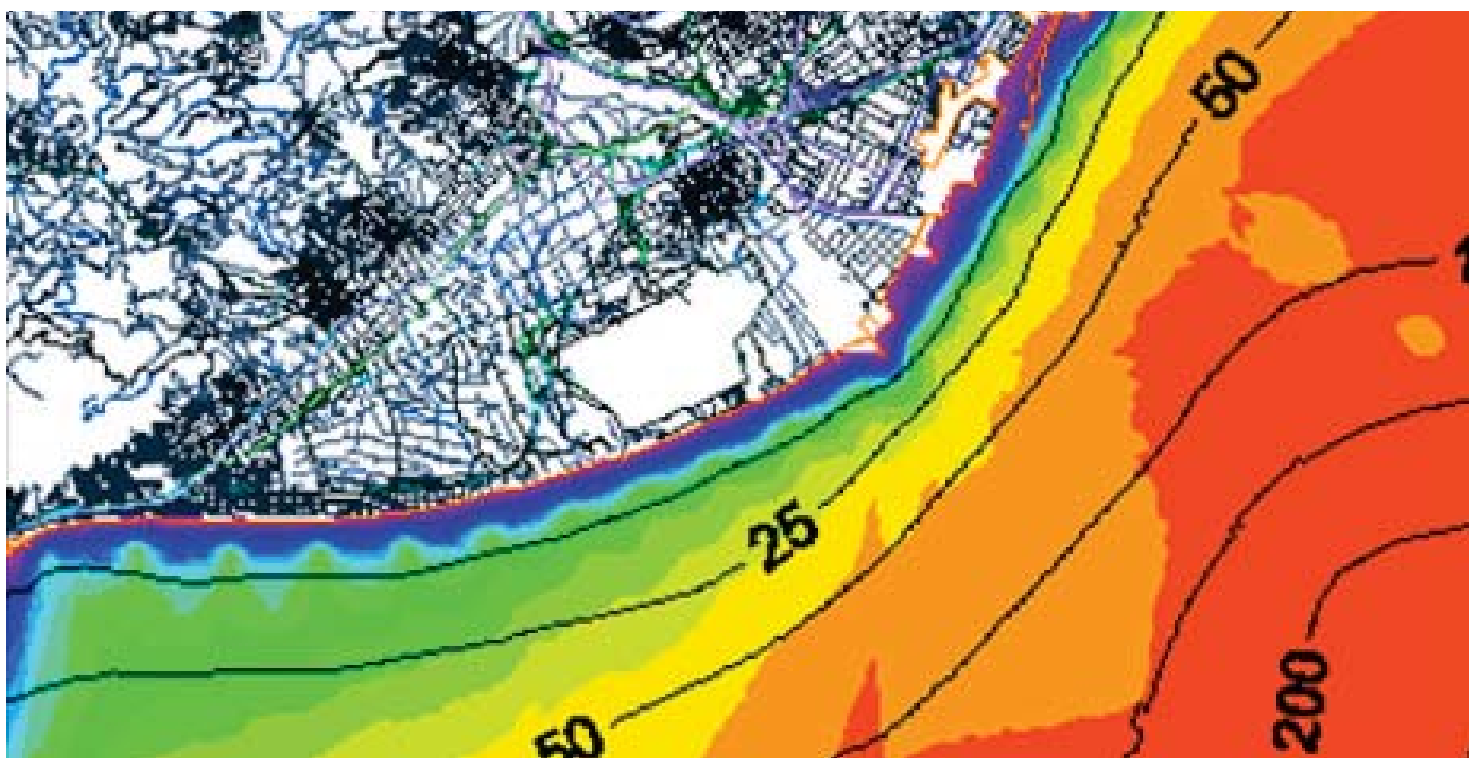


PSAMB 2014-2020

APROFITAMENT DELS RECURSOS ENERGÈTICS MARINS DE LA COSTA DE L'AMB



Treball elaborat:

Direcció de Serveis Ambientals de l'AMB



Direcció:

Direcció de Serveis Ambientals de l'AMB - Barcelona Regional



Redacció:

Ecosost - Litoral Consult





BARCELONA
REGIONAL
AGÈNCIA
DESENVOLUPAMENT
URBÀ



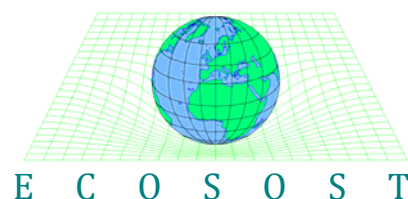
Àrea Metropolitana
de Barcelona

APROFITAMENT DELS RECURSOS ENERGÈTICS MARINS DE LA COSTA DE L'ÀREA METROPOLITANA DE BARCELONA



Maig de 2013

Consultors:



Índex

1.	ANTECEDENTS I EQUIP CONSULTOR	3
2.	INTRODUCCIÓ	5
3.	ENERGIA UNDIMOTRIU	8
3.1.	Clima marítim de l'onatge	8
3.2.	Propagacions de l'onatge	11
3.3.	Càlcul del potencial energètic	13
4.	ENERGIA MAREOMOTRIU I DELS CORRENTS MARINS.....	17
4.1.	Clima marítim de marea i vent	17
4.1.1.	Vent.....	17
4.1.2.	Marea	19
4.2.	Simulacions numèriques.....	20
4.3.	Corrents generals.....	21
4.4.	Estimació de potencial energètic.....	24
5.	ENERGIA MAREMOTÈRMICA I DELS GRADIENTS SALINS.....	25
5.1.	Condicions ambientals locals de temperatura i salinitat.....	27
5.2.	Càlcul del potencial energètic per gradient tèrmic	29
5.3.	Càlcul del potencial energètic per gradient salí	31
6.	REVISIÓ DE L'ESTAT DE LA TÈCNICA.....	34
6.1.	Tecnologies que aprofiten l'energia de les onades	34
6.2.	Tecnologies que aprofiten l'energia dels corrents marins.....	46
6.3.	Tecnologies que aprofiten l'energia dels gradients tèrmics	50
6.3.1.	Cicle obert.....	53
6.3.2.	Cicle tancat	54
6.4.	Tecnologies que aprofiten l'energia dels gradients salins	57
6.4.1.	Osmosis per pressió retardada (OPR).....	60
6.4.2.	Electrodiàlisi reversible (EDR)	62
7.	VALORACIÓ GENERAL DE L'APROFITAMENT ENERGÈTIC.....	64
7.1.	Valoració general sobre el potencial energètic.....	64
7.1.1.	Onatge.....	64
7.1.2.	Corrents	69
7.1.3.	Gradients tèrmic i salí.....	73
7.2.	Valoració inicial dels costos d'explotació.....	84
8.	CONCLUSIONS	92

Apèndix 1. Figures de propagació.

Apèndix 2. Figures de corrents.

1. ANTECEDENTS I EQUIP CONSULTOR

Barcelona Regional ha rebut l'encàrrec d'elaborar una part dels treballs de diagnosi territorial i elaborar mapes i eines temàtiques del Pla de Sostenibilitat Ambiental que està duent a terme l'Àrea Metropolitana de Barcelona (AMB). En aquest sentit, el pla integral és fonamenta en una diagnosi multi-vectorial del territori metropolità feta des de la perspectiva ambiental.

El present encàrrec es concreta en el Estudi per a l'aprofitament dels recursos energètics marins de la costa de l'Àrea Metropolitana de Barcelona. Atès la Mediterrània no és, *a priori*, un mar energèticament potent, el plantejament de l'estudi es detectar i determinar els possibles potencials energètics, així com l'estat de l'art de les tecnologies útils en condicions similars.

L'abast de l'estudi del potencial energètic marí comprèn:

- ✓ Anàlisi de les condicions d'onatge
- ✓ Anàlisi de les condicions de corrent
- ✓ Anàlisi de les condicions de temperatura i salinitat
- ✓ Estat de l'art de l'aprofitament de recursos energètics marins
- ✓ Revisió de les diferents tecnologies
- ✓ Càlcul de rendiments i eficiència energètica
- ✓ Aprofitament energètic: Anàlisi local

El present Estudi ha estat dut a terme per les empreses Enginyers i Consultors en Sostenibilitat, S.L.U. (ECOSOST) i Litoral Consult, S.L.

ECOSOST, és una empresa dedicada a l'Enginyeria Marítima, amb 15 anys d'experiència, experta en climatologia Marítima, dinàmica costanera i modelització numèrica del medi marí. En l'actualitat ECOSOST centre els seus esforços en la investigació de les Energies Renovables, amb la undimotriu com a principal objectiu, d'on ha iniciat un procés de patent de tecnologia pròpia (verure Figura 1).

Litoral Consult, és una Consultoria Ambiental, fundada el 1996, tenint com a missió l'aplicació del mètode científic en el disseny i en el desenvolupament de projectes ambientals en l'entorn litoral. Litoral Consult pretén desenvolupar els seus projectes amb un model sostenible i una gestió adequada dels recursos disponibles.

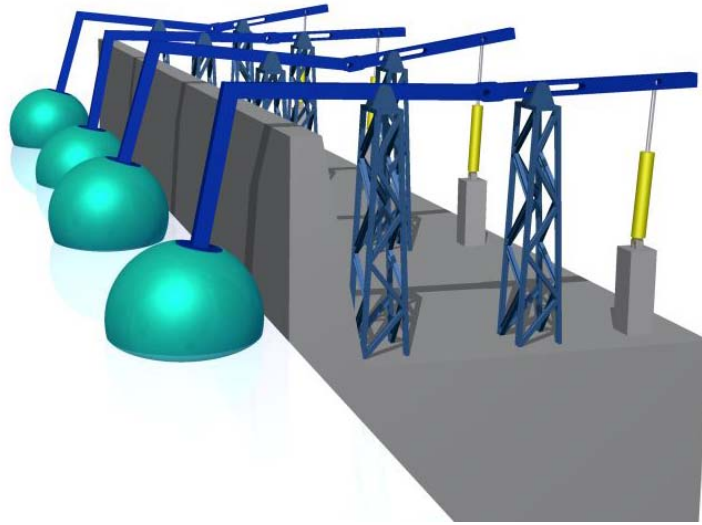


Figura 1. Patent de tecnologia d'ECOSOST¹

¹ "Sistema d'extracció de energia eNeRUN". Patent en desenvolupament

2. INTRODUCCIÓ

En l'actualitat el món i la societat moderna està tendint cap a un desenvolupament sostenible, que demanda de recursos inesgotables, incloent-hi els energètics. En aquest sentit, i donat que els combustibles fòssils tenen el doble component de contaminar en excés i de ser peribles, la tendència en el futur és que les energies renovables, netes i inesgotables, prenguin un clar protagonisme (veure Figura 2).

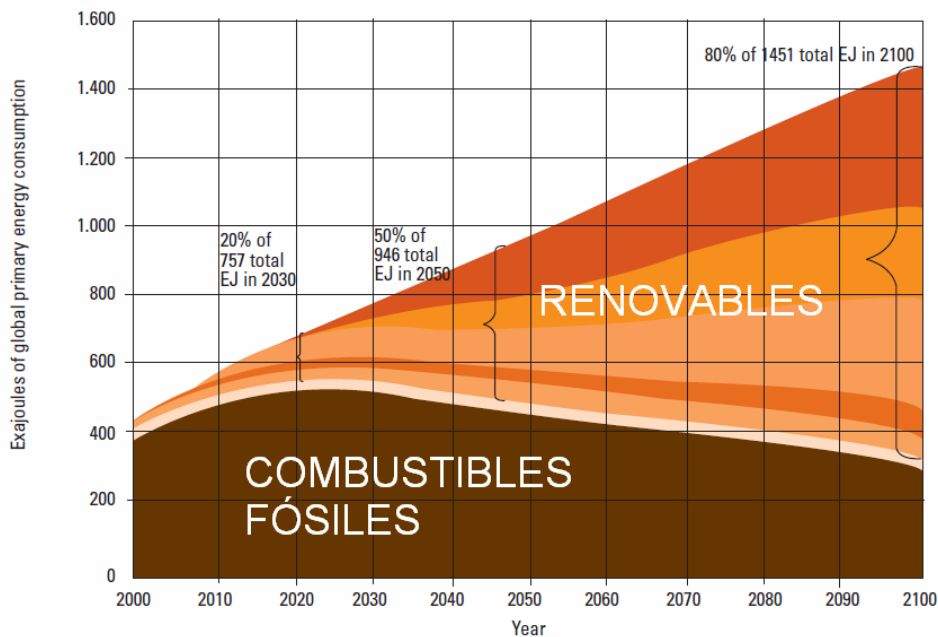


Figura 2. Escenaris de penetració de diferents tecnologies renovables fins el 2100²

Dins dels recursos naturals capaços de proporcionar-nos energia, es troben els mars i oceans, amb un potencial energètic molt elevat a nivell mundial, podent-se captar la seva energia de modes molt diversos. D'entre ells, l'energia de les onades es presenta com la més aprofitable de totes. Es tracte doncs, d'una energia renovable i amb capacitat de predicció bastant més alta que altres.

Avui per avui, els costos en la captació de l'energia undimotriu són massa elevats, si bé, s'espera que a mig termini el cost de producció pugui situar-se en un llinar igual o inferior a l'obtingut per fonts convencionals (veure Figura 3).

Altres tipus d'energies com la mareomotriu o les degudes a gradients tèrmics o salins, tenen les barreres de ser tant sols productives en ubicacions molt determinades.

² Renovables 2050 "Un informe sobre el potencial de las energías renovables en la España peninsular"; IIT - CIEMAT (Greenpeace). Julio 2005

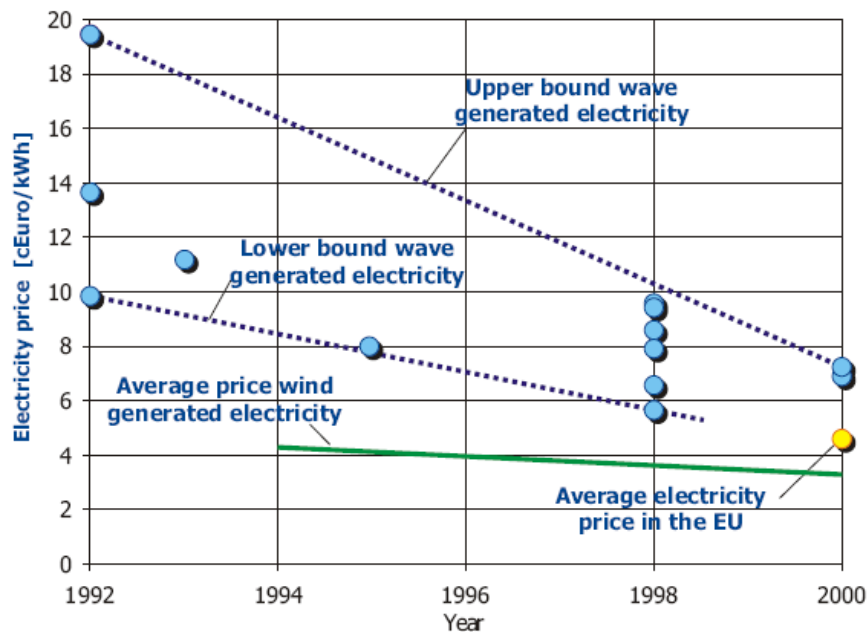


Figura 3. Evolució dels costos de producció d'energia undimotriu amb les tecnologies testades durant el segle XX

L'estabilització en la producció mundial de combustibles fòssils, així com l'augment del seu cost, ha intensificat la cerca d'energies renovables. Tot i que tradicionalment més cares, les fonts d'energies renovables presenten varis incentius, com ara l'augment de la seguretat en el proveïment energètic, el decaïment de les emissions de carboni i el compliment amb les quotes de generació d'energia renovable i la legislació vigent respecte de la qualitat de l'aire. Les fonts d'energia renovable són especialment atractives en indrets aïllats, per exemple illes, on per la seva economia d'escala i pels costos que suposa fer-hi arribar el combustible necessari l'estalvi pot arribar a ser molt important.

Dins de les Energies del Mar hi ha tecnologies clarament diferenciades, en funció de l'aprofitament energètic: energia de les mareas o mareomotriu, energia dels corrents, energia mareomotèrmica, energies de les onades o undimotriu i energia del gradient salí (osmòtica).

Mareomotriu: consisteix en l'aprofitament energètic de les mareas. Es basa en aprofitar l'ascens i descens de l'aigua del mar produït per l'acció gravitatòria del Sol i la Lluna, encara que només en aquells punts de la costa en que la mar alta i la baixa difereixen més de cinc metres d'altura és rendible instal·lar una central mareomotriu. Un projecte d'una central mareomotriu està basat en l'emmagatzematge d'aigua en un embassament que es forma en construir un dic amb unes comportes que permeten l'entrada d'aigua o cabal a turbinar, en una badia, cala, riu o estuari per a la generació elèctrica, o bé aprofitar les condicions naturals si n'hi ha, per mitjà de la instal·lació d'un o més sistemes de turbines hidràuliques.

Energia dels corrents: consisteix en l'aprofitament de l'energia cinètica continguda en els corrents marins. El procés de captació es basa en convertidors d'energia cinètica similars als aerogeneradors emprant en aquest cas instal·lacions submarines.

Maremotèrmica: es fonamenta en l'aprofitament de l'energia tèrmica del mar basat en la diferència de temperatures entre la superfície del mar i les aigües profundes. L'aprofitament d'aquest tipus d'energia requereix que el gradient tèrmic sigui d'almenys 20 °C. Les plantes maremotèrmiques transformen l'energia tèrmica en energia elèctrica utilitzant el cicle termodinàmic denominat "cicle de Rankine" per produir energia elèctrica en el qual el seu focus calent és l'aigua de la superfície del mar i el focus fred, l'aigua de les profunditats.

Energia de les onades o undimotriu: És l'aprofitament energètic produït pel moviment de les ones. L'onatge és una conseqüència del fregament de l'aire sobre la superfície del mar, pel que resulta molt irregular. Això ha portat a la construcció de múltiples tipus de tecnologies per fer possible el seu aprofitament.

Potència osmòtica: La potència osmòtica o energia blava és l'energia obtinguda per la diferència en la concentració de la sal entre l'aigua de mar i l'aigua dels rius mitjançant els processos d'osmosi.

Segons estudis realitzats per diversos autors (Wick y Schmitt, 1977), considerant la superfície total que cobreixen els oceans ($3 \times 10^{14} \text{ m}^2$), el potencial energètic mundial i la densitat d'energia de cada una de les cinc fonts mencionades anteriorment poden resumir-se com ho senyala la Taula 1³.

Font Oceànica	Potència 10 ¹² Watts	Densitat d'energia Watts-hora/m ³
Marees	0.03	28
Corrents	0.05	0.14
Gradients tèrmics	2.00	580
Gardients salins	2.60	670
Onatges	2.70	4.2

Taula 1. Potència i densitat d'energia de fonts oceàniques

En els següents apartats es valora el potencial energètic per separat de cadascuna de les tipologies anteriors, i posteriorment s'analitzarà el seu possible aprofitament.

³ "Evaluación y Estudio de alternativas de Generación de Energía Eléctrica a Partir del Océano" Matías Alonso Allende 1981

3. ENERGIA UNDIMOTRIU

3.1. Clima marítim de l'onatge

La caracterització del règim de l'onatge, s'ha realitzat partint de la informació de la boia direccional costanera de Barcelona, que pertany a la xarxa REDCOS de *Puertos del Estado*.

La ubicació de la boia és propera a la bocana nord del Port de Barcelona (veure Figura 4). Aquestes dades cobreixen des de març de 2004 fins a agost de 2011, cosa que suposa poc més de 7 anys.



Figura 4. Ubicació de la boia costanera de Barcelona

En primer lloc s'obtindrà la distribució sectorial de l'onatge, amb la finalitat de caracteritzar els onatges predominants en la ubicació de la boia. A tal efecte s'ha obtingut la rosa d'onatge (veure Figura 5), i a la vegada la taula que relaciona les variables alçada d'ona significant o Hs i direcció mitja (Taula 2).

Tal i com s'observa a la rosa d'onatge, la majoria dels onatges es concentren entre les direccions compreses pels sectors ENE i SSW, sectors en els quals es troben més del 98% del total d'onatges.

ROSA DE OLEAJE

Boya CostaBarcelona: 44769 datos direccionales

Alturas de Hs en m

▮ Frecuencia 1%

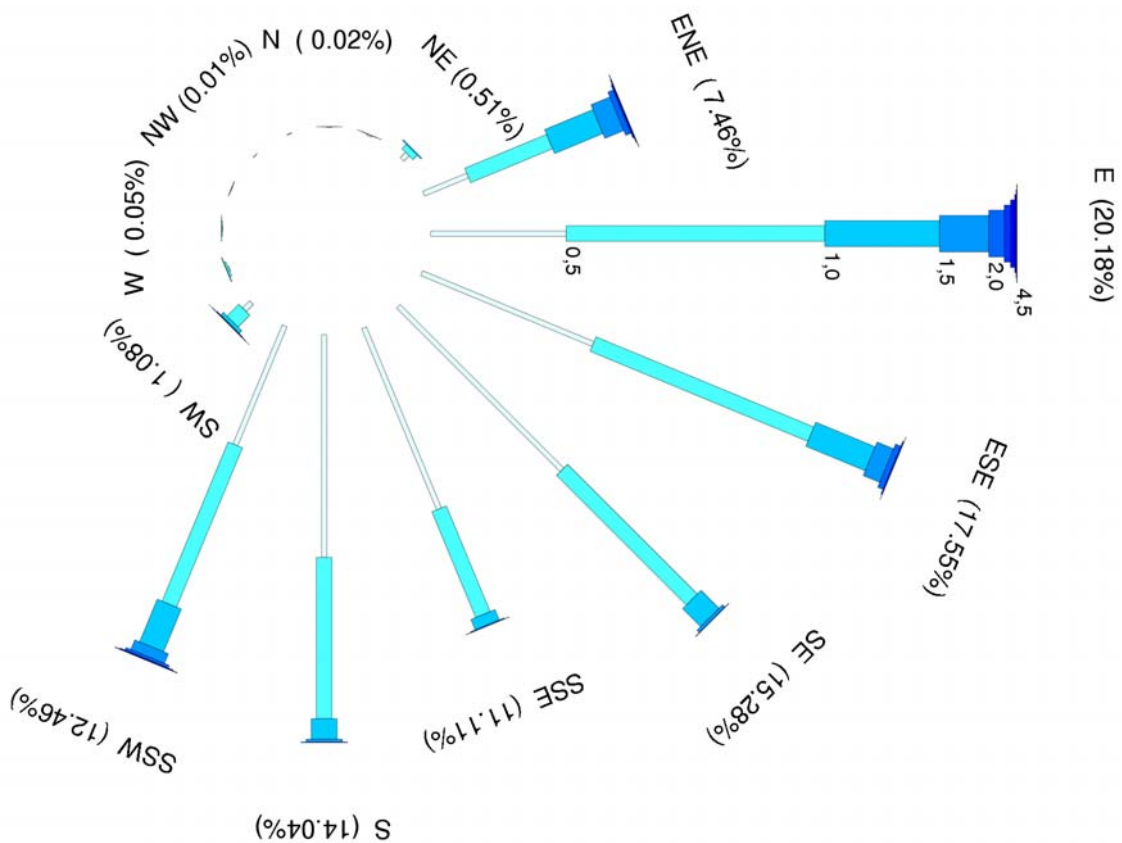


Figura 5. Rosa d'onatge a la boia

L'estudi de l'onatge, es completa determinant la relació que existeix entre les variables alçada d'ona (Hs) i període de l'onatge (Tp). En aquest sentit s'ha obtingut el diagrama de dispersió d'ambdues variables (Figura 6).

Sector/Hs	0.0-0.5	0.5-1.0	1.0-1.5	1.5-2.0	2.0-2.5	2.5-3.0	3.0-3.5	3.5-4.0	4.0-4.5	4.5-5.0	5.0-5.5	5.5-6.0	%	TOTAL
Calmas													0.04%	17
N	6	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02%	9
NNE	22	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.05%	24
NE	117	95	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.51%	229
ENE	734	1365	806	315	87	20	10	3	0	0	0	0	7.46%	3340
E	2087	3987	1766	759	236	99	63	24	9	4	0	0	20.18%	9034
ESE	2856	3632	989	276	86	19	1	0	0	0	0	0	17.55%	7859
SE	3566	2827	392	51	4	0	0	0	0	0	0	0	15.28%	6840
SSE	3018	1764	172	16	2	0	0	0	0	0	0	0	11.11%	4972
S	3431	2486	317	43	7	0	0	0	0	0	0	0	14.04%	6284
SSW	1985	2657	712	180	42	16	5	0	0	0	0	0	12.46%	5577
SW	156	257	59	9	3	1	0	0	0	0	0	0	1.08%	485
WSW	19	31	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.13%	56
W	8	13	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.05%	23
WNW	5	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02%	9
NW	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01%	4
NNW	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02%	7
%	40.25%	42.71%	11.70%	3.64%	1.04%	0.35%	0.18%	0.06%	0.02%	0.01%	0.00%	0.00%	100.00%	
TOTAL	18021	19121	5240	1629	467	155	79	27	9	4	0	0		44769

Taula 2. Taula Hs – direcció mitja

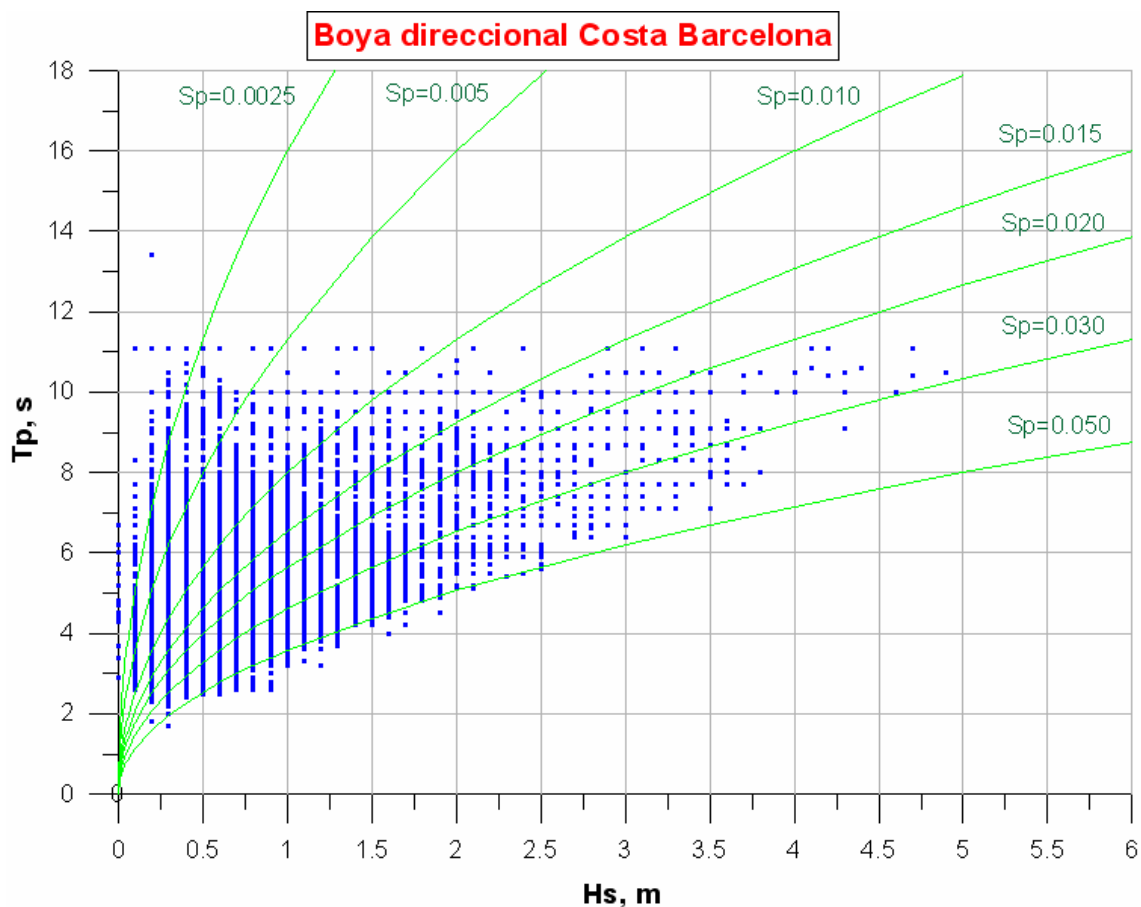


Figura 6. Diagrama de dispersió Hs-Tp

3.2. Propagacions de l'onatge

Un cop caracteritzat el règim de l'onatge en la ubicació de la boia es procedirà a continuació a realitzar les propagacions des de la boia fins a qualsevol punt de l'àrea marítima davant de les costes de Barcelona per tal d'establir la relació de transformació entre la ubicació de la boia i qualsevol punt costaner. Naturalment, propagar totes les dades del registre és una tasca massa costosa, de manera que s'emprarà una metodologia que permeti propagar de manera senzilla tots els estats de mar registrats per la boia durant gairebé 8 anys (des de març de 2004 fins l'actualitat).

