

INDUSTRIA TEKNOLOGIAREN  
INGENIARITZAKO GRADUA  
**GRADU AMAIERAKO LANA**

***WELLS TURBINAK: IKASKETA ETA  
OWC ZENTRALETARAKO BESTE  
AUKERAK***

**Ikaslea: Eguizabal, Mazón, Markel**

**Zuzendaria: Olondo, Castro, Concepción**

**2018-2019 Kurtsoa**

**Data: 2019, 06, 18**

# ABSTRACT

Energia berriztagarriak gero eta garrantzi handiagoa hartzen ari dira gure produkzio sisteman. Horien artean, itsasoak duen energia erabiltzen duten sistemak aukera bat dira, OWC sistema izanik lan honetan aztertzen dena. Wells turbinak izan dira gaur egun arte gehien erabili izan den teknologia, baina pixkanaka beste aukera batzuk eratu joan dira, inpulstu turbinak adibidez. Hori da, hain zuzen ere, lan honetan jorratu izan dena: Wells turbinen eta beste aukera batzuen arteko konparaketa.

Las energías renovables están aumentando su importancia en nuestro sistema de producción. Entre ellas, los sistemas que utilizan la energía del mar son una opción, siendo los sistemas OWC los que se van a examinar en este trabajo. Las turbinas Wells son la tecnología más utilizada hasta el día de hoy pero poco a poco han ido apareciendo otras opciones, como las turbinas de impulso. De hecho, eso es lo que se ha tratado en este trabajo: una comparativa entre las turbinas Wells y otras de las opciones.

Renewable energies are increasing their importance in our production system. Among them, the systems that use the energy of the sea are an option, being the OWC systems those that have been examined in this

work. Wells turbines are the most used technology to this day, but other options such as impulse turbines have been appearing little by little. In fact, that is what has been discussed in this work: a comparison between the Wells turbines and other options.

# AURKIBIDEA

1. Laburduren zerrenda.....	1
2. Irudien eta taulen zerrenda.....	2
3. Helburua.....	4
4. Testuingurua.....	5
5. Olatu-energia sistemak.....	8
6. Olatuen potentzia.....	12
7. OWC sistemak.....	14
7.1 Ganbara.....	15
7.2 Turbina.....	16
7.3 Sorgailua.....	17
7.4 Mutrikuko zentrala.....	17
8. Wells turbinak.....	20
8.1 Sarrera.....	20
8.2 Alabeak.....	21
8.3 Diseinu parametroak.....	22
8.4 Aurkeztutako arazoak.....	25
9. Wells turbinaren aldaerak.....	27
9.1 WT koro zuzentzailearekin.....	28
9.2 WT errore bikoitzarekin.....	31
10. OWC sistematarako beste aukerak.....	33
10.1 Inpultsu turbinak.....	33
10.2 Twin turbines.....	35
11. Plangintza.....	37

12. Gastu-aitorpena.....	39
13. Ondorioak.....	41
14. Informazio iturriak.....	43

# 1. Laburduren zerrenda

<b>OWC</b>	Oscillating Water Column
<b>WT</b>	Wells turbina
<b>KZ</b>	Koro zuzentzailearekin
<b>IT</b>	Inpultsu turbina
<b>TT</b>	Ingelesez " <i>Twin Turbines</i> "
<b>GRAL</b>	Gradu amaierako lana

## 2. Irudien eta taulen zerrenda

4.1 irudia: Espainian erabilitako energia iturriak (martxoak 2019).....	6
5.1 irudia: Tapchan sistema.....	8
5.2 irudia: Waveroller sistema.....	9
5.3 irudia: Pelamis sistema.....	10
5.4 irudia: Wave Dragon sistema.....	11
6.1 irudia: olatuen potentzia mundu mailan [1].....	12
7.1 irudia: OWC sistema baten eskema.....	14
7.2 irudia: Mutrikuko zentralaren produkzioa [2].....	19
8.1 irudia: Wells turbina baten eskema.....	20
8.2 irudia: WT baten alabeak.....	21
8.3 irudia: Wells turbina bateko alabe baten gaineko indarrak.....	23
8.4 irudia: alabe baten diseinurako formula [3].....	25
9.1 irudia: turbinatutako fluxua [4].....	27
9.2 irudia: alabeak gradu aldaketarekin.....	28
9.3 irudia: alabeak koro zuzentzailearekin [4].....	29
9.4 irudia: kororik gabeko errendimendua [4].....	30
9.5 irudia: errendimendua koroarekin [4].....	30
9.6 irudia: errendimendua sarrera sinusoidalarekin [4].....	31
9.7 irudia: WT errore bikoitzarekin (Pereiras, 2008).....	32

<b>9.8 irudia: WT kontrako noranzko alabeekin (Pereira.....</b>	<b>32</b>
<b>10.1 irudia: inpultsu turbina baten eskema [5].....</b>	<b>34</b>
<b>10.2 irudia: errendimenduen arteko konparaketa [5].....</b>	<b>35</b>
<b>10.3 irudia: <i>Twin Turbines</i>-en eskema.....</b>	<b>36</b>
<b>11.1 irudia: Proiektua gauzatzeko epeak.....</b>	<b>37</b>
<b>11.2 irudia: Gantt diagrama.....</b>	<b>38</b>
<b>13.1 taula: Proiektuaren egileak.....</b>	<b>39</b>
<b>13.2 taula: Barne-orduak.....</b>	<b>39</b>
<b>13.3 taula: Amortizagarriak.....</b>	<b>40</b>
<b>13.4 taula: Gastuak.....</b>	<b>40</b>
<b>13.5 taula: Gastu-aitorpenaren emaitza.....</b>	<b>40</b>



### 3. HELBURUA

Gradu amaierako lan honen helburu nagusia OWC zentraletan erabiltzen diren turbina mota desberdinen arteko konparaketa bat egitea da. Horretarako, hasieran gaur egungo egoera energetikoari buruzko azterketa bat egingo da, eta baita OWC zentraleri buruzko azalpen bat ere.

Turbinen artean, Wells turbinak dira gehien erabili izan diren turbinak. Hori dela eta, eta fluxu bidirekzionaletan egon zen lehen turbina izanik, honi buruzko azterketa teknikoago bat egingo da. Teknologia bakoitzaren abantailak eta desabantailak aztertuko dira, ikusteko zein izan litekeen OWC zentraletarako dagoen etorkizuna.

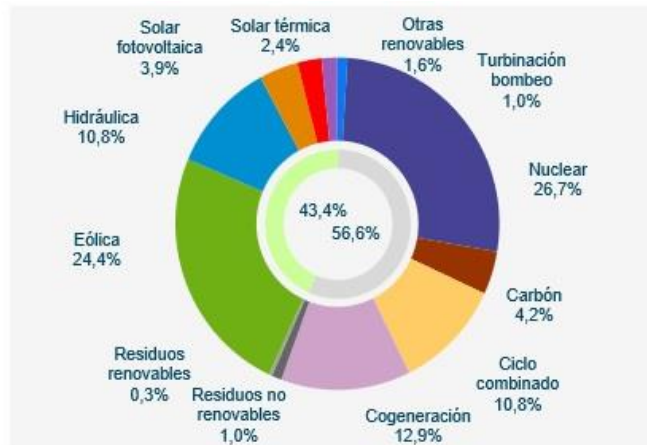
## 4. TESTUINGURUA

Nabaria da gizarteak elektrizitatearekiko daukan menpekotasuna. Gaur egungo energia elektrikoaren eskariari beste hainbat aldagai batu behar zaizkio hurrengo urteetako eskaria aurreikusteko: herrialde azpigaratuen garapena, gailu elektrikoen erabileraren hazkundera etab.

Historikoki erabili izan diren iturriak energia elektrikoa sortzeko, ordea, ez dira hain baliagarriak izango datozen hamarkadetan. Alde batetik, erabili izan diren materialak erregai gisa ez dira amaigabeak eta, bestetik, haietako gehienek ondorio zorigaitzak ekar ditzakete munduaren etorkizunerako beroketa globala dela eta. Munduko hiri garrantzitsu askok jada jarri izan dute arazo honi aurre egiteko zenbait murriztapen; Madrilen, adibidez, txirrindula edo kotxe elektrikoen erabilera sustatzen ari dira, gasolina eta diesela erabiltzen duten kotxeei debekuak jarritz.

Azaldutako arrazoiengatik, gizartearen erronka nagusietako bat energia ekoizteko beste bide batzuk bilatzea da, horien artean energia berriztagarrien bidez elektrizitatea ekoiztea izanik bide zentzuzkoena. Herrialde gehienek berriztagarriak erabiltzen dituzte jada, nahiz eta ez izan erabilienak. Hurrengo grafikoan ikus daiteke zen izan den 2019. urteko martxoan Spainian erabili izan diren energia iturriak, *Red Eléctrica de España* datuen arabera.

