

# Itsas olatuen energia eraldatzeko zentral baten deskribapena

*Mikel Alberdi Goitia*

Sistemen Ingeniaritza eta Automatika saila.  
Bilbao (UPV/EHU)

**Laburpena:** Itsas olatuen energia eraldatzeko hainbat metodo desberdin daude, baina gutxi dira egitasmo errealetan oinarrituta gauzatu direnak. Horietako bat da Ur-Zutabe Oszilatzaile motako harrapaketa-kamera batean oinarritutakoa. Olatuek kameran sartzean barneko ur-zutabea mugitzen dute, kamerako airea konprimatuz eta deskonprimatuz. Harrapaketa-kameraren goiko aldean kokatuta dagoen Wells motako turbina baten bidez noranzko bakarreko energia mekanikora eraldatzen da bertan sortutako bi noranzkoko haize-fluxua. Turbina indukzio-sorgailu bati akoplaturik dagoenez, prozesuaren azken eraldaketa egiten da, alegia, energia elektrikoaren sorkuntza.

**Abstract:** Over a thousand patents have been lodged worldwide for harnessing wave power. However, only a very small number of these have been tested on the open sea, between these technologies, the most notable one is the Oscillating Water Column. The wave motion inside the chamber alternately compresses and decompresses the air that exists above the water level inside the chamber. The Wells turbine converts an oscillating flow into a unidirectional rotary motion for driving an electrical generator, that determines the last energy conversion stage.

## 1. SARRERA

Egungo gizartea, jabetuta dago energia jasangarria garatzeko beharra dagoela. Izan ere, alde batetik petroleo gabezia dago eta bere salneurria etengabe igotzen ari da; beste alde batetik, egungo gizakiak gero eta bizi-kalitate hobea eskatzen du eta naturaren bizirautea ere badago kolokan [1]. Hori dela-eta, mundu mailan eta Europa mailan ere protokolo eta zuzentarau desberdinak sortu dira, energia berriztagarriak garatu eta ezartzeko [2-5].

Itsasoko olatuak mundu mailan eta Euskal Herrian ere energia-iturri garrantzitsuak dira. Gure lurraldeak daukan itsasoko olatuen energia potentziala oso handia da, alde batetik bere kostaldea luzea delako eta beste alde batetik baliabide hau handia, iraunkorra eta aurreikusgarria delako [6].

Eusko Jaurlaritzak hurrengo urteerako 5 MW-ko potentzia ezarri nahi du itsas olatuen energiaren inguruan [7]. Helburu hau lortzeko, Eusko Jaurlaritzak Europan aintzindariak diren instalazioak egin ditu. Hona hemen ai-pagarrienak: BIMEP (*Biscay Marine Energy Platform*) Armintzako kostaldearen aurrean olatu-bihurgailuak frogatzeko ikergunea [8] eta NEREIDA MOWC Mutrikuko olatuen energia ustiatzeko zentrala [9].

Azken zentral honek, Ur-Zutabe Oszilatzaile motako 16 harrapaketa-kamera ditu, kaildea babesteko berriki eraiki den dikearen barnean. 2011. urtean amaitu da instalazioko ekipamendu elektriko eta mekanikoen fabrikazioa eta aurreikuspenen arabera, urte amaieran egon daiteke abian. 300 KW-ko potentzia izendatua izango du eta urtean 600.000 KWh-ko energia-ekoizpena lor daitekeela aurreikusten da [10].



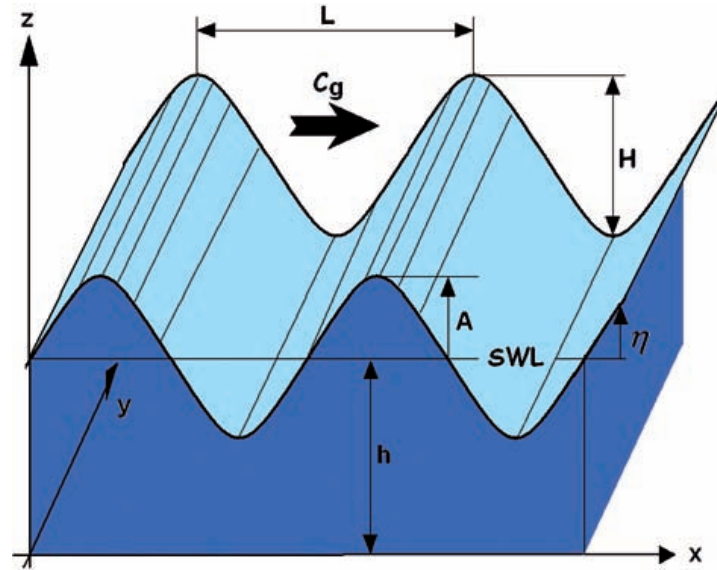
Iturria: *Tecnología e innovación* (Estatuko Portuak).

**1. irudia.** Mutrikuko dike berria eta NEREIDA MOWC

## 2. OLATUAK

Olatua haizearen eraginez itsasoaren gainazalean sortzen diren uhinak dira. Bere sorreran bost eragilek hartzen dute parte [11]:

1. Haizearen abiadura.
2. Itsasoan zeharreko oztopo gabeko haizearen ibilbidea (*fetch* bezala ezagutzen dena).
3. *Fetch* honen zabalera.
4. Haizearen eraginaren iraupena.
5. Itsasoaren sakontasuna *h*.



**2. irudia.** Olatuen parametroak

Faktore hauek olatuaren ezaugarriak finkatzen dituzte:  $H$  olatuaren altuera,  $L$  olatuaren uhin-luzera,  $T_w$  olatuaren periodoa eta olatuaren norabidea.

Azterketa honen lehen helburua olatuek energia-baliabide modura izan ditzaketen balioak finkatzea da, beraiek izango baitira zentralaren sarrera. Honetarako eta Mutrikuko zentralaren kokapena kontutan izanik, olatuaren teoriarik egokiena Airyren teoria lineala da, lehen mailako Stokesen teoria bezala ezaguna ere. Teoria hau nahikoa zehatza da, eta ingeniartzako helburu ugari eta askotarikoa [12].

Teoria linealak olatua uhin sinusoidal bakun bezala deskribatzen du, bere profila sinu edo kosinu funtzio jarrai baten bidez deskribatuz. Olatuaren profila  $\eta$  desplazamendu bertikalaren bidez adierazten da  $x$  kokapenerako eta  $t$  denborarako, hurrengo eran:

$$\eta(x,t) = A \cos \left[ \frac{2\pi x}{L} - \frac{2\pi t}{T_w} \right] \quad (1),$$

non  $A$  olatuaren amplitudea eta  $L$  olatuaren uhin-luzera hurrengo ekuazioaren bidez kalkulatzen den:

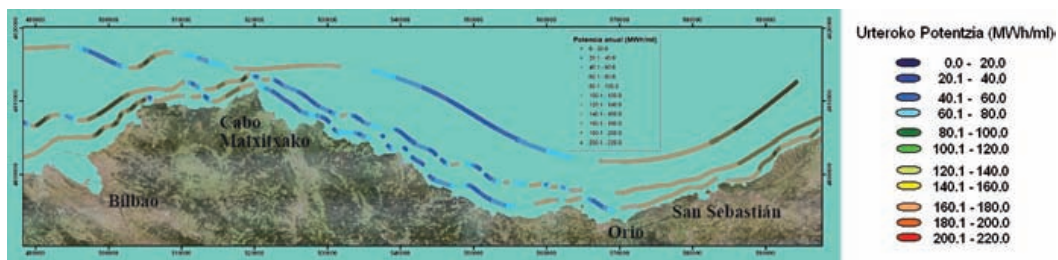
$$L = \frac{gT_w^2}{2\pi} \tanh(2\pi h / L) \quad (2),$$

eta  $g$  grabitatearen azelerazioa den.