Mitjançant la simulació d'uns pocs "onatges tipus" i els paràmetres de propagació obtinguts (K_p o coeficient de propagació, que relaciona el valor de l'alçada d'ona d'aigües fondes amb l'alçada d'ona propagada, i angle), es pot transformar cada estat de mar del registre de la boia i obtenir els seus valors locals (H_s , T_p i angle), relacionant l'estat de mar en qüestió amb els 4 "onatges tipus" propagats més semblants, i interpolant de manera ponderada els seus valors de propagació.

Un cop s'obtingui la transformació de tot el registre de dades des de la boia a qualsevol zona del domini que abasti tot el front costaner de Barcelona, es podran definir els valors locals d'energia, flux d'energia i potència per metre de l'onada en qualsevol part del domini, quedant definit el potencial energètic de l'onatge. En particular es propagaran 21 onatges, repartits en 7 sectors i 3 onades per sector, que engloben més del 95% dels onatges existents en el registre de dades de la boia, i que representaran pràcticament al 100% les característiques del règim mitjà. En la Taula 3 es mostra el conjunt d'onatges propagats.

De cara a les propagacions, s'ha utilitzat el model de propagació espectral d'onatge OLUCA-SP, inclòs dins del Model Integral de Morfodinàmica de Platges (MOPLA), pertanyent al Sistema de Modelatge Costaner (SMC) el qual forma part del projecte "*Modelo de Ayuda a la Gestión del Litoral*", dut a terme pel *Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas* (GIOC) de la Universitat de Cantàbria, per a la Direcció General de Costes del Ministeri de Medi Ambient. El Oluca-SP, és un model parabòlic de propagació espectral de l'onatge, el qual considera els fenòmens de assomerament, difracció, refracció, i dissipació d'energia per rotura de l'onatge i fricció amb el fons.

El domini complert que han cobert les propagacions es mostra a la Figura 7, on s'indica, a més, la ubicació de la boia costanera de Barcelona. Per a les corresponents propagacions des d'aigües fondes s'ha discretitzat el domini en malles rectangulars, utilitzant per a cada sector una malla adequada per a la bondat numèrica dels resultats.

Totes les malles numèriques tenen les mateixes característiques: 376 nodes en la direcció de propagació i 326 nodes en la direcció perpendicular. En cadascuna de les malles s'aconsegueix resoldre l'onatge en cel·les regulars de mida 20 m x 20 m, amb el que abasten una extensió de 7,5 Km x 6,5 Km.

Sector	Hs	Tp
ENE	1	5
	2	8
	3	11
E	1	5
	2	8
	3	11
ESE	1	5
	2	8
	3	11
SE	1	5
	2	8
	3	11
SSE	1	5
	2	8
	3	11
S	1	5
	2	8
	3	11
SSW	1	5
	2	8
	3	11

Taula 3. Característiques dels onatges propagats des de la boia

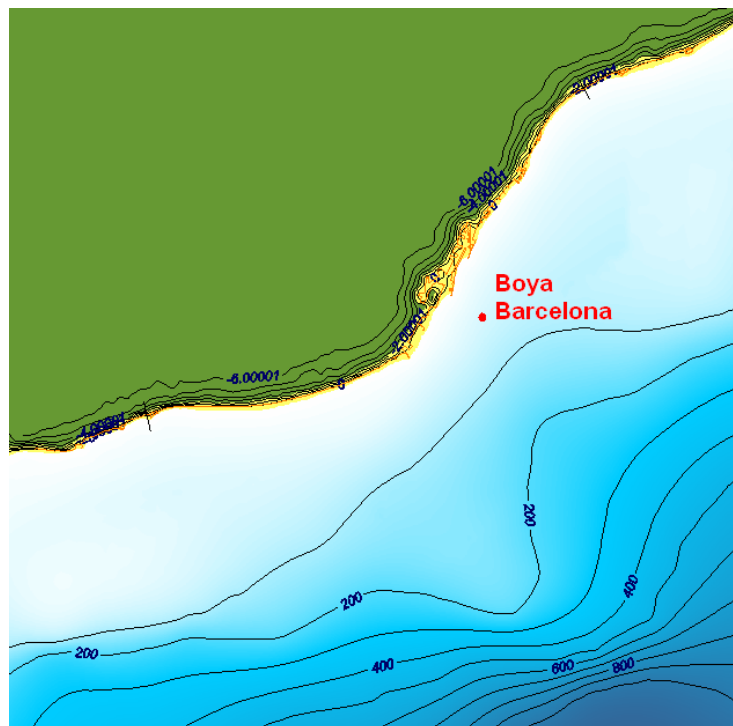


Figura 7. Domini computacional

En les malles de propagació anteriorment definides s'han propagat els onatges per a cada sector, parametritzant l'espectre freqüencial (o espectre TMA) en 10 components, i l'espectre direccional (Borgman, 1984) en 15 components.

El conjunt de simulacions numèriques realitzades es mostren en el Apèndix 1. En aquestes figures se mostra en detall la distribució de l'alçada d'ona incident i la direcció mitja de l'onatge.

3.3. Càlcul del potencial energètic

Les onades contenen dos tipus d'energia, l'energia cinètica de les partícules de l'aigua, que en general es mouen de manera circular, i l'energia potencial de les partícules elevades (veure Figura 8).

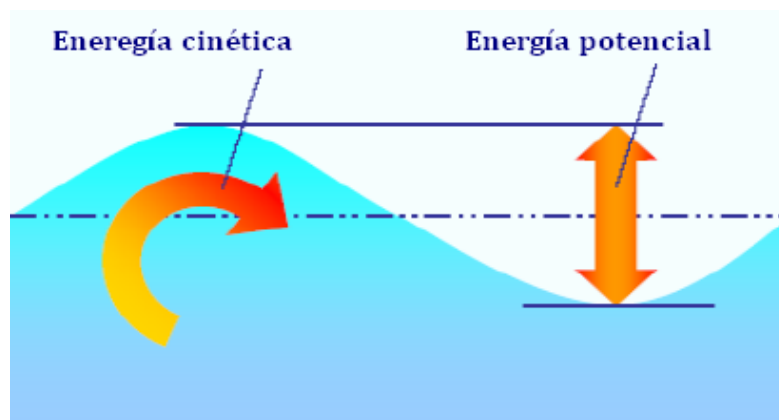


Figura 8. L'energia cinètica iguala la potencial en el punt mig (Center, 2004)⁴

L'onatge actua com a acumulador d'energia en el sentit de que és capaç de rebre energia (energia solar que en escalfar la superfície terrestre genera vents i aquests generen onatge), transportar-la d'un lloc a un altre i emmagatzemar-la.

Les ones es propaguen a milers de quilòmetres per la superfície amb pèrdues d'energia mínimes, de manera que l'energia generada en qualsevol part de l'oceà acaba en la vora continental, concentrant l'energia de les onades a la costa.

Tot i que les pèrdues són mínimes, la densitat energètica de l'onatge decreix prop de les costes causa de la interacció d'aquestes amb el llit marí, però, aquesta dissipació d'energia pot ser compensada per fenòmens naturals com la reflexió o la refracció, que originen les anomenades concentracions d'energia o *hot spots*.

⁴ CENTER FOR RENEWABLE ENERGY SOURCES, 2004. "Ocean Energy Conversion in Europe. Recent Advancements and Prospects" en Coordinated Action on Ocean Energy, proyecto de la UE, Renewable Energy Technologies.

Amb tot això, la disponibilitat energètica arreu de l'oceà varia d'un lloc a un altre, de manera que requereix d'una anàlisi particularitzada, especialment prop de les zones costaneres, on s'ha d'estudiar la propagació de l'onatge mitjançant models numèrics que siguin capaços de simular els fenòmens de somatge, difracció, refracció i reflexió, per tal de poder estimar a cada zona o tram, l'energia potencial portada per les ones.

La capacitat de l'onatge de generar energia es mesura amb els paràmetres energia, flux d'energia i potència per metre de front d'ona (kW/m). Els paràmetres que caracteritzen una ona curta són:

- *Longitud de onda (λ): distància que separa dos crestas consecutivas*

$$\text{En profundidades indefinidas, la longitud de onda se define como } \lambda = \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi}$$

- *Periodo de la ola (T): tiempo entre dos crestas o dos valles sucesivos: $T = \frac{2 \cdot \pi}{\omega}$*

- *Celeridad de la onda: velocidad de traslación de la ola o velocidad de fase: $C = \frac{\lambda}{T} = \frac{\omega}{k}$*

$$\text{donde: } k = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}$$

- *Celeridad del grupo: $C_g = \frac{C}{2} = \frac{g \cdot T}{4\pi}$*

- *Peso específico del agua de mar: $\rho = 1028 \text{ kg/m}^3$*

- *Altura de la ola (H): distància entre la cresta y el valle*

La potència de les onades, depèn del quadrat de l'alçada d'ona i del període o freqüència del moviment. Les expressions que permeten obtenir l'energia, el flux d'energia i la potència per metre de l'onada són:

$$\text{Energía total (kJ/m}^2\text{)} = \frac{\rho \cdot g \cdot H^2}{8}$$

$$\text{Flujo de energía (kW/m)} = \frac{\rho \cdot g \cdot H^2}{8} \cdot C_g = \frac{\rho \cdot g^2 \cdot H^2 \cdot T}{32\pi}$$

$$P \text{ (kW/m)} \approx 0,96 \cdot H^2 \text{ (m)} \cdot T \text{ (s)}$$

En funció del règim climàtic de cada zona, el valor mitjà del potencial energètic augmenta segons augmenta la freqüència de presentació d'onatges de llarg període i altures d'onada grans. En zones favorables, els fluxos d'energia mitjans varien entre 35 i 60 kW/m, que es corresponen amb onades d'amplituds al voltant de 2 m i períodes grans, prop de 10 s.

Per desgràcia, el mar mediterrani presenta un règim d'onatge pobrament energètic, cosa que el situa prop de la densitat mitjana mundial de 8 kW/m (veure Figura 2).

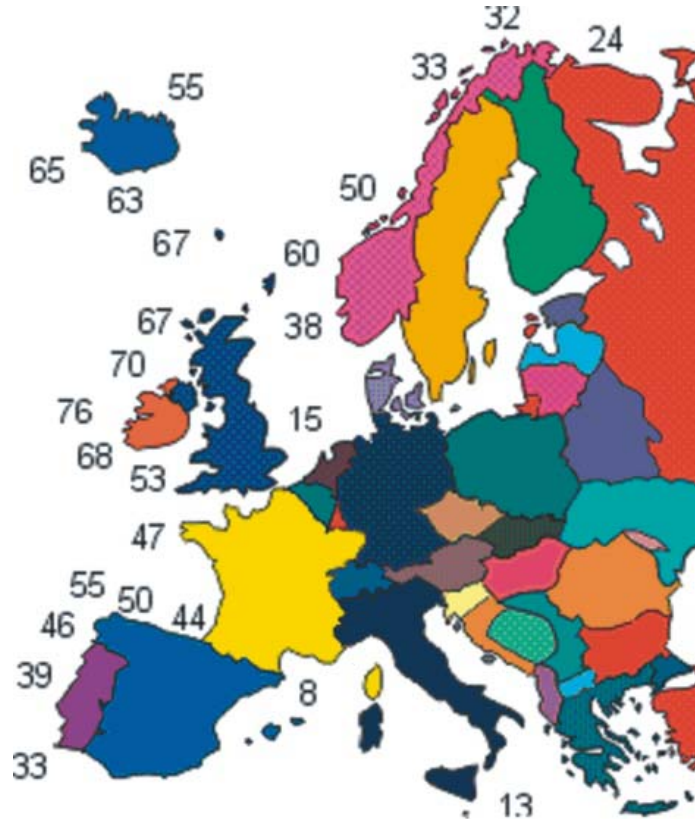


Figura 9. Distribució europea del potencial anual de les ones, kW/m (Center, 2004)

Per a poder definir el mapa del potencial energètic enfront de a costa de l'AMB, s'utilitzaran els resultats de les propagacions, per mitjà dels quals es podrà relacionar les condicions d'onatge existents entre la font de dades, és a dir, la ubicació de la boia, amb qualsevol punt situat dins de la xarxa de propagació, per mitjà de tres variables: 1) alçada d'ona significant o H_s , obtinguda del coeficient de propagació o K_p , que relaciona els valors de H_s entre la boia i el punt d'interès; 2) la direcció mitja que l'onatge pren en el punt de la malla que s'analitzi; i 3) el període de pic de l'espectre o T_p , que s'assumeix que no varia en aproximar-se a la costa.

Per poder identificar el potencial energètic en qualsevol zona pròxima a la costa de Barcelona, caldrà definir un domini, el qual sigui cobert per totes les propagacions, de tal manera que pugui definir-se el règim local d'onatge en cadascuna d'aquestes zones, o el què és el mateix, transformar el registre de dades des de la boia fins a les zones analitzades, per mitjà de la propagació de tots els estats de mar registrats per la boia, que en aquest cas tenen una freqüència horària.

Un cop s'obtingui la transformació de tot el registre de dades des de la boia a qualsevol zona del domini que abasti tot el front costaner de Barcelona, es podran definir els valors locals d'energia, flux d'energia i potència per metre de l'onada en qualsevol part del domini, utilitzant les formulacions anteriors, quedant definit el potencial energètic de l'onatge.

4. ENERGIA MAREOMOTRIU I DELS CORRENTS MARINS

Els corrents generats a les zones costaneres, són el resultat de l'acció de diferents fenòmens, com ara l'onatge, el vent, la marea, els gradients de salinitat i temperatura, i els corrents generals o de plataforma.

Cadascun dels fenòmens actuant genera un tipus o altre de corrents marines: les generades per l'onatge afecten només a la zona de romponents, i per tant són molt turbulentes, les de vent són especialment importants prop de la superfície, les generades per gradients de salinitat i/o temperatura solen ser de tipus local, i les més uniformes en espai i temps són les generals i especialment notòries en els talussos de la plataforma continental.

Per això, l'aprofitament energètic de la cinètica continguda en els corrents marins no és igual ni possible en tots els casos. D'entrada, la turbulència generada pel trencament de l'onatge fa impossible el seu aprofitament, especialment per l'alt contingut de material en suspensió (sobretot sediments). Els corrents per salts de gradients salí i tèrmic solen ser molt variables, locals, i els corrents generats no són d'intensitat suficient prop de les zones costaneres, a no ser que s'hi produeixi un salt molt gran (poc probable a les costes catalanes).

D'altra banda, les marees a la Mediterrània són petites i a més la costa barcelonina és una costa oberta pel què no es generen intensitats destacables degudes a aquest fenomen. Finalment, els corrents generals o de plataforma, solen presentar valors estacionals poc variables i per tant, a priori, de més fàcil aprofitament, però la seva predicció sol ser erràtica i complexa.

En aquest apartat es pretén caracteritzar les condicions dels corrents que més es poden identificar per mitjà de model numèric, com són les degudes a vent i marea, descartant les de l'onatge donat que no són aprofitables per extreure'n energia.

4.1. Clima marítim de marea i vent

4.1.1. Vent

La caracterització del règim de vent, s'ha realitzat partint de la informació de les dades WANA, que són dades de predicció de vent davant tota la costa espanyola, que pertanyen a *Puertos del Estado*. En aquest cas s'ha utilitzat el node davant la costa de Barcelona, node 2066051, amb unes coordenades 41^º 22.5' N – 2^º 15' E.

En primer lloc s'obtindrà la distribució sectorial del vent, amb la finalitat de caracteritzar sectors predominants en alta mar. A tal efecte s'ha obtingut la rosa de vent (veure Figura 10), i a la vegada la taula que relaciona les variables velocitat mitja del vent o V i direcció mitja (Taula 2).

Tal i com s'observa a la rosa de vent, la distribució és bastant uniforme per tots els sectors, però destaquen les intensitats dels vents del 1er i del 4rt quadrant, característics de la mediterrània occidental: nord (tramuntana), est (llevant) i nord-oest (mestral).

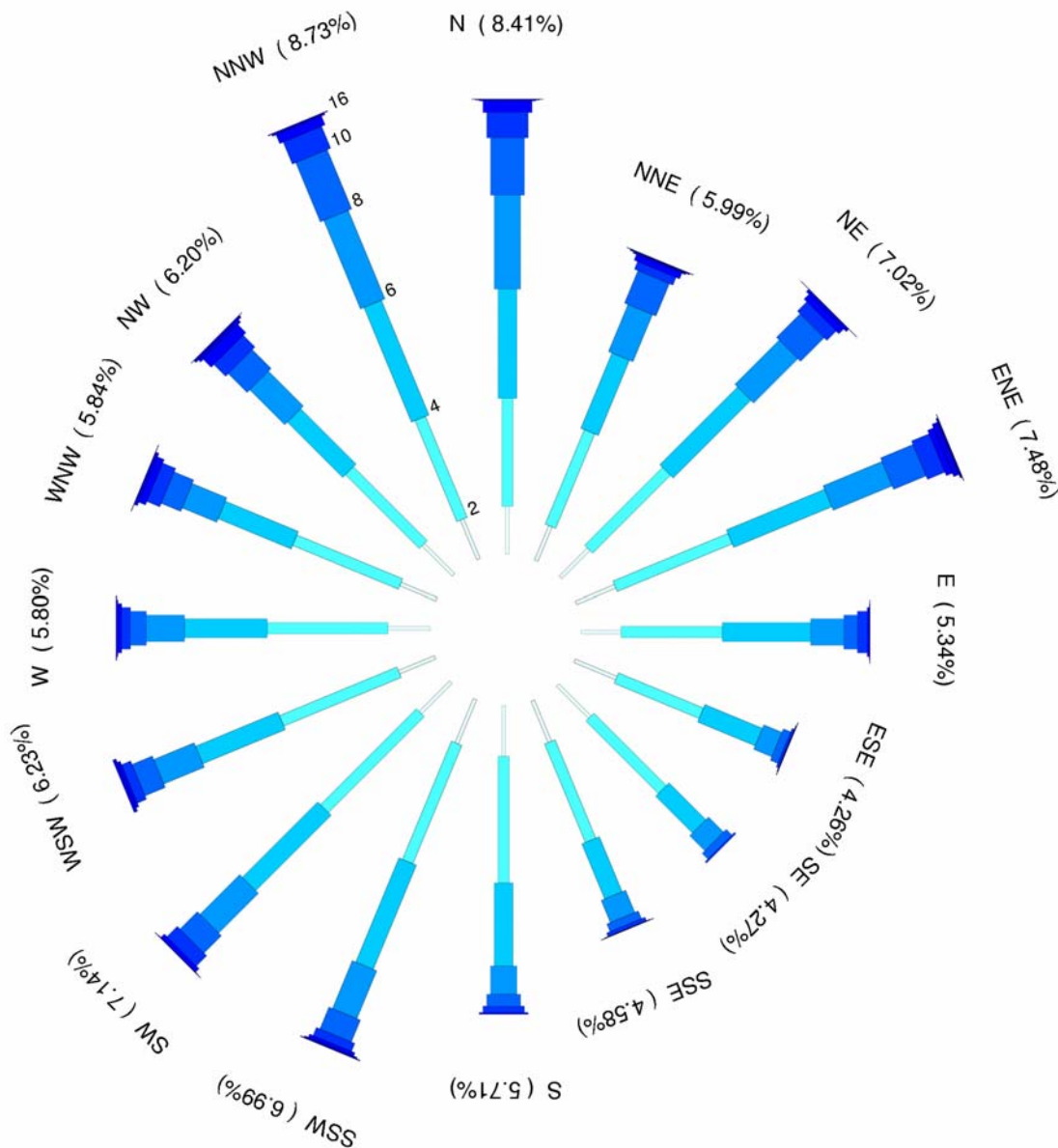


Figura 10. Rosa de vent en aigües fondes

Sector/V	< 2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	>22	%	TOTAL
Calmas													0.00%	0
N	253	573	579	498	304	134	62	4	4	2	0	0	8.41%	2413
NNE	197	542	432	270	186	44	32	8	6	2	0	0	5.99%	1719
NE	213	583	583	332	177	70	36	18	0	0	0	0	7.02%	2014
ENE	224	660	563	338	186	100	34	30	10	2	0	0	7.48%	2147
E	212	537	468	176	72	52	11	2	2	0	0	0	5.34%	1532
ESE	240	487	330	104	42	12	4	2	0	0	0	0	4.26%	1221
SE	242	543	276	113	42	10	0	0	0	0	0	0	4.27%	1226
SSE	237	565	316	127	44	20	2	2	0	0	0	0	4.58%	1313
S	269	671	441	150	62	34	10	0	0	0	0	0	5.71%	1637
SSW	253	679	598	275	125	46	18	8	4	0	0	0	6.99%	2006
SW	229	719	565	298	130	77	26	2	2	0	0	0	7.14%	2048
WSW	207	674	473	232	116	52	16	18	0	0	0	0	6.23%	1788
W	223	641	438	202	84	47	20	6	4	0	0	0	5.80%	1665
WNW	207	607	419	198	112	74	38	18	0	2	0	0	5.84%	1675
NW	227	554	415	262	141	88	59	16	14	2	0	0	6.20%	1778
NNW	228	579	658	508	340	126	50	10	4	0	0	0	8.73%	2503
%	12.76%	33.52%	26.33%	14.23%	7.54%	3.44%	1.46%	0.50%	0.17%	0.03%	0.01%	0.00%	100.00%	
TOTAL	3661	9614	7554	4083	2163	986	418	144	50	10	2	0		28685

Taula 4. Taula V – direcció mitja

4.1.2. Marea

El nivell de càlcul del mar es determina a partir de les dades recollides a l'Informe Climàtic de Nivell del Mar proporcionat pel Mareògraf de Barcelona.

En condicions mitjanes es pot considerar una marea astronòmica de 0.2 m, resultat de la diferència entre la mínima i la màxima marea astronòmica (veure la Figura 11). Per a les simulacions dels corrents generats per vent i mareas, s'utilitzaran els valors dels harmònics de marea que definiran les condicions durant les simulacions (Taula 5).

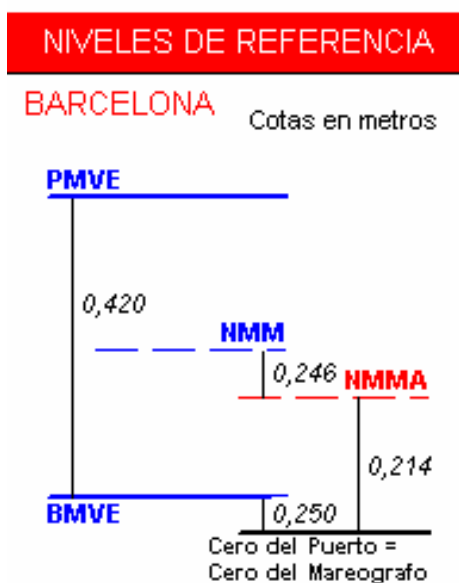


Figura 11. Nivell del Mar referents al zero d'Alacant NMMA (Mareògraf de Barcelona)

Harmònic	Amplitud, m	Fase, °
Z0	0.3976	0
Q1	0.0032	53.18
O1	0.0239	101.8
P1	0.0117	157.22
S1	0.007	228.74
K1	0.0369	165.83
2N2	0.0016	194.53
MU2	0.0017	181.38
N2	0.01	201.45
NU2	0.0018	206.24
M2	0.0464	214.01
L2	0.0011	223.39
S2	0.016	232.2
K2	0.0046	230.19
M3	0.0015	161.26
MN4	0.0021	303.59
M4	0.0053	346.9
MS4	0.0034	51.49
MK4	0.001	65.03

Taula 5. Harmònics de marea. Mareògraf de Barcelona

4.2. Simulacions numèriques

L'anàlisi dels corrents marins es realitzarà mitjançant el Sistema MOHID, que és un model tridimensional del medi aquós que inclou un mòdul hidrodinàmic baroclínic per a la columna d'aigua i un 3D per als mòduls de transport lagrangià i eulerià. Consta de mòduls específics per a l'avaluació de paràmetres i processos no conservatius com la turbulència (model GOTM). El model ha estat desenvolupat per MARETEC (Marine and Environmental Technology Research Center) de l'Institut Superior Tècnic (ITS) de la Universitat Tècnica de Lisboa.

Els resultats dels corrents s'establiran en una malla 3D i per tant oferiran els corrents a diferents alçades de la columna d'aigua. De tota manera, de cara als càlculs del potencial energètic s'utilitzarà el valor de la velocitat mitjana a tota la columna d'aigua.

La metodologia per conèixer els corrents en qualsevol punt del domini analitzat, davant la costa de l'AMB, serà similar a la descrita per l'onatge, i per tant, consistirà en convertir el registre històric de dades de vent i mareas (aquestes obtingudes a partir dels harmònics), en un registre de corrents (intensitat i mòdul) en qualsevol punt enfront de la costa.

El primer que s'ha detectat és que l'agent impulsor principal és el vent, pel què es dedueix que la marea no hi té influència, donada la costa oberta de l'AMB.

Tenint en compte la metodologia anterior, es simularan uns quants casos tipus que representin el total de casos possibles a l'àrea d'estudi, dels quals s'obindrà els valors del corrent, en direcció i intensitat, a qualsevol punt del domini.

Posteriorment es generarà el registre històric dels corrents, obtenint els corrents per a cada condició de vent, com a interpolació dels resultats dels 4 casos tipus més similars a les condicions en qüestió.

En concret, s'ha analitzat els 8 sectors principals de vent (sectors cada 45°), considerant dues intensitats de vent, febles de 5 m/s i moderats de 15 m/s. No s'han simulat condicions extremes, donat que el què interessa és el règim mig.

En l'Apèndix 2, es resumeixen els resultats dels 16 casos tipus analitzats, on s'aprecien les figures resultants amb la distribució 2D-H dels corrents generats.

4.3. Corrents generals

En aquest apartat tractarà d'estimar-se quin és el patró de corrents generals o de plataforma que existeix a la franja litoral situada enfront de l'Àrea Metropolitana de Barcelona.

Estudis anteriors dels corrents a la costa catalana, indiquen un cert coneixement del corrent de plataforma o "corrent Catalana", que produeix moviment de la massa d'aigua en direcció pràcticament paral·lela a la costa.

Diverses campanyes de mesura en la zona han mostrat el predomini de corrents en direcció WSW (de l'ordre del 60%) sobre les corrents en direcció ENE (de l'ordre del 40%). Les velocitats de corrent (de fins a 30 cm/s) són també superiors cap el WSW que cap el ENE.

L'únic cas que es coneix de registres continuats de corrents a la costa central catalana, va ser el que es dugué a terme durant el programa SPIO (facilitat per EMSSA) enfront de Barcelona. Des de setembre de 1987 fins setembre de 1988 es mantingueren dos correntímetres rotor a 8 m i 15 m de profunditat prop la desembocadura del Besòs (fons de 22 m).

A títol il·lustratiu es mostra a la Figura 12 els resultats. En els dos nivells de mesura la direcció dominant és cap el WSW o SW, seguida del NE, amb una gran diferència respecte a qualsevol altre sector.