Estructura de generación mensual peninsular



#### 4.1 irudia: Espainian erabilitako energia iturriak (martxoak 2019)

Grafikoan ikus daiteke energia berriztagarria %50an baino gutxiago erabili izan dela energia elektrikoa ekoizteko. Ekoizpena jasangarria izan dadin, portzentaje hori guztiz irauli beharko litzateke, energia berriztagarrien bidez ia energia guztia lortuz. Logikoki, hori ezin da egun batetik bestera egin, instalatuta dagoen potentzia ez delako nahikoa. Eolikoa da gehien erabiltzen den ekoizpen mota, %24,4eko portzentajearekin. Sistema mota honek daukan arazoetako bat bere garapen gorenera heldu dela diote jakitunek, ondorioz, etorkizunerako beste bide batzuk bilatzera behartuta gaude.

Grafikoan bertan ere ikus daiteke energia hidraulikoaren erabilera %10,8koa dela. Espainia penintsula bat izanik, ekoizpen mota hau hurrengo belaunaldietarako garrantzitsua izango dela logikoa dirudi. Itsasoko ura erabiltzen duten sistemak bi taldetan banatzen dira: undimotriz eta mareomotriz.

Undimotriz izena grekotik dator, "undi" olatua izanik eta "motriz" mugimendua. Izenak berak esaten duenez, sistema honek olatuek

daukaten energia erabiltzen du elektrizitatea ekoizteko. Mareomotriz, ordea, itsasoetan gertatzen diren itsasaldiek sortutako energia potentzialaren diferentziak erabiltzen ditu. Azken mota honetako zentralik garrantzitsuenetariko bat Frantzian kokatuta dagoen La Rance da. 225000 biztanleentzako energia ekoizteko ahalmena dauka, 10MW-ko ahalmena duten 24 turbinekin. Arazo nagusiena ingurumen inpaktua da, 22 km<sup>2</sup>-ko urtegia behar duelako ur guztia gorde ahal izateko.

Lan honen helburuetako bat energia *undimotriz*-eko sistema batek erabiltzen duen turbinaren azterketa bat egitea da, Wells turbinarena hain zuzen ere. Ondorengo ataletan egingo da energia mota honetako sistemen azalpen labur bat.

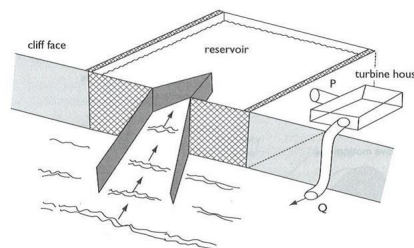
## 5. OLATU-ENERGIA SISTEMA NAGUSIAK

Atal honen helburua sistema ezberdinen azterketa labur bat egitea, olatuek sortutako energiaren baliatzen diren sistemei sarrera bat emateko. Mota honetako sistemak bi taldetan sailka daitezke: *onshore*, kostaldetik hurbil baldin badaude edo *offshore*, itsasoan barrenean baldin badaude.

OWC ("Oscillating Water Column") sistema GRAL honetako muinetako bat denez, beste atal batean egingo da, gehiago sakonduz.

- TAPCHAN:

Izena ingelesetik dator eta "Tapered Channel" esan nahi du. Sistema honek mendietan kokatutako urtegiak erabiliz energia produzitzen duten sistemen nahiko antza dauka: uraren energia potentzialaz baliatzen da energia produzitzeko. Itsaslabar batean kokatzen da urtegia, eta itsasotik urtegiara doan kanalaren estutze baten ondorioz olatuen maila handiagotzea lortzen da. Abantaila nagusietako bat energiaren produkzioa eskariari doitu daitekeela da.



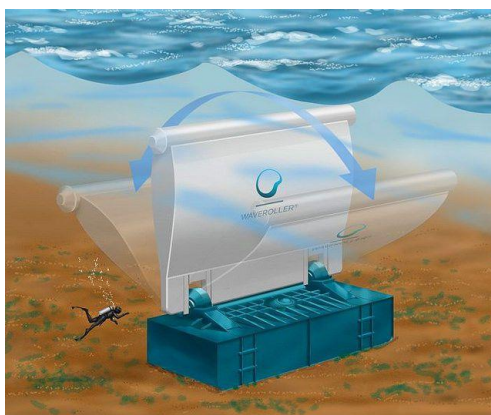
A diagram of the TAPCHAN device. (Twidell and Weir, 2006)

### 5.1 irudia: Tapchan sistema

- **WAVEROLLER:**

Itsas-hondoan kokatutako plakek jasandako mugimenduei esker oinarritzen den sistema bat da. Hondoko olatuei esker, plakek aurrerako eta atzerako mugimenduak jasango dituzte, eta mugimendu horiek pistoi-ponpa sistema bat eragingo dute.

Plakak unitateka egon daitezke lanean, eskariari moldatuz. Azterketa sakon bat egin behar da instalazioa egin baino lehen, olatuek behekaldean izango duten indarra nahikoa izango dela ziurtatzeko.



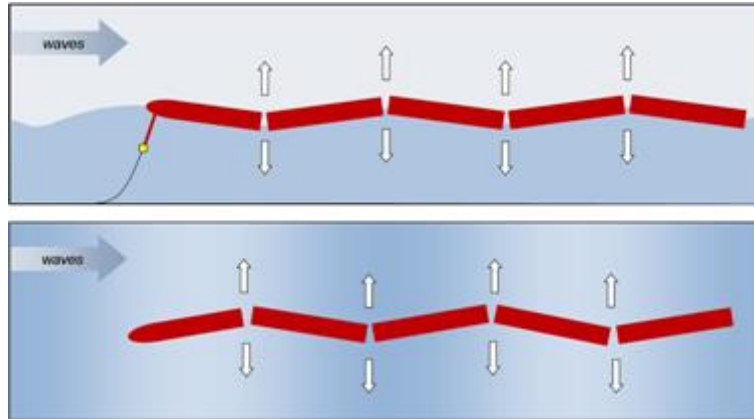
**5.2 irudia: Waveroller sistema**

- **PELAMIS:**

Kasu honetan, sistema ez da uretan guztiz murgilduta egongo. Suge baten antza duen dispositibo bat da, hainbat unitateekin (tutu antzekoak), beraien artean artikulazioen bidez elkartuta daudelarik.

Olatuen mugimenduen ondorioz, elkarrekin artikulatutako unitateak uhin batek jarraitzen duen mugimendu berari jarraituko diote. Modu

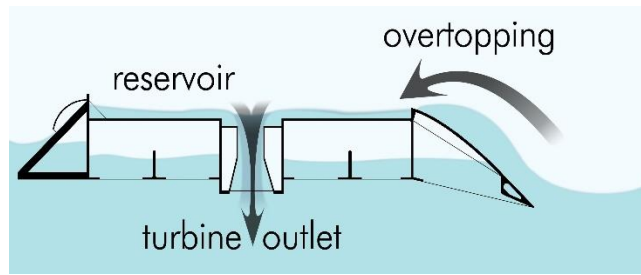
honetan, "tutu"-en artean dauden ariete hidraulikoak mugimendua jasango dute, energia sortuz.



5.3 irudia: Pelamis sistema

- WAVE DRAGON:

TAPCHAN sistemaren nahiko antza dauka, funtzionamendu printzipioari dagokionez. Sistema honek olatuak itsas-mailatik gora igotzen ditu, bertan dagoen urtegi batera. Ondoren, urtegi horrek dauzkan ahateak zabalduz ura turbinatu egiten da, energia sortuz. Itsasoan barrenean egon ohi dira instalatuta, olatuek daukaten energia potentziala ahalik eta hobekien aprobetxatu ahal izateko. Kasu honetan ere ura urtegiaren barruan gorde daiteke, eskariak eskatzen duen momentuan energia sortu ahal izateko.



**5.4 irudia: Wave Dragon sistema**

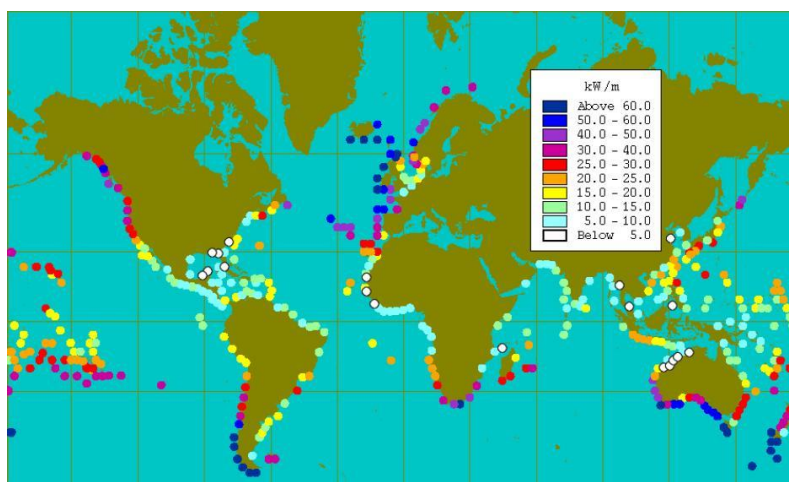


## 6. OLATUEN POTENTZIA

Aurretik komentatu den bezala, olatuen potentzia aldagarrik garrantzitsuena da OWC sistemetan. Olatuen maiztasuna handia izateaz gain, olatu-hormaren kontra talka egitean sorturiko aire zutabeak alabeak mugitzeko energia minimo bat izan behar du.

Negutegi efektuko gasen ondorioz, beroketa globala areagotu egin da, eta horrekin batera, olatuen kantitatea eta itsas-maila. Ikuspuntu utopiko batetik, itsas energia erabiltzen duten sistemek arazo hau erabil dezakete energia sortzeko, arazo hori sortzen duten sistemak erabili beharrean.

