Prototype». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **109**, 187-198.
- [12] RIBEIRO S, SILVA E, GOMES RPF *et al.* 2016. «Hydrodynamic Optimization of the UGEN: Wave Energy Converter with U-Shaped Interior Oscillating Water Column». *International Journal of Marine Energy*, **15**, 112-126.

- [13] HENRIQUES JCC, LOPES MFP, GOMES RPF *et al.* 2012 «On the Annual Wave Energy Absorption by Two-Body Heaving WECs with Latching Control». *Renewable Energy*, **45**, 31-40.
- [14] LOPES BS, GATO LMC, FALCÃO AFO *et al.* 2018. «Test Results of a Novel Twin-Rotor Radial Inflow Self-Rectifying Air Turbine for OWC Wave Energy Converters». *Energy*. **170** p.869-879.
- [15] HENRIQUES JCC, GATO LMC, GOMES RPF *et al.* 2015. «Latching Control of a Floating Oscillating-Water-Column Wave Energy Converter». *Renewable Energy*. **90**, 229-41.
- [16] ZANUTTIGH B, ANGELELLI E eta KOFOED JP. «Effects of Mooring Systems on the Performance of a Wave Activated Body Energy Converter». *Renewable Energy*, **57**, 422-431.
- [17] MARTINELLI L, ZANUTTIGH B eta KOFOED JP. 2011. «Selection of Design Power of Wave Energy Converters Based on Wave Basin Experiments». *Renewable Energy*. **36**, 3124-3132.
- [18] LE MÉHAUTÉ, BERNARD. 1976. *An Introduction to Hydrodynamics and Water Waves*. Springer-Verlag, USA.
- [19] National Instruments. LabVIEW 2016 (64-Bit) - English. 2016, <http://www.ni.com/download/labview-development-system-2016/6055/en/>
- [20] ISAACSON M. 1991. «Measurement of Regular Wave Reflection». *Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering*, **117**, 553-569.
- [21] User Guide. STAR-CCM + ® Documentation. 2015.
- [22] BIMEP and IH Cantabria. Metocean Analysis of BiMEP for Offshore Design. March, 2017.
- [23] AIRY GB. 1845. «Tides and Waves». *Enciclopedia Metropolitana*, **5**, 241-396.
- [24] STOKES, G. 1847. «On the Theory of Oscillatory Waves». *Transaction of the Cambridge Philosophical Society*, **8**, 441-455.
- [25] IZQUIERDO U, ESTEBAN GA, BLANCO JM *et al.* «Experimental Validation of a CFD Model Using a Narrow Wave Flume». *Applied Ocean Research*, **86**, 1-12.
- [26] ROBERT GD eta ROBERT AD. 1991. *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists Advanced Series on Ocean Engineering*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, Cornell University, USA.