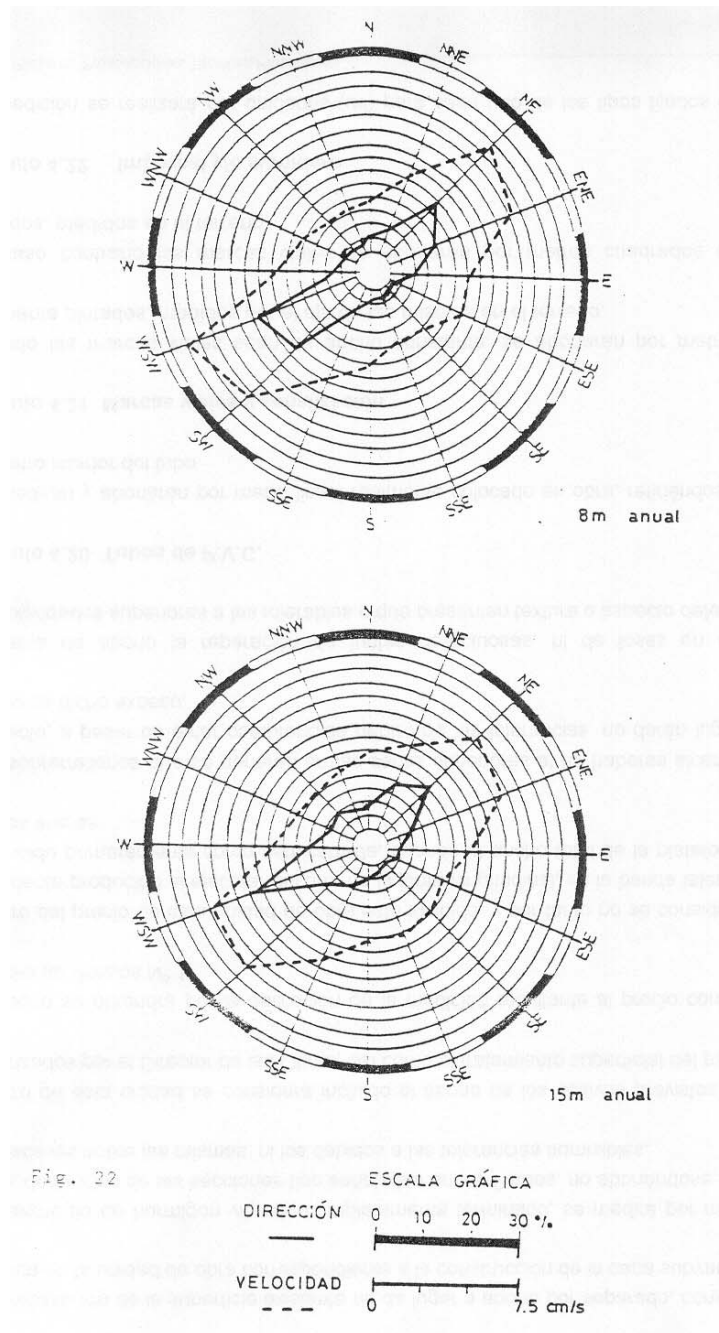


Figura 12. Corrents enfront de la costa de Barcelona.

Estudis més recents (CAMCAT, 2004)⁵, han analitzat el corrent general al quadrant nord-est del Mediterrani, obtenint grans intensitats damunt el tal·lus de la plataforma continental, apropant-se puntualment a la costa catalana degut a les irregularitats de la batimetria. Les intensitats properes a la franja costanera superen lleugerament els 15 cm/s en alguns casos (veure Figura 13).

⁵ Pla de Contenció de Riscos per Abocament de Contaminants de Catalunya

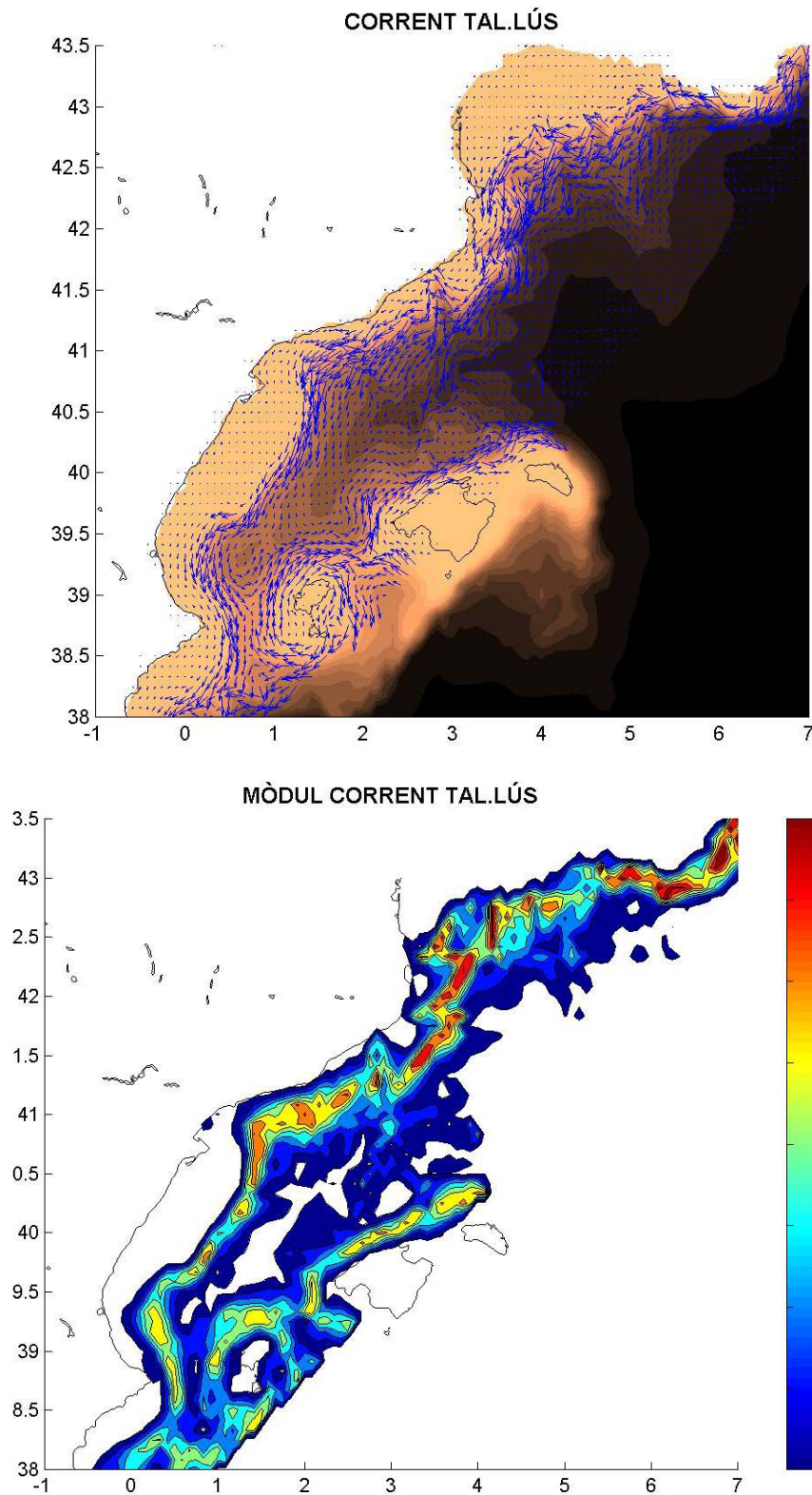


Figura 13. Corrents de plataforma al nord-est del Mediterrani (CAMCAT, 2004)

4.4. Estimació de potencial energètic

L'energia generada a través dels corrents marins, és captada usant turbines submergides amb aspes rotatives i un generador. Les turbines submarines treballen amb el mateix principi de funcionament que les turbines eòliques, transformant l'energia cinètica dels fluids i transferint-la a energia de rotació, i després a energia elèctrica.

Les velocitats dels corrents són més lentes que les del vent, però en cavi, degut a la densitat de l'aigua (835 cops la de l'aire) les turbines aquàtiques són més petites que les eòliques amb la mateixa capacitat instal·lada.

La potència que és possible d'extreure dels corrents marins depèn de la velocitat del fluid, de l'àrea de les pales del rotor i de l'eficiència de la turbina aquàtica, i pot ser calculada com:

$$Power = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p$$

on ρ es la densitat del mar (1028 kg/m³)

A és l'àrea de les aspes del rotor (m²)

v es la velocitat dels corrents (m/s)

C_p és el coeficient de la turbina, que mesura l'eficiència

Un cop definits els valors dels corrents a qualsevol punt del domini davant les costes de l'AMB, es podrà definir el potencial energètic dels corrents marins tenint en compte que es definirà en base a una tecnologia prèviament seleccionada, que ofereixi els valors de l'àrea de les aspes del rotor i el rendiment o eficiència de la turbina.

Els corrents vindran definits pels valors obtinguts de les simulacions numèriques, que defineixen els valors dels corrents generats per vent i mareas, i s'hi sumarà un valor constant equivalent als corrents generals o de plataforma, a partir de les dades de què es disposa d'acord amb l'estudi realitzat pel CAMCAT.

5. ENERGIA MAREMOTÈRMICA I DELS GRADIENTS SALINS

Els mars i oceans són col·lectors naturals d'energia solar, i diàriament absorbeixen quantitats enormes d'energia en forma de radiació solar. A les latituds tropicals, els dies més llargs i la llum solar intensa afavoreixen una major temperatura de la columna d'aigua fins als 35 m o inclús fins als 100 m de profunditat, donant com a resultat aigües superficials de fins a 27-29°C. Més enllà d'aquesta capa calenta, la temperatura descendeix gradualment fins a una mitja d'uns 4,4°C. Si es té en compte la segona llei de la termodinàmica, aquest diferencial de temperatura es pot observar com a un volum significatiu d'energia potencial, la qual, si es pot extreure, representaria una font d'energia completament renovable.

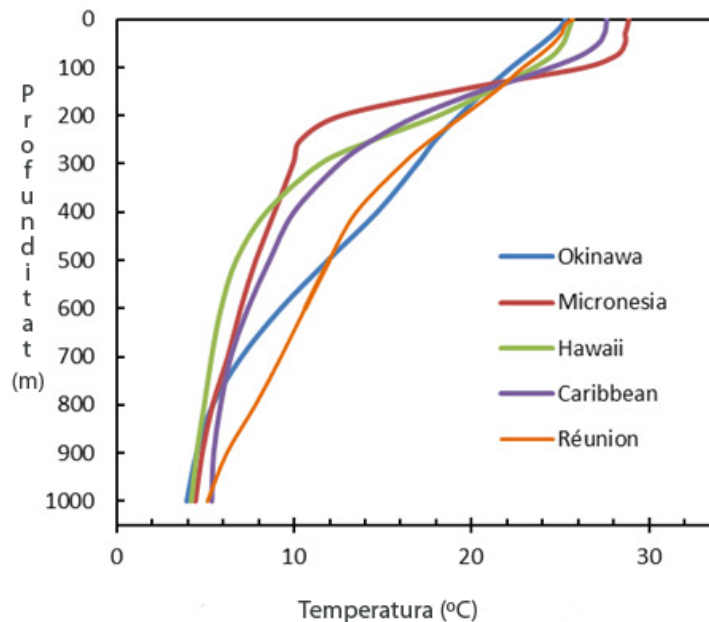


Figura 14. Evolució de la temperatura amb la profunditat (Font: modificat de GEC Co. Ltd)

L'energia marina de diferències de temperatura, o OTEC per les seves sigles en anglès (*Ocean Thermal Energy Conversion*), és una tecnologia dissenyada precisament per extreure aquesta energia tèrmica dels mars i oceans i convertir-la en electricitat o en matèries primeres. Per tal d'obtenir-ne un aprofitament viable, aquesta tecnologia requereix un salt tèrmic de 20°C entre l'aigua calenta superficial i l'aigua freda profunda, i per tant, d'entrada només és possible en certes àrees del món, essent la zona dels tròpics l'àmbit clau per a aquesta tecnologia (veure referències a la Figura 14). Els principals usos de l'OTEC són la generació d'energia, l'obtenció d'aigua dessalada, proporcionar capacitat de refrigeració i el recolzament a l'aqüicultura marina (utilitzant l'efluent d'aigües fredes riques en nutrients de les plantes OTEC).

D'altra banda, com en el desenvolupament de tota altra tecnologia de generació energètica, cal tenir en compte els possibles impactes ambientals associats. En aquest sentit, i donat que la tecnologia OTEC requereix de la mobilització mitjançant bombeig de grans volums d'aigua marina, cal tenir en compte el possible efecte sobre les característiques regionals de les masses d'aigua. La barreja de volums importants d'aigua, profunda i freda d'una banda i superficial i calenta de l'altra, modifica les seves característiques en l'efluent, principalment pel que fa a la temperatura i als nutrients. En part per aquesta raó es proposen projectes d'instal·lacions a bord de grans embarcacions, donat que gràcies a la seva mobilitat es podria evitar l'impacte que representa l'abocament d'un gran volum d'aigua amb característiques diferents a les locals, en un mateix punt, de forma continuada. D'altra banda, la descàrrega de l'aigua a una profunditat intermèdia també podria contribuir a minimitzar els efectes ambientals negatius.

De la mateixa forma que amb la temperatura, és possible obtenir energia de l'aprofitament del gradient de salinitat existent entre dues masses d'aigua, és a dir, la diferència de concentració en sals entre l'aigua dolça i l'aigua salada, la composició en sals de la qual és gairebé totalment estable arreu (Taula 6). La distinció entre aigua dolça i aigua salada òbviament es fa en referència a la seva concentració en sals, però existeix una categorització més àmplia en funció d'aquesta característica (Taula 7).

A priori, aquest aprofitament és viable en indrets on hi ha disponible una massa d'aigua dolça que es troba amb aigua salada, com per exemple a les desembocadures de rius. Avui en dia hi ha dues tecnologies que estan essent desenvolupades per fer viable des del punt de vista comercial l'aprofitament d'aquesta forma d'energia: l'osmosi per pressió retardada (OPR) i l'electrodiàlisi reversible (EDR).

Actualment sembla ser que la utilització d'aquestes tecnologies no hauria de representar un impacte ambiental significatiu, i en tot cas menor al produït per les instal·lacions de dessalinització. La barreja entre aigua dolça i aigua salada és un procés que ja té lloc de forma natural a les desembocadures dels rius, i les plantes de generació d'energia bàsicament el que fan és replicar aquest procés retornant un efluent d'aigua salabrosa al medi. Tot i així, la descàrrega concentrada d'aquesta aigua salabrosa, així com l'oscil·lació constant del seu contingut en sals en cas de produir-se, podria alterar l'ambient receptor i comportar un impacte sobre la fauna i flora local en cas de que aquesta no estigui adaptada al rang de concentracions abocat.

D'altra banda, també cal tenir en compte que es tracta d'unes plantes que tampoc requereixen de cap tipus de combustible per funcionar més enllà del proveïment d'aigua, així com que una bona part de les grans ciutats i de les àrees industrials es troben precisament localitzades a les desembocadures de grans rius, pel que les plantes de generació d'energia es podrien construir en sòls industrials degradats, així com inclòs construir-se sota terra per reduir el seu impacte visual.

DENOMINACIÓ		SALINITAT (g/l)
Dolça		<1
Salobrosa	Baixa	1-2
	Mitjana	2-5
	Alta	5-10
Salina		10-30
Marina		30-50
Salmorra		50-200

Taula 6. Denominació de les aigües en funció del seu grau de salinitat

IÓ	VALÈNCIA	CONCENTRACIÓ (ppm o mg/kg)	% SOBRE LA SALINITAT TOTAL	PES MOLECULAR	mmol/kg
Cl	-1	19.345	55,03	35.453	546
Na	1	10.752	30,59	22.990	468
SO ₄	-2	2.701	7,68	96.062	28,10
Mg	2	1.295	3,68	24.305	53,30
Ca	2	416	1,18	40.078	10,40
K	1	390	1,11	39.098	9,97
HCO ₃	-1	145	0,41	61.016	2,34
Br	-1	66	0,19	79.904	0,83
BO ₃	-3	27	0,08	58.808	0,46
Sr	2	13	0,04	87.620	0,09
F	-1	1	0,00	18.998	0,07

Taula 7. Composició de l'aigua de mar pel que fa als principals ions (Floor, 2006⁶)

Finalment, en ambdós casos, cal tenir en compte les condicions especials de manteniment que requeririen les instal·lacions, tant pel que fa a evitar els fenòmens de corrosió o *biofouling*, com pel que fa a la necessitat periòdica de substitució d'elements.

5.1. Condicions ambientals locals de temperatura i salinitat

La determinació de les característiques locals és important de cara a la determinació de les zones que, *a priori*, disposen d'un major Potencial Energètic. A partir de dades històriques de fonts pròpies, es pot definir el rang de temperatures superficials de la massa d'aigua del litoral barceloní entre 12°C i 25-26°C, podent sobrepassar els 26 graus ocasionalment, especialment en zones més encaixades per dics o d'altres infraestructures marítimes.

⁶ Floor, J. (2006). The chemical composition of seawater. No publicat: www.seafriends.org.nz/oceano/seawater.htm

A la Figura 15 es mostra l'evolució setmanal de la temperatura superficial (a 1 metre de profunditat) de l'aigua de mar enfront de la platja de la Barceloneta al llarg de l'any 2012, així com l'evolució de la temperatura mitjana al llarg del període 2005-2012.

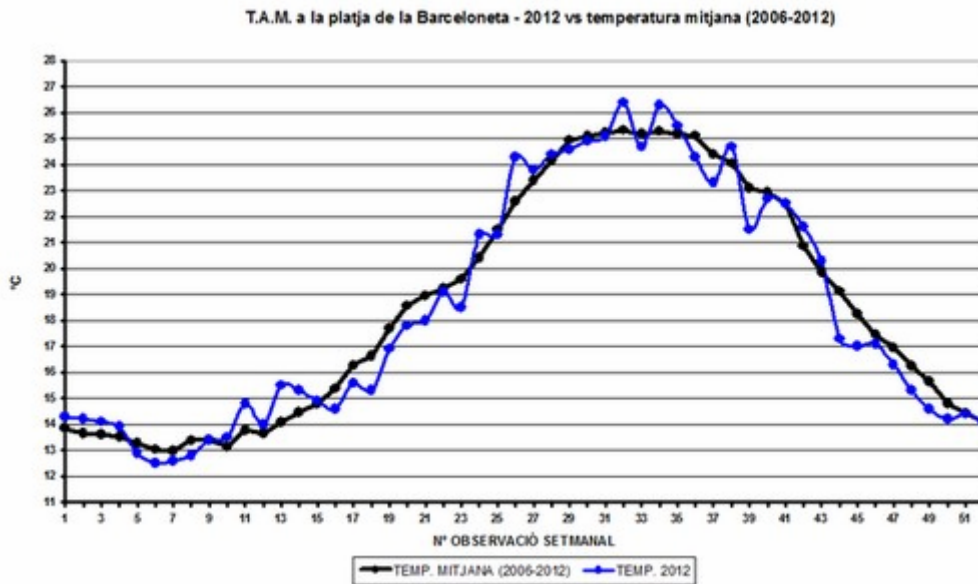


Figura 15. Observacions setmanals de la temperatura de l'aigua del mar, a 1 - 1,5 metres de fondària i a 180 metres de la línia de la costa enfront la platja de la Barceloneta⁷

Pel què fa a l'evolució en profunditat, el perfil de temperatura al llarg de la columna d'aigua en aigües obertes pot ser descrit com a dues capes separades per una interfase. Aquesta interfase o termoclina es troba sovint marcada per un canvi abrupte en la temperatura, si bé més normalment és un canvi gradual que succeeix en un rang de profunditat variable.

A la zona d'estudi, durant l'època d'establiment de la termoclina estacional (que es fa evident principalment a l'estiu) es detecta en general a partir dels 15-20 m de fondària, on la temperatura comença a decreixer, i simultàniament, és possible detectar un lleuger augment de la salinitat, que es pot arribar a aproximar a valors de 39‰ (mentre que en superfície acostuma a oscil·lar entre 37,5 i 38,5‰).

Referent a la salinitat, és important destacar també que la ubicació de la zona d'estudi entre els rius Llobregat i Besòs propicia que especialment després d'episodis de pluges sigui possible detectar una capa d'aigua superficial amb un contingut inferior de sals dissoltes.

Existeixen instal·lacions que proporcionen sèries llargues de dades útils. Així, la boia "Barcelona" de *Puertos del Estado*, situada enfront del litoral barceloní sobre una

⁷ Diego Lázaro - <http://marbcn.blogspot.com.es>

profunditat de 68 metres i unes coordenades geogràfiques de 41,32°N - 2,20°E, instal·lada des del març de 2004, proveeix de dades de temperatura superficial de l'aigua cada hora i amb una precisió de dècima de grau.

També, enfront del litoral de Vilanova i la Geltrú, a 4 km de distància al sud del port i a l'interior de la zona protegida de pesca, s'hi localitza l'observatori submarí OBSEA (4559692m N, 395351m E - UTM 31T), instal·lat al 2009.

Aquest observatori realitza mesures de salinitat i temperatura a la profunditat a la que es troba, 21 metres, i més recentment s'ha equipat amb una boia meteorològica que també admet la connexió d'un AWAC que permet mesurar la velocitat dels corrents marins a diferents profunditats, la temperatura, la conductivitat i la turbulència de l'aigua. A més, a mig-llarg termini es preveu la instal·lació de nous observatoris interconnectats al llarg del litoral del Garraf en direcció nord-est.

5.2. Càlcul del potencial energètic per gradient tèrmic

Quan dues masses d'aigua amb temperatures diferents es barregen té lloc una transferència d'energia de la massa més calenta cap a la massa freda, transferència que continua fins que la temperatura de la barreja arriba a una situació d'equilibri en un punt intermedi entre les temperatures originals d'ambdues masses. Durant aquest procés, l'aigua calenta perd energia que es transfereix a l'aigua freda, la qual com a conseqüència obté un guany en la seva energia.

És a dir, que en un sistema tancat la quantitat total d'energia es conserva, de manera que la suma de les energies d'ambdues masses d'aigua abans de que es barregin serà igual al total d'energia d'ambdues masses un cop s'hagin barrejat d'acord amb la llei de conservació de l'energia. La temperatura final de la barreja dependrà de les masses dels dos volums d'aigua i les seves temperatures inicials d'acord amb la següent fórmula:

$$m_1c(T_1) + m_2c(T_2) = (m_1 + m_2)cT_{final}$$
$$T_{final} = \frac{m_1(T_1) + m_2(T_2)}{m_1 + m_2}$$

on m és la massa

c és el calor específic de la massa d'aigua

T és la temperatura

Aquestes fórmules estan relacionades amb la següent per a una massa d'aigua, on es calcula l'energia a aportar perquè una massa d'aigua augmenti la seva temperatura en uns

determinats graus, i que obté un resultat en calories/segon que és possible transformar a Joules/segon (dividint per 4,18), que equival a watts:

$$Q = c \times f \times \Delta T$$

on Q és la quantitat de calor, en calories/segon

f és el cabal, en forma de 1.000 kg/s (m^3/s)

c és el calor específic (en $\text{cal}/\text{g}\cdot^\circ\text{C}$)

ΔT és l'increment de temperatura

Aquestes són fórmules bàsiques que aporten informació sobre com es transmet l'energia entre diferents masses d'aigua, així com l'energia que cal transmetre per augmentar la temperatura, però a diferència del càlcul del potencial energètic del gradient salí, no es disposa d'una fórmula única que permeti calcular de forma teòrica l'energia màxima generada a partir de dos volums d'aigua amb unes temperatures (calenta i freda) determinades.

En aquest cas s'utilitza tot un desenvolupament que, a més, depèn del tipus de sistema o cicle que s'estigui estudiant (veure l'apartat de revisió de l'Estat de la Tècnica). En el cas de considerar un sistema OTEC de cicle obert (Figura 16), per exemple, segons Vega⁸, s'hauria de tenir en compte els següents càlculs:

Calor absorbit de l'aigua marina (J/s): $q_w = m_{ww} \times c \times (T_{wwi} - T_{wwo})$

Taxa de generació de vapor (kg/s): $m_s = q_w / h_{fg}$

Treball de la turbina (J/s): $w_T = m_s (h_3 - h_5)$

Calor emès cap a l'aigua de mar (J/s): $q_c = m_{cw} \times c \times (T_{cwo} - T_{cwi})$

on m_{ww} és la taxa de flux en massa de l'aigua calenta

c és el calor específic

T_{wwi} i T_{wwo} la temperatura de l'aigua salada a l'entrada i sortida de l'intercanviador de calor

h_{fg} el calor d'evaporació

h són les entalpies als punts indicats

i el sufix cw es refereix a l'aigua freda.

⁸ Vega L. (2002). *Ocean Thermal Energy Conversion Primer*. Marine Technology Society Journal, vol. 6 (4): Pag. 25-35

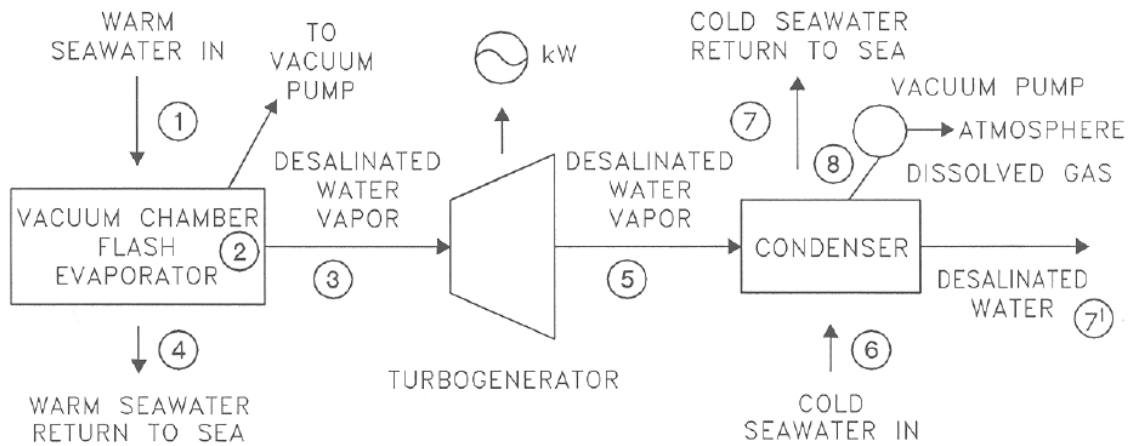


Figura 16. Model esquemàtic del funcionament d'una instal·lació OC-OTEC en què es basen els càlculs següents.

5.3. Càlcul del potencial energètic per gradient salí

L'energia osmòtica, també anomenada energia del gradient salí, es produeix al barrejar aigües amb diferents concentracions salines. Empíricament es coneix que quan dues solucions amb diferents composicions es posen en contacte existeix una força motriu que fa que es barregin i formin una única solució. Essent aquest el cas, es pot suposar que la variació en l'energia lliure de Gibbs, per a una situació així, serà negativa. En aquest sentit, fa més d'un segle es va proposar la següent fórmula per a un sistema de fluids barrejant-se sota pressió i temperatura constant:

$$\Delta G = nRT(X_A \ln X_A + X_B \ln X_B)$$

on n és el nombre de molècules implicades en la barreja

R és la constant universal dels gasos en unitats apropiades

T és la temperatura absoluta

X_A és la fracció molar del component A

X_B és la fracció molar del component B

Tenint en compte que les fraccions molars no són mai superiors a 1, el resultat dels logaritmes en aquesta equació és negatiu, pel què, efectivament, $\Delta G < 0$. L'energia lliure alliberada durant la barreja pot ser calculada mitjançant la fórmula anterior. Un cop s'hagi realitzat, la solució resultant no es separarà espontàniament en les solucions inicials, i revertir la situació implica la realització d'un treball. Aquest fet és consistent amb l'experiència, i és obvi, per exemple, que l'aigua salada no es separa espontàniament en una capa d'aigua dolça i una capa d'aigua salada més densa.

De fet, per fer una separació d'aquest estil s'ha de recórrer a solucions més radicals com la destil·lació, on la solució s'escalfa i part de l'aigua s'evapora i es recull per condensació, o el pas forçat per una membrana permeable que retengui els ions.

A partir d'aquesta fórmula és possible calcular la quantitat d'energia que es pot derivar de la barreja d'aigua dolça amb aigua salada. Donat que la força motriu és deguda a l'entropia, la quantitat d'energia per un volum donat d'aigua dolça s'incrementa alhora que s'incrementa el volum d'aigua salada. L'energia màxima s'obté barrejant l'aigua dolça en un volum infinit d'aigua salada, de tal manera que la composició final de la barreja serà exactament igual a la composició de l'aigua salada. El canvi en l'energia lliure del sistema ve donat per:

$$\Delta G_{\max} = RT \ln X_{H_2O}$$

on R és la constant universal dels gasos, 8,1314 J/mol·°K

T és la temperatura absoluta, 293°C (20°C)

X_{H_2O} és la fracció molar de l'aigua en el producte

L'aigua de mar conté aproximadament un 3,50% de NaCl, el què significa que en 100 g d'aigua de mar hi ha aproximadament 3,5 g de NaCl (0,0599 mols) i 96,5 grams de H₂O (5,36 mols). Per tant, la fracció molar de l'aigua a l'aigua de mar és:

$$X_{H_2O} = 5,36 / (5,36 + 0,0599) = 0,989$$

Substituint la fracció molar a l'equació anterior, s'obté que:

$$\Delta G_{\max} = 8,1314 \times 293 \times \ln(0,989) = -8,1314 \times 293 \times 1,11 \times 10^{-2} J/mol = -27,1 J/mol$$

I per gram d'aigua (1 mol de H₂O conté 18 g, formats per 2 g de H i 16 g de O), això és:

$$\Delta G_{\max} = -27,1/18 J/g = -1,5 J/g$$

El valor negatiu indica que l'energia és alliberada i que, per tant, la barreja tindrà lloc espontàniament, tal i com indica el sentit comú. També és important el fet que indica que una instal·lació dissenyada per recuperar l'energia que allibera aquesta barreja pot recuperar fins a 1,5 Joules màxims teòrics per cada gram d'aigua dolça que es barregi amb aigua salada.