Hala ere, olatuen hazkunde hau ez da oso nabaria berotegi efektuarekin konparatuz. Izan ere, Kaliforniako unibertsitaterako egindako ikerkuntza batek agerian utzi zuen olatuen potentzia %0,4 handitu egin dela urtero, 1948-tik. Datu hori, negutegi efektuko gasekin konparatuz gero, handiagoa izan beharko litzatekela ikus dezakegu.



6.1 irudia: olatuen potentzia mundu mailan [1]

6.1 irudian ikus daiteke grafikoki nolakoa den olatuen potentzia mundu mailan, kW/m-tan neurtuta. Espainari dagokionez, ikus daiteke ipar kostaldean nahiko potentzia sortzen dela, Galizia aldea izanik potentzia handiena sortzen den lekua.

Izan ere, nahiz eta momentu honetan instalatuta dauden sistema gehienak prototipoak izan, Galiziako gobernutik bultzada handia ematen ari zaie energia berriztagarriari. 2020. urterako bertako kontsumo osoaren %45a energia mota honekin asetzea da helburua, horretatik gehiena itsasoko energia aprobetxatzen duten sistemak izanik.

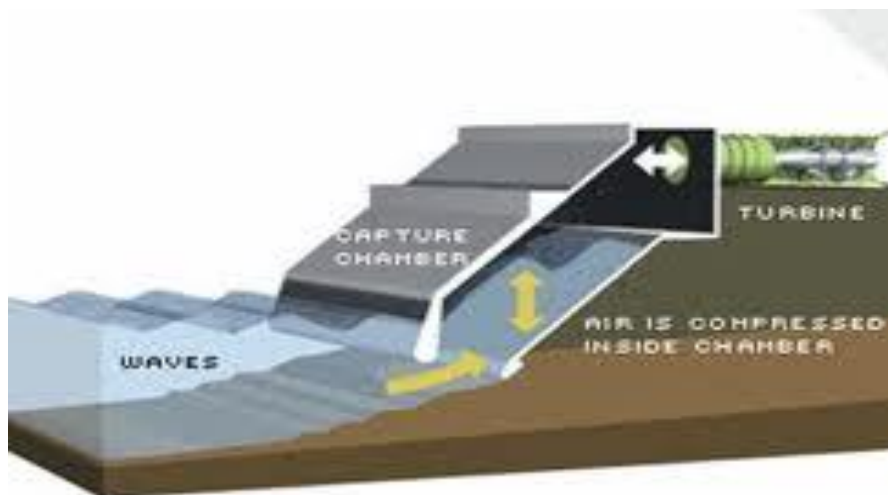
Euskadiri dagokionez, nahiz eta Kantauri Kostaldeko olatuen potentzia nahikoa sortu, gobernutik ez dute, momentuz, energia mota hauek erabiltzeko asmorik. "Estrategia energética de Euskadi 2030" dokumentuan, nahiz eta etorkizunerako garrantzitsua izango dela aurreikusi, momentu honetan daukan azpi-garapenaren ondorioz beste aukera batzuei lehentasuna ematea erabaki du gobernuak.

## 7. OWC SISTEMAK

OWC sistemak (ingelesez, "Oscillating Water Column"), bere izenak adierazten duen bezala, olatuek sortutako zutabe oszilatzaile bat erabiltzen du energia sortzeko. Funtzionamendu printzipioa horrela laburbildu daiteke: olatu batek ganbara baten barneko olatu-horma baten aurka talka egitean sortutako presio diferentziagatik eskuratzen da energia.

Aurreko kapituluan komentatu den bezala, OWC zentralak *onshore* edo *offshore* instalatu daitezke. Kokapenaren arabera, abantaila batzuk eta desabantaila batzuk sor daitezke: *offshore* kokatuz gero, adibidez, olatuek energia gehiago aurkeztuko dute baina zailagoa izango da mantentze egokia egitea.

Sistema mota hau ondorengo irudiaren bitartez adierazi dezakegu:



7.1 irudia: OWC sistema baten eskema

7.1 irudian ikus daiteke eskematikoki nolakoa den OWC sistema baten funtzionamendua. Lehendabizi, olatuek olatu horma baten kontra talka egiten dute. Horren ondorioz, aire zutabe batek gora egingo du, eta turbina batetik pasatzen da. Turbinatik pasatzean, energia elektrikoa sortuko da eta, olatuek atzera egitean, turbinaren alabeak ere mugituko dira beraien formagatik (geroago sakonduko dugu), berriz ere energia elektrikoa sortuz. OWC zentralak ondorengo hiru ataletan banatu daitezke.

### **7.1. Ganbera**

Aurretik aipatutako olatu-horma ganbararen barnean dago, edo, hobeto esanda, ganbararen kanpo paretak babesten du olatu-horma. Gainera, ganbaran zehar mugituko da aire fluxua turbinara heltzeko. Eraikitzerako orduan, kontuan izan behar da itsasoarekin egongo dela kontaktuan eta, hortaz, olatuekin. Ondorioz, ganbararen hormek kolpeekiko eta korrosioarekiko erresistentzia nahikoa izan behar dute.

Hortaz aparte, obra zibilaren muina izango da ganbara, eta kontuan izan behar da izango duen ingurumen inpaktua eta inpaktu bisuala. Ikuspuntu teknikotik ikusita, ganbararen geometriak guztiz baldintzatuko du turbinaren funtzionamendua. Ganbararen barneko erresonantzia maiztasun naturala eta olatuengatik sortutako erresonantzia bat egiten dutean, sortutako energia maximoa izango da.

Arestian komentatu den bezala, olatuek maiztasun aldakorra aurkezten dute eta, urtaroaren arabera, oso desberdina. Ondorioz, ganbara eraikitzerako orduan, ez da bakarrik tamaina eta erresistentzia kontuan izan behar, ganbararen geometriak turbinan zer nolako eragina izango duen ikasi behar da ere.

## 7.2. Turbina

Behin olatuak aire zutabea sortu duela, korrante hori turbinatik pasako da. Turbina mota hau Wells turbina izan ohi da, eta aurrerago egingo da turbina mota honen azterketa zabal bat. Turbina OWC sistemen muina da eta eraikitzerako orduan hainbat aspektu hartu behar dira kontuan: fluxu bidirekzionala, maiztasun eremu handi batekin lanean egongo dela etab.

Hasiera batean norabide bakarreko turbinak erabiltzen ziren, itzulera-contrako balbula batzuekin batera. Balbula horiei esker, fluxuaren norabidea zuzentzea lortu zen, baina beste hainbat arazo agertu ziren.

Fluxu bidirekzionalaren arazoari aurre egiteko fluxuari bere kabuz jarraitzen dioten turbinak sortu ziren, horien artean WT izanik aitzindaria.

### **7.3. Sorgailua:**

Turbinaren ardatza sorgailu bati egongo da konektatuta, azken honek energia elektrikoa ekoiztu izateko. Sorgailuak bi motatakoak izan daitezke: sinkronoak edo asinkronoak.

Sinkronoek abiadura konstantean mugitzen dira funtzionamendu egoera normalean, eta bere abantaila nagusietako bat da sareari ematen dioten egonkortasuna. Beste modu batean esanda, sareari ez diote inolako perturbaziorik sartzen. Aurkezten duten desabantaila: kontrol zehatzago bat behar dutela. Asinkronoek ez dute horrelako kontrol zorrotzik behar, baina ez dute egonkortasun hain handia ematen.

OWC sistemetan sorgailu asinkronoak erabiltzea da ohikoena, oso abiadura altuekin lan egin behar delako. Gainera, abiadura desberdinei hobeto egokitzen da, olatuek sortutako aire zutabeen maiztasun eremuari hobeto egokituz.

### **7.4. Mutrikuko zentrala**

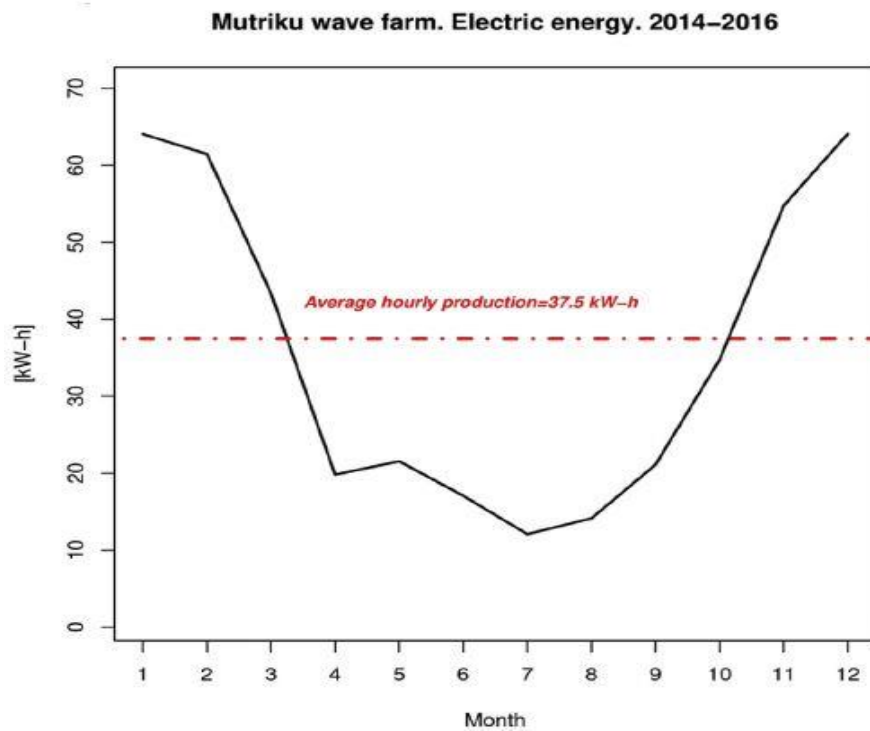
Euskal Herrian OWC sistema erabiltzen duen zentral bakarra dago eraikita, Mutrikun hain zuzen ere. Mundu mailan sareari modu jarrai batean energiaz ekoizten duen zentral bakarra da. 2011. urtetik dago funtzionamenduan, eta 2014-2016 urte bitartean UPV/EHU-ko ikertzaile talde batek zentralari buruzko ikasketa bat egin zen, bere funtzionamendua aztertzeko.