Olatu batek duen energia-balioa, normalean olatuaren fronteak metroko duen potentzia terminoarekin deskribatzen dena, hurrengo adierazpenaren bidez kalkula daiteke [13]:

$$P_{\text{wavefront}} = \frac{\rho_w g H^2 L}{16 T_w} \left[ 1 + \frac{4\pi h / L}{\sinh(4\pi h / L)} \right] \quad (3),$$

non  $\rho_w$  uraren dentsitatea den.



Iturria: Itsas ikerketa aldizkaria RIM08 (AZTI-Tecnalia).

### 3. irudia. Olatuaren urteroko potentzia

#### 2.1. Euskal kostaldeko energia-atlasa

Kantauri kostaldeko olatualdiaren klima, Bizkaiko golkoaren eta Atlantiko ipar-ekialdearen inguruan duen kokapen geografikoarekin zuzeneko harrema du [6]. Euskal kostaldearen orientazio eta kokapenagatik, *fetch* handiak sortzen dira. Borrasken zentrua normalean Irla Britainiarren ipar-ekialdearen eta Islandia artean kokatuta dagoenez, *fetch* hauek 1.500 km-ko luzera izan dezakete [14].

Euskal plataforma kontinentalean itsasoaren egoera desberdin asko gertatzen dira, olatuaren gailurraren altueraren eta periodoaren arabera. Urteroko batez besteko olatu-espektroa Estatuko Portuen buiak neurtutakoa da [15].

Olatuaren norabidearen azterketa estadistikoaren arabera, ipar-ekialdetik datozen (% 25) *swell* motako olatuak (ipar-ekialdeko haizeek sortutako olatuak dira, beraietan euskal kostaldeko haizeek eraginik ez dutelarik) nabarmentzen dira, zonaldeko olatu handienak direlarik. Olatuen % 77 a lau-garren koadrantetik datoz [14].

1. eta 2. tauletan ikus daitezke olatuen ezaugarriak; bertan, ardatz horizontalean olatuen altuera-adierazlea dago (erregistro baten olatu handien herenaren batez bestekoa) eta ardatz bertikalean olatuen periodoa.

**1. taula.** Olatu-espektroa ordutan neurtua

Olatuaren periodoa (sg)	Olatuaren altuera-adierazlea (m)										Guztira orduak (h urtean)	
	≤ 0,5	(0,5-1]	(1-1,5]	(1,5-2]	(2-2,5]	(2,5-3]	(3-3,5]	(3,5-4]	(4-4,5]	(4,5-5]		> 5,0
<b>~02</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>
<b>(02-04]</b>	13,23	84,01	10,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>107,40</b>
<b>(04-06]</b>	26,19	356,53	281,20	70,78	15,24	1,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>751,35</b>
<b>(06-08]</b>	24,79	414,87	343,83	246,24	137,88	59,48	27,07	9,29	4,56	0,26	0,53	<b>1.268,80</b>
<b>(08-10]</b>	49,06	741,27	721,74	347,25	175,11	98,46	66,31	47,65	27,07	14,98	12,70	<b>2.301,60</b>
<b>(10-12]</b>	18,92	312,56	629,58	532,52	353,99	195,17	117,91	68,50	45,73	34,16	38,63	<b>2.347,68</b>
<b>(12-14]</b>	5,96	71,92	195,17	249,31	239,50	167,58	137,88	97,85	64,91	41,17	63,16	<b>1.334,41</b>
<b>(14-16]</b>	2,01	29,08	40,91	53,35	75,34	73,32	65,96	52,47	47,13	34,43	81,56	<b>555,56</b>
<b>(16-18]</b>	0,26	3,68	3,68	7,36	8,50	5,34	5,96	7,36	5,61	7,01	18,31	<b>73,06</b>
<b>(18-20]</b>	0,26	0,53	2,80	1,14	1,14	2,28	2,54	0,88	1,66	0,53	2,54	<b>16,29</b>
<b>&gt; 20</b>	0,00	0,26	0,53	0,53	0,88	0,26	0,26	0,26	0,00	0,00	0,88	<b>3,85</b>
<b>Guztira</b>	<b>140,69</b>	<b>2.014,71</b>	<b>2.229,60</b>	<b>1.508,47</b>	<b>1.007,58</b>	<b>603,30</b>	<b>423,90</b>	<b>284,26</b>	<b>196,66</b>	<b>132,54</b>	<b>218,30</b>	<b>8.760,00</b>

Iturria: Estatuko Portuak.

**2. taula.** Olatu-espektoaren energia-balioak

Olatuaren periodoa (sg)	Olatuaren altuera-adierazlea (m)										Guztira potentzia (kWh/m urtean)	
	≤ 0,5	(0,5-1]	(1-1,5]	(1,5-2]	(2-2,5]	(2,5-3]	(3-3,5]	(3,5-4]	(4-4,5]	(4,5-5]		> 5,0
<b>~02</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>
<b>(02-04]</b>	1,05	60,11	20,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>81,36</b>
<b>(04-06]</b>	3,47	425,16	931,46	459,54	163,59	22,47	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>2.005,70</b>
<b>(06-08]</b>	4,60	692,63	1.594,51	2.238,23	2.071,75	1.335,07	848,58	387,56	244,20	17,60	47,19	<b>9.481,92</b>
<b>(08-10]</b>	10,40	1.414,35	3.825,20	3.607,20	3.007,03	2.525,76	2.375,87	2.273,11	1.658,43	1.146,42	1.303,33	<b>23.147,09</b>
<b>(10-12]</b>	5,52	819,99	4.588,07	7.606,26	8.358,27	6.884,04	5.808,64	4.492,95	3.852,22	3.595,13	5.450,38	<b>51.461,47</b>
<b>(12-14]</b>	2,05	222,99	1.680,93	4.208,47	6.683,08	6.985,44	8.027,58	7.584,54	6.462,63	5.120,34	10.531,11	<b>57.509,15</b>
<b>(14-16]</b>	0,80	104,05	406,54	1.039,09	2.425,63	3.526,57	4.431,22	4.693,00	5.414,04	4.940,16	15.690,48	<b>42.671,57</b>
<b>(16-18]</b>	0,12	14,92	41,44	162,43	310,07	291,28	453,52	745,87	729,92	1.139,71	3.992,00	<b>7.881,28</b>
<b>(18-20]</b>	0,13	2,38	35,29	28,10	46,44	138,76	216,17	99,24	242,19	95,53	619,08	<b>1.523,31</b>
<b>&gt; 20</b>	0,00	1,32	7,31	14,33	39,49	17,70	24,72	32,91	0,00	0,00	235,95	<b>373,71</b>
<b>Guztira</b>	<b>28,14</b>	<b>3.757,89</b>	<b>13.130,94</b>	<b>19.363,65</b>	<b>23.105,36</b>	<b>21.727,08</b>	<b>22.186,29</b>	<b>20.309,17</b>	<b>18.603,63</b>	<b>16.054,89</b>	<b>37.869,51</b>	<b>196.136,55</b>