Finalment, cal dir que existeixen alternatives més complexes a la fórmula exposada a l'inici que tenen en compte més factors, com ara els volums de les solucions en barreja, també a temperatura i pressió constant, però que en el fons deriven de la fórmula exposada inicialment. Per exemple:

$$\Delta E = 2R_g T \left(c_c \ln \frac{c_c (1 + \varphi)}{c_c + \varphi c_d} + \varphi c_d \ln \frac{c_d (1 + \varphi)}{c_c + \varphi c_d} \right)$$

on R_g és la constant universal dels gasos en unitats apropiades (J/mol·°K)

T és la temperatura absoluta

C_d es la concentració del solut a la solució diluïda (aigua dolça)

C_c és la concentració del solut a la solució concentrada (aigua salada)

φ és la ratio de dilució, en la forma $\varphi = V_d/V_c$, on V és el volum de les solucions en barreja

6. REVISIÓ DE L'ESTAT DE LA TÈCNICA

De cara a determinar el rendiment energètic marí i abans d'entrar a valorar el potencial energètic de cadascun dels possibles aprofitaments, cal conèixer l'estat de la Tècnica, ja que no tots els mecanismes aprofiten de la mateixa manera els recursos energètics.

Per a cada tipus d'energia de la que es pretengui quantificar el seu aprofitament s'haurà de determinar quins són els millors sistemes d'aprofitament existents al mercat, per tal d'establir els nivells de rendiment oferts per cadascun dels dispositius analitzats. El nivell de rendiment per a cada sistema d'aprofitament energètic vindrà donat per la seva "corba de potència" que relaciona la capacitat productiva d'energia en base al potencial energètic del recurs que es pretén aprofitar.

6.1. Tecnologies que aprofiten l'energia de les onades

El gran potencial energètic de les onades es concentra en els marges continentals, que sumen un total de 336.000 km de longitud aproximadament i es pot dir que suposen un recurs potencial del voltant de 2 TW de potència. Ara bé, un dels majors inconvenients en la utilització de l'energia de les onades, és la seva irregularitat i inconstància. A més, els dispositius han de ser bastant lleugers per a aprofitar l'energia de les onades petites i, a la vegada, suficientment resistents per a suportar els cops de les onades quan hi ha temporal.

En aquestes condicions no és d'estranyar que, segons les xifres del *World Energy Council*, existeixin més de 1000 dissenys de convertidors d'energia actualment patentats, la majoria amb importants dificultats pràctiques.

El desenvolupament de tecnologies que aprofiten l'energia de les onades es remunta a més de 100 anys, i per tant de tots els modes d'explotació de les energies marines és la que més sistemes diferents ofereix. Com a mostra d'això s'indiquen alguns dels convertidors d'energia undimotriu existents al món, instal·lats en fase de prototip o ja en funcionament i connectats a la xarxa (veure Taula 8). De tots ells s'analitzarà en detall les tecnologies més conegudes i amb més probabilitats d'èxit, i per tant, amb major probabilitat de ser aprofitades a les nostres aigües.

Tots els convertidors tenen en comú que l'energia que desenvolupen és proporcional a les masses d'aigües que oscil·len i l'amplitud d'oscil·lació. La mateixa es descompon en dues parts aproximadament iguals: una potencial, deformació de la superfície, i una cinètica, desplaçament de les partícules. L'energia continguda en el seu moviment o energia cinètica, pot transformar-se en energia elèctrica de diferents maneres. De manera molt genèrica, podem dir que els sistemes utilitzats poden classificar-se en dos: fixes a la plataforma continental i flotants.

Nombre del dispositiu	Potencia del dispositiu (kW)	Superfície que ocupa (m ²)	Ratio aprox. Potencia /Superfície	Fluido de trabajo (aire, agua o aceite a presión)	Instalaciones en el mar profundo, medio y costera
OWC de Unión Fenosa	27	48	559	Agua de mar	Costera
Tapchan	400	7000	57	Agua de mar	Costera
El Pato Salter	2310	4050	570	Aceite a presión	Aguas profundas
OWC Clam	2500	2827	884	Aire	Aguas profundas
Cilindro de Bristol	2000000	1656000	1208	Agua de mar	Aguas profundas
Balsa de Cockerell	2000	5000	400	Aceite a presión	Aguas profundas
Buque Kai mei	2000	960	2083	Aire	Aguas profundas
Bomba de Manguera	110	113	973	Agua de mar	Aguas profundas
Bomba de pistón	45	64	707	Agua de mar	Aguas profundas
OWC NEL	2000000	1552000	1289	Aire	Aguas profundas
Convertidor de Belfast	75	51	1471	Aire	Costera
OWC Kvaerner	500	79	6366	Aire	Costera
OWC Sakata	60	360	167	Aire	Costera
OWC de Kujukuri	30	31	955	Aire	Costera
OWC de Pico	400	96	4167	Aire	Costera
BBDB	200	36	5556	Aire	Poco profundas
OWC Mighty Wale	110	1200	92	Aire	Poco profundas
OWC de China	30	40	750	Aire	Costera
OWC Energetech	500	875	571	Aire	Costera
OWC Limpet	500	84	5952	Aire	Costera
OWC Alda	1000	-	-	Aire	Costera
OWC Nereida	250	700	537	Aire	Costera
OWC Breakwave	750	525	1427	Aire	Costera
FWVP	1500	-	1019	Agua de mar	Aguas profundas
PowerBuoy	20	20	1531	Aceite a presión	Aguas profundas
Pelamis	750	490	118	Aceite a presión	Aguas profundas
Wavedragon	6000	51000	160	Agua de mar	Aguas profundas
SSG	12000	75000	1944	Agua de mar	Todo tipo de ubicación
Plataforma flotante de múltiples convertidores	2520	1296	-	Aceite a presión	Aguas profundas
Wavestar	6000	1440	4167	Aceite a presión	Poco profundas
AWS	1200	90	13296	Aire	Poco profundas
Searev	500	375	1333	Aceite a presión	Aguas profundas
Wavebob	1500	225	6667	Aceite a presión	Aguas profundas
Oyster	500	216	2315	Agua de mar	Poco profundas
Waveroller	13	16	825	Aceite a presión	Poco profundas
Multiwave Plane	30	22	1374	Agua de mar	Poco profundas
Aquabuoy	500	157	3183	Agua de mar	Aguas profundas

Taula 8. Principals sistemes de conversió d'energia undimotriu instal·lats arreu de món

Dins de les diferents maneres d'extreure energia, en trobem l'aprofitament directe de les oscil·lacions en l'alçada de l'aigua, que poden fer pujar i baixar un pistó dins d'un cilindre, movent d'aquesta forma un generador d'electricitat.

Una altra possibilitat és que el moviment de les onades produeixi un desplaçament de l'aire en l'interior d'un cilindre, l'aire busca la sortida i va a parar a una turbina que, girant, activa un generador, quan l'onada es retira del recinte, el cilindre reabsorbeix l'aire que hi havia pujat, i el moviment de l'aire cap avall torna a moure la turbina.

És el que es coneix com a columna d'aire oscil·lant o columna oscil·lant, i és un dels sistemes que més varietats tecnològiques ofereix (Figura 17). A pesar de l'aparent senzillesa del mecanisme, la irregularitat de les onades constitueix un important inconvenient a l'hora d'utilitzar-lo com a font d'energia continua.

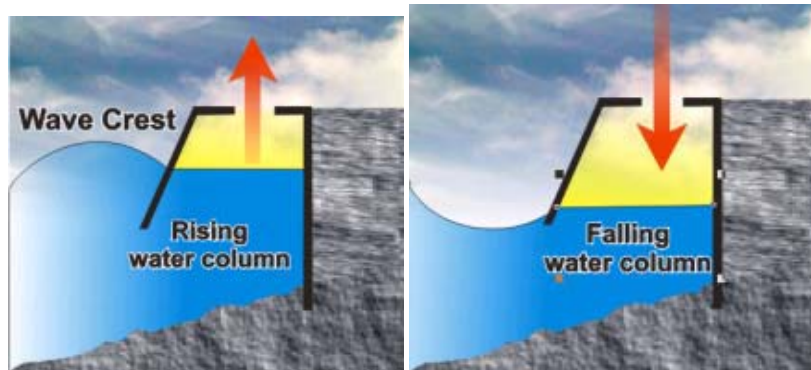


Figura 17. Sistemes de columnes oscil·lants

Les tecnologies existents abans de l'any 2000, basades en la Oscil·lació o Columnes Assistides d'aigua (OWC), boies i pontones (*The Hosepump*), tapes i canals afilats (*The Pendolor* y TAPCHAN) encara existeixen o segueixen sent desenvolupades (Figura 18).

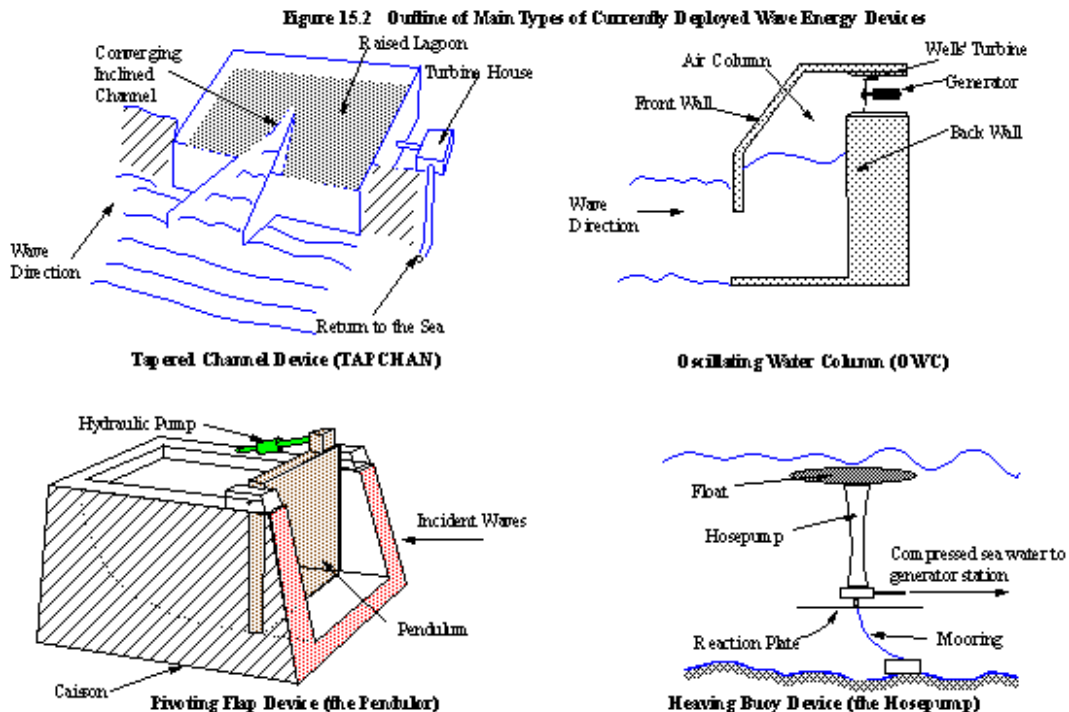


Figura 18. Generació a partir de onades en oscil·lació⁹

⁹ World Energy Council - <http://www.worldenergy.org/wec-geis/focus/renew/trackrecord.asp>

Després de 20 anys d'investigacions més avançades es va presentar el Projecte LIMPET, com a resultat de la col·laboració de les firmes Wavegen i Queen's University Belfast i la Unió Europea, que va fer possible que s'instal·lés una estació generadora d'electricitat de 500 kW de potència a l'illa escocesa de Islay, que ofereix energia a més de 400 llars i l'any 2000 es va unificar al sistema electroenergètic del Regne Unit¹⁰.

El LIMPET (*Land Installed Marine Powered Energy Transformer*) consisteix en una estructura de formigó oberta al mar per la seva part inferior, on trenquen les onades, i una cambra d'aire en la part superior. Al entrar la marea, comprimeix l'aire, que aleshores fa girar les turbines. La novetat en el LIMPET és que les seves turbines no s'aturen quan retrocedeix la onada cap el mar i es genera una succió inversa a través d'elles, sinó que sempre giren en el mateix sentit amb independència del anar i venir de la marea. D'aquesta forma, el generador escocès aconsegueix produir electricitat sense interrupció (Figura 19).



Figura 19. Generador Limpet

Una altra tecnologia destacable és el Pelamis (anomenada també serp de mar), desenvolupat a Ocean Power Delivery Ltd, Escòcia¹¹.

El convertidor Pelamis és una estructura semisubmergida i articulada, composta per seccions cilíndriques. El moviment generat per les onades a les unions és el que activa un sistema de braços hidràulics amb oli a pressió, que generen el moviment en motors hidràulics per mitjà d'acumuladors amortidors. La longitud total d'un element Pelamis és d'uns 130 m i el diàmetre de les seccions de 3.5 m, i la potència nominal de 375 kW, i representa la tecnologia més robusta fins el moment, instal·lada i connectada a xarxa davant les costes de Portugal (Figura 20).

¹⁰ <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia17/HTML/articulo03.htm>

¹¹ Yemm, R. (1999). "The history and status of the Pelamis Wave Energy Converter", "Wave power – Moving towards commercial viability", IMECHE Seminar, London, UK



Figura 20. The Pelamis Wave Energy Converter (Ocean Power Delivery Ltd.)

El sistema que usen les boies OPT (*Ocean Power Technology*) està basat en el *Point Absorber Wave Energy Converter*, desenvolupat per Rambøll a Dinamarca, i consisteix en un flotador connectat a una base ancorada per un cable de polièster (Figura 21).

El moviment relatiu entre la superfície del mar i l'estructura del fons, activa una bomba amb un pistó (actuador) instal·lat entre el flotador i el cable de subjecció. Un model a escala 1:10 va ser testat davant les costes daneses, a Nissum Bredning, durant un període de tres mesos, i un model escala 1:4 amb un diàmetre de 2.5 m es va testar en alta mar.

En l'actualitat *Ocean Power Technology*, té més de 10 boies instal·lades arreu del món, una d'elles a Santoña (Cantàbria), però la majoria estan en fase de proves o prototip (Figura 22).

Una de les primeres tecnologies que es va desenvolupar és el *Salter Duck*, introduït el 1974. La singularitat d'aquest convertidor és que pot aprofitar tant l'energia cinètica com la potencial de les onades, assolint una de les eficiències més altes del mercat (prop de 90%).

El desenvolupament es va produir de manera lenta fins l'any 1983, i no va ser fins el 1993 que es va redissenyar per donar-li una nova empenta. El disseny actual es caracteritza per la seva alta disponibilitat i eficiència amb uns costos baixos de producció, però de moment no s'ha comercialitzat ni n'és un referent al sector (Figura 23).

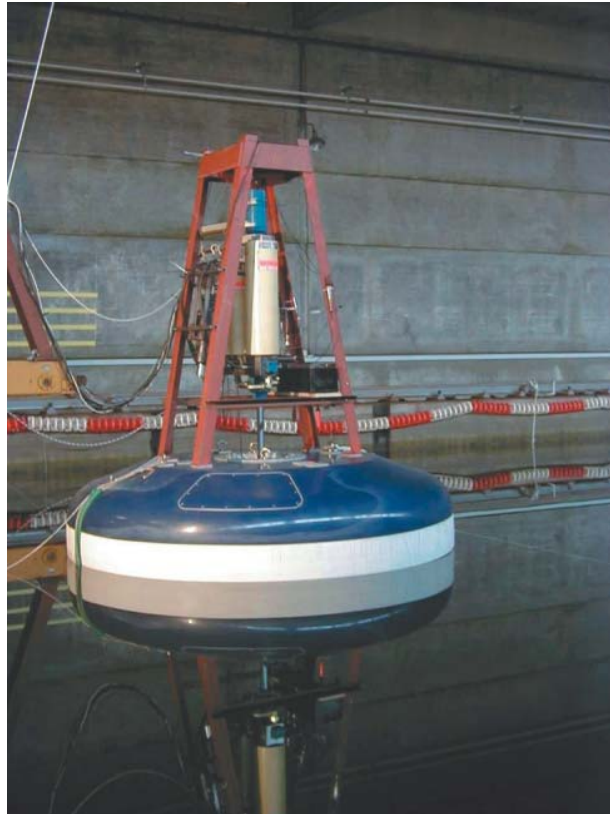


Figura 21. Point Absorber Wave Energy Converter



Figura 22. Dimensions d'una boia OPT

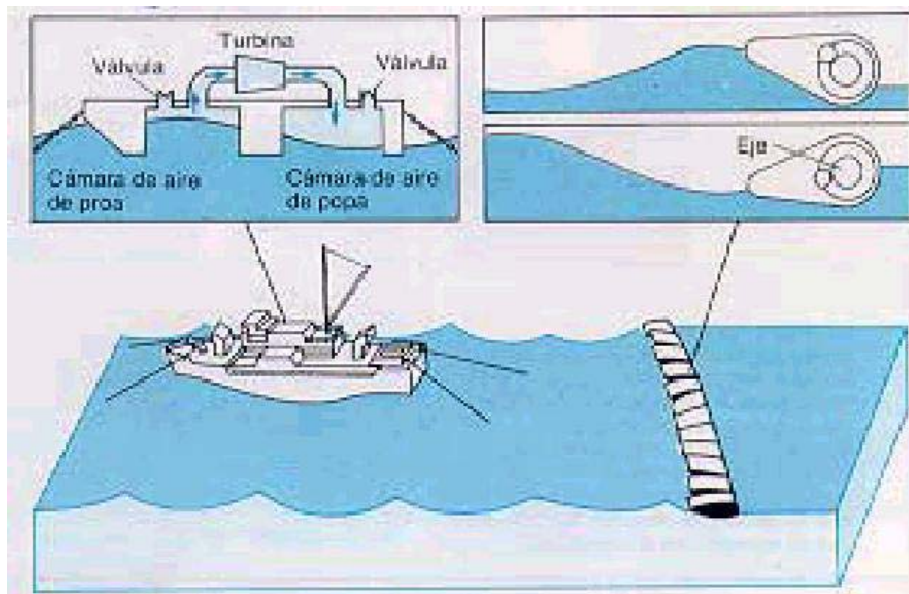


Figura 23. Salter Duck System

El sistema *Archimedes Wave Wing*, es basa en una estructura pressuritzada on la part superior és mòbil respecte la part inferior, i s'acciona per l'efecte de l'oscil·lació de la superfície lliure. Un generador lineal a l'interior és el que genera l'energia elèctrica (Figura 24). En l'actualitat hi ha una planta pilot a Portugal¹².

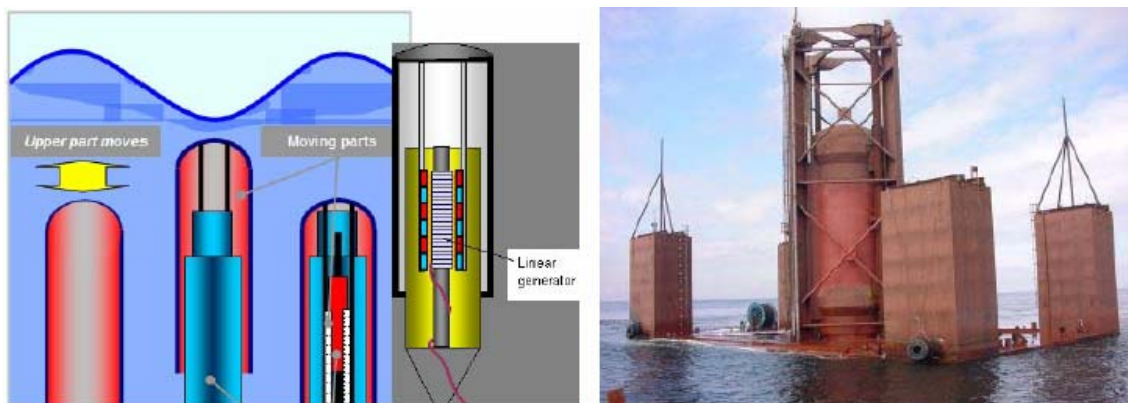


Figura 24. Sistema *Archimedes Wave Wing*

Un altra de les tecnologies instal·lades és el sistema *Wave Dragon* (Figura 25), que és un dispositiu que sura amb una alçada relativa per damunt del nivell del mar. Les onades van omplint una "banyera" central que en la part inferior hi té l'evacuació on s'instal·la una turbina o un sistema de turbines de baixa pressió, a les que s'acobra un generador d'imants permanents¹³.

¹² <http://www.waveswing.com/>

¹³ Hald, T., Friis-Madsen, E. & Kofoed, J.P. (2002): "Hydraulic Behaviour of the Floating Wave Energy Converter Wave Dragon". 10th IMAM Conference, Greece



Figura 25. Sistema Wave dragon

També hi ha tecnologia espanyola, com Ceflot¹⁴, que es basa en crear un “horitzó artificial” de tal forma que els elements de la perifèria es van movent segons el moviment de les onades (Figura 26).

La segona tecnologia espanyola destacada és la Boia Arlas Invest, que consisteix en una boia que segueix el moviment de les onades. Aquest moviment enrotlla i desenrotlla el cable de fixació sobre un mecanisme electro-mecànic (Figura 27).

La tecnologia espanyola amb més volada és PIPO Systems¹⁵, que es tracte d’una idea patentada recentment (2004), per l’empresa Pipo Systems, S.L. Per produir energia aprofita dos fenòmens de manera conjunta, el moviment vertical d’una boia combinat amb el sistema de columna d’aigua oscil·lant (Figura 28). El moviment relatiu entre la boia i tres cossos flotants situats al seu voltant, es transmet a la columna d’aire oscil·lant.

També existeix una patent catalana amb força volada en els últims temps, donat que ha aconseguit el recolzament del Ministerio de Educación y Ciencia (MEC) i del CIDEM. Es tracte de Hidroflot, S.L., que és membre del trampolí tecnològic de La Salle, i que prepara la construcció del primer prototipus de central d’onatge per a la seva instal·lació en aigües costaneres al nord de Espanya. Amb un pressupost de quasi 10 M€, a la inversió privada hi col·laboraran en el finançament els organismes públics anteriorment citats.

¹⁴ <http://www.ceflot.com/>

¹⁵ Pàgina de PIPO Systems

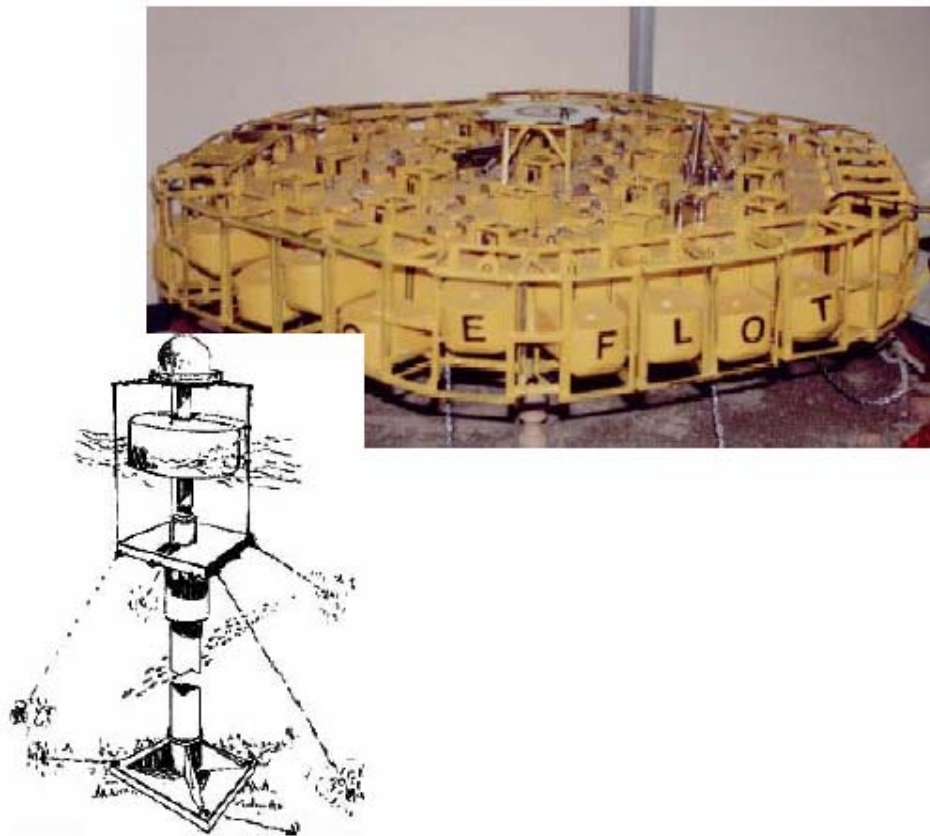


Figura 26. Tecnologia espanyola Ceflot

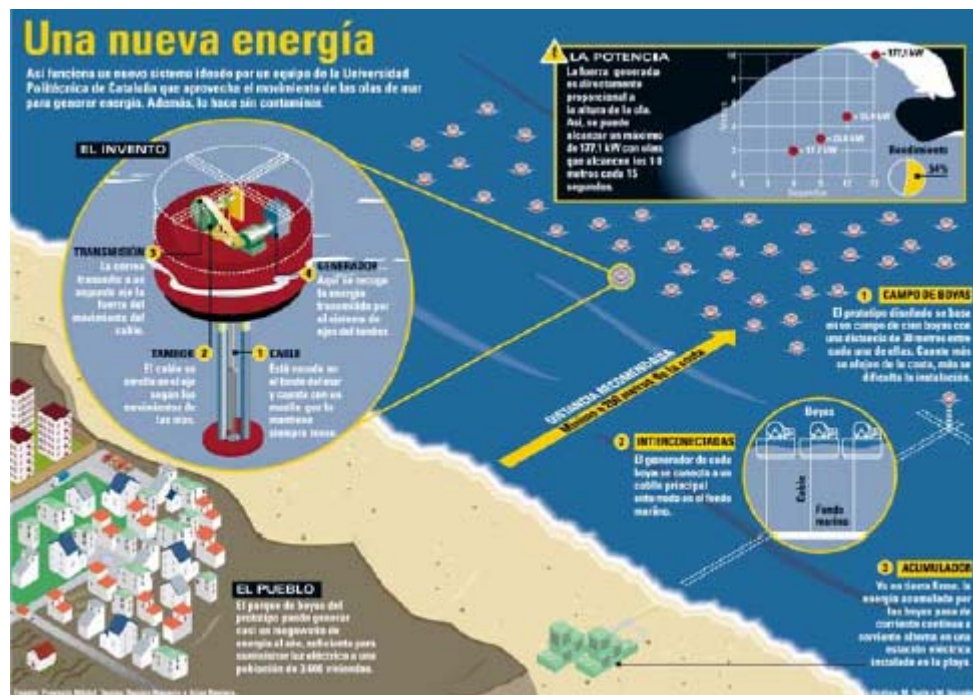


Figura 27. Tecnologia Boya Arlas Invest

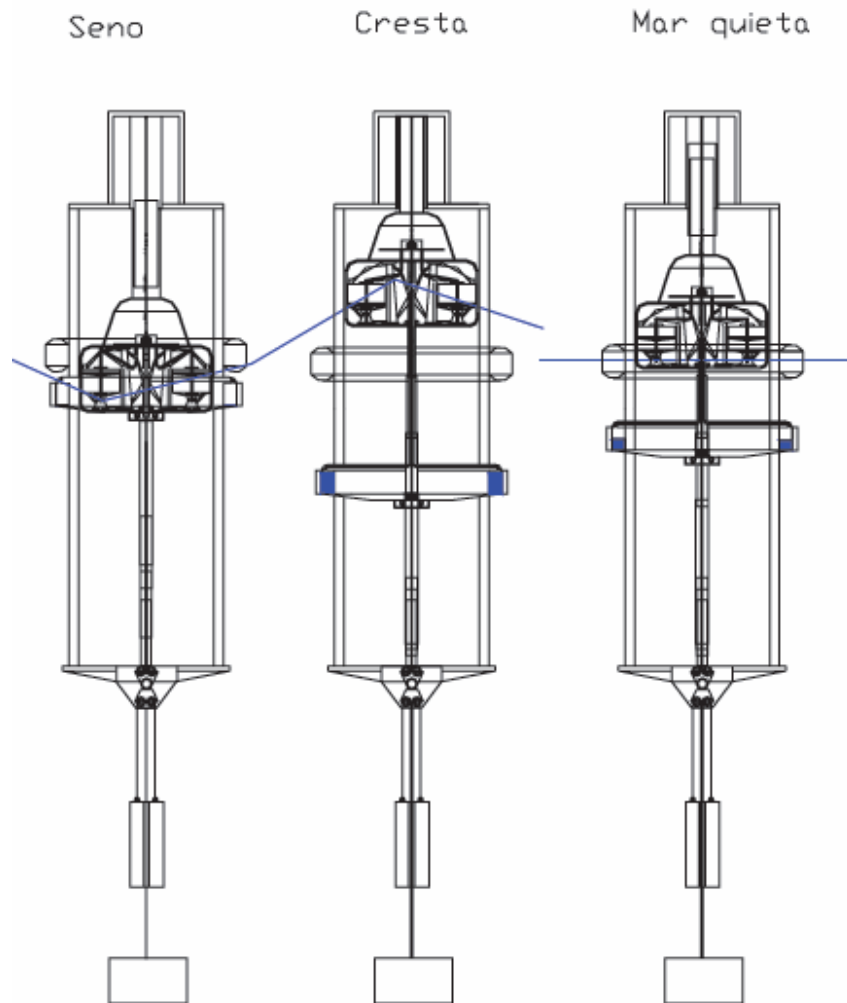


Figura 28. Esquema de la tecnologia PIPO Systems

El prototipus Hidroflot¹⁶ es basa en una plataforma flotant amb 16 captadors de més de 40 metres capaç de produir 6 MW (Figura 29). El rang de treball, s'espera que vagi des de 1,3 m de alçada d'ona fins als 6 metres, amb la capacitat de submergir-se automàticament per a protegir-se en cas de temporal.