Teknologia berri bat izanik, aurretik ezin zen aurreikusi nola erantzungo zuen. Ikertzaileen arabera, zentralak ez zuen espero zen bezain ondo erantzun. Espero zen produkzioa 600.000 Kwh-koa zen, 296 kW-ko potentzia nominalarekin. Emaitez, ordea, erakutsi zuten produkzio horren %41-ra baino ez zela heldu.

Azpi-produkzio horrek zenbait arrazoi ditu. Alde batetik, zentrala 16 turbinekin lan egiteko zegoen pentsatuta baina, diseinuan egondako errore baten ondorioz, 2 turbina ez daude funtzionamenduan. Bestetik, mota honetako lehen zentrala izanda, oso zaila izan zen aurreikustea praktikan gertatuko zena (mantentze lanak, adibidez.)

Turbinak urrats finkoko WT-ak dira, 3 alabeetako 2 errotoreekin muntatuak. Bakoitzaren guztizko pisua 1200 kg-koa da, eta beraien dimentsioak: 3 m luze eta 1,25 m zabal

Aipatutako arazoak gorabehera, zentralak denboraren %74,4-an dago etengabe sarea elikatzen, nahiko denbora dena kontuan hartzen badugu olatuek ez direla guztiz jarraiak. Gainera, egindako ikerkuntzak erakutsi zuten diferentzia oso handia dagoela negu-aldeko produkzioaren eta uda-aldeko produkzioaren artean. Hurrengo grafikoan ikus daiteke diferentzia hori.



### 7.2 irudia: Mutrikuko zentralaren produkzioa [2]

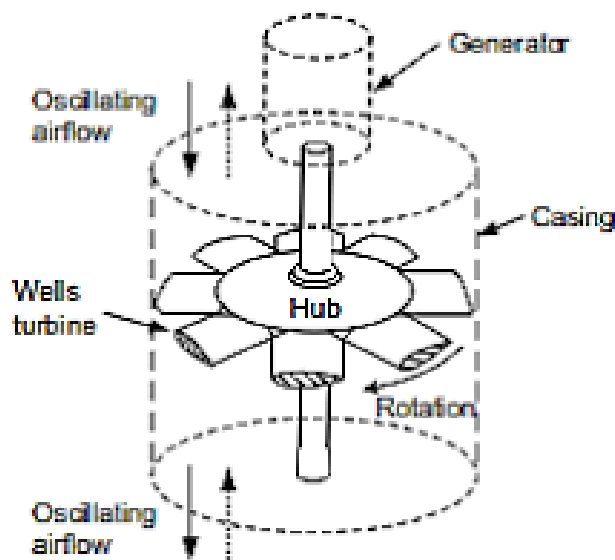
Agerian zegoen beste arazoetako bat sorturiko zarata zen, batez ere eraikitzerako orduan. Energia berriztagarria ekoizteko planta bat izanik, ez zirudien zentzuzkoa kontaminazio akustikoa sortzea, ondorioz, zarata minimizatzeko sistema bat jarri zen turbina bakoitzean.



## 8. Wells turbina

### 8.1. Sarrera

OWC sistemak azaltzean komentatu dugu Wells turbinak direla sistema honekin lan egiteko dauden turbina egokienak. Izan ere, bere alabe simetrikoei esker lortzen dugu turbina mugiaraztea aireak egindako mugimendu osoan zehar: xurgatzean eta kanporatzean.



8.1 irudia: Wells turbina baten eskema

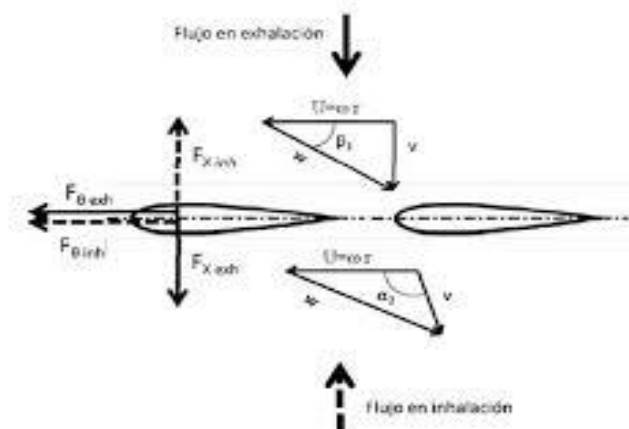
8.1 irudian ikus daiteke turbina mota honen eskema bat. Bertan, airearen fluxu direkzionalari biraketa norabide bakar batekin jarraitzen diola ikus daiteke. Nahiz eta irudian turbina bertikalki kokatuta egon hau ez da zertan horrela izan behar; izan ere, sistema osoaren eskeman (7.1 irudia), turbina horizontalki egongo litzateke kokatuta.

Kokapena edozein izanda ere, mota honetako turbina guztiak olatuek sortutako aire zutabeari esker mugituko dira. Itsasoko urarekin zuzenean ez direnez kontaktuan egongo, gatzagatik sor litekeen korrosioa saihesten da.

8.1 irudian ikus daiteke alabeen kopurua 8 dela. Nahiz eta irudi hori turbinaren sinplifikazio bat izan, errealitatean alabe kopurua 8 izan ohi da, aldaerak gorabehera.

## 8.2. Alabeak

Komentatu dugun bezala, Wells turbinen alabeak simetrikoak dira, 8.2 irudian ikus daitekeen bezala. Bertan, abiaduren triangelua ikus daiteke, eta baita sortutako parra ere.



### 8.2 irudia: WT baten alabeak

Alabeak aire fluxuari elkartzutak egon behar dira kokatuta, simetrikotasun hori aprobetxatu ahal izateko. Xurgatzean eta kanporatzean sortutako indar axiala ( $F_x$ ) eta indar tangenziala ( $F_0$ )

agertzen dira bertan. Azken indar hau izango da mugimendua sortuko duenak.

Nahiz eta indar tangenziala izan guk nahi izango duguna, ezinezkoa da indar axiala ezabatzea. Izan ere, horren ondorioz gertatuko dira turbinan egon litezkeen arazo mekaniko asko (bibrazioak, zarata...).

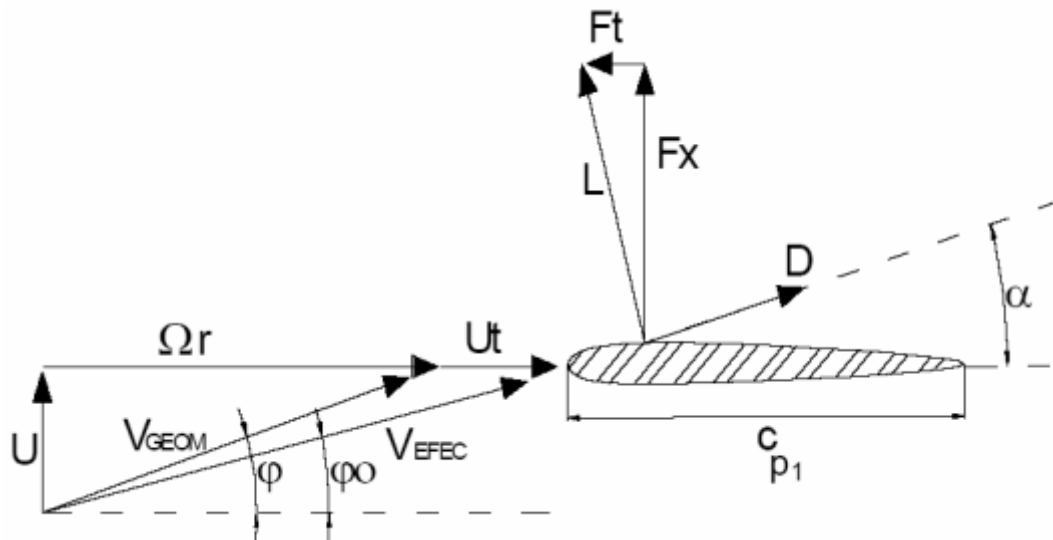
Komentatu dugu airea elkartuta sartu behar dela simetrikotasun hori aprobetxatzeko. Hala ere, beti ezin da lortu fluxua erabat perpendikularki sartzea. Hori lortu ahal izateko zenbait aldaera egin dira: fluxuaren sarrera aldatzen duten sistemak edota alabearen beraren angelua aldatzen duten sistemek.