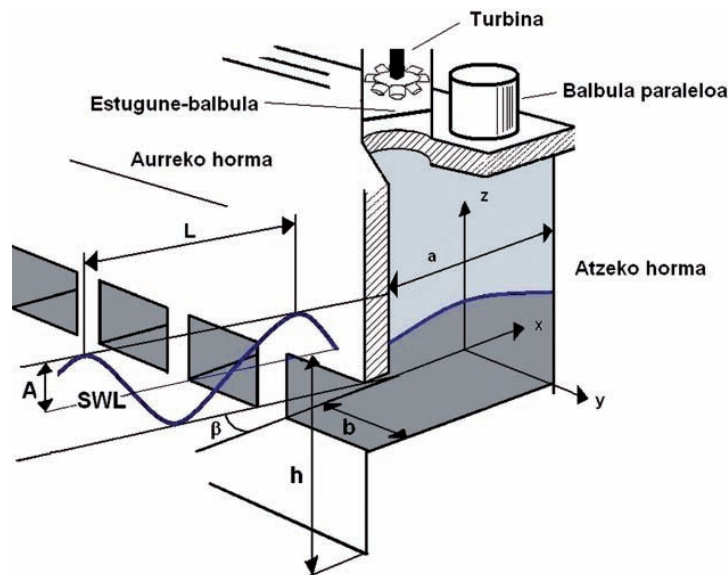
Iturria: AZTI-Tecnalia.

1. taulak olatu bakoitza urtean zehar zenbat ordu neurtu den adierazten du eta 2. taulak olatuaren energia-balioa adierazten du. Ikus daitezkeen bezala, 1,5 eta 4 m altuera eta 10,5 eta 13,5 s arteko periodoa duten olatuek itsasoko energiaren zatirik handiena dute. Bizkaiko Golkoko batez besteko energia-balioak, olatu-frontearen potentziaren arabera neurtuta, 25 KW/m-koa da.

Honenbestez, urteroko Euskal kostaldeko baliabide energetikoa 13 TWh-koa da. Bateriaezintasunek eragin gabeko euskal kostaldea okupatuko balitz eta aurreratuenetako kaptazio-energia teknologien errendimendua kontuan hartzen badugu, Euskal Autonomia Erkidegoko elektrizitate-eskariaren %7 eta %10 arteko energia sortu liteke, edo EAEko etxeetako kontsumo elektrikoaren %37 eta %50 a. Horrela, atmosferara 0,96-tik 1,54 milioi tona CO<sub>2</sub> isurtzea saihestuko litzateke.

### 3. HARRAPAKETA-KAMERA

Olatuen energia eraldatzeko egitura da. Normalean kostan finkatuta dago; kameraren egituraren goiko aldeak aire-kamera bat osatzen du eta 4. irudian ikus daitezkeen bezala, beheko aldean uretan sartuta dagoenez olatuen eraginpean dago.



4. irudia. Harrapaketa-kamera eta olatua

Olatuen energia eraldatzeko aire-kamera baten sorrera da bere eskakizun nagusia. Sarrerako olatuen jarduerak ur-zutabea oszilatzen behartzen du (*OWC* akronimoa *Oscillating Water Column* izendapenetik dator),

harrapaketa-kamerako airea konprimatuz. Honetarako egituraren aurreko ezpaina itsasoan barneratuta egon behar da beti. Harrapaketa-kamerako ezpaina itsasoaren gainazalaren gainetik gelditzen denean (*broaching*), aire-kamera eta atmosferaren artean barne konexioa sortzen da, eta presioen berdintasuna eta turbinaren gelditzea gertatzen da.

Harrapaketa-kameraren azterketan, hurrengo baldintzak hartu behar dira kontuan [16]:

- Bi dimentsioko geometria bakuna, kameran hondoratuta dauden muga solidoak irudikatzeko.
- Kameraren aurreko eta atzeko hormen arteko distantzia  $a$  da.
- Norabide bakarrean hedatzen diren olatuak, bi horma bertikalen artean eta  $h$  sakontasun konstantean sortutako kanalean zehar mugitzen direnak.
- Harrapaketa-kameraren itsaso azpian murgildutako  $b$  irekiera eta olatuak hedatzen diren kanalaren zabalera berdinak dira.

Deskribatutako olatuak eta OWC harrapaketa-kamera kontuan izanik,  $\rho(t)$  eta  $V(t)$  aldaketak txikiak direla onartuz (olatuaren teoria linealarekin bat datorrena) eta  $\rho(t)$  linealizazio isentropikoaren bidez  $p_a + p(t)$ -rekin uztartuz, hurrengo lortzen da:

$$w + w_v = -V \frac{d\rho}{dt} + \rho q \quad (4),$$

non  $q(t)$  ur-zutabeak desplazatzen duen eta hemendik aurrera haize-fluxu bezala aipatuko dugun haize-bolumenaren fluxua,  $w$  turbinan zeharreko aire-masaren jarioa,  $w_v$  by-pass (+ ateratzen denean) balbulan zeharreko aire-masaren jarioa,  $\rho(t)$  kamera barruko airearen dentsitatea eta  $V(t)$  kamera barruko aire-bolumena.

### 3.1. Hidrodinamika

Olatu intzidenteez harrapaketa-kameraren barruan ur-zutabearen mugimendu librea sortzen dute, eta honek,  $q(t)$  haize-fluxua mugitzen du eta  $p_a + p(t)$  aire-presio oszilatzailerak sortzen du. Olatuaren teoria lineala onartuz, hurrengo idatz daiteke:

$$q(t) = q_r(t) + q_i(t) \quad (5),$$

non  $q_r(t)$  erradiaziozko haize-fluxua den eta  $q_i(t)$  difrakziozko haize-fluxua.