De cara a l'explotació d'energia, el projecte es comercialitza en parcs de 50 MW composts per vuit plataformes flotants Hidroflot instal·lades offshore a dues milles nàutiques de distància a la costa, sobre fons de 50 a 100 metres de fondària. El mínim impacte visual i el respecte al medi ambient, fan d'aquest projecte de futur un aliat contra el canvi climàtic.

A pesar d'això, cap de tots aquests sistemes són vàlids per a la seva instal·lació a les costes catalanes, degut a que no poden aprofitar les onades més minses, que segons el règim mig ofereixen quasi el 83% del temps amb valors d'alçada d'ona inferior a 1 m.

¹⁶ <http://www.hidroflot.com/>



Figura 29. Tecnologia catalana Hidroflot

Les dues últimes tecnologies que es presenten, són les úniques tecnologies que donen un bri d'esperança per aprofitar l'energia de les onades al mediterrani, donat que són capaces d'aprofitar l'energia fins i tot amb valors d'alçada d'ona inferiors a 1 m.

La més destacada és Wave Star¹⁷, que és una tecnologia danesa molt avançada a nivell de prototipus i amb una gran projecció, donada la gran inversió que hi ha al darrera, i a una tecnologia robusta i amb un nivell d'eficiència dels més alts del mercat. Es tracta d'un sistema basat en unes plataformes on s'hi situaran 10, 20 o 40 flotadors articulats a la plataforma, i que transformen el moviment del braç del flotador en energia per mitjà d'un sistema hidràulic amb oli a pressió (Figura 30).

La plataforma compta amb un sistema de previsió del nivell de marea, per tal d'apujar-la o abaixar-la i així poder ser útil en mars amb fortes carreres de marea. A més en cas que sigui necessari s'apuja la plataforma al màxim i els flotadors fora de l'abast de les majors onades que es puguin produir en cas de temporal (Figura 31).

En l'actualitat, un prototipus a escala 1:2 es troba instal·lat davant de les costes daneses a Roshage des de l'any 2009 i s'hi està fent un fort seguiment per tal de saber els límits operatius i el rendiment del sistema. Segons les mesures obtingudes, el sistema Wave Star, és capaç de produir energia a partir de 0.5 m d'alçada d'ona amb un màxim rendiment entre 2 i 3 m, a partir d'on es recomana aturar la producció per evitar danys.

A la Figura 32, es mostra els nivells d'energia produïts durant el mes de setembre de 2012 així com els rendiments obtinguts. Com es pot veure la producció comença a partir d'onades de 0.5 m i els nivells d'eficiència s'apropen al 70 i 75%.

¹⁷ <http://www.wavestarenergy.com/>



Figura 30. Plataforma comercialitzada Wave Star C5



Figura 31. Flotadors apujats per protegir-se de temporals

Per últim es presenta una de les últimes tecnologies aparegudes, procedent de Turquia, el Yeti Cluster¹⁸, que a nivell de prototipus sembla una tecnologia capaç d'extreure energia fins i tot dels onatges més petits. El sistema consta d'un únic element flotant i robust, en el interior del qual s'instal·la un cos central, que a mode de contrapès, oscil·la independentment del element exterior, de tal manera que el moviment diferencial que s'hi genera és compensat per 4 o 6 pistons hidràulics amb oli a pressió (Figura 33). A dia d'avui es troba en fase de proves, però es tracta d'una tecnologia òptima per a les condicions del Mediterrani.

¹⁸ <http://www.yeticluster.com/>

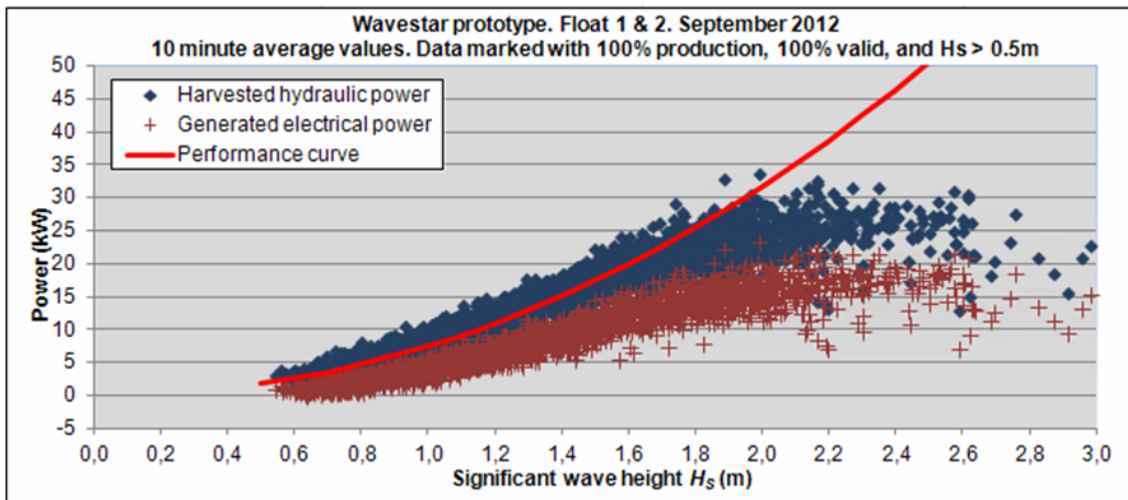


Figura 32. Mesures del rendiment del prototipus Wave Star durant el setembre de 2012

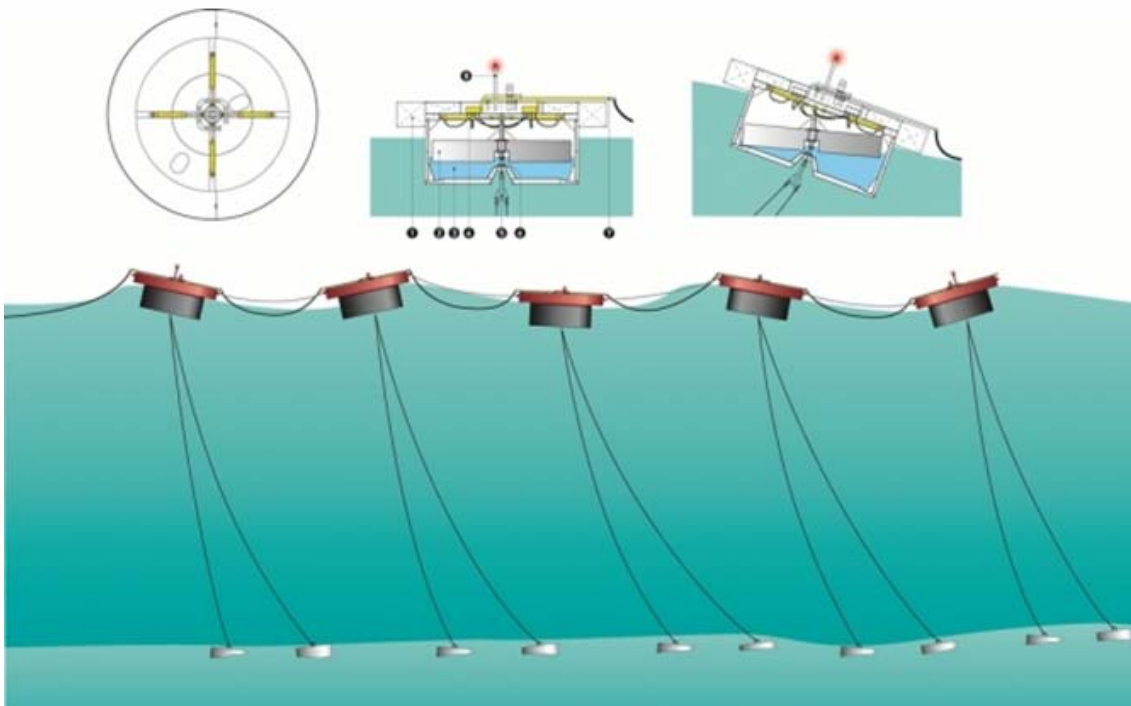


Figura 33. Esquema dels mòduls que componen el sistema Yeti Cluster

6.2. Tecnologies que aprofiten l'energia dels corrents marins

L'energia mitjançant els corrents no ha estat ben desenvolupada fins els últims anys, amb un nombre relativament petit de prototipus. Hi ha dues variants en la investigació d'aquestes turbines, incloent turbines que usen concentració i "convertidor de mareas" (*tidal fences*):

Turbines d'eix horitzontal: Similar al concepte de turbines d'eix horitzontal de generació eòlica.

Turbines d'eix vertical: El concepte d'instal·lació és col·locar un gran nombre de turbines d'eix vertical en un "convertidor de marea".

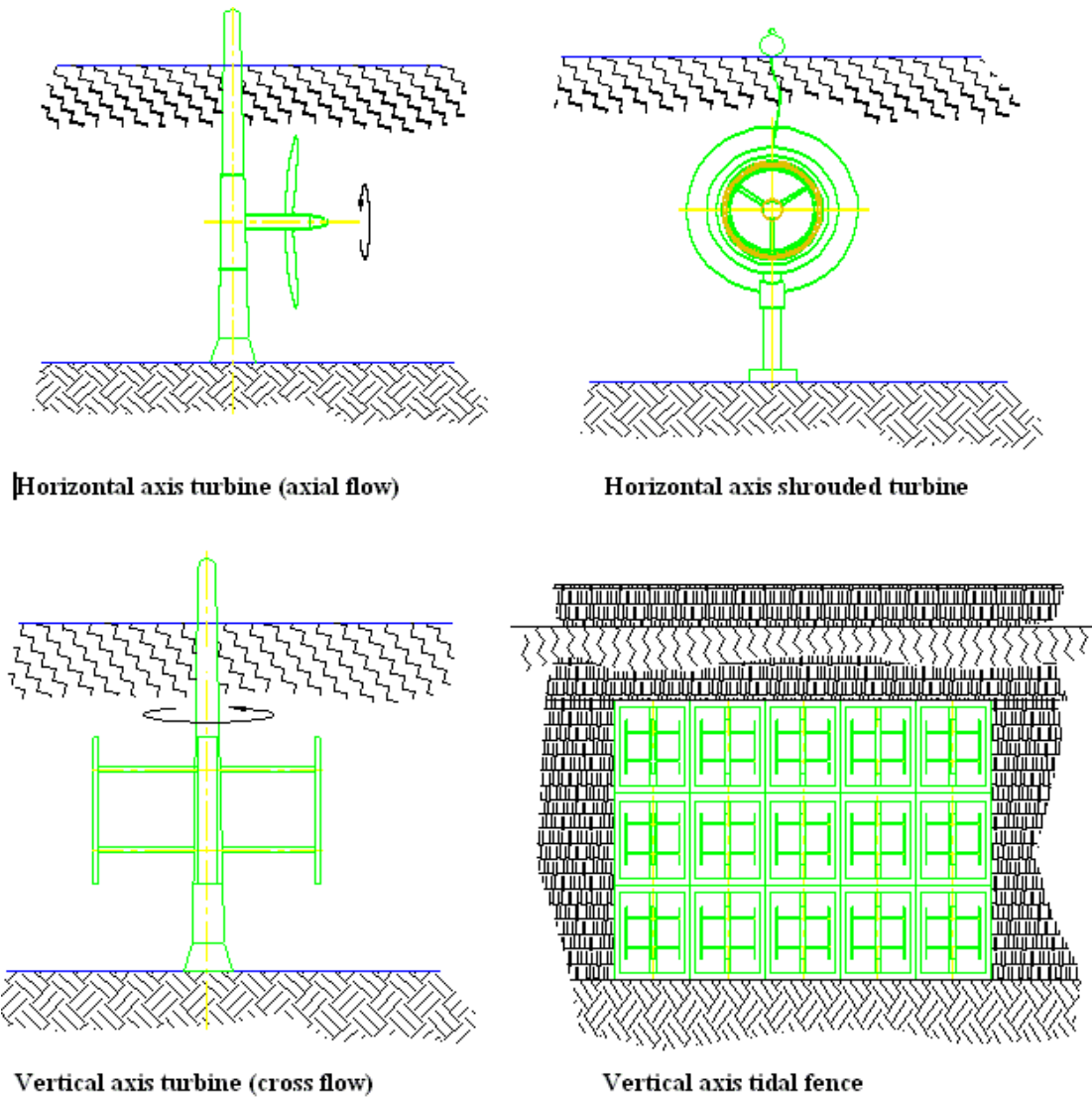


Figura 34. Turbines per a l'aprofitament dels corrents marins

Dins de les tecnologies destacades fora de les tipologies de la figura anterior, és el sistema Stingray, el qual està dissenyat per a extreure l'energia de l'aigua que flueix per efecte de la marea o dels corrents marins. El prototipus ha estat instal·lat a Yell Sound, Islàndia, l'estiu 2002 amb promesa de resultats i l'empresa EB planeja desplegar de nou altres proves remotes y de desenvolupament.

Stingray consisteix en un hidroplà que té el seu angle d'atac en relació amb la corrent que s'aproxima, que es pot variar per mitjà d'un mecanisme simple. Això fa que el braç de recolzament oscil·li, cosa que al seu torn obliga a un cilindre hidràulic a estirar-se i arronsar-se (Figura 35). Això produeix grans pressions d'oli, el qual es utilitza per a conduir un generador. Existeix un projecte per a ser instal·lat de 3MW.



Figura 35. Disseny Stingray

D'altra banda existeixen múltiples tecnologies que funcionen amb turbines, ja que són les que presenten majors eficiències (Figura 36). De tota manera totes elles, presenten una corba de potència que indica que tant sols són rendibles per corrents importants (superiors a 1 m/s, i amb bons rendiments amb intensitats que s'aproximin a 3m/s), pel què no són avui per avui, tecnologies que puguin ser utilitzades a la Mediterrània.

De totes elles, la tecnologia SeaGen (Figura 37) és la que més èxit està tenint, i ja ha instal·lat el primer sistema d'extacció amb bons rendiments a la costa nord d'Irlanda, on la configuració amb un pas estret dins d'una badia i fortes mareas és òptima per aquest tipus d'extracció.



Figura 36. Sistemes d'obtenció d'energia dels corrents marins

A pesar de que SeaGen, com les altres tecnologies, no és adequada per la poca intensitat dels corrents existents al Mediterrani, i un cop comprovat que la seva corba de rendiment mostra un valor òptim de fins a 1.200 kW per intensitats de 3 m/s i valors molt minsos per intensitats petites¹⁹, s'utilitzarà aquest sistema com a tecnologia prototipus per avaluar el potencial energètic dels corrents marins davant les costes de l'AMB, ja que per poder establir un valor del potencial és necessari de fixar l'àrea de les pales del rotor, i el coeficient d'eficiència de la tecnologia utilitzada.

¹⁹ SEAFLOW - *World's first pilot project for the exploitation of marine currents at a commercial scale*
"MCT's SeaGen Tidal Turbine" – Peter Fraenkel; Marine Current Turbines Ltd.

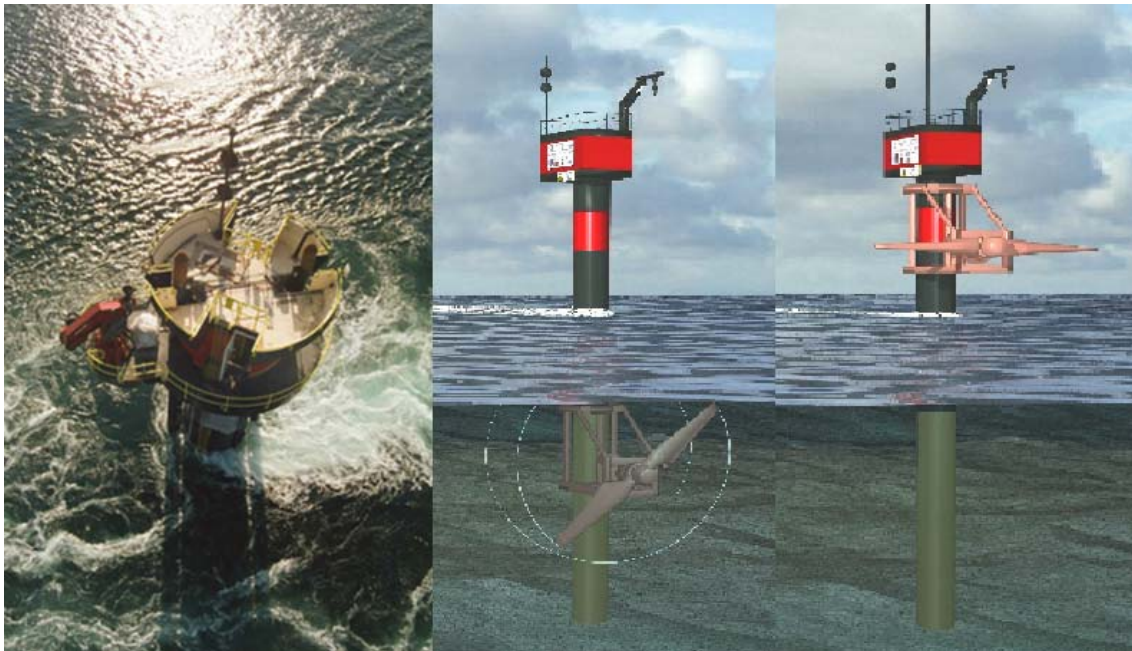


Figura 37. Tecnologia SeaGen i sistema instal·lat a Irlanda, on s'observen es forts corrents generats per les fortes carreres de marea de la zona

6.3. Tecnologies que aprofiten l'energia dels gradients tèrmics

Des de finals del segle XIX s'ha proposat diferents tècniques per aprofitar els recursos tèrmics oceànics per a la generació d'energia elèctrica. Del conjunt, actualment tan sols les alternatives de cicle tancat (CC-OTEC) i les de cicle obert (OC-OTEC) han demostrat tenir una base experimental i teòrica suficient:

- OC-OTEC: instal·lacions anomenades de “cicle obert” perquè utilitzen aigua de mar com a fluid de treball mitjançant un procés d'evaporació instantània, permetent obtenir aigua dessalada com a subproducte
- CC-OTEC: instal·lacions anomenades de “cicle tancat” perquè utilitzen un cicle termodinàmic amb un fluid de treball intermedi. Existeixen bàsicament tres propostes de cicles termodinàmics per a la seva utilització en instal·lacions de CC-OTEC, cadascun d'ells anomenat amb el nom del seu dissenyador:
 - Cicle de Rankine: utilitza fluids orgànics amb un punt d'ebullició menor al de l'aigua, raó per la qual sovint és anomenat Cicle de Rankine Orgànic (ORC)

- Cicle de Kalina: ideat l'any 1984, utilitza una barreja d'aigua i amoníac com a fluid de treball, amb una eficiència que teòricament es un 20% superior a l'assolida mitjançant el cicle de Rankine²⁰.
- Cicle d'Uehara: presentat com a alternativa l'any 1994 i també utilitza aigua i amoníac com a fluid de treball, amb una eficiència teòricament superior a l'assolida mitjançant el cicle de Kalina a l'incorporar un mecanisme d'extracció i absorció^{21,22}.

Tot i que l'inici teòric de la tecnologia OTEC data d'inicis del segle XIX, quan al 1881 el físic francès Jacques d'Arsonval va establir la base pel disseny d'una instal·lació CC-OTEC, el primer intent de construcció d'una planta OTEC plenament operativa no va succeir fins als anys 30 del segle XX, quan el seu deixeble Georges Claude va impulsar la construcció d'una instal·lació OC-OTEC terrestre a la badia de Matanzas a Cuba²³. Aquesta planta pilot va estar operativa durant un curt període de temps, essent destruïda durant una tempesta. Posteriorment, el 1956 investigadors francesos van dissenyar una instal·lació OC-OTEC de 3 MW a Abidjan (Costa de Marfil), però no es va acabar la seva construcció per falta de competitivitat enfront de l'energia hidroelèctrica local, de menor cost.

La següent fita va arribar el 1979 amb la construcció de l'anomenada "Mini-OTEC", la primera instal·lació flotant CC-OTEC (veure apartat 6.3.2) per part del *Natural Energy Laboratory of Hawaii Authority* (NELHA), que va permetre demostrar el concepte desenvolupat per d'Arsonval. Funcionava utilitzant amoníac com a fluid de treball, captava aigua a 4,4°C a una profunditat de 670 m mitjançant una canonada de polietilè, presentava una potència bruta de 50 kW, i va assolir una producció neta màxima de 18 kW abans de l'apagada prevista tres mesos després de la seva posada en marxa. Va ser considerada un èxit i encara avui en dia segueix essent l'única instal·lació flotant que ha estat capaç de produir energia neta. El 1981 també s'hi va construir la instal·lació OTEC-1, dissenyada més per a l'assaig de diferents alternatives tecnològiques que no pas per a la producció d'energia pròpiament dita.

Durant varis mesos entre 1982 i 1983, una instal·lació CC-OTEC terrestre en base a freó-22 va ser construïda per un consorci japonès (Toshiba i TEPCO) a l'illa de la República de Nauru (oceà Pacífic). Comptava amb una canonada de polietilè de 945 m que assolía una profunditat de 580 m i aportava aigua a 5-8°C, amb un diferencial tèrmic mig de 20°C respecte la superfície. La seva potència bruta era de 120 kW i va produir un màxim de 31,5 kW de potència neta estant connectada a la xarxa elèctrica.

²⁰ Kalina A. Generation of Energy. US Patent, 4489563 (1984)

²¹ Uehara, H. i col. (1994). Performance analysis of OTEC using new cycle with absorption and extraction process. Proceedings of the Oceanology International '94 Conference

²² Uehara, H.; Ikegami, Y. i Nishida, T. (1998). Performance analysis of OTEC system using a cycle with absorption and extraction processes. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, part B, vol. 64 (624): 384-389

²³ Claude G. (1930). Power from the Tropical Seas. Mechanical Engineering, Vol. 52, nº.12, 19: 1039-1044

També a Hawaii es va construir per part del NELHA una OC-OTEC el 1992, estant operativa entre 1993 i 1998 i derruïda el gener de 1999. Estava dissenyada per proporcionar una potència de 210 kW sota unes condicions de 26°C d'aigua superficial calenta i 6°C de l'aigua profunda i freda.

A més, aproximadament un 10% del vapor era redirigit a un condensador per a la producció d'aigua dessalada. Va estar operativa durant 6 anys i va assolir una producció màxima de 255 kW bruts i 103 kW nets i 0,4l/s d'aigua dessalada, essent la primera instal·lació OC-OTEC capaç de donar un rendiment energètic positiu.

El 1984 a l'Índia es va dissenyar en col·laboració amb la Saga University del Japó una instal·lació CC-OTEC basada en amoníac d'1 MW. La construcció d'aquesta instal·lació a bord d'una embarcació de 69 m d'eslora, anomenada Sagar Shakthi, va iniciar-se l'any 2000 per part del *National Institute of Ocean Technology* (NIOT) però no va poder ser completada degut a problemes en el desplegament de tota la longitud de la canonada de captació de l'aigua freda.

Posteriorment es va dur a terme un experiment de 10 dies a la mateixa embarcació enfront de Tuticorin el 2005, demostrant la dessalinització utilitzant gradients tèrmics en aigües menys profundes (400 m) i produint 100 m³/dia d'aigua dolça.

Desde principis del segle XXI, al Japó s'ha testejat una sèrie de plantes d'energia basades en OTEC (Kobayashi y col.²⁴), així com models de laboratori durant els darrers vint anys del segle XX. El 2006, el Institute of Ocean Energy de la Universitat de Saga va construir un prototipus OTEC híbrid de 30 kW que utilitza un fluid mixt d'aigua i amoníac i actualment encara genera electricitat.

Actualment existeix un acord per a la construcció a escala comercial d'una instal·lació de 10 MW a les Bahames per part de l'empresa Ocean Thermal Energy Corporation, així com una altra instal·lació també de 10 MW a l'illa de Martinica per part de l'empresa francesa DCNS; altres empreses nord-americanes com Lockheed Martin (Hawaii 10MW ampliables a 100MW) o Makai Ocean Engineering també estan projectant sobre el paper instal·lacions de potència similar.

En aquest darrer país al 2006 es va aprovar el desenvolupament d'una instal·lació OTEC a la República de les Illes Marshall, concretament a l'illa Kwajalein, per produir fins a 7 MWh/any i com a conseqüència permetre estalviar fins a un 38% del consum de dièsel de l'illa; un projecte similar existeix per a l'illa de Diego Garcia a l'Índic, amb una instal·lació de 13 MW per a l'estalvi de combustible fòssil i la producció de gairebé 5.700 m³ d'aigua potable al dia.

²⁴ Kobayashi, H.; Jitsuhara, S. y Uehara H. The Present Status and Features of OTEC and Recent Aspects of OTEC. No publicat: www.nmri.go.jp/main/cooperation/ujnr/24ujnr_paper_jpn/Kobayashi.pdf

Finalment, també s'ha proposat un sistema OTEC que utilitzi no només l'energia tèrmica de l'oceà com a font de calor, sinó també l'energia solar tèrmica mitjançant la incorporació de col·lectors solars en un cicle que ha rebut el nom de SOTEC^{25,26}.

La seva eficiència tèrmica podria ser fins a 1,5 vegades superior a les obtingudes en sistemes basats en CC-OTEC segons les simulacions efectuades sota condicions del Japó, i estant òbviament subjecte a variacions climàtiques. També s'han proposat projectes de caire més futurista com les plataformes flotants anomenades "Hexagonal Energy Island", que ajunten diferents fonts energètiques (OTEC, aerogeneradors, aprofitament de corrents marines, ones i energia solar).

6.3.1. Cicle obert

En els sistemes de cicle obert s'utilitza l'aigua calenta de la superfície del mar com a fluid de treball per a accionar una turbina.

L'aigua calenta captada en superfície es vaporitza parcialment en un evaporador en el que prèviament s'ha extret l'aire amb una bomba de buit. Això és possible donat que al reduir-se la pressió a l'evaporador per extracció de l'aire, també es redueix la temperatura d'ebullició de l'aigua, pel que aquesta bull a la temperatura a la que es troba a la superfície del mar. Cal tenir en compte que l'aigua s'evapora per efecte de la baixa pressió, pel que el vapor produït també és de baixa pressió. Així a l'evaporador s'obté una barreja de vapor i aigua líquida a la pressió de saturació corresponent a la temperatura de l'aigua. Aleshores el vapor separat de l'aigua líquida passa a través d'una turbina d'expansió, accionant-la, i posteriorment es dirigeix a un condensador.

El condensador utilitza l'aigua freda del mar, captada a grans profunditats, com a fluid refrigerant i converteix altre cop en aigua líquida el vapor utilitzat. Això tant pot fer-se per un condensador de contacte directe, que al no tenir una paret sòlida interposada proporciona una condensació més efectiva, o bé amb contacte indirecte (Figura 38), fet que permet obtenir aigua dessalada que pot ser igualment retornada al mar o bé ser aprofitada com a subproducte.