Turbinek funtzionamendu egoera optimo bat dute. Fluxuaren abiadura handitu ahala, eraso angelua ere handituko da, eta heldu daiteke momenturen bat non alabeek sorturiko momentua jaistea. Hori ekiditeko jarri daitezke komentatutako sistemak sarrera fluxua kontrolatu ahal izateko.

### **8.3 Diseinu parametroak**

Wells turbinak diseinatzerako orduan, bilatu behar dugu aire fluxua ahalik eta axialena izatea. Honekin batera, gertatzen den presio beherakada aire fluxuarekiko lineala izatea lortu behar dugu. Bi baldintza hauek betetzen badira, turbina eta gero dagoen energia zinetiko errotazionala minimizatzea lortuko dugu, hasiera batean

bilatzen ari ginena. Hurrengo irudian ageri dira alabe baten gainean gertaturiko indarrak:



**8.3 irudia:** Wells turbina bateko alabe baten gaineko indarrak (Pinilla, 1985)

Aurreko irudian ikus daitezke alabearen gainean gertaturiko indarrak, baita abiadura triangeluak ere. Indar aerodinamikoak hurrengo eran deskonposa daitezke:

$$F_T = L \sin \theta - D \cos \theta$$

$$F_X = L \cos \theta - D \sin \theta$$

Non  $F_X$  eta  $F_T$  aurretik komentatutako indar axiala eta tangentialak diren, hurrenez hurren. Garapenarekin jarraitu baino lehen bi kontzeptu azalduko dira, laburki: euste-indarra eta arraste-indarra. Bi kontzeptu hauek garrantzitsuak dira alabearen gainean gertaturiko indarrak ulertu ahal izateko.

Euste-indarra jariakin baten zehar mugitzen den gorputz baten pean sortzen den indarra da, norabide perpendikularrean. Indar honen eraginez sortzen da 8.3 irudian ikus daitekeen L aldagaia, ingelesez "lift" esan nahi duena (eustea).

Arraste-indarra, ordea, mugimenduarekiko paralelo sortzen den indarra izango litzateke. Indar mota honek garrantzi handia dauka automobilgintzan edo hegazkinetan, besteak beste. Kasu honetan, eskeman D letrarekin adierazi da arraste-indarra, ingelesez "drag" esan nahi baitu.

Behin bi azalpen hauek eginda, horrela geratuko lirateke euste eta arraste indarrak 8.3 irudiko aldagaien arabera:

$$L = \frac{1}{2} V_{efec}^2 c C_{Loptimo}$$

$$D = \frac{1}{2} V_{efec}^2 c C_D$$

Non CL eta CD euste eta arraste koefizienteak diren, hurrenez hurren, Biak koefiziente aerodinamikoak dira, hortaz, adimentsionalak izango dira.

Errotazio ardatzarekiko abiadura eraginkorraren ( $V_{efec}$ ) angelua, hurrengo formularen bidez adierazi daiteke:

$$\tan\alpha = \frac{U}{\Omega r + Ut}$$

Atal honen hasieran komentatu den bezala, diseinatzerako orduan bilatu behar dena presio diferentziaren eta fluxuaren arteko erlazio lineal bat bilatzea da. Horretarako, lehendabizi presio diferentziaren erlazioa lortu behar dugu. Energiaren kontserbazio printzipioa aplikatuz gero, alabeen gertaturiko presio diferentziaren adierazpena lortu dezakegu:

$$P_1 - P_2 - \frac{1}{2} U_T^2 = r \Omega U_T$$

Orain arte lortu ditugun ekuazioekin lan eginez gero, presio diferentziaren hurrengo adierazpen sinplifikatura helduko ginateke:

$$P_1 - P_2 = U U_T \cot \alpha$$

Lortu ditugun ekuazioak konbinatuta, Pinillak lortutako diseinu ekuaziora helduko ginateke, hurrengoa dena:

$$\frac{B \cdot C \cdot C_L}{4 \pi \cdot r} = \Delta P_o^* \times \frac{1}{\sqrt{1 + (U^*)^2}} \times \frac{1}{\left(1 + \frac{\Delta P_o^*}{2} \cdot \left(\frac{2 + (U^*)^2}{1 + (U^*)^2}\right)\right)}$$

**8.4 irudia:** alabe baten diseinurako formula [3]

#### **8.4. Aurkeztutako arazoak**

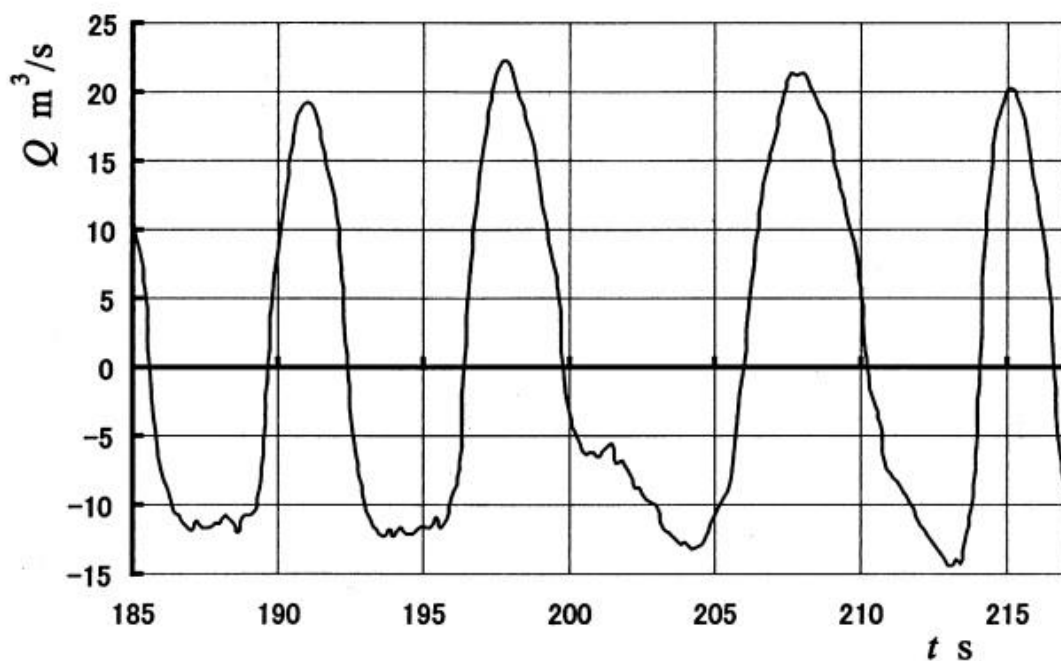
Behin alabeei buruzko ikasketa eginda, azter dezagun funtzionamenduan aurkeztutako arazorik garrantzitsuenak.

- Eguraldi kritikoetan, hau da, olatuen potentzia normalean aurkezten duen potentzia baino handiagoa denean, galeren balio kritikoa gainditzen da eta sistematik lortzen den potentzia kritikoki jaisten da.
- Orain arte eraiki izan diren turbina gehienak handiegiak dira, bertatik lor daitekeen potentziarekin konparatuz.
- Aire fluxu baxuekin pare baxuak lortzen dira.

## 9. Wells turbinaren aldaerak

WT aitzindariak izan ziren OWC sistemetan erabiltzeko. Nahiz eta fluxu bidirekzionaletarako egokienak dirudi, arestian aipatutako arrazoiengatik, zenbait aldaketak proposatu izan dira arazo horiek konpontzeko.

WT-en alabeak finkoak eta simetrikoak izanda, era egokian erantzungo liokete fluxu bidirekzional konstanteari; hau da, fluxuaren abiadura berdina izango balitz sartzerakoan eta kanporatzean. Fluxuaren abiadura (emaria), ordea, ez da berdina bi norabideetan.



9.1 irudia: turbinatutako fluxua [4]

Irudiko abzisa ardatzetik gora erakusten den emaria olatua ganberan sartzen den momentuari dagokio. Behako parte, ordea, olatua ganbaratik irteten den momentuari.

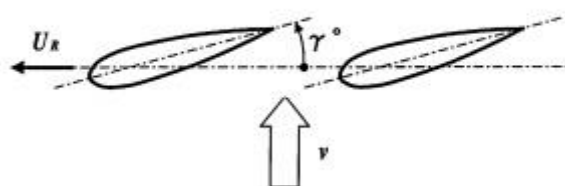


Grafikoa Indian kokatutako *National Institute of Ocean Technology*-k daukan OWC planta bati dagokio. Nahiz eta agertzen den kurba ez den beti horrela izan behar, daukan joera errepikatuko da sistema honetako planta guztietan.

Ondorioz, gertatzen den emari diferentzia honi aurre egiteko hainbat proposamen egin izan dira, hurrengoak izanik aipagarrienak.