### 3.1.1. Erradiaziozko haize-fluxua

Erradiaziozko haize-fluxua, kameraren barruko  $p(t)$  aire-presio oszilazioak sortutakoa da, olatu intzidenterik kontuan hartzen ez denean. Hurrengo ekuazioaren bidez kalkulatzen da:

$$q_r(t) = \int_{-\infty}^t g_r(t-\tau) p(\tau) d(\tau) \quad (6),$$

non  $g_r(t)$  kameraren geometriaren menpe dagoen erradiazio funtzioa den.  $B(\omega)$  sistemaren erradiazio-koefizientearekin uztartzen da, Fourierren aldeantzikko transformazioaren bidez:

$$q_r(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} B(\omega) \cos(\omega t) d(\omega) \quad (7).$$

$B(\omega)$  koefizientea hidrodinamikoa, harrapaketa-kameraren geometriaren eta hondoratutako kostaldearen menpe dago. Deskribatutako geometriarako, erradiazio-koefiziente hidrodinamikoa hurrengo adierazpenaren bidez ebazten da:

$$B(\omega) = -\frac{2\omega\mu b}{p_w g k} \sin^2(ka) \quad (8).$$

Adierazpide honetan,  $\omega$  olatuen frekuentzia da,  $k$  olatu zenbakia eta  $\mu$  aldagai hurrengo ekuazioaren bidez ebazten da:

$$\mu = \left( 1 + \frac{\omega^2}{g} h \csc h^2(kh) \right)^{-1} \quad (9).$$

Dispersio-erlazioak olatuen jokamoldea deskribatzen du eta hurrengo adierazpenaren bidez kalkula daiteke:

$$k \tanh(kh) = \omega^2 / g \quad (10).$$

### 3.1.2. Difrakziozko haize-fluxua

Difrakziozko haize-fluxua olatu intzidenterik sortutakoa da, kameraren barruko  $p(t)$  aire-presioa eta  $p_a$  atmosferako aire-presioa berdinak direla onartzen denean. Olatu erregularrak kontuan hartzen badira, hauen gainazalaren iguera Airyren teoriaren arabera (1) ekuazioaren bidez deskribatzen da.

Kameraren aurreko hormaren erruz sortutako difrakzioa bazter batera utzita,  $q_i(t)$  difrakziozko haize-fluxua kamera barruko ur gainazal librearen

desplazamenduak sortua da ( $x = -a$  eta  $x = 0$  artean); hau, olatu intzidentearen eta atzeko horman isladatutako olatu intzidentearen gainezarpenaren ondorio gisa gertatzen da, eta hurrengo adierazpenaren bidez deskribatzen da:

$$q_i(t) = \frac{2Ab\omega}{k} \sin(2ka) \cos(\omega t + \beta) \quad (11),$$

non  $\beta$  olatu intzidenteen hedapen angelua den.

Olatu irregularrak kontsideratzen badira,  $N$  zenbaki finitu olatu erregularraren superposizioaren bidez simula daiteke, hurrengo adierazpenaren bidez:

$$\eta(x,t) = \sum_{n=1}^N A_n \cos[(2\pi x / L_n) - (\omega_n t)] \quad (12).$$

Olatu irregularrak sortutako difrakziozko haize-fluxua hurrengo eran adieraz daiteke:

$$q_i(t) = 2b \sum_{n=1}^N \frac{A_n \omega_n}{k_n} \sin(2k_n a) \cos(\omega_n t + \beta_n) \quad (13).$$

### 3.2. Termodinamika

Harrapaketa-kamera airez osaturiko sistema ireki bat da, eta haren mugak kameraren hormak, ur-zutabe gainazala eta balbulak dira; bertan, haizearen energia zinetikoa txikitzat jotzen da.

Prozesu termodinamikoa adiabatikoa dela onartzen da, olatu batek irauten duen denboran trukaturako bero kantitatea, tenperatura konstantea mantentzeko beharrezkoa litzatekeen zati txiki bat baino ez delako [17].

Airea gas perfektutzat hartzen da:

$$(p_a + p) / \rho = RT, \quad du = c_v dT, \quad dh = c_p dT, \quad \gamma = c_p / c_v, \quad R = c_p - c_v \quad (14),$$

non  $T$  tenperatura absolutua den,  $u$  barne energia espezifikoa,  $c_v$  bolumen konstante peko bero espezifikoa,  $s$  entropia espezifikoa,  $h$  entalpia espezifikoa,  $c_p$  presio konstante peko bero espezifikoa eta  $\gamma$  bero espezifikoen arteko erlazioa.

Malguki efektua airearen konprimagarritasunarengatik harrapaketa-kameraren aire-bolumenarekin handitzen da, eta ez da bazter batera utzi behar tamainu errealeko sistemetan.

Airearen karga/deskarga prozesua behar bezain motela da, airearen prozesu termodinamikoa kameran uniforme delako onartu ahal izateko; hau da, nahiz eta sartzen den  $w$  aire-masaren fluxua ateratzen denaren desberdina izan, kamera barruko  $V(t)$  aire-bolumenak dentsitate eta egoera uniformeak ditu edozein unetan.

### 3.2.1. Kameratik atmosferarako aire-deskarga prozesua

Olatu intzidentearen jardueragatik gertatzen da, airea harrapaketa-kameratik kanpora ateratzen denean,  $p > 0$ ,  $w > 0$ ,  $w_v \geq 0$  izanik.

Prozesua adiabatiko itzulgarria da, eta beraz, isentropikoa. Ondorioz, deskarga prozesu bakoitzean zehar  $\rho(p_a + p)^{-1/\gamma} = \text{konstantea}$  da.

$$\frac{d\rho}{dt} = -\frac{1}{\gamma RT} \frac{dp}{dt} \quad (15).$$

### 3.2.2. Atmosferatik kamerarako aire-karga prozesua

Olatu intzidentearen jardueragatik gertatzen da, airea kanpotik harrapaketa-kameran sartzen denean,  $p < 0$ ,  $w < 0$ ,  $w_v \leq 0$  betez.

Modelatzea zailagoa da bi arrazoiengatik:

1. Airearen entropia espezifikoa balbuletan, hodian eta turbinan gertatzen diren biskositate galerekin aldatzen delako.
2. Airearen entalpia espezifikoa turbinan egindako lanarengatik aldatzen delako.

Kameraren karga prozesuan dentsitatearen eta presioaren aldaketak uztartzen dituen ekuazioa honakoa da:

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{1}{\gamma RT} \frac{dp}{dt} + \rho \frac{w}{m} \left[ \frac{T_{1s}}{T} - 1 \right] + \rho \frac{w_v}{m} \left[ \frac{T_a}{T} - 1 \right] - \rho \frac{L}{c_p m T} \quad (16).$$

Bertan,  $m(t)$  kameran edukitako aire-masa,  $T_{1s}$  egoera termodinamiko jakin baten tenperatura izanik, bere presioa turbinaren irteerako presioaren  $p_a + p_t$  berdina da;  $a$  azpiindizeak kanpo atmosfera adierazten du eta  $L$  eza-gunak diren galera biskosoak (errotazio abiadura baterako turbinaren presio-diferentziaren menpe daudenak).

### 3.2.3. Linealizazio isentropikoa

$dp/dt$  deribatua  $d\rho/dt$  rekin uztartzen da, (15) adierazpenaren bidez deskarga prozesuan eta (16) adierazpenaren bidez karga prozesuan. Airea-

ren presio eta dentsitate erlazioaren linealizazio isentropikoa, (15) eta (16) ekuazioen ordeztu hurrengo jartzean datza:

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{1}{\gamma RT_a} \frac{dp}{dt} \quad (17).$$

Gas perfektu baten dentsitatearen aldaketak, hurrengo adierazpenaren bidez ebatzen da:

$$d\rho = \frac{\rho}{c_p} ds + \frac{1}{\gamma RT} dp \quad (18),$$

non eskuineko bi terminoak, hurrenez hurren entropiaren eta presioaren aldaketak diren.