Durant aquest procés dut a terme a l'evaporador els gasos dissolts a l'aigua, principalment nitrogen, oxigen i diòxid de carboni, són alliberats quan s'assoleixen baixes pressions de l'ordre d'un 2% de la pressió atmosfèrica (1 atm).

²⁵ Yamada, N.; Hoshi, A. i Ikegami, Y. (2006). Thermal efficiency enhancement of Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) using solar thermal energy. 4th International Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit (IECEC). San Diego, California

²⁶ Yamada, N.; Hoshi, A. i Ikegami, Y. (2009). Performance simulation of solar-boosted ocean thermal energy conversion plant. *Renewable Energy*, 34: 1752-1758

Aquests gasos no condensables s'han d'anar evacuant de forma continuada per prevenir la seva acumulació i mantenir així les baixes pressions de treball que requereix el sistema, ja que si no són retirats des de la cambra de buit poden interferir en la condensació per un efecte de recobriment sobre les superfícies del condensador; de fet poden acumular-se fins a nivells que aturin l'evaporació. Un compressor pot retirar aquests gasos no condensables.

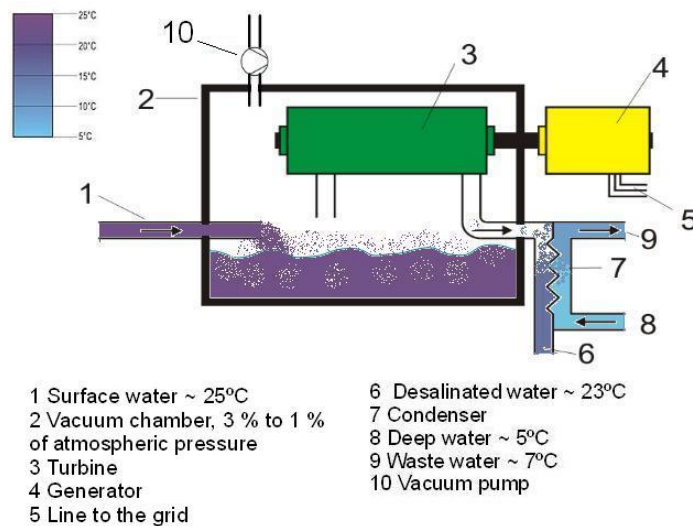


Figura 38. Model esquemàtic del funcionament d'una instal·lació OC-OTEC

6.3.2. Cicle tancat

Aquesta alternativa va ser la proposada inicialment per d'Arsonval el 1881. En aquest sistema, l'aigua calenta superficial i l'aigua freda profunda es fan circular a través d'intercanviadors de calor per evaporar i condensar, respectivament, un fluid de treball diferent a l'aigua marina.

En aquest cas s'utilitza un fluid amb un punt d'ebullició baix, habitualment propà, freó o amoníac, que mobilitza un generador de turbina en un recorregut de flux tancat, generant així electricitat. Els sistemes de cicle tancat presenten l'avantatge, respecte als sistemes de cicle obert, de necessitar turbines més petites; això és degut a què la pressió i el volum específic del fluid de treball són superiors.

Si bé les instal·lacions de CC-OTEC són més complexes, són significativament més eficients, obtenint un millor rendiment gràcies a la millor eficiència del fluid de treball. El disseny bàsic d'aquesta tipologia d'instal·lacions és l'anomenat cicle de Rankine (Figura 39), ideat per l'escocès William Rankine a mitjans del segle XIX. Aquest utilitza un fluid de treball pur, si bé hi ha alternatives, com el cicle Kalina o el cicle Uehara.

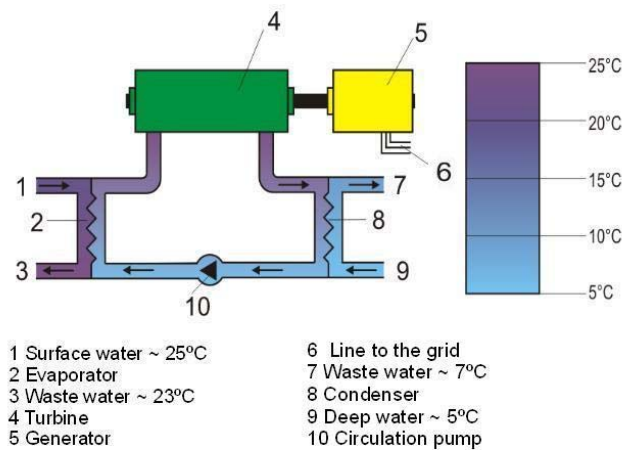


Figura 39. Model esquemàtic del funcionament d'una instal·lació CC-OTEC

L'any 1984 es va proposar un nou cicle amb el nom del seu dissenyador (el físic rus Alexander Kalina), el que es coneix com a cicle Kalina (Figura 40) i que utilitza com a fluid de treball una barreja d'aigua i amoníac per incrementar l'eficiència tèrmica. Requereix la incorporació al sistema d'un separador i d'un regenerador i es caracteritza principalment perquè la composició relativa aigua-amoníac del fluid de treball varia al llarg del cicle. Per sistemes OTEC incrementa l'eficiència tèrmica teòrica, si bé a l'utilitzar un fluid binari (aigua – amoníac) es redueix l'eficiència de l'evaporador i del condensador respecte del cicle Rankine. D'altra banda però, en comparació al cicle de Rankine l'aigua extreta de les profunditats marines per condensar la barreja d'amoniac i aigua no és necessari que sigui tant freda, fet que es veu reflexat en una canonada menys profunda i per tant amb menors costos operatius.

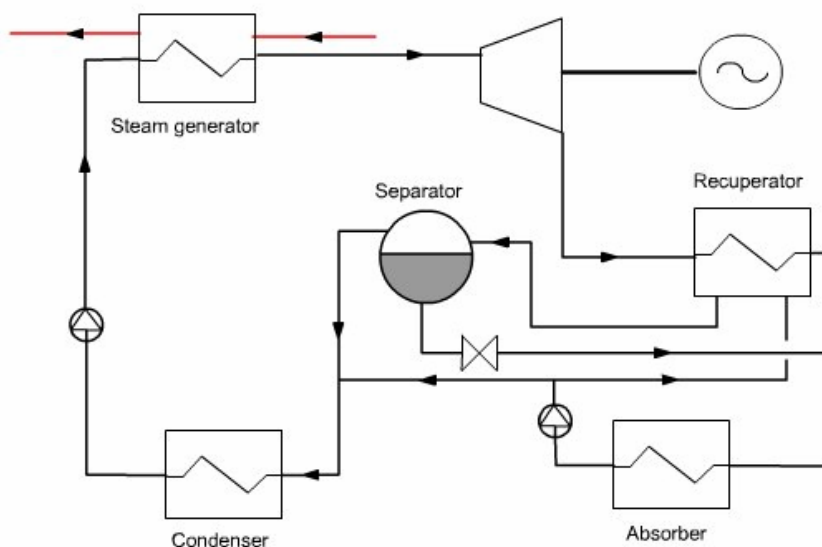


Figura 40. Diagrama esquemàtic del cicle de Kalina (Font: www.thermoptim.org)

Un cicle més avançat i complex va ser inventat el 1994 pel japonès Haruo Uehara. Es coneix com a cicle Uehara (Figura 41) i també assegura eficiències teòriques majors a les del cicle Rankine, utilitzant una barreja d'aigua i amoníac com a fluid de treball i extraient part del vapor de la turbina per reduir la càrrega de treball del condensador, essent la resta de l'operativa similar a la del cicle Kalina. Pel fet de ser el cicle més complex, seguidament es descriu amb més detall el seu funcionament.

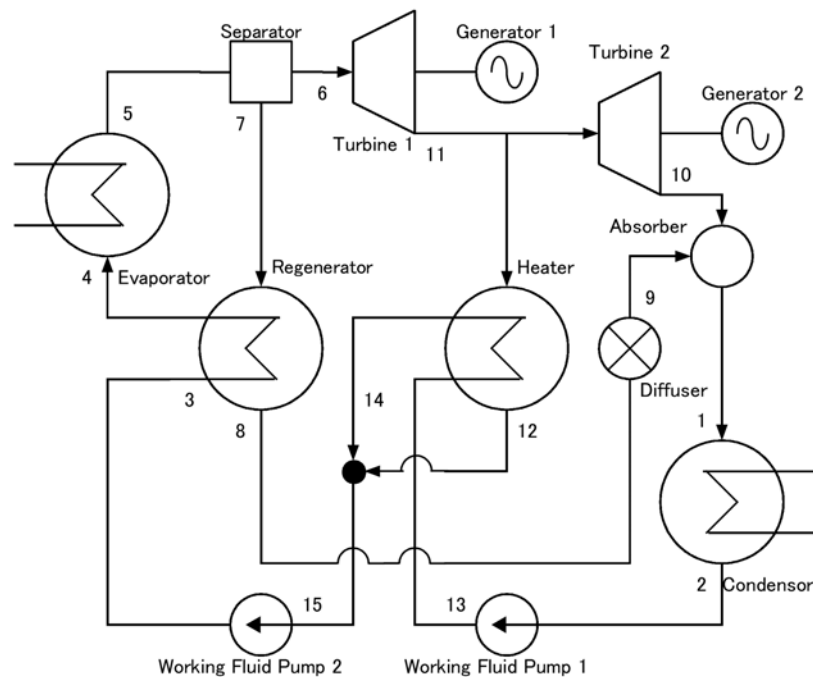


Figura 41. Diagrama esquemàtic del cicle d'Uehara (Noda²⁷)

Segons es pot observar a la Figura 41, el cicle Uehara bàsic consisteix en dues turbines, dues bombes, un evaporador, un condensador, un regenerador, un escalfador, un difusor, un separador i un absorbidor.

El fluid de treball s'escalfa per mitjà de l'evaporador, i tot seguit es separa en vapor saturat i líquid saturat mitjançant el separador, seguint a partir d'aquest punt camins separats.

El vapor saturat s'envia a la primera turbina (alta pressió) i a la seva sortida, part del vapor és extret i enviat en recirculació a l'escalfador. El vapor restant és remès al absorbidor, després que s'hagi utilitzat a la segona turbina (baixa pressió).

²⁷ Magesh, R. (2010). OTEC Technology – A World of Clean Energy and Water. Proceedings of the World Congress on Engineering (WCE). London, U.K.

La part de vapor extreta del sistema de turbines es recircula a mitja pressió i es refreda per intercanvi amb el fluid de treball, amb el que posteriorment s'uneix per formar el fluid de treball bàsic, circulant a partir d'aleshores a baixa pressió.

La major part del vapor que surt de la primera turbina és enviat a la segona turbina, i després enviat a l'absorbidor on es barreja amb la fracció líquida, que provenia del separador i que havia estat inicialment refredada al regenerador per intercanvi amb el fluid de treball que prové de la bomba 2.

D'altra banda, el líquid saturat que provenia del separador disposa d'una temperatura elevada dins del rang propi del cicle, i per tant és enviat al regenerador on és refredat pel fluid de treball, o dit d'altra manera, al regenerador s'aprofita el calor residual d'aquest líquid saturat per escalfar el fluid de treball abans de dirigir-lo a l'evaporador, on s'inicia el cicle. El líquid refredat al regenerador segueix el seu camí en direcció al difusor i un cop passat aquest absorbeix el vapor provinent de la segona turbina, i és enviat al condensador, on es refreda fins a la mínima temperatura del cicle. Aquest líquid és enviat mitjançant la primera bomba cap a l'escalfador, on s'escalfa per efecte del vapor extret de la primera turbina, i posteriorment mitjançant una segona bomba és reenviat al regenerador per repetir de nou tot el cicle.

6.4. Tecnologies que aprofiten l'energia dels gradients salins

L'aprofitament dels gradients de salinitat és encara, avui en dia, un concepte en desenvolupament, tot i que les millores en altres tecnologies íntimament relacionades, com la dessalinització, ha beneficiat i seguirà beneficiant els avenços d'aquests sistemes de generació d'energia. Durant les últimes dècades s'ha identificat com a mínim dos mecanismes per a la conversió d'aquesta energia en electricitat (Figura 42), són els següents:

- Osmosi per pressió retardada (OPR): concepte desenvolupat per Sidney Loeb l'any 1973 que consisteix en què un volum d'aigua de baixa salinitat passa a través d'una membrana cap a una solució pressuritzada d'elevada salinitat en circulació constant, la despressurització de la qual genera energia mitjançant una hidroturbina
- Electrodiàlisi reversible (EDR): es basa en la diferència de potencial químic entre dues solucions (aigua dolça i aigua salada), que és la força motriu del procés. Les diferències de potencial químic generen un voltatge que amb l'ús de membranes per electrodiàlisi es converteix en corrent elèctric

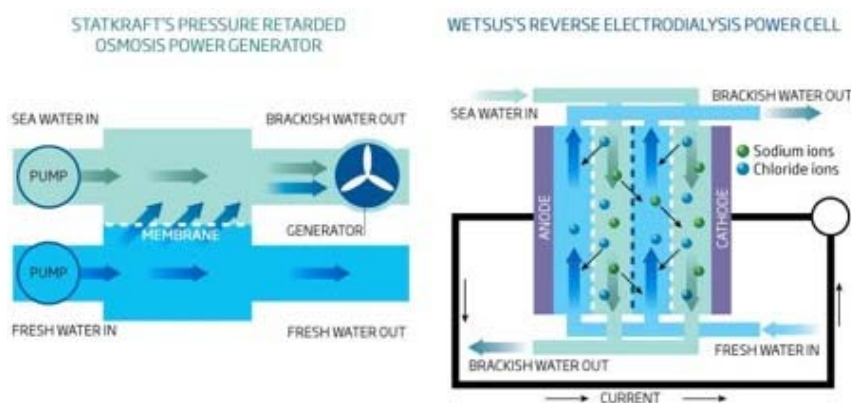


Figura 42. Esquema bàsic del funcionament de l'OPR i l'EDR

La investigació en el mecanisme de l'osmosi per pressió retardada o OPR s'està duent a terme principalment a Noruega, on l'empresa pública noruega Statkraft treballa amb el desenvolupament d'aquest tipus d'aprofitament energètic des de l'any 1997 amb l'objectiu de fer-ne l'aprofitament viable. La primera instal·lació a nivell mundial va ser posada en marxa el novembre del 2009 a Tofte, a les afores d'Oslo. Aquesta instal·lació té una capacitat de producció limitada, dissenyada per 10kW però operà inicialment a 2-4 kW, i està concebuda principalment amb la finalitat de dur-hi a terme assajos que permetin el desenvolupament de la tecnologia. L'objectiu final és la construcció d'una instal·lació comercialment viable en uns pocs anys.

D'altra banda, fins a l'actualitat només s'ha experimentat amb l'electrodiàlisi reversible o EDR a una escala molt petita a Holanda, per part de Westus (Willemse²⁸ dona una visió global sobre el procés que ha seguit el desenvolupament d'aquesta tecnologia al país, amb un retrat acurat sobre els diferents agents que hi han participat). Més recentment s'ha proposat la construcció d'una instal·lació en un dic de 75 anys d'antiguitat anomenat Afsluitdijk, fet que podria convertir Holanda en país pioner en la implementació de la tecnologia EDR.

L'Afsluitdijk (Figura 43) és un dic que connecta el nord d'Holanda Septentrional amb la província de Frísia, als Països Baixos, i que va ser construït per embassar el mar interior Zuiderzee, separant-lo del Mar de Wadden i creant així el llac d'aigua dolça que rep el nom d'IJsselmeer, on desemboca el riu IJssel. Té una longitud de 32km i una amplada de 90m, amb una alçada original de 7,25m sobre el nivell del mar, i hi passa una autopista de dos carrils per banda. Als dos extrems té complexos de rescloses, que permeten tant el pas de vaixells com l'evacuació periòdica de l'aigua que contínuament aporten l'IJssel i altres rius, el que el converteix en una localització ideal per a la instal·lació d'una planta basada en EDR.

²⁸ Willemse, R. (2007). Blue energy (salinity power) in the Netherlands. Technical report by Energy research Centre of the Netherlands (ECN-E--07-058)

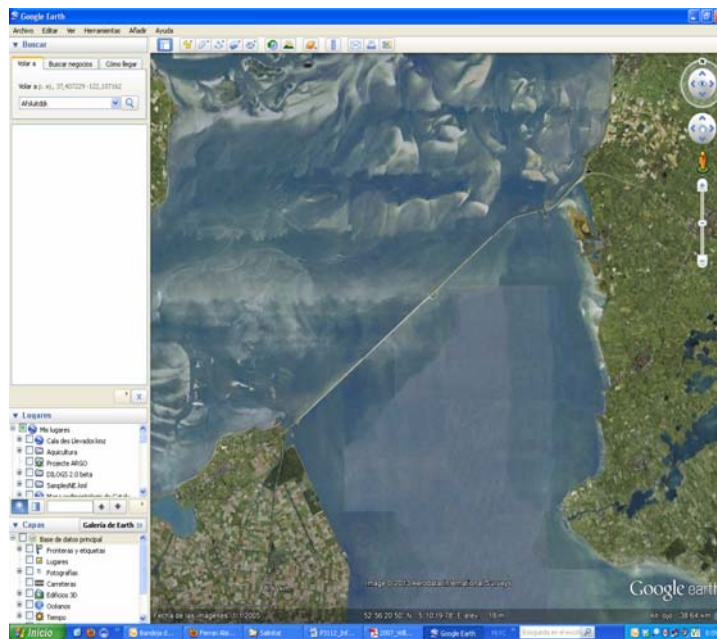


Figura 43. Imatge de satèl·lit del Afsluitdijk (Font: Google Earth)

Actualment està prevista la construcció d'una planta de baixa capacitat (es parla d'uns 50 kW), que en cas de demostrar-se viable es podria ampliar de forma gradual. L'objectiu final és la construcció d'una instal·lació amb una capacitat estimada de 200 MW (Figura 44), el que representaria el consum d'unes 500.000 llars.



Figura 44. Possible aspecte de la instal·lació d'EDR a construir al Afsluitdijk²⁹

²⁹ Font: Rijkswaterstaat

Per acabar, cal dir que existeix una altra tecnologia, el generador hidrocràtic, ideat per l'empresa Walder LLC (Figura 45); el seu funcionament no es detalla més en els següents apartats. Es tracta d'un sistema capaç d'extraure energia dels gradients de salinitat sense l'ús de membranes. El generador consta d'un tub instal·lat en el fons del mar perforat al llarg de la seva estructura per permetre l'entrada d'aigua de mar. Una turbina està instal·lada verticalment a l'interior del tub i connectada a un generador sota la canonada. L'aigua dolça és injectada a la part inferior del tub, i la barreja resultant d'aigua dolça i salada té com a conseqüència un flux ascendent d'aigua salobre més gran que la injecció inicial d'aigua dolça, flux que fa girar la turbina i així genera energia.

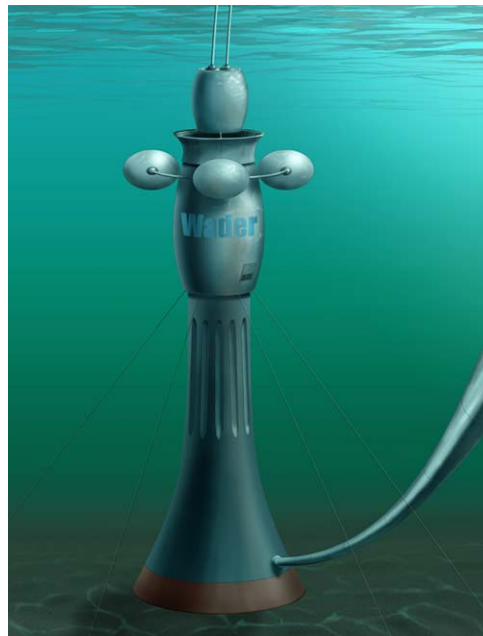


Figura 45. Aspecte del generador hidrocràtic (Font: Walder LLC)

Actualment existeixen dissenys que impliquen la utilització d'efluents d'aigua dolça utilitzada com a element refrigerant en instal·lacions de generació d'energia (Figura 46) així com d'aigües residuals (Figura 47). Ja s'han dut a terme tests bàsics d'injecció d'un flux d'aigua dolça a través del dispositiu en medi marí.

6.4.1. Osmosis per pressió retardada (OPR)

En l'osmosi per pressió retardada o OPR, dues masses d'aigua, una dolça i una salada, es troben separades a banda i banda d'una membrana que deixa circular l'aigua però no les sals.

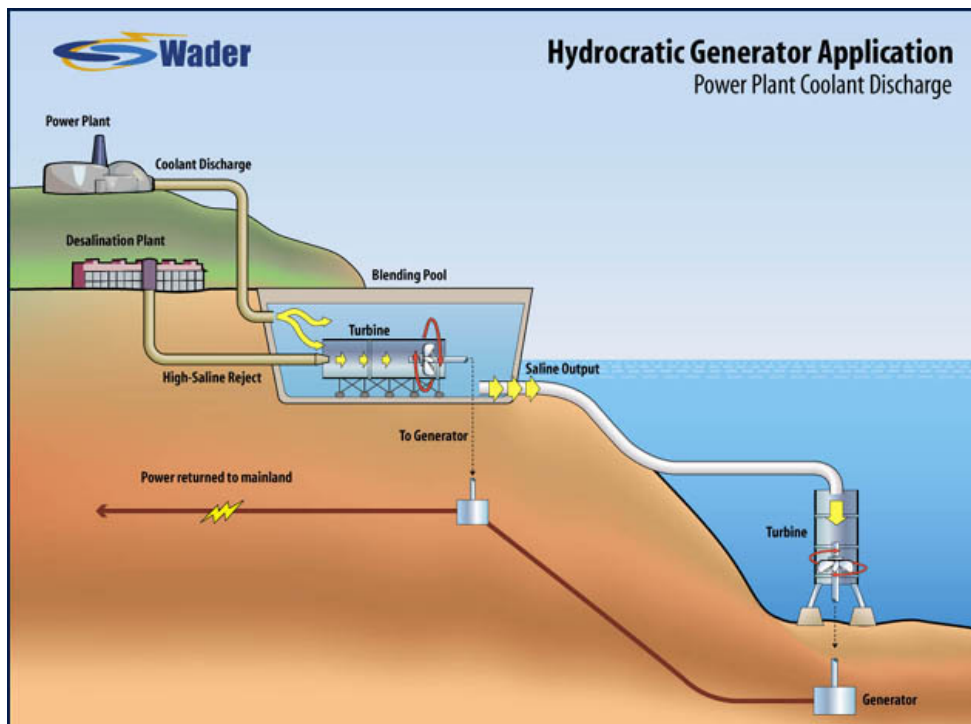


Figura 46. Mecanisme de l'aprofitament de la descàrrega d'aigua utilitzada com a refrigerant en un generador hidrocràtic (Font: Walder LLC)

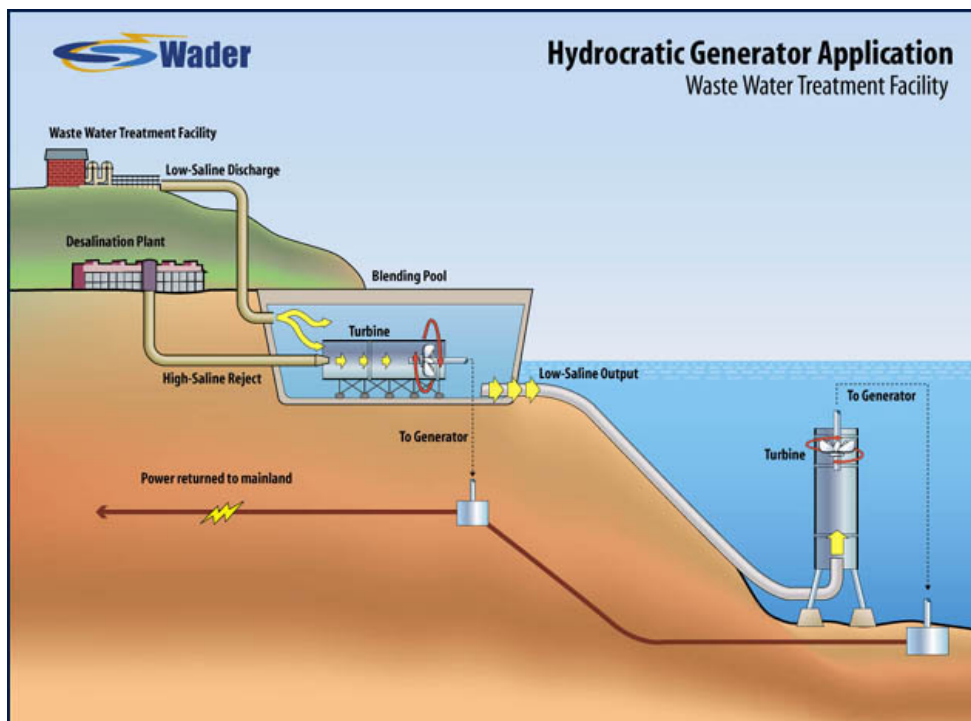


Figura 47. Mecanisme de l'aprofitament d'aigües residuals en un generador hidrocràtic (Font: Walder LLC)

Abans d'entrar als mòduls on es troben les membranes, l'aigua salada es pressuritza a aproximadament a la meitat de la pressió osmòtica existent. Un cop en el mòdul, existeix un flux d'aigua dolça que migra a través de la membrana cap a l'aigua de mar pressuritzada, fet que resulta en un excés d'aigua salada (diluïda i pressuritzada) que es subdivideix en dos efluent; aproximadament un terç serà descarregat a través d'una hidroturbina per a la generació d'energia, mentre que la resta s'envia a l'intercanviador de pressió amb la finalitat de pressuritzar l'aigua salada entrant. L'efluent de la planta serà majoritàriament aigua de mar diluïda que serà podrà ser abocada a la boca del riu o al mar, en funció principalment dels possibles impactes ambientals.

La producció d'electricitat mitjançant aquesta tècnica pot ser considerada constant els 365 dies de l'any. Les membranes estan constituïdes per compostos polimèrics i el desenvolupament de la tecnologia es mesura en termes de watts produïts per metre quadrat de membrana polimèrica. Així, la primera central elèctrica que utilitzà aquesta tecnologia aconseguí assolir valors de 1 W/m^2 , si bé ja s'han desenvolupat membranes amb densitats de 3 W/m^2 o superiors, fet que representa un avenç substancial donat que cap a 1999 les eficiències eren de l'ordre de $0,1 \text{ W/m}^2$. L'empresa noruega pública Statkraft s'ha marcat com a objectiu la consecució de membranes amb una producció de $4\text{-}6 \text{ W/m}^2$ i una vida mitja de les membranes de 7-10 anys.

Apart de les millores en l'eficiència de les membranes, la millora del procés també depèn de les millores a efectuar a l'intercanviador de pressió.

6.4.2. Electrodiàlisi reversible (EDR)

L'electrodiàlisi reversible utilitza la diferència de potencial químic entre dues solucions amb diferent salinitat per generar un voltatge que mitjançant membranes d'electrodiàlisi produeix corrent elèctrica. D'aquesta forma, no és l'aigua la que creua la membrana com succeïa amb l'OPR, de fet les membranes són impermeables, sinó els ions clor i sodi. Aquesta configuració requereix dos tipus de membrana, una per a cada tipus d'ió, el que fa el procés més complicat. D'altra banda però, presenta l'avantatge, enfront l'osmosi, de treballar a pressions més baixes i que el transport d'ions és el que crea la corrent, és a dir, que es genera energia elèctrica directa enlloc d'energia de pressió, pel que no es requereix d'una turbina per a generar l'electricitat, tot i que aquesta sigui en forma de corrent continu.

Com es pot veure a la Figura 48, el dispositiu es disposa en una sèrie apilada de membranes, la meitat de les quals són permeables a l'ió sodi i l'altre meitat a l'ió clor, amb l'aigua marina i l'aigua dolça fluint alternativament entre cada parell de membranes. Les membranes controlen la difusió dels ions a l'aigua, causant l'oxidació i reducció de l'ànode i el càtode generant energia.