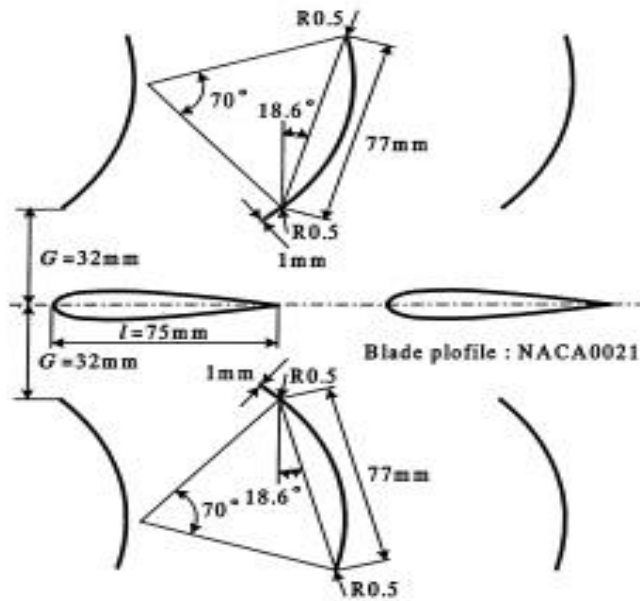
### 9.1. Wells Turbina koro zuzentzailearekin

Proposamen honetan aldaketa bi aurkeztu ziren: alde batetik, KZ bat jartzea alabeak baino lehen eta ondoren; bestetik, alabeen graduazioa aldatu ahal izatea. Aldaketa hauen helburu nagusia WT-en eraginkortasuna handitzea zen, aipaturiko emari desberdintasun horri hobeto erantzunez.



### 9.2 irudia: alabeak gradu aldaketarekin

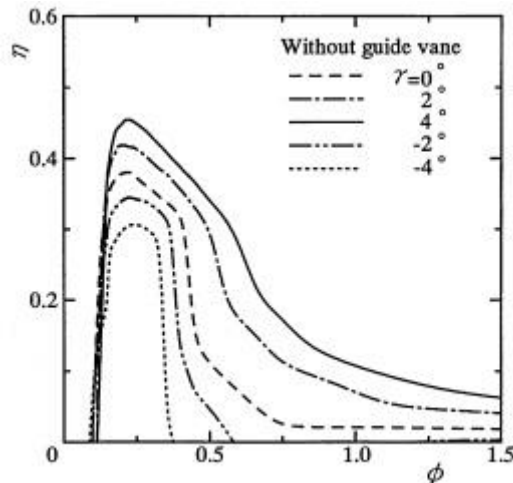
Irudian ikus daitezkeen bezala, proposamen honetan alabeak  $\gamma$  angelua desbideratzeko aukera izango zuen. Hortaz aparte, hurrengo irudian agertzen diren KZ-k jartzea erabaki zen.



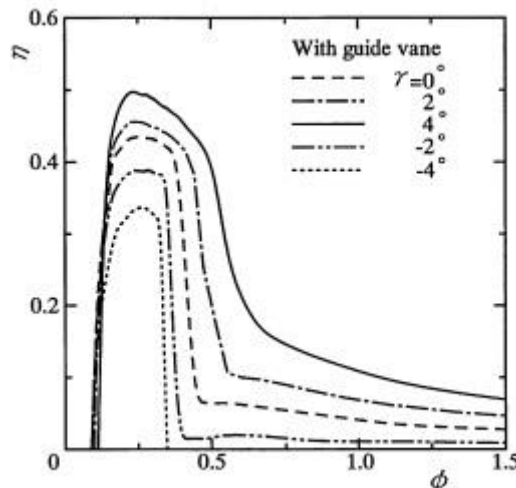
### 9.3 irudia: alabeak koro zuzentzailearekin [4]

Dimentsio hauek, ordea, ez dira prototipo guztietan berdinak izan. Beste frogetan koroaren dimentsio desberdin batzuk proposatu egin ziren, fluxuarekiko angelu desberdinekin. Hala ere, dimentsio berriak ez ziren asko aldentu jatorrizko eredutik. Irudian  $\gamma=0^\circ$ -rako egoera dago adierazita, baina entsegurako zenbait angelu desberdin frogatu ziren. Frogan 8 alabe erabili izan ziren baina, arestian komentatu den bezala, kopurua aldakorra izan daiteke.

Frogatu izan ziren angelu desberdinak  $0^\circ$ ,  $2^\circ$ ,  $4^\circ$ ,  $-2^\circ$  eta  $-4^\circ$  izan ziren. Froga egiterako orduan, lehendabizi KZ ez jartzea erabaki zen, desbiderazio angelu desberdinentzat. Modu honetan, ikusi egin zen zer nolako eragina KZ-ren kokapena turbinaren errendimenduan. (Hurrengo irudietan) ikus daiteke grafikoki turbinaren errendimendua: lehenak KZ-rik gabeko egoerari dagokiona eta bigarrenak KZ dueneko egoerari dagokiona:



9.4 irudia: kororik gabeko errendimendua [4]



9.5 irudia: errendimendua koroarekin [4]

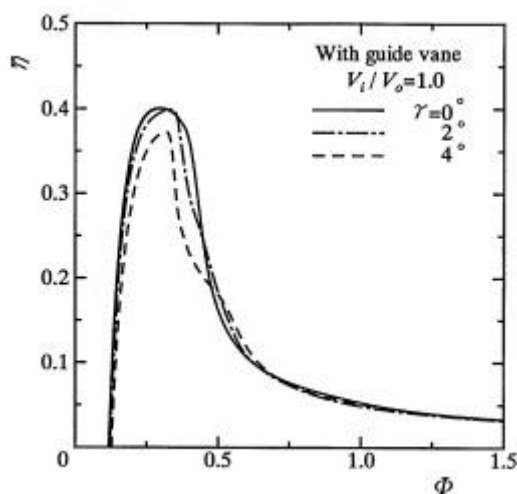
Bi grafikotik atera daitekeen lehenengo ondorio garrantzitsua KZ-k errendimendua handitzen duela da. Egoera zehatz batean fijatuz gero, errendimendu baxueneko egoeran adibidez, ikus dezakegu errendimendu maximoa kororik gabe %30-koa dela, gutxi gorabehera. KZ-rekin, ordea, %33-koa inguru. Nahiz eta errendimendua ez zenez asko handitu, agerian geratu zen KZ-ak errendimendua hobetzen zuela.

Desbideratze angeluari dagokionez, beste ondorio nabarmen bat atera daiteke grafikotik: angelua zenbat eta positiboagoa izan, orduan eta errendimendu handiagoa. Bi kasuetatik lortu izan zen egoerarik

hoberena errendimenduaren ikuspuntutik ondorengoa izan zen:  $4^\circ$  desbiderazio angelua KZ-arekin.

Hala ere, aipatutako egoera ez zen guztiz errealitatera hurbiltzen, sarrerako fluxua sinusoidala izan behar zuelako. Orduan, (irudiaren zenbakia) irudiko sarrera sinusoidal baten antzeko bat ezartzea erabaki zen.

Bertatik atera zen ondorioa hurrengoa da: egoerarik hoberena KZ-a jartzea da, bai, baina  $2^\circ$ -tako desbiderazio angeluarekin. Hurrengo grafikoan ikus daiteke turbinaren errendimendua sarrera sinusoidal baten pean.



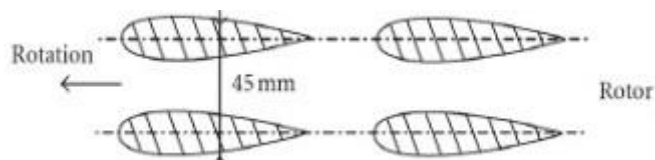
9.6 irudia: errendimendua sarrera sinusoidalarekin [4]

Bertan agertzen den  $V_i / V_0$  erlazioa sarrera sinusoidalean emandako kanporatze eta hartze abiadura maximoak dira. Zenbait sarrera desberdin frogatu ziren, eta zenbakiak gorabehera, guztiek ondorioztatu zuten emaitza bera.

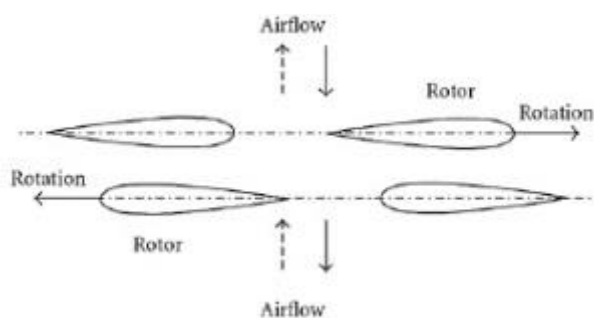
## 9.2. Wells turbina errore bikoitzarekin

Proposatu egin den beste WT mota bat KZ batekin doa ere, baina kasu honetan bi erroreekin, hau da, alabeen kopuru bikoitzarekin. Gainera,

alabeen kokapena bi modu desberdinetan bana daiteke: norabide berean doazenak eta kontrako norabidean doazenak.



9.7 irudia: WT errotore bikoitzarekin (Pereiras, 2008)



9.8 irudia: WT kontrako noranzko alabeekin (Pereiras,2008)

Azken disposizio hau Erresuma Batuan kokatutako LIMPET OWC zentrolean dago instalatuta. Nahiz eta fluxuari modu hobereanean jarraitzeko aukera eman, bi aldaera hauek desabantaila batzuk ere aurkezten dituzte: mantentzerako arazo gehiago, diseinu konplexuagatik eraikitzeko kostu gehiago, sistemari pisua gehitu etab.