Linealizazio isentropikoa egiterakoan, bi errore sartzen dira:

- $(\rho/c_p)ds$  terminoa bazter batera utziz, linealizazioa egiten da.
- $(\gamma RT)^{-1}$  terminoaren ordeztu  $(\gamma RT_a)^{-1}$  jarrita, prozesu isentropikoa dela onartzen da.

Airearen presio/dentsitate erlazioaren linealizazio isentropikoak sortutako errorea %1 a baino txikiagoa da [16]. Beraz, bere erabilerak agerian uzten du airearen konprimagarritasunak sortzen duen malguki efektuaren modelatuaren gerturatze egokia.

### 3.3. Emaitzaren eredu

(4) ekuazioan prozesu hidrodinamikoa sartzean, hurrengo adierazpena lortzen da:

$$w + w_v = -V \frac{d\rho}{dt} + \rho q_i(t) + \rho \int_{-\infty}^t g_r(t-\tau) p(\tau) d(\tau) \quad (19).$$

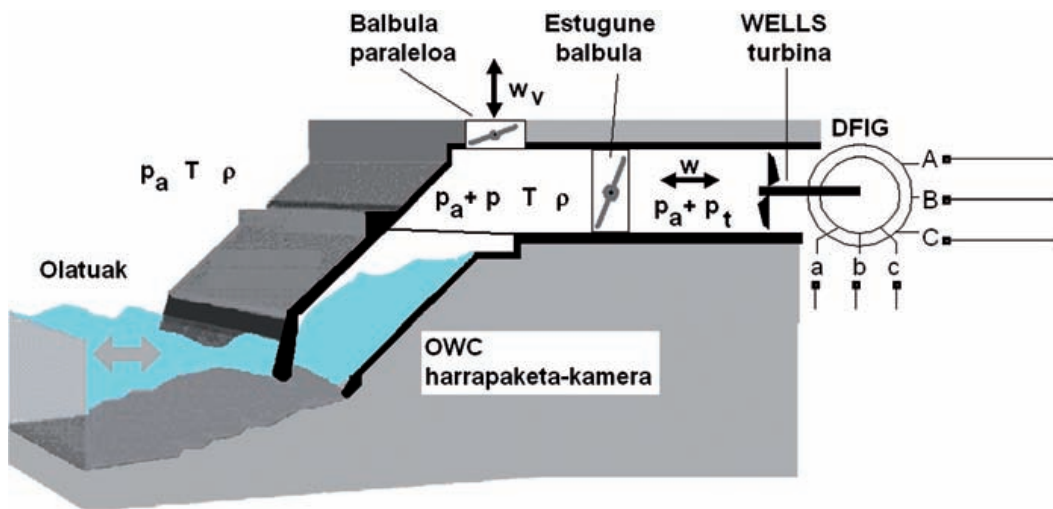
(19) ekuazioan prozesu termodinamikoaren airearen presio/dentsitate erlazio isentropikoa sartzerakoan eta  $dp/dt$  ebatztean, hurrengo ekuazio linealizatua lortzen da:

$$\frac{dp}{dt} = -(w + w_v) \frac{\gamma P_a}{V_0 \rho_a} + \left[ q_i(t) + \int_{-\infty}^t g_r(t-\tau) p(\tau) d(\tau) \right] \frac{\gamma P_a}{V_0} \quad (20),$$

non  $V_0$  pausagune egoeran kamerako aire-bolumena den. Ekuazio honetan kontuan izan behar da,  $w$  turbinan zeharreko aire-masaren fluxua  $p$  presioa-erikiko proportzionalak dela (turbinaren abiadura zehatz baterako) [18].

### 3.4. Balbulak

Azterketan, kontuan hartzen dira bi balbula motaren erabilera; turbinarekin seriean eta paraleloan kokatuta daudenak, 5. irudian ikusi daitezkeen bezala. Biek helburu bera daukate, turbinan zehar doan haize-fluxua kontrolatzea; hala ere, olatuen energia-erlaketaren prozesu hidrodinamikoak, balbula bakoitzaren operazioaren ondorioz era desberdinetan aldatzen direnez, errendimendu desberdinak lortuko dela espero da.



### 5. irudia. Balbulak harrapaketa-kameran

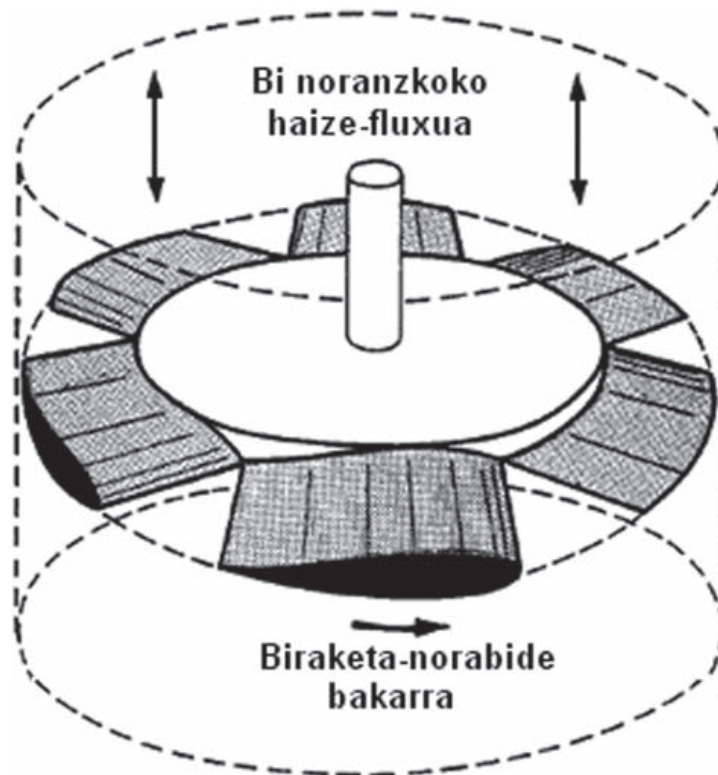
Serie- edo estugune-balbula (*throttle valve*), harrapaketa-kamera kanpoko aldearekin konektatzen duen hodian muntatzen da, turbina baino ari-nago. Partzialki ixten da, haize-fluxu handiegiak saihesteko [19].

Balbula paraleloa (*by-pass valve*), kamera eta atmosferaren artean konektatzen da, turbinarekiko paraleloan, biak haize-fluxuaren sarrera/irteera baitira. Balbula ireki egiten da kameraren presio handiegiak saihesteko. Presio honen muga, turbinaren ezaugarri aerodinamikoak bidez eta beronen aldiuneko abiaduraren bidez definituta dago [20].