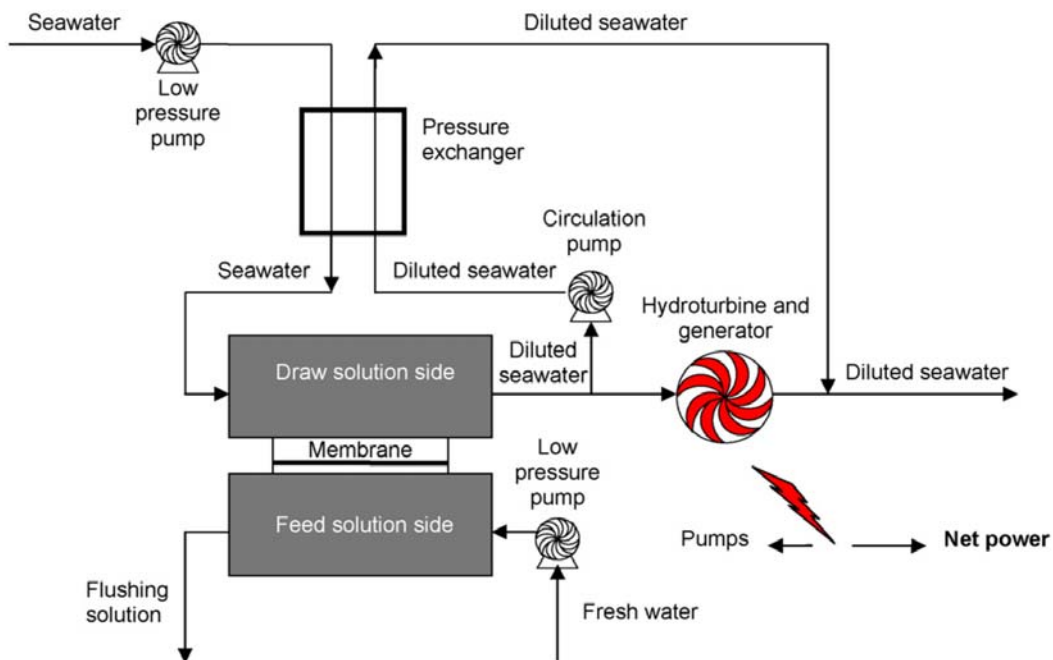


Figura 48. Representació esquemàtica d'una planta de generació d'energia a partir de OPR (Achilli i col., 2009)

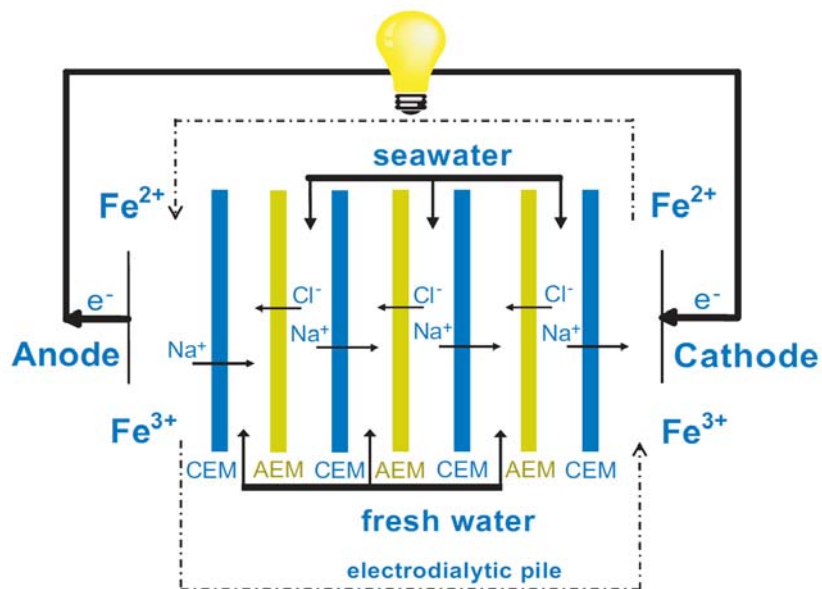


Figura 49. Representació esquemàtica del mecanisme bàsic de generació d'electricitat en una planta d'EDR (Font: Wetsus)

7. VALORACIÓ GENERAL DE L'APROFITAMENT ENERGÈTIC

7.1. Valoració general sobre el potencial energètic

En aquest apartat es realitzarà la valoració del potencial energètic dels diferents recursos del mediterrani davant la costa de l'AMB, segons les diferents metodologies exposades en els apartats 3.3 (onatge), 4.4 (corrents), 5.2 (gradients tèrmics) i 5.3 (gradients de salinitat).

7.1.1. Onatge

D'acord amb la metodologia definida en els apartats de l'onatge es procedirà a calcular el valor del potencial energètic enfront de la costa de l'AMB. Tal i com es comentava en l'apartat 3.3, el potencial energètic del medi natural depèn dels valors locals de l'onatge, en concret de l'alçada d'ona (valor quadràtic) i del període.

Donat un registre històric de dades, com és el cas de les dades de la boia de Barcelona, es defineix el valor del potencial energètic del medi natural en aquell punt, calculant el valor instantani de la potència estimada per a cada estat de mar, i s'hi calcula la suma de tots els estats de mar per fer-ne una mitja ponderada.

Aquests càlculs ofereixen un valor del Potencial Energètic a la ubicació de la boia costanera de Barcelona de 4.73 kW/m (potència per metre lineal del front d'ona). Per a tenir altres valors de referència, es resumeix a la Taula 9, alguns valors obtinguts al llarg de la costa espanyola, a partir dels càlculs pels registres històrics de dades d'altres boies.

Localització	Potència, kW/m
Barcelona	4.73
Tortosa	6.00
Palamós	5.56
Gijón	27.52
A Coruña	87.13

Taula 9. Valors de referència de la potència del medi natural en diferents zones

Tal i com mostren aquests resultats, es denota clarament el reduït potencial del mar mediterrani, i les costes catalanes en concret, sobretot si es compara amb els valors del nord de la península, fruit del règim oceànic d'aquelles zones enfront del règim d'un mar tancat com la Mediterrània. Val a dir, que els valors obtinguts a A Coruña, que corresponen a la boia de Punta Langosteira, representen un dels potencials més alts de tot el món.

De cara a definir un mapa del potencial energètic de tota la zona d'interès, el què es farà serà definir una sèrie de punts al llarg de tota l'àrea analitzada, a on per mitjà dels resultats de les propagacions, s'obtéindrà la transformació del registre de la boia a cadascun d'aquests punts, de tal manera que quedi definit un registre històric local en cada punt.

A partir d'aquí, es procedirà a calcular el valor del potencial en cada punt de la mateixa manera que s'ha fet a la boia, i amb això es podrà definir el mapa del potencial energètic. Lògicament, s'espera que a mesura que ens allunyem de la costa, els valors siguin més alts, donat a què les alçades d'ona són més grans en alta mar que prop de la costa (fenomen conegut com a assomerament, pèrdua de l'energia de les onades, i per tant de l'alçada d'ona, en acostar-se a la costa, per efecte de la fricció amb el fons marí).

A la Figura 50, es mostra tots els punts en els què s'ha obtingut un règim local de l'onatge i a on s'ha procedit a calcular el potencial energètic, distribuïts en diferents fondàries, amb major densitat prop de la costa, ja que els valors són més constants a alta mar que prop de la costa, on els calats reduïts fan que la distribució sigui molt irregular.

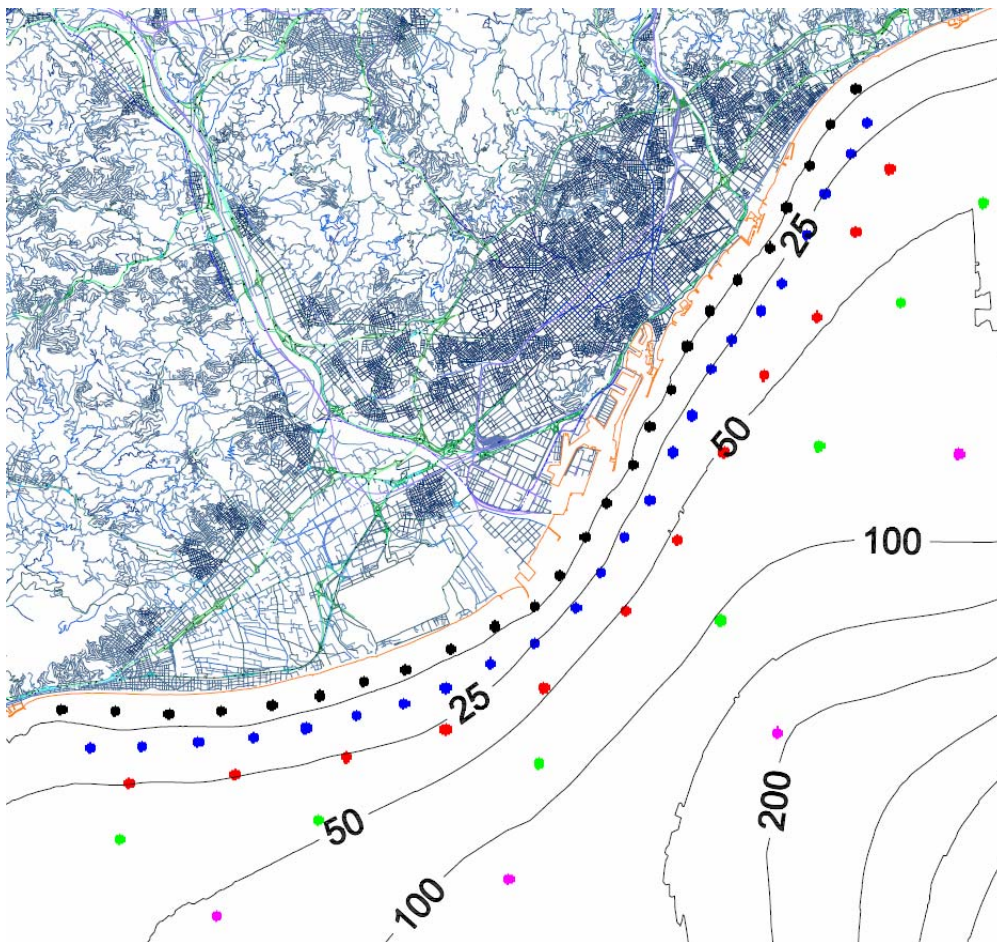


Figura 50. Distribució dels punts on s'ha calculat el potencial energètic

En base als resultats anteriors, s'ha definit el mapa del potencial energètic del medi natural degut a les onades davant de les costes de l'AMB, el qual es mostra a la Figura 51.

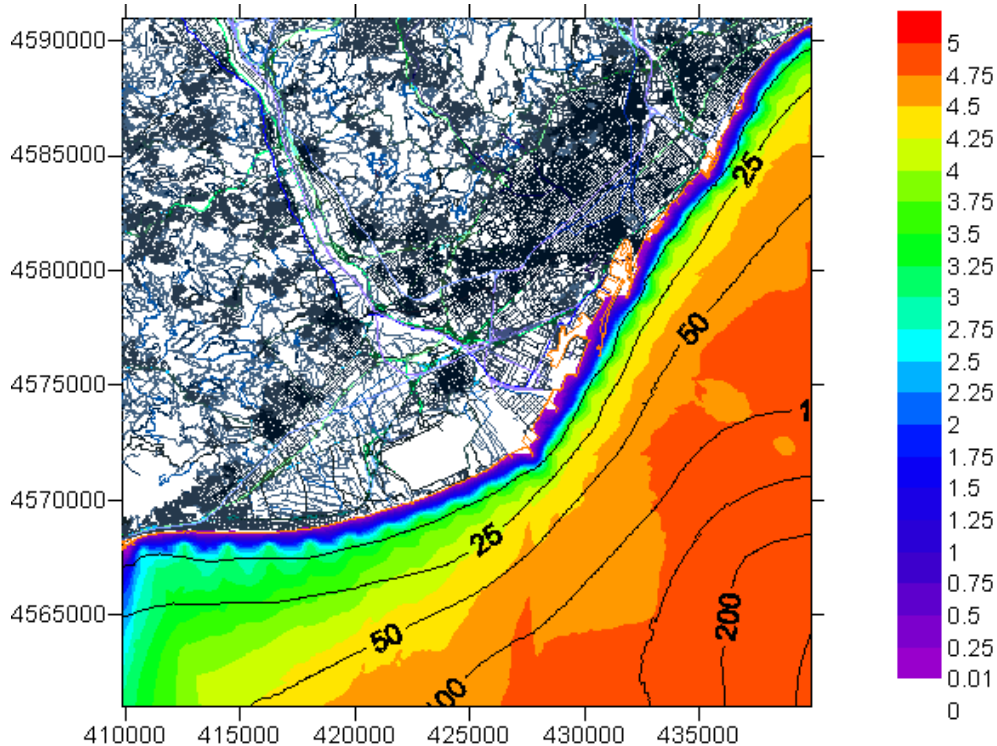


Figura 51. Mapa del potencial energètic de l'onatge (kW/m) davant la costa de l'AMB

Tal i com s'esperava, la potència de les onades a les costes catalanes i en concret a la costa de l'Àrea Metropolitana de Barcelona, és força reduït, i ni tant sols a fondàries majors a 200 m (equivalent a uns 10 km de la costa) s'assoleixen valors propers a 5 kW/m. De tota manera, a partir d'uns 5 km de la costa i a fondàries de més de 100 m, els valors del potencial energètic són força similars i s'apropen els 4.7 kW/m.

Per tal de definir el potencial energètic tenint en compte el factor hores de funcionament, factor del rendiment del sistema d'extracció, factors de pèrdua etc, serà necessari considerar un tipus de tecnologia amb la que s'extregui l'energia.

La millor tecnologia actualment per a realitzar aquestes valoracions, correspon a Wave Star, considerant que s'instal·larà el mòdul comercial Wave Star C5, que està format per una plataforma en la que s'hi ubiquen 20 flotadors de 5 m de diàmetre cadascun i braços de 10 m de longitud, amb un pes total de 1.600 Tn (Figura 52). La potència nominal instal·lada és de 600 kW, i fa referència a la màxima potència que pot generar el sistema. Tenint en compte que els onatges del Mediterrani estan lluny del valor òptim pel qual el sistema ofereix la potència màxima (que en aquest cas és per valors de $H_s \geq 2.5$ m) i a que es produeixen pèrdues en el propi sistema d'extracció, podem parlar d'uns valors d'eficiència de tant sols el 10%, a les àrees de major efectivitat a partir d'uns 5 km de la costa.



Figura 52. Mòdul comercial Wave Star C5

Així doncs, un sol mòdul Wave Star C5 rendint al 100% podria ser capaç de produir en un any l'equivalent a 5.256.000 kWh. Ara bé al mediterrani, la seva eficiència es redueix a un 10% i per tant estaríem parlant d'uns 525.600 kWh a l'any.

D'altra banda, si el que es pretén és instal·lar un parc undimotriu davant les costes de Barcelona, s'haurà de valorar quina distribució en l'espai resulta òptima per extreure el màxim rendiment si es col·loquen diferents mòduls. Per desgràcia, aquest nivell de detall no s'ha estudiat per a la tecnologia Wave Star, amb el què la següent estimació es basarà en suposicions sobre la distribució òptima de múltiples mòduls tenint en compte que no es facin ombra els uns als altres.

Atenent a l'efecte que pot produir sobre l'onatge incident, i l'onatge que es transmet rera el mòdul, es suposa que una distància de 5 vegades l'espai del mòdul és suficient per mitigar l'efecte ombra, tal i com succeeix amb la difracció de l'onatge. Donat que l'onatge és variable mentre que la ubicació dels mòduls serà fixa, es considera la millor disposició del mòduls orientats en la direcció principal, que en el cas del mediterrani seria orientats cap a l'est. En la direcció perpendicular, que sol no representar una direcció principal de l'onatge es podran apropar més els mòduls, fins a una distància estimada de 2 vegades la longitud dels mòduls.

En el cas del Wave Star C5, que té una longitud aproximada de 70 m, resulta que la superfície aprofitable per cada mòdul és d'uns 90.000 m² (veure Figura 53). Amb aquest distribució, el potencial energètic podria oferir valors màxims de més de 60 kWh/m², però a les costes de Barcelona s'assoliran com a màxim 5.96 kWh/m² a les àrees més favorables en aigües fondes (a partir d'uns 5 Km de la costa).

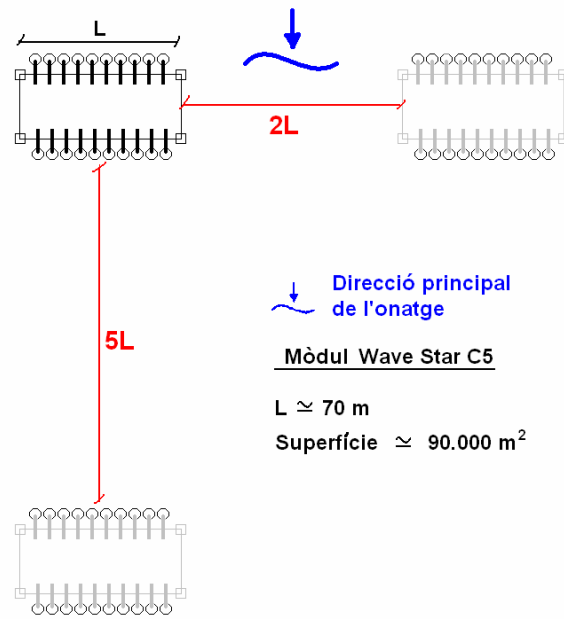


Figura 53. Distribució òptima d'una parc undimotriu amb mòduls Wave Star C5

Atenent a una distribució en planta d'un parc undimotriu segons la figura anterior, es pot definir el mapa del potencial energètic vinculat a la tecnologia Wave Star, que s'indica a la Figura 54.

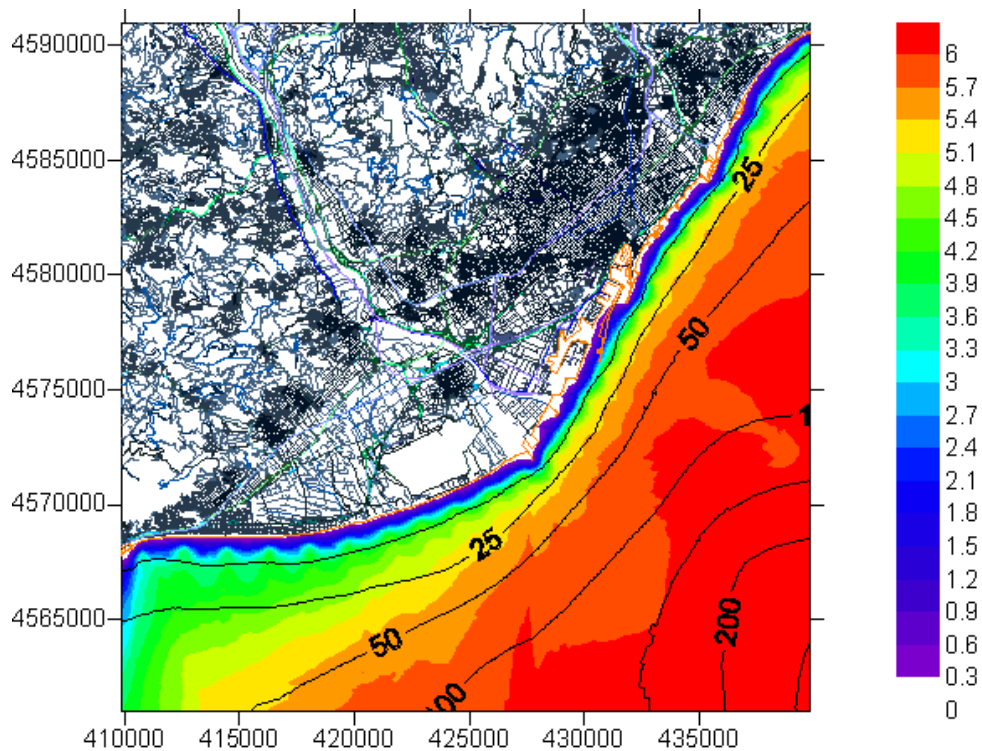


Figura 54. Mapa del potencial energètic (kWh/m^2) generat amb Wave Star

7.1.2. Corrents

De manera similar al què s'ha fet per l'onatge, es procedeix a continuació a definir el potencial energètic dels corrents marins. Per fer-ho s'utilitzaran els resultats de les simulacions dels corrents generats per vent i mareas, que ofereixen un registre històric a qualsevol punt de l'àrea coberta per la malla de les simulacions. A més, s'hi tindrà en compte els valors dels corrents generals o de plataforma que recorren per davant de la costa de l'AMB.

Per tal de poder definir el mapa del potencial energètic, és necessari definir un tipologia determinada, en aquest cas turbina, per poder estimar els valors, en funció de la intensitat dels corrents, el diàmetre de les aspes del rotor, i el coeficient d'eficiència de la turbina.

En el cas que ens ocupa, s'han fet els càlculs suposant que s'instal·lés la tecnologia més solvent que existeix al mercat, que és la turbina d'eix vertical SeaGen, i en concret el model comercial SeaGen "S" (veure Figura 55). Un sol element d'aquest model comercial, ofereix una potència màxima instal·lada de 2.000 kW, i està compost d'un màstil i dos rotors, cadascun d'ells amb unes aspes de 11 m de diàmetre, cosa que ofereix un àrea efectiva de 190 m². Segons els rendiments observats en els prototipus d'aquesta tecnologia, els valors d'eficiència es situen tant sols entre el 20% i el 30%, però degut a la manca d'una corba de potència, pels càlculs que es realitzaran s'emprarà un valor del coeficient de la turbina de $C_d = 0,25$.

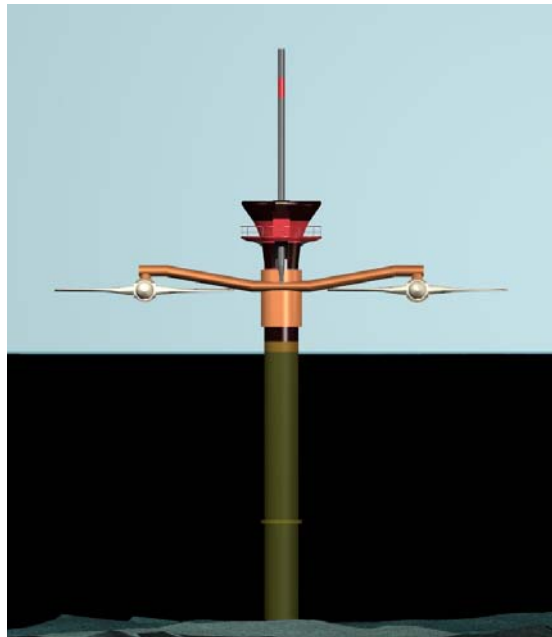


Figura 55. Model SeaGen "S" amb una potència màxima instal·lada de 1.000 kW

A partir d'aquestes premisses, s'ha obtingut els valors dels corrents generats per vent i mareas en els mateixos punts on s'havia analitzat l'onatge (Figura 50), incorporant en cada punt un valor constant dels corrents de plataforma. Aquests corrents, són variables al llarg del temps, en la columna d'aigua i en la seva ubicació en planta, essent màxims prop del talús de la plataforma continental i reduint-se prop de la costa. Per tant és força complicat definir-ne un valor adequat, però s'estima que una intensitat promig restaria al voltant de 0.10 m/s.

Segons aquests valors, s'ha obtingut el potencial energètic degut als corrents marins (en kW) davant de la costa de l'Àrea Metropolitana de Barcelona, i que es mostra a la Figura 56. Sobre aquests resultats és important de remarcar, que els corrents generats per vent i mareas tenen una contribució molt minsa, i per tant, la major part de l'energia obtinguda prové del valor preestablert pels corrents de plataforma. Donada la incertesa d'aquests corrents, s'ha calculat el potencial per un valor nul dels corrents de plataforma (Figura 57) i per un valor màxim estimat de 0.25 m/s (Figura 58).

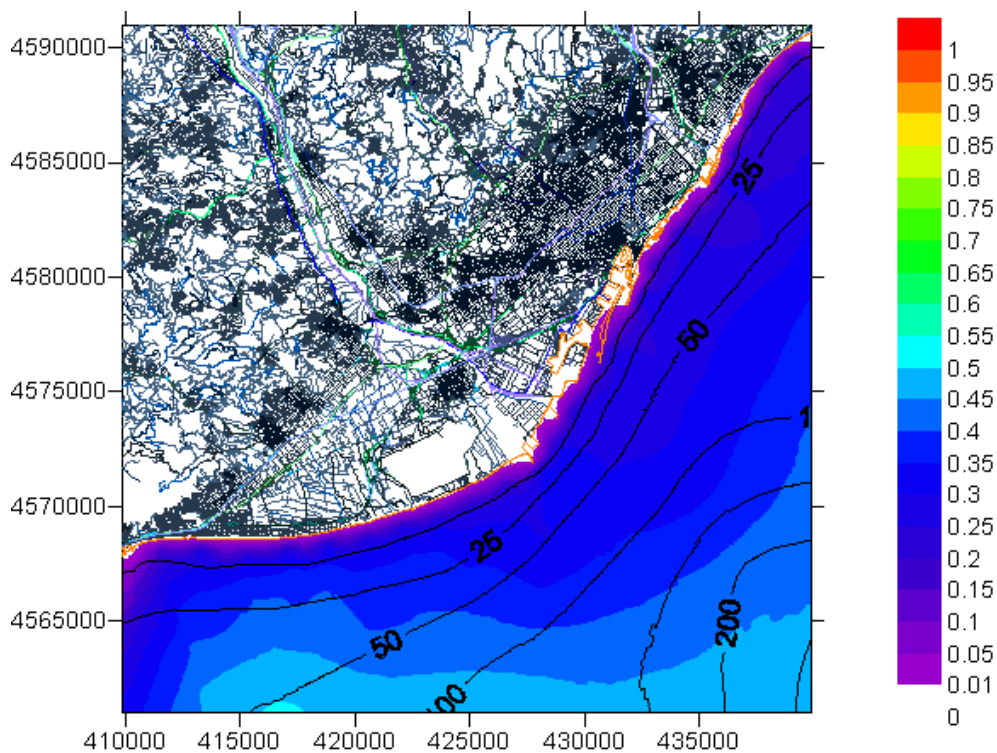


Figura 56. Mapa del potencial energètic dels corrents (kW) davant la costa de l'AMB considerant un valor constant dels corrents de plataforma de 0.10 m/s

Aquests valors corresponen als valors del potencial del medi natural degut als corrents marins, i no tenen en compte la generació anual d'energia (en kWh) ni la distribució en planta de múltiples estacions, que ens oferirà un valor del potencial energètic finalment en kWh/m².