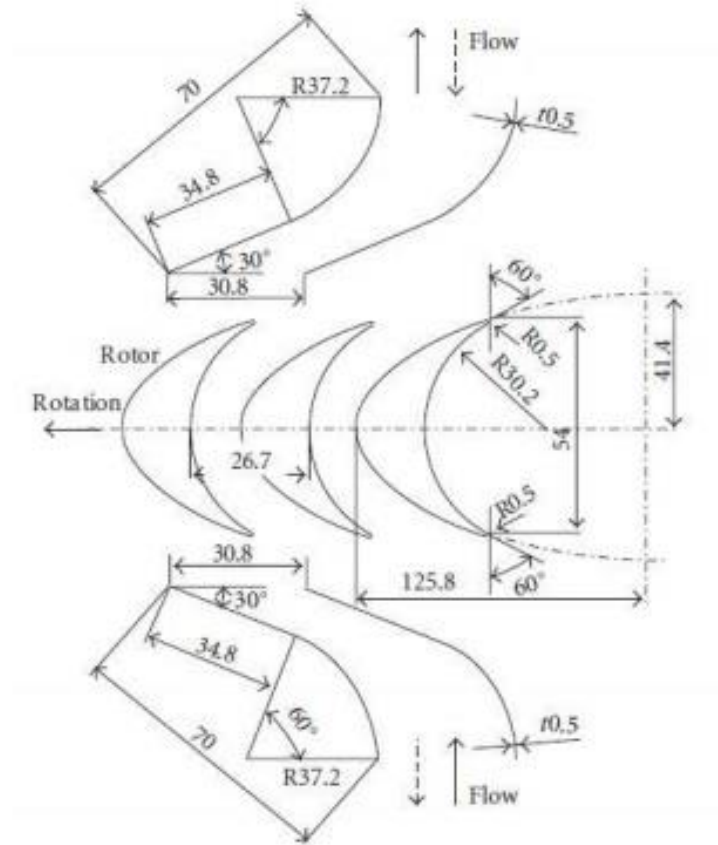
## 10. OWC sistemetarako beste aukerak

Orain arte aipatu izan diren WT-ak aproposak dira fluxu bidirekzionalaren aurrean lan egiteko aurkezten duten ahalmenagatik. Hala ere, nahiz eta aldaeren bidez hobekuntzak bilatu, sistematik lortutako errendimendu baxuak beste bide batzuk bilatzera behartzen gaitu.

Bi izan dira orain arte bilatu izan diren irtenbide nagusian: alde batetik, inpulstu turbinak eta, bestetik, norabide bakarrean lan egiten duten turbinak erabiltzea, sisteman aldaketa batzuk sartuz fluxu bidirekzionala zuzentzeko. IP-k OWC sistemetarako egokiak izan daitezke, fluxuaren bi norabideetan biraketa bera aurkezten dutelako.

### 10.1 Inpulstu turbinak

Erabili diren inpulstu turbinen alabeak koilara itxurakoak dira, zentral hidroelektrikoetan erabiltzen diren inpulstu turbinak bezala. WT-aren aldaeretan ikusi den bezala, kasu honetan ere bi KZ egongo dira errodetea inguratzen. Hurrengo irudian adierazten da eskematikoki turbinaren alabeak eta KZ-a.

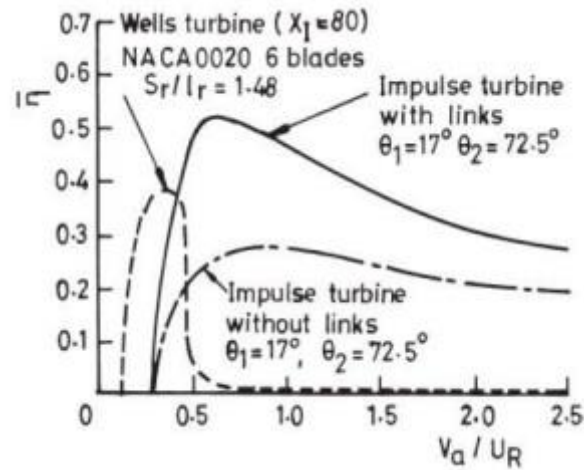


10.1 irudia: inpultsu turbina baten eskema [5]

OWC sistematarako IT aitzindari honetan, ordea, desabantaila nagusi bat dago: airea kanporatzeko jarritako koroa aire-hartze prozesuan oztopo handiak jartzen zuen. Fluxua bidirekzionala izan behar denez, ezinezkoa zen KZ kentzea, ondorioz, pentsatu izan zen irtenbide bat KZ-ren kokapena aldatzeko aukera izatea izan zen.

Aldaketa hau sartuta errendimendua nabarmen handitzea lortu zen, (grafikoaren zenbakia) irudian ikus daitekeen bezala. Hala ere, koroa mugitzeko aukera izateak beste desabantaila berri bat sortu zuen: KZ bakoitzak bi aldiz mugitu behar zuen bere posizioa aireak jarraitutako

ziklo bakoitzean. Horrek, turbinaren diseinurako eragozpen handia suposatzen du, eta mantentze lanei zailtasun handia ematen dio.



10.2 irudia: errendimenduen arteko konparaketa [5]

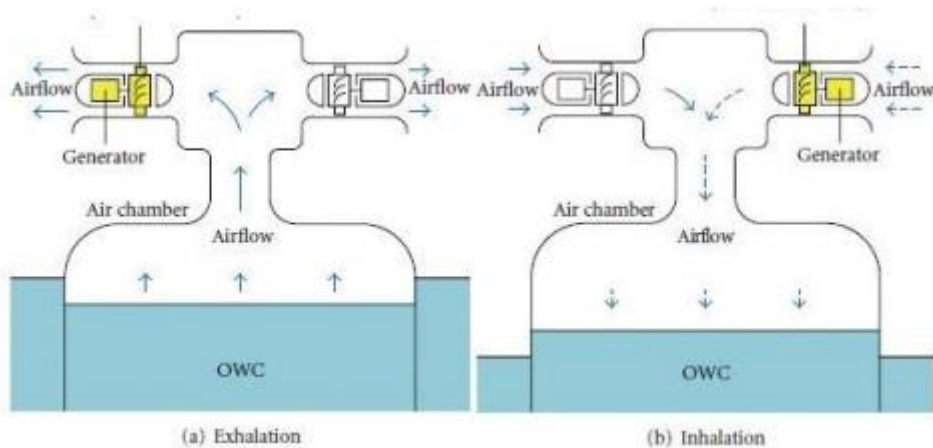
Grafikoan ikus daiteke errendimendu nahiko ona lortu zela KZ-ri aldaketa hau sartuz. Hala ere, aipatutako desabantailengatik, gerta daiteke errendimendu hobekuntza hori ekonomikoki jasangarria ez izatea, eraikitzerako eta mantentzerako kostu gehigarriengatik.

### 10.2 Twin Turbines

Aukera honek beste konplexutasuna ematen dio OWC sistemari. Orain arte ikusi denaren arabera, fluxu bidirekzionalari jarraitzeko aukerarik onena turbina bidirekzionalak erabiltzea zen. Hala ere, turbina mota hauek erabiltzeak zenbait arazo dakar, horietatik garrantzitsuena lortutako errendimendu baxua izanik.



TT-ekin proposatzen dena norabide bakar batean lan egiten duten bi turbina berdinean erabiltzea da, bakoitzak fluxuaren norabide baterako lan egingo duelarik.



### 10.3 irudia: *Twin Turbines*-en eskema

Helburua turbina bakoitzak norabide bakar batean funtzionatzea denez, funtzionatzen ez duen turbinak fluxu zuzentzaile bezala jokatu beharko du. Ondorioz, turbina diseinatzerako orduan aspektu hau izan behar da kontuan, diseinuaren zailtasuna handituz.

Hala ere, zuzentzaile bezala jokatu behar duen turbinatik fluxu pixka bat atera egingo da, sistemaren funtzionamendu egoera optimoena oztopatuz. Horretaz gain, kontuan izan behar da mantentze kostuak asko igoko direla, turbina bakar bati aplikatu beharrean bi turbinei aplikatu behar zaiolako.

# 11. Plangintza


Ondorengo bi grafikoetan adierazi dira GRAL egiteko jarraitu izan diren epeak. Lanaren muina informazioa bilatzea izan denez, Gantt diagraman adierazitako jarduera gehienak hori dagokie. Hurrengo taulan agertzen dira epe horiek, Gantt diagraman ez delako oso ongi ikusten. Atazak hurrengoak izan dira:

I.B.1: Egoera energetikoaren eta OWC sistemiei buruzko informazioa bilatzea.

I.B.2: Wells turbinei buruzko informazioa bilatzea.