### 4. WELLS TURBINA

6. irudian ikusten den bezala, Wells turbina haize-fluxu turbina bat da, axial motakoa, alabe aerodinamikoak dituen rodete bat edo gehiago osatua.

Turbina honek ur-zutabe oszilatzailean sortutako bi noranzkoko haize-fluxua erabiltzen du, eta haize-fluxu intzidentearen noranzkoa kontuan izan gabe turbinaren biraketa-norabidea mantentzeko, rodete alabeak perfil



Iturria: The Islay wave power project: an engineering perspective (Proc. Instn. Civ. Engrs. Wat. Marit. & Energy, 1997).

### 6. irudia. Wells turbina

aerodinamiko simetrikoekin diseinatu dira, orokorrean NACA00XX seriekoak izaten direlarik.

Wells turbinaren sarrera, harrapaketa-kameran sortutako bi noranzkoko haize-fluxuaren eraginez rodeteen sortzen den presio-diferentzia da.

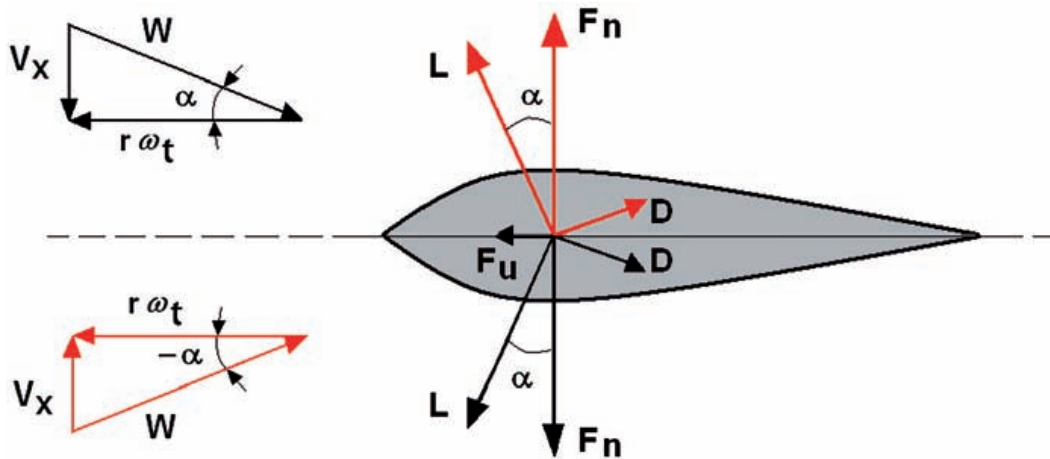
Rodeteen sortzen den presio-diferentziaren eta turbinaren momentu mekanikoaren adierazpenak hurrengoak dira:

$$dp = C_a(\rho b l n / 2) (1/a) [V_x^2 + (r\omega_t)^2] \quad (22).$$

$$T_t = C_t(\rho b l n / 2) r [V_x^2 + (r\omega_t)^2] \quad (23).$$

non  $dp$  turbinaren rodetearen muturren arteko presio-diferentzia den,  $C_a$  potentzia-koefizientea,  $\rho$  haizearen dentsitatea,  $b$  alabearen altuera,  $l$  alabearen luzera,  $n$  alabe kopurua,  $a$  zeharkako area,  $V_x$  haize-fluxuaren abiadura,  $r$  batezbesteko erradioa,  $\omega_t$  turbinaren abiadura angeluarra,  $T_t$  turbinak sortutako momentu mekanikoa eta  $C_t$  momentu-koefizientea.

Turbinatik atera daitekeen potentzia mekanikoa, bere galera egoerak (*stalling*) mugatzen du eta horixe da diseinuaren arazo nagusienetakoa, Wells turbinaren erabilerarekin intrintsekoa.



7. irudia. Abiaduren eta indarren eskema alabeen

7. irudian erakusten den bezala, turbinaren biraketa-planoa haize-fluxuarekiko perpendikularra denez,  $W$  erresultantea sortzen da alabea erasotuz  $\alpha$  eraso-angeluarekin. Wells turbina galera-egoeran sartzen da,  $\alpha$  eraso-angelua balore jakin bat gainditzen duenean, orokorrean  $14^\circ$  baino handiagoa denean. Alabeak eraginkorrakoak dira eraso-angulua  $7^\circ$  ingurukoa denean [21]. Fluxu-koefizientea haize-fluxuaren intzidentzia-angeluaren neurri bat da, eta alabeen garatutako indar aerodinamikoek parametro honen balioaren menpe daude [22].

Haize-fluxuaren eraso-angeluaren aldiuneko balioa, turbinaren rodetaren aldiuneko abiadura angeluarra eta haize-fluxuaren abiadura axiala ezagutuz kalkula daiteke. Haize-fluxuaren egoera eraso-angeluaren funtziopean adierazi beharrean, ohikoagoa da  $\phi$  dimentsiorik gabeko fluxu-koefizientea erabiltzea, eraso-angeluaren tangentea bezala definitzen den hurrengo espresioaren arabera:

$$\phi = \tan(\alpha) = V_x(r\omega_t)^{-1} \quad (24).$$

Emaria ekuazio honen bidez kalkulatzen da:

$$Q = V_x a \quad (25).$$

Turbinak erabilgarri daukan aldiuneko potentzia neumatikoa, ekuazio honen bidez kalkulatzen da:

$$P_{avai} = dp Q \quad (26).$$

Wells tubinaren etekina, turbinak sortutako aldiuneko potentzia eta erabilgarri duen potentzia neumatikoarekin erlazioa izanik, ekuazio honen bidez ebatzi daiteke:

$$\eta_{turbine} = \frac{P_t}{P_{avai}} = \frac{T_t \omega_t}{dp Q} = \frac{C_t}{C_a \phi} \quad (27).$$

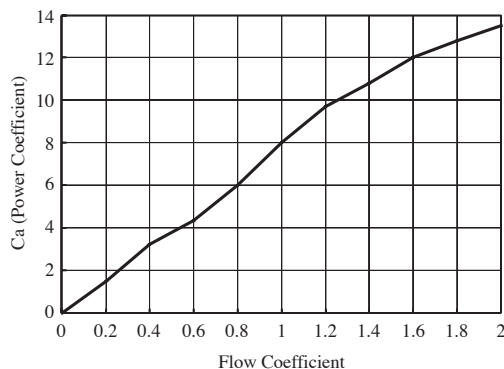
#### 4.1. Turbinaren funtzionamendua galeran

Haize-turbinak oso sentikorrek dira haize-fluxuaren aldaketekiko. Makinaren erantzunaren denbora baino handiagoak diren itsasoaren aldaketak, turbinaren errotazio-abiadura doitu konpontzen dira, abiadura aldagarriko sorgailuaren bidez. Baina turbo-sorgailuaren erantzunaren denbora baino txikiagoak diren itsasoaren aldaketak, taldearen inertzia finkoarengatik ezin konpon daitezke, bereziki geometria finkoko turbinetan; hau dela eta etekina nabarmen murrizten da.