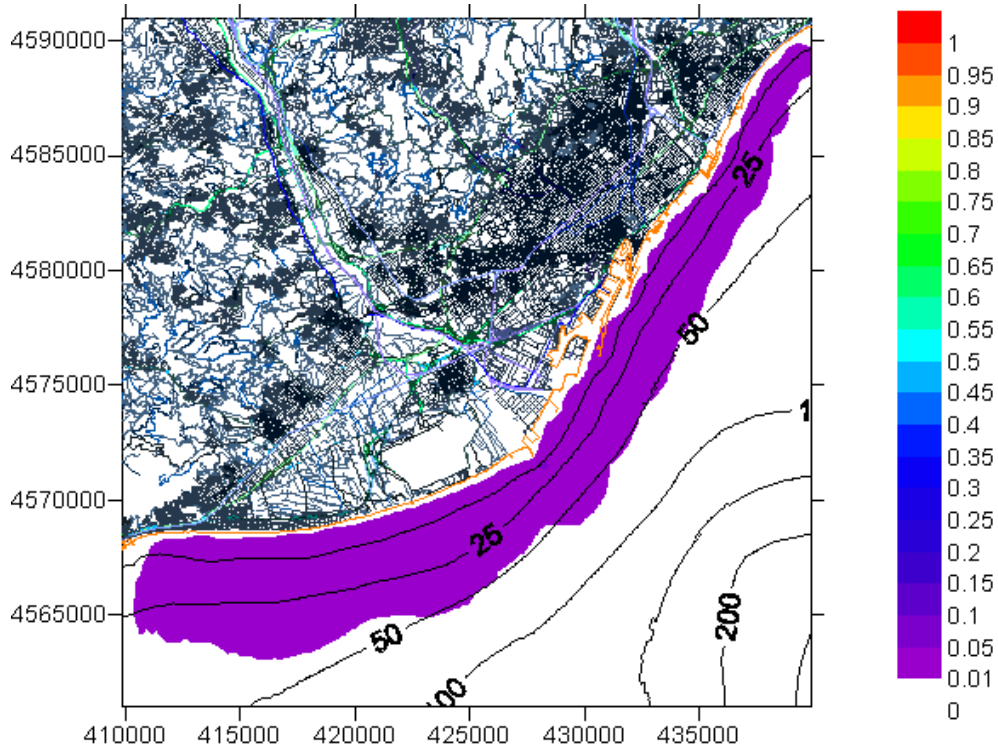


Figura 57. Mapa del potencial energètic dels corrents (kW) davant la costa de l'AMB considerant un valor constant dels corrents de plataforma de 0.00 m/s

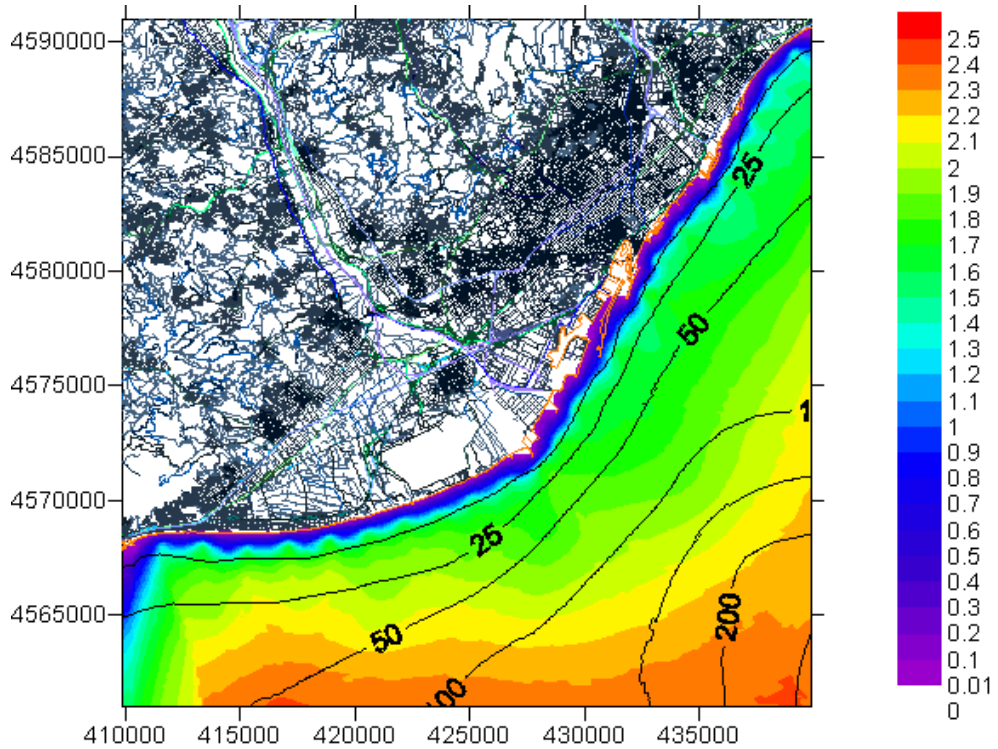


Figura 58. Mapa del potencial energètic dels corrents (kW) davant la costa de l'AMB considerant un valor constant dels corrents de plataforma de 0.25 m/s

En base a aquests resultats, es veu clarament la incertesa del potencial real, degut a la falta d'informació sobre la distribució en horitzontal i en vertical dels corrents més importants, com són els corrents generals, però en qualsevol cas, això no varia les conclusions sobre el possible aprofitament d'aquest recurs, ja que com s'havia comentat en la revisió de l'Estat de la Tècnica, tant sols és aprofitable l'energia generada pels corrents, quan les intensitats voregen els 2 m/s, cosa que queda bastant llunyana en el cas del Mediterrani occidental, i en especial davant la costa barcelonina.

D'altra banda, si es suposa un parc en el què s'instal·len múltiples turbines, i atenent a que l'ombra d'unes a altres pugui afectar una longitud de 5 cops les aspes del rotor en la direcció principal dels corrents i l'equivalent a 3 longituds en la direcció perpendicular (valors que s'empren en parcs eòlics), es pot definir el potencial energètic generat per SeaGen en front la costa de Barcelona. Amb la potència instal·lada per un prototipus SeaGen "S", es podria arribar a generar un total de 4.380.000 kWh anuals, si els corrents fossin òptims (amb valors de 2.5 m/s o majors). Degut a què els corrents són clarament inferiors i a què la potència de la turbina és proporcional a la velocitat al cub, si s'assumeix que l'eficiència és tant sols del 0.5%, aquest valor es redueix a 21.900 kWh.

Tenint en compte que cada turbina cobreix uns 30 m de longitud, l'àrea que ocuparia cada estació per no fer ombra a les altres seria d'uns 13.500 m², i per tant a les millors zones de la costa de Barcelona el valor del potencial energètic seria tant sols de 1.62 kWh/m². A la Figura 59, es mostra el resultat del potencial energètic generat amb SeaGen suposant que els corrents generals són tant sols de 0.1 m/s.

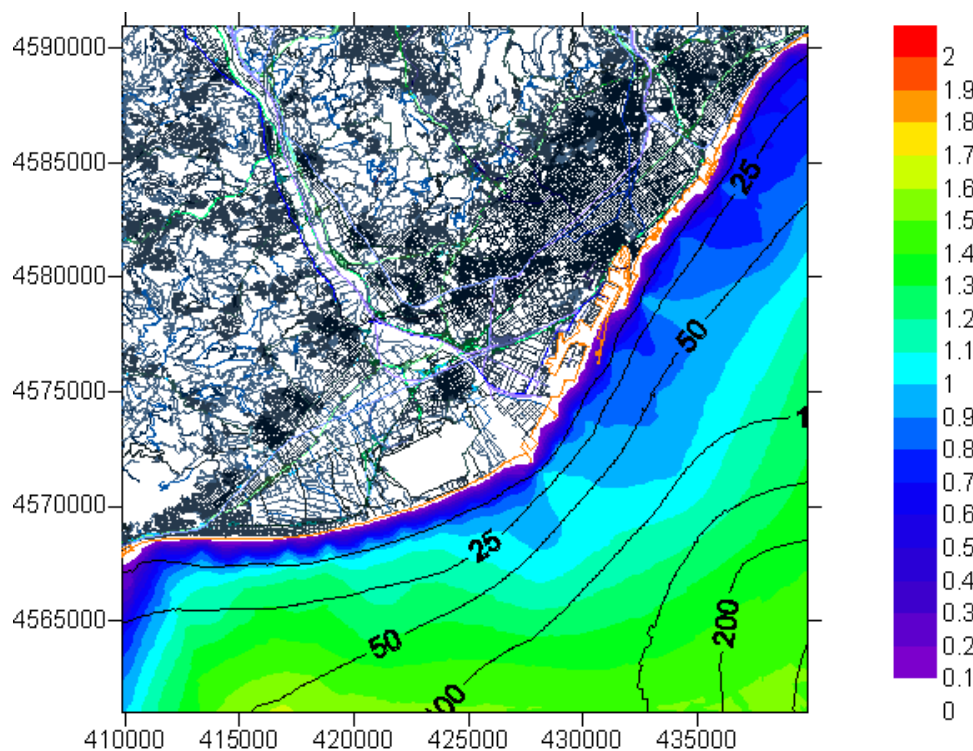


Figura 59. Mapa del potencial energètic (kWh/m²) generat amb SeaGen

7.1.3. Gradients tèrmic i salí

En aquests apartat es discutirà com estimar el potencial energètic generat pels gradients tèrmic i salí, tot i que, en aquests cas, se sap, a priori, que són del tot no aprofitables en l'àmbit de la costa de l'Àrea Metropolitana de Barcelona, ja que s'està molt lluny d'assolir salts tèrmics de 20° i salts de salinitat del 10‰.

Partint del fet que es tracta de processos de generació d'energia que aprofiten uns diferencials, ja siguin de salinitat o temperatura, de cara a una major generació que pugui fer rendible el procés, es tractaria de cercar aquelles ubicacions amb un major potencial.

Com ja s'ha comentat, el tram objecte d'estudi, el front litoral de l'àrea metropolitana de Barcelona, no ofereix un diferencial tèrmic suficientment important ($\geq 20^{\circ}\text{C}$) entre les aigües superficials i profundes, ni tant sols agafant-les a gran profunditat en el moment de l'estiu en què les aigües superficials estiguin més calentes. Això és degut a que, a diferència del que passa en altres indrets, les aigües profundes de la Mediterrània es troben típicament a uns 12-13°C al llarg de tot l'any, donat que és un mar gairebé tancat i s'acaba escalfant tota la columna d'aigua.

Pel que fa a l'aprofitament cal tenir en compte que a partir del teorema de Carnot, proposat per l'enginyer francès Sadi Carnot al 1824, es pot definir que l'eficiència màxima d'una màquina tèrmica que operi entre dos reservoris d'energia tèrmica a temperatures T_f (mínima, en graus °K) i T_c (màxima, en graus °K) vé donat per la següent equació:

$$\eta = 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

Així per exemple, si suposem una màquina que treballa entre dos focus tèrmics, essent un aigua en equilibri amb vapor d'aigua, a 100°C, i l'altre aigua en equilibri amb gel, a 0°C, aleshores:

$$\eta = 1 - \frac{273,13}{373,13} = 26,8\%$$

És a dir que, de tota la calor disponible, només aproximadament una quarta part s'aprofita com a treball, mentre que la resta es perd. La diferencia de temperatura entre el flux d'aigua calenta i el flux d'aigua freda té un fort impacte en l'eficiència del sistema. Es per això que abans d'iniciar una nova instal·lació és necessari pel seu disseny realitzar simulacions detallades de la seva operativitat, fent-ho en cada cas aplicant un model adequat al cicle escollit per al procés.

Pel que fa als sistemes aplicables a l'OTEC, en una situació ideal dels tròpics podríem considerar unes temperatures de 28°C i 4°C, pel que tindríem una eficiència màxima teòrica del 7,97%; en casos en què el diferencial tèrmic és més petit, com el que es troba al litoral barceloní, tindrem una eficiència encara més baixa.

A més, cal tenir en compte que en una màquina real el rendiment es veu reduït encara més per factors irreversibles. Així, en estudis comparatius entre els models comentats anteriorment conduïts per Uehara i col.³⁰ es determina que l'eficiència tèrmica precisament amb temperatures de 28°C i 4°C és del 5,23% en cas d'utilitzar el cicle Uehara, 1,038 vegades el rendiment màxim obtingut amb un cicle Kalina (5,04%) i 1,31 vegades el rendiment màxim obtingut amb un cicle Rankine bàsic (3,98%). D'altra banda però, també cal tenir en compte que els sistemes OTEC no tenen costos associats al consum de combustible i el recurs utilitzat és enorme, renovable i virtualment sense fi.

El fet que a la pràctica el rendiment d'aquests sistemes es redueixi a valors d'entre el 3% i el 5% implica que la generació d'energia de l'ordre de MW exigeixi la utilització de quantitats enormes d'aigua, tot i que inferiors en cas de cicles del tipus Kalina i Rankine per les seves particularitats. Així, degut a la seva baixa eficiència, els sistemes OTEC amb dimensió comercial hauran de ser força grans en comparació a les plantes de generació d'energia tradicionals.

De fet, l'avaluació econòmica d'instal·lacions OTEC indica que el seu futur comercial es troba en instal·lacions de l'entorn de 100 MW de capacitat per a països industrialitzats i en instal·lacions de mida més petita per a illes petites de països en desenvolupament³¹. Existeixen diversos articles amb informació sobre els costos econòmics associats a la construcció i funcionament d'instal·lacions d'aquest tipus³².

Una forma senzilla d'augmentar l'eficiència del cicle és utilitzar una font d'aigua calenta amb una temperatura superior a la de l'aigua marina superficial, principalment efluentes de processos industrials. Amb aquest propòsit per exemple, s'ha proposat utilitzar la descàrrega d'aigua calenta del condensador d'una planta nuclear per a un sistema OTEC, enlloc del flux d'aigua de mar superficial. Fent ús de simulacions per ordinador, Kim i col.³³ van avaluar diferents tipologies de cicle; els resultats van mostrar que el sistema pot generar electricitat quan la diferència de temperatura entre el flux calent i el flux d'aigua freda és superior a 15°C, inferior al límit habitualment considerat de 20°C.

³⁰ Uehara, H.; Ikegami, Y. i Nishida, T. (1998). Performance analysis of OTEC system using a cycle with absorption and extraction processes. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, part B, vol. 64 (624): 384-389

³¹ Magesh, R. (2010). OTEC Technology – A World of Clean Energy and Water. Proceedings of the World Congress on Engineering (WCE). London, U.K

³² Vega L. (2002). Ocean Thermal Energy Conversion Primer. Marine Technology Society Journal, vol. 6 (4): 25-35

³³ Kim, N.J.; Ng, K.C. i Chun, W. (2009). Using the condenser effluent from a nuclear power plant for Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC). International Communications in Heat and Mass Transfer, vol. 36: 1008-1013

El sistema es va simular per utilitzar com a font de calor l'efluent de la planta nuclear Wolsong a la costa est de Corea, resultant en un augment d'eficiència d'aproximadament un 2% respecte al sistema que utilitzaria directament l'aigua de mar superficial com a font de calor. De fet, no és un estudi únic, i l'aprofitament del calor residual d'instal·lacions industrials per a la generació d'energia mitjançant la tècnica OTEC ja ha estat valorada a d'altres llocs com per exemple a indrets com Rotterdam³⁴ o Xile³⁵.

En el cas de Barcelona, en què el diferencial tèrmic existent no és suficient per utilitzar fonts naturals, a l'entorn del litoral barceloní es troba la Central Tèrmica de Cicle Combinat del Besòs. Segons la declaració d'impacte ambiental (DIA) emesa en el seu moment³⁶ disposa d'autorització per a l'abocament de fins a 99.000 m³/h d'aigua de mar prèviament captada amb un increment de temperatura màxim de 7,6°C, aigua que actualment és abocada a 250 m de la desembocadura del riu Besòs, riu amunt.

A més, també cal tenir en compte que es tracta d'aigua ja tractada per a la seva circulació per sistemes de conducció tancats, pel que la incidència dels fenòmens de *biofouling* seria previsiblement menor. Existeix també la possibilitat d'elaborar un estudi que permeti determinar fins a quin punt seria possible reduir el cabal captat, i per tant abocat per la instal·lació, de tal forma que al reduir el volum d'aigua aquesta pel contrari augmenti la quantitat de calor absorbida per unitat de volum i fent per tant més viable el seu aprofitament per a la generació d'energia. Sense tractar-se del mateix procés, cal destacar que actualment l'empresa Districlima realitza l'aprofitament tèrmic del vapor de baixa pressió procedent de la incineradora de residus urbans Tèrsa, així com realitza producció de fred mitjançant màquines de compressió elèctriques, absorció i acumulació.

A l'altre extrem de la ciutat hi trobem instal·lacions que a priori també podrien donar peu a algun tipus d'aprofitament. Així, dins l'àmbit del port de Barcelona s'hi troben localitzades tant la regasificadora operada per ENAGAS com la central de cicle combinat operada per Gas Natural, de construcció més recent.

Després de múltiples canvis ocasionats per les successives ampliacions de la regasificadora, actualment aquesta instal·lació disposa d'autorització per a la captació de fins a 56.000 m³/h d'aigua de mar i el seu retorn amb una reducció de temperatura que no pot ser superior a 8°C.

³⁴ Ventosa Capell, V. (2011). Analysis of possibilities for 1MW electricity generation from waste heat in the port of Rotterdam. Tesis. Universitat Politècnica de Catalunya

³⁵ Soto Avello, R.A. (2012). Aumento de eficiencia de centrales termoelectricas y nucleares usando energia oceano-termica. Tesis. Pontificia Universidad Católica de Chile. Escuela de Ingeniería

³⁶ RESOLUCIÓN de 9 de marzo de 2001, de la Secretaría General de Medio Ambiente por la que se formula declaración de impacto ambiental sobre el proyecto de instalación de dos turbinas para gas natural en ciclo combinado, de 800 MW de potencia eléctrica total, en la central térmica de Besós, en el término municipal de Sant Adrià de Besós (Barcelona), promovido por ENDESA (BOE núm. 80, de 3 d'abril de 2001)

Pel què fa a la central de cycle combinat operada per Gas Natural, el sistema de refrigeració opera mitjançant torres d'evaporació amb aigua de mar, de la qual es necessiten entre 2.700-3.300 m³/h, als que cal sumar el que requereix la planta dessaladora per abastir la central, entre 100 i 325 m³/h. Aquesta aigua de mar és captada precisament del retorn a mar de les aigües fredes abocades per ENAGAS. L'efluent del sistema de refrigeració oscil·la entre 2.100 i 2.600 m³/h, als que cal afegir-hi el rebuig de la planta dessaladora, resultant-ne un volum total d'entre 2.160 i 2.795 m³/h. El punt d'abocament del conjunt d'aquestes aigües d'origen marí correspon a l'emissari d'ENAGAS.

Pel que fa a les aigües abocades per ENAGAS, aquestes presenten un salt tèrmic negatiu, que no suposa una diferència tèrmica suficient respecte de la temperatura de l'aigua de mar com per realitzar-ne un aprofitament amb les tecnologies actuals. D'altra banda, l'efluent de Gas Natural, amb una salinitat lleugerament superior, es barreja amb el d'ENAGAS, i tèrmicament tampoc suposaria un diferencial important tenint en compte que parteix d'una temperatura inferior.

Per tant, a priori no seria possible l'aprofitament de les tecnologies OTEC al no tenir disponibilitat de dues masses d'aigua amb un salt tèrmic suficient.

D'altra banda, pel què fa a l'aprofitament del gradient salí, també existeix la possibilitat d'utilitzar l'efluent d'instal·lacions de depuració d'aigua residual com a font d'aigua dolça enlloc d'altres fonts naturals, utilitzant la del mar com a aigua salada o inclús l'efluent hipersalí d'instal·lacions dessaladores, podent així incrementar el rendiment.

En aquest sentit, a l'altre riba del riu Besòs s'hi troba l'estació de depuració d'aigües residuals (EDAR) del Besòs, que tracta i aboca mitjançant un emissari submarí grans volums d'aigua dolça que podrien aprofitar-se per a la generació d'energia aprofitant el gradient salí. Segons dades de l'Àrea Metropolitana de Barcelona (AMB), presenta una capacitat de disseny de 525.000 m³/dia, amb un cabal depurat al 2011 de 134.559 hm³.

Circumstàncies similars podrien buscar-se a l'altre gran riu de l'àrea metropolitana, el Llobregat. En aquest cas existeixen possibles sinèrgies amb la depuradora (EDAR del Baix Llobregat) i la dessalinitzadora (ITAM Barcelona), les dues grans instal·lacions de tractament d'aigües de la zona, també de cara a l'aprofitament energètic del gradient salí.

En el primer cas, l'EDAR del Baix Llobregat i segons dades de l'AMB, presenta una capacitat de disseny de 315.000 m³/dia, amb un cabal depurat al 2011 de 100.793 hm³, del qual una petita part (≈2% al 2011) és reutilitzada amb diversos fins, principalment per a l'alimentació de la barrera contra la intrusió salina i de les zones humides properes. En segon lloc, la ITAM de Barcelona es va posar en funcionament el mes de juliol del 2009 i funciona per osmosi inversa, amb una producció potencial de fins a 60 hm³/any, si bé només està previst el seu funcionament a ple rendiment en cas que les reserves hídriques es considerin baixes.

El procés de dessalinització genera un rebuig en forma de salmorres. La ITAM del Llobregat està dissenyada per a un cabal de 60 hm³/any produïts i un cabal màxim de 2,31 m³/s. En el procés de dessalinització per osmosis inversa s'obté un rendiment del 45%: és a dir s'obtenen 73 hm³/any de rebuig (2,82 m³/s) de cabal màxim teòric (sobre un total captat aproximat de 133 hm³/any). A nivell real, la producció d'aigua dessalinitzada al 2010 va ser de 10,81 hm³ (i per tant, aproximadament 13,2 hm³/any abocats), mentre que al 2011 va ser de 7,38 hm³ (i per tant, aproximadament 9,0 hm³/any abocats).

A aquest cabal s'ha d'afegir les puntes de cabal ocasionades per la neteja de filtres que s'estimen de l'ordre del 1,5% del cabal de rebuig. La concentració salina de les salmorres és de l'ordre de 70.000 ppm de TDS (sòlids totals dissolts). A més d'aquestes sals, hi ha la presència de llots (residus sòlids en suspensió de l'aigua), juntament amb els lixiviats dels productes químics utilitzats per a la neteja diària dels filtres i de les membranes de forma periòdica.

Segons la DIA emesa en el seu moment³⁷, la salmorra resultant del procés es retorna al mar mitjançant l'emissari de l'EDAR del Baix Llobregat, i s'ha de fer en dilució amb l'efluent de l'EDAR, en un rang que oscil·la entre 3 litres d'aigua residual /2 litres d'aigua de rebuig (3/2) i 2 litres d'aigua residual /1 litre d'aigua de rebuig (2/1).

De cara a possibles sinèrgies, també cal comentar que al "Conveni de col·laboració entre l'Entitat Metropolitana de Serveis Hidràulics i Tractament de Residus, l'Agència Catalana de l'Aigua i Aigües Ter Llobregat per a la connexió del rebuig de la dessalinitzadora de Barcelona a l'emissari de l'EDAR del Baix Llobregat" signat l'abril del 2009, a la seva clàusula segona es diu que ATLL ha d'elaborar "un projecte de futur emissari per l'abocament de la salmorra, independent de l'emissari actualment existent". Aquesta prescripció respon a que tant l'Entitat del Medi Ambient, com l'Empresa Metropolitana de Sanejament, S.A. (EMSSA) titulars de l'emissari de l'EDAR del Baix Llobregat consideren que la connexió de les aigües de rebuig de la dessalinitzadora pot comportar un perill de corrosió per la qual cosa demanen buscar una altra solució. En el projecte elaborat per SENER al 2011 es valoren altres opcions tècniques, incloent-hi la de la construcció d'un emissari independent³⁸.

Finalment comentar que també s'ha de tenir en compte l'existència del col·lector de salmorres de la conca del Llobregat, la construcció del qual va permetre reduir els nivells de conductivitat al riu Llobregat des dels màxims assolits a finals dels anys 80 del segle passat (Figura 60).

³⁷ RESOLUCIÓN de 6 de junio de 2005, de la Secretaría General para la Prevención de la Contaminación y el Cambio Climático, por la que se formula declaración de impacto ambiental sobre la evaluación, del proyecto «Desaladora del área metropolitana de Barcelona», promovido por la Sociedad Estatal Aguas de las Cuencas Mediterráneas, S.A. (ACUAMED). (BOE núm. 155, de 30 de juny de 2005)

³⁸ ATLL (2011). Projecte de modificació de l'abocament de la salmorra de rebuig de la planta dessalinitzadora de la conca del Llobregat. Memòria Ambiental

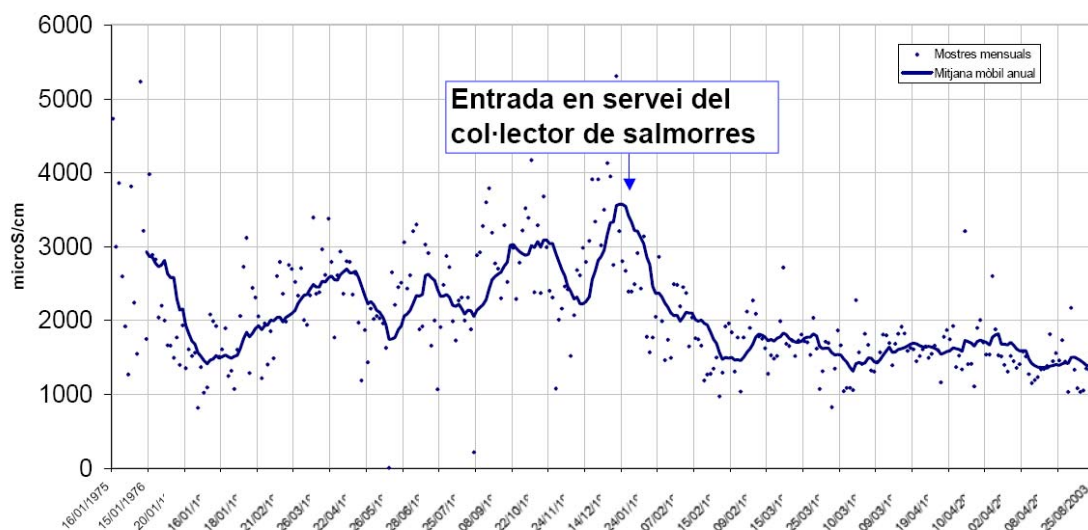


Figura 60. Evolució de la conductivitat del riu Llobregat al seu pas per Sant Joan Despí
(Font: Comunitat d'usuaris d'aigües del delta del riu Llobregat)

Aquest col·lector discorre des de les mines de Súria i Cardona per la llera del Llobregat fins al seu abocament posterior al mar i així evita l'entrada d'aquests volums a les estacions depuradores d'aigües residuals, i no només els provinents de les explotacions mineres, sinó també els efluent salins segregables de diverses indústries de la conca (Figura 61).

El punt de confluència dels dos braços està a la torre de trencament de càrrega especial de Castellgalí. En aquest punt una conducció única de 58 km transporta l'aigua fins a la desembocadura que es situa a l'EDAR del Baix Llobregat. Concretament el col·lector aboca les seves aigües també a l'emissari que reuneix els efluent de l'EDAR i de la dessalinitzadora.

Segons l'estudi d'impacte ambiental de l'ampliació del col·lector de salmorres de la conca del Llobregat redactat al 2006³⁹, des de l'any 1989 al 2000 les aportacions anuals al col·lector van anar augmentant des de 2,6 hm³ i unes 170.000 tones de Cl⁻ fins a prop de 3,5 hm³ i 400.000 tones de Cl⁻. Aquests increments van significat també que la concentració de la salmorra vehiculada va passar d'uns 60g/l a uns 120g/l de mitja d'ió clorur.

Per tant, possiblement el col·lector també es pugui considerar com un actiu a l'hora de pensar en els possibles aprofitaments de l'energia provinent de gradients salins.

³⁹ Agència Catalana de l'Aigua – ACA (2006). Estudi d'impacte ambiental de l'ampliació del col·lector de salmorres de la conca del Llobregat. Memòria resum

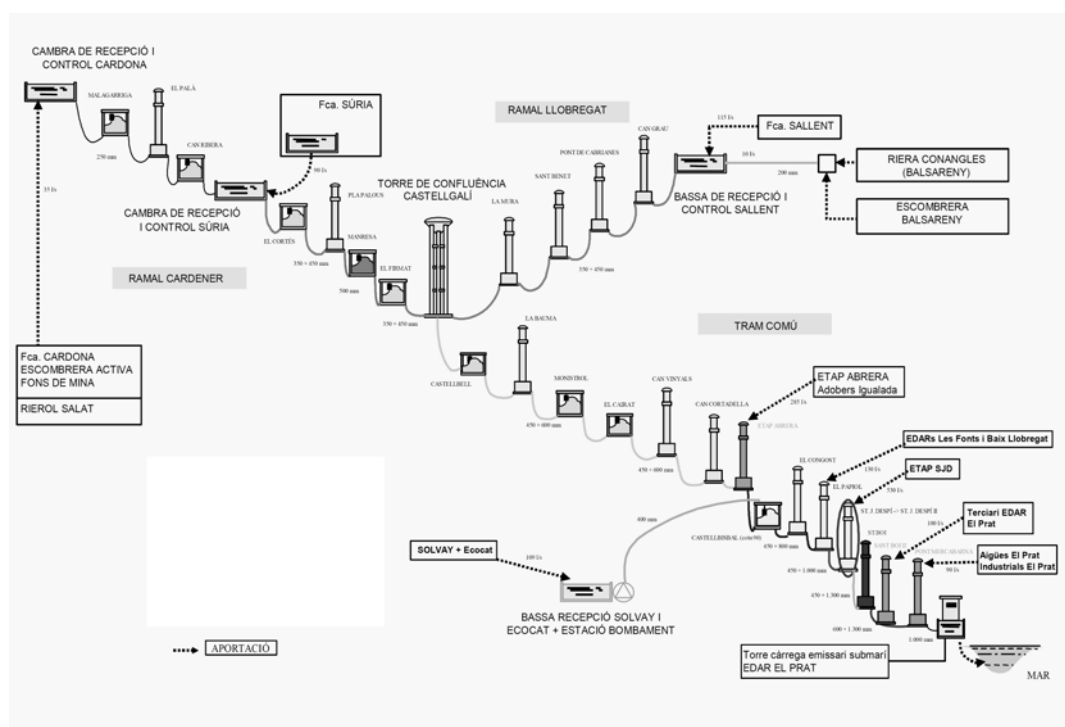


Figura 61. Esquema del col·lector de salmorres després de les obres del 2009⁴⁰

La ciutat de