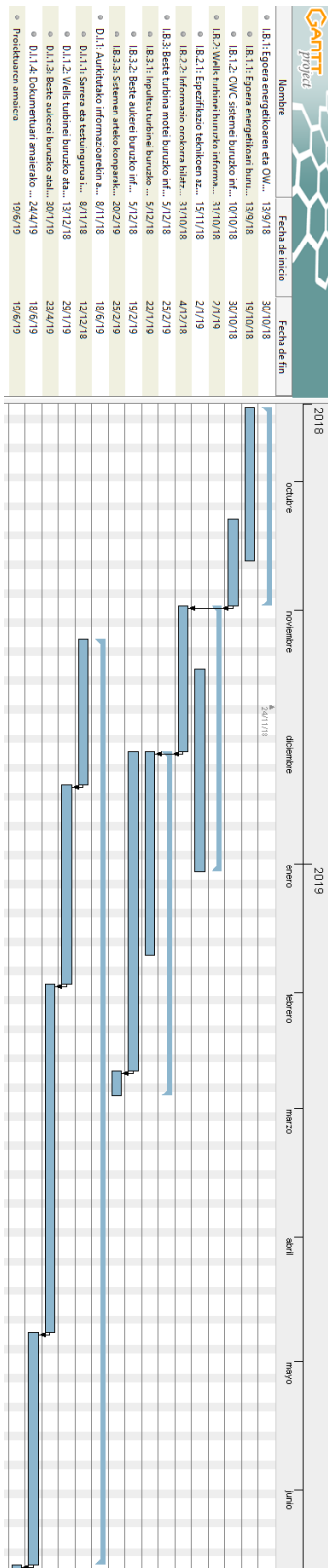
I.B.3: Beste turbina motei buruzko informazioa bilatzea.

D.I.1: Aurkitutako informazioarekin amaierako dokumentua idatzi.



Nombre	Fecha de inicio	Fecha de fin
• I.B.1: Egoera energetikoaren eta OWC sistemiei bur...	13/9/18	30/10/18
• I.B.1.1: Egoera energetikoari buruzko informazi...	13/9/18	19/10/18
• I.B.1.2: OWC sistemiei buruzko informazioa bil...	10/10/18	30/10/18
• I.B.2: Wells turbinei buruzko informazioa bilatzea	31/10/18	2/1/19
• I.B.2.1: Espezifikazio teknikoen azterketa	15/11/18	2/1/19
• I.B.2.2: Informazio orokorra bilatzea	31/10/18	4/12/18
• I.B.3: Beste turbina motei buruzko informazioa bil...	5/12/18	25/2/19
• I.B.3.1: Inpultsu turbinei buruzko informazioa ...	5/12/18	22/1/19
• I.B.3.2: Beste aukerei buruzko informazioa bilat...	5/12/18	19/2/19
• I.B.3.3: Sistemen arteko konparaketa ikertu	20/2/19	25/2/19
• D.I.1: Aurkitutako informazioarekin amaierako dok...	8/11/18	18/6/19
• D.I.1.1: Sarrera eta testuingurua idatzi	8/11/18	12/12/18
• D.I.1.2: Wells turbinei buruzko atala idaztea	13/12/18	29/1/19
• D.I.1.3: Beste aukerei buruzko atala idaztea	30/1/19	23/4/19
• D.I.1.4: Dokumentuari amaierako forma eman	24/4/19	18/6/19
• Proiektuaren amaiera	19/6/19	19/6/19

## 11.1 irudia: Proiektua gauzatzeko epeak



11.2 irudia: Gantt diagrama

## 12. Gastu-aitorpena

Gastu-aitorpena egin ahal izateko proiektuaren parte diren bi pertsona hartu behar dira kontuan: proiektuaren egilea eta proiektuaren zuzendaria. Hurrengo taulan agertzen da nola izendatu izan diren:

Kodea	Erantzunkizuna	Izen-Abizenak	Rola
K1	Senior ingeniaria	Concepción Olondo Castro	Zuzendaria
K2	Ingeniari laguntzailea	Markel Eguizabal Mazon	Egilea

**13.1 taula: Proiektuaren egileak**

Proiektuaren garapenak suposatzen duen kostua azaltzen da atal honetan. Kostu guztiak lau azpimultzo nagusitan sailkatu dira: barne orduak, amortizagarriak, azpikontratazioak eta gastuak.

- **Barne-ordua:** Lan-pakete bakoitzeko partaideen lanordua eta bakoitzaren kostua kontuan harturik ondoko gastua lortzen da:

Kodea	Kostua (€/h)	Ordu kopurua(h)	Kostua (€)
K1	60	30	1800
K2	20	320	6400
Azpitotala			8.200 €

**13.2 taula: Barne-ordua**

- **Amortizagarriak:** Unibertsitatean eskuragarri dagoen materiala, eta beste proiektuetarako berrerabil daitezkeena:

Baliabidea	Erosketa kostua	Bizitza erabilgarria (h)	Erabiltze denbora (h)	Kostua (€)
K1 Ordenagailua	1000	3000	30	10
K2 ordenagailua	750	3000	320	80
K1 Office lizentzia	80	1200	4	0,27
K2 office lizentzia	80	1200	45	3
Azpitotala				93,27 €

**13.3 taula: Amortizagarriak**

- **Azpikontratazioak:** Proiektu honetan ez da azpikontrataziorik aurrera eraman, ondorioz, honi dagokion gastua nulua da.
- **Gastuak:** Proiektua amaitu eta gero berrerabili ezingo diren materialak dira. Proiektu hau aurrera eramateko erabili diren baliabideak argia eta interneta izan direnez, horiek bakarrik agertuko dira.

Baliabidea	Kostua (€)
Argia	300
Interneta	150
Azpitotala	
	450 €

**13.4 taula: Gastuak**

Gastu-aitorpenaren emaitza totala hurrengo taulan adierazi da:

Gastu-aitorpena	
Barne-orduak	8200
Amortizazioak	93,27
Azpikontratazioak	0
Gastuak	450
Totala	
	8.743,27 €

**13.5 taula: Gastu-aitorpenaren emaitza**

## 13. Ondorioak

GRAL gauzatzerakoan OWC sistementzat dauden turbina mota desberdinen azterketa bat egitea zen helburua. Behin turbina mota erabilienak ikusita, zenbait ondorioetara heldu garela esan genezake.

Lehendabizi, etorkizun hurbilerako energia iturri berriak bilatu behar ditugula, eta horien artean itsasoak emandako energia aprobetxatzea aukera ona izan daitekeela. Itsasoak emandako aukeretatik, olatuek daukaten potentzia erabiltzea irtenbide on bat izan daitekeela ere ikusi dugu.

Teknologiari begira, OWC sistemetan erabiltzen diren zenbait turbina desberdin aztertu dira GRAL honetan. Aitzindaria izan zer turbina bidirekzionala, Wells Turbina, diseinu sinpleena eta mantentzerako erraztasun gehiago aurkezten duena da. Hala ere, azaldu den bezala, norabide bakarrean lan egiten duten turbinek daukaten errendimendu mailaraino ez da heltzen. Horretaz gain, gehitu behar zaio fluxu handiekin lan egiterakoan aurkezten dituen arazoak.

Bilatu izan den beste irtenbide bat inpultsu turbinak erabiltzea izan da. Hauen konplexutasun askoz handiagoa da, eta proiektuaren hasierako kostua eta mantentze lanei dagozkien gastuan nabarmen handitzen dira. Hala ere, Wells turbinekin konparatuz errendimendu hobeak lor daitezke koro zuzentzaileak ezarriz. Bi turbina mota hauetako zenbait aldaera proposatu izan dira errendimenduaren hobekuntza lortu nahian. Hala ere, lortu den hobekuntza horrek ez du, kasu gehienetan

Azkenik, norabide bakarreko turbinak erabiltzea izan da bilatu izan den beste irtenbidetako bat. *Twin Turbines*, ikusi den bezala, fluxu bidirekzionalaren arazoari konponbide bat ematen dio. Hala ere, turbina bidirekzionaletan gertatzen den bezala, diseinuaren konplexutasuna eta mantentze lanetarako behar den kostu gehigarria atzera bota izan ditu enpresa askori.

Amaitzeko, eta ondorio orokor bezala, OWC sistemetan erabiltzen diren turbinetan ikerketa sakonagoak egin behar direla esango nuke. Guztiek dauzkate besteekiko abantaila konparatibo batzuk, baina baita desabantaila batzuk ere. Datozen urteetan energia berriztagarriek izango duten indarra ikusita, eta itsasoak etengabe energia mugitzen duela jakinda, itsasoko ura erabiltzen duten sistemek izugarritzko garrantzia izango dute, OWC sistemak aukera jasangarri bat.

## 14. Informazio iturriak

- [1] Hrudnick.sitios.ing.uc.cl. (n.d.). *Generación mareomotriz*. [online]
- [2] Fernández, S. (2017). *Analizamos los datos de la Central Undimotriz de Mutriku. Producción, factor de capacidad, problemas...* [online] DiarioRenovables | Energías renovables. Eólica, solar, fotovoltaica, baterías, movilidad sostenible
- [3] Santa, A. (n.d.). *Generación de Energía Eléctrica con Turbinas Wells*.
- [4] Segouchi, T. (2003). A modified Wells turbine for wave energy conversion. *Renewable Energy*, 28, pp.79-91.
- [5] Setoguchi, T & Santhakumar, S & Maeda, H & Takao, M & Kaneko, K, 2001. "A review of impulse turbines for wave energy conversion," *Renewable Energy*, Elsevier, vol. 23(2), pages 261-292.