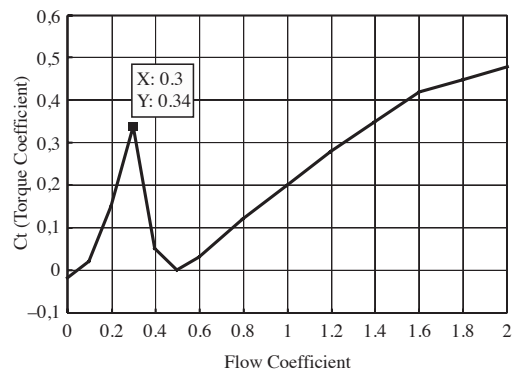
Wells turbinan oinarritzen diren itsas olatuen energia eraldatzeko zentralen etekina, haize-fluxu oszilazioek mugatzen dute:

1. Ur-zutabe oszilatzailean oinarritutako harrapaketa-kamerak sortzen duen bi noranzkoko haize-fluxuarengatik.
2. Fluxu-koefizienteak balio kritiko bat gainditzen duenean, errendimenduan jausialdi arina gertatzen delako eta honek turbinak sortutako potentzia elektrikoan eragin zuzena daukalako.

Wells turbina batek garatutako momentua eta potentzia, neur edo erabil daitezke,  $\phi$  fluxu-koefizientearen arabera aldatzen diren bi koefizienteen aldaketan oinarrituz:  $C_a$  potentzia-koefizientea eta  $C_t$  momentu-koefizientea [26]. Beraz, turbina baten etekina aztertzerakoan, ohikoa da koefiziente



**8. irudia.** Potentzia-koefizientea vs fluxu-koefizientea



**9. irudia.** Momentu-koefizientea vs fluxu-koefizientea



hauen kurbak aztertzea. Gure turbinaren kasuan,  $C_a = f(\phi)$  eta  $C_t = f(\phi)$  kurben ezaugarriak 8. eta 9. irudietan ikus daitezke.

Wells turbinaren galera-egoera  $\phi$  fluxu-koefizienteak balore kritiko bat gainditzen duenean gertatzen da,  $C_t$  momentu-koefizientearen erortze azkarra sortaraztean 9. irudian ikusi dezakegun bezala. Balorea, 0.3 izan da azterketa honetan erabilitako turbinaren kasuan. Fluxu-koefizientea, (24) ekuazioan ikus daitekeen bezala, turbina zeharkatzen duen haize-fluxuaren  $V_x$  abiadura axialarekiko proportzionala da eta olatu handien eraginpean handitzen denez,  $\phi$  fluxu-koefizienteak balore kritikoa gainditu eta momentu-koefizientearen gutxitze azkarra sortzen du [23].

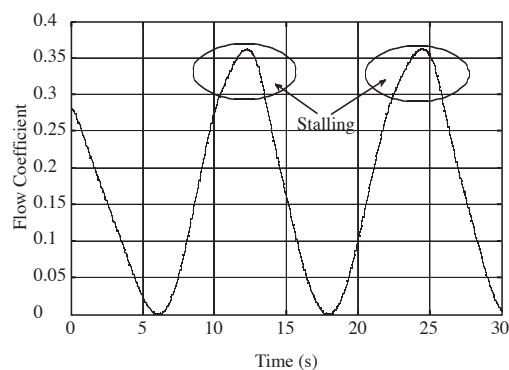
(23) adierazpenean ikus daitekeenari jarraiki kontuan hartzen badugu, turbinaren momentua eta momentu-koefizientea zuzenean proportzionalak diranez, haize-fluxuak balore kritikotik gora egitean, turbinak sortutako momentu mekanikoaren erortze azkarra gertatzen da. Funtzionamendu honen galera-egoera edo *stalling* izendapena hartzen du.

Wells turbinaren galera-egoerak, turbinaren etekinaren eta sorgailuaren potentzia aktiboaren gutxitzea dakar, baina gainera, bai korrante faktorea eta bai sare elektrikora bueltatutako potentzia elektrikoaren uhindura faktoreak handitzen ditu.

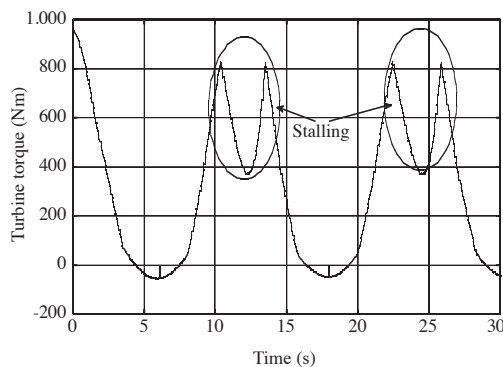
Hau erakusteko, jarraian aurkeztuko ditugu egindako simulazio batzuen emaitzak, itsasoaren egoerak turbina galera-egoera sartzen dutenekoak.

10. irudian ikus daiteke fluxu-koefizienteak 0,3 balore kritikoa gainditu eta turbina galera-egoeran sartzeraren behartzen duela, 11. irudian ikus daitekeen bezala. Irudi honetan, agerian gelditzen da turbinaren momentuaren gailurretan gertatzen den erortze handia. Erortze hau haize-fluxua 0,3 baino handiagoa den heinean mantentzen da.

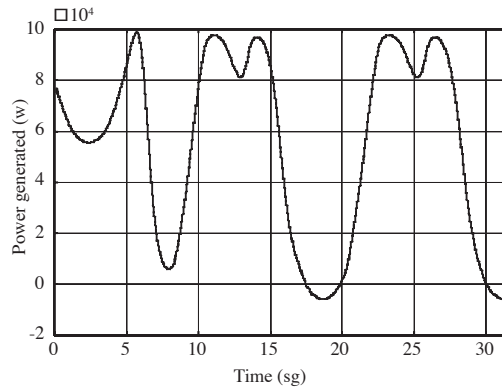
12. irudian, indukzio-sorgailuak sarera itzulitako potentzia aktiboa erakusten da, eta bertan kontrol gabeko kasuaren aldaketa handiez gain,



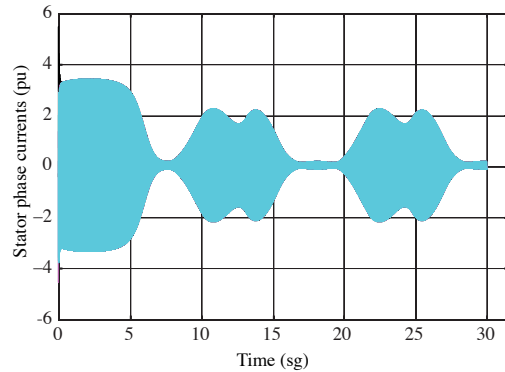
**10. irudia.** Fluxu-koefizientea



**11. irudia.** Turbinaren momentua



**12. irudia.** Sortutakopot entzia aktiboa



**13. irudia.** Estatorekokor ronte trifasikoak

*stallingari* dagozkionak ikus daitezke. Azkenik, 13. irudian erakusten dira estatorearen hiru faseko korronteak, berez olatuen arabera korronte oso aldakorrak eta *stallingaren* ondorioz areagotuak.

## 5. ONDORIOAK

Wells turbina galera-egoeran sartzen denean, turbo-sorgailuaren funtzionamenduak eta zentralaren etekinak txarrera egiten dute.

Turbo-sorgailuaren ekuazioa oso ezaguna da eta hurrengo adierazpenaren bidez ebatzen da:

$$J \cdot \left( \frac{d\omega_t}{dt} \right) = T_t - T_g - T_l \quad (28),$$

non  $J$  turbo-sorgailuaren inertzia den,  $T_g$  sorgailuak ezarritako momentu elektromagnetikoa eta  $T_l$  galerak batzen dituen terminoa [24].

Inertzia diseinuarekin batera ezartzen dela kontuan izanik eta beraz konstantea dela onartzen bada eta galerak bazter batera uzten badira, (28) ekuazioak adierazten du turbo-sorgailuaren abiadura era hauetan erregula daitekeela:

1. Sorgailuak ezarritako momentu elektromagnetikoa kontrolatuz, elektrikoki sorgailuaren labanketa handituz. Onartutako labanketamuga handiena, turbo-sorgailuaren abiadura maximoak ezartzen du.
2. Turbinak sortutako momentu mekanikoa kontrolatuz, balbulen bidez haize-fluxua erregulatuz (kontuan izan behar da, azterketa ho-

netan aukeratu den turbina geometria finkokoa dela eta beraz, bal-bulak direla momentu mekanikoa kontrolatzeko era bakarra).

Metodo desberdinak aurreikusten dira, turbo-sorgailuaren abiadura kontrolatzeko: haize-fluxuaren kontrola, sorgailuaren bihurgailu itzulgarriaren kontrola eta bi kontrol hauek elkartuz osatutako kontrola.

## **BIBLIOGRAFIA**

- [1] IEA (2002). *Distributed Generation in Liberalised Electricity Markets*. International Energy Agency, Paris.
- [2] Decisión 98/352/CE, del Consejo de 18/5/1998 sobre un programa plurianual de fomento de las energías renovables en la Comunidad (Altener II), *Diario Oficial de las Comunidades Europeas* 159/L.
- [3] Decisión 646/2000/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 28/2/2000, por la que se aprueba un programa plurianual de fomento de las energías renovables en la Comunidad (Altener), *DOCE* L 79.
- [4] Directiva 2001/77/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 27/9/2001 relativa a la promoción de la electricidad generada a partir de fuentes de energía renovables en el mercado interior de la electricidad, *DOCE* L 283/33.
- [5] RENEWABLE ENERGY TECHNOLOGY ROADMAP (2007). *20% by 2020*. European Renewable Energy Council, Brussels.
- [6] GALPARSORO, I., LIRIA, P., LEGORBURU, I., RUIZ-MINGUELA, P., PÉREZ, G., MARQUÉS, J., TORRE-ENCISO, Y. eta GONZÁLEZ, M. (2008). «Atlas de energía del oleaje. La planificación espacial marina como herramienta en la selección de zonas adecuadas para la instalación de captadores», *Revista de Investigación Marina*, 1-9.
- [7] EEE, ENERGIAREN EUSKAL ERAKUNDEA, 2011/04/01, <http://www.eve.es/web/Energias-Renovables.aspx>.
- [8] EEE, ENERGIAREN EUSKAL ERAKUNDEA, BIMEP, 2011/04/01, <http://www.eve.es/web/Energias-Renovables/Energia-marina/BIMEP/LasOlas.aspx>
- [9] ORTUBIA, I., LÓPEZ DE AGUILERA, L.I. eta TORRE-ENCISO, Y. (2008). «Implantación de una central undimotriz en el nuevo dique de abrigo al puerto de Mutriku», *III Congreso Nacional de la Asociación Técnica de Puertos y Costas, Innovación en la construcción y explotación portuaria*, Barcelona.
- [10] EEE, ENERGIAREN EUSKAL ERAKUNDEA, 2011/04/01, [http://www.eve.es/jornadas/ponencias\\_energia\\_marina\\_09/Torre\\_Enciso\\_Yago.pdf](http://www.eve.es/jornadas/ponencias_energia_marina_09/Torre_Enciso_Yago.pdf).
- [11] SORENSEN. R.M. (2006). *Basic Coastal Engineering*. Springer-Verlag. New York.
- [12] CHADWICK, A., MORFETT, J. eta BORTHWICK, M. (2004). *Hydraulics in civil and environmental engineering*, Spon Press, London.

- [13] THIRUVENKATASAMY, K., NEELAMANI, S. (1997). «On the efficiency of wave energy caissons in array», *Applied Ocean Research* **19**, 61-72.
- [14] GONZÁLEZ, M., URIARTE, A., FONTÁN, A., MADER, J. eta GYSSELS, P. (2004). «Marine Dynamics. Oceanography and Marine Environment of The Basque Country», *Elsevier Oceanography Series, Marine Pollution Bulletin* **50**, 133-158.
- [15] PUERTOS DEL ESTADO, MINISTERIO DE FOMENTO, 2011/04/03, [http://w3.puertos.es/es/oceanografia\\_y\\_meteorologia/banco\\_de\\_datos/oleaje.html](http://w3.puertos.es/es/oceanografia_y_meteorologia/banco_de_datos/oleaje.html)
- [16] FALCÃO, A.F. de O. eta JUSTINO, P.A.P. (1999). «OWC Wave Energy Devices with Air Flow Control», *Ocean Engineering* **26**, 1275-1296.
- [17] KESTIN, J. (1966). *A Course in Thermodynamics*. Blaisdell, Waltham.
- [18] CORSINI, A. eta RISPOLI, F. «Modeling of wave energy conversion with an Oscillating Water Column device», *Dipartimento di Meccanica e Aeronautica*, Università di Roma «La Sapienza», Roma, Italy.
- [19] JUSTINO, P.A.P. eta FALCÃO, A.F. de O. (2000). «Active relief-valve control for an OWC wave energy device», *Proceedings of The Fourth European Wave Energy Conference*, Aalborg, Denmark, 295-300.
- [20] FALCÃO, A.F. de O., VIEIRA, L.C. eta JUSTINO, P.A.P. (2001). «By-pass air-valve control of an OWC wave power plant», *Proceedings of the 20th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*.
- [21] CRUZ, J. (2008). *Ocean Wave Energy*. Springer, Berlin.
- [22] DIXON, S.L. 1978. *Fluid Mechanics, Thermodynamics of Turbomachinery*. Pergamon, Oxford.
- [23] AMUNDARAIN, M., ALBERDI, M., GARRIDO, A.J. eta GARRIDO, I. (2010). «Modeling and simulation of wave energy generation plants: Output power control», *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **58**, 105-117.
- [24] JAYASHANKAR, V., UDAYAKUMAR, K., KARTHIKEYAN, B., MANIVANNAN, K., VENKATRAMAN, N. eta RANGAPRASAD, S. (2000). «Maximizing Power Output From A Wave Energy Plant», *Power Engineering Society Winter Meeting*, **3**, 1796-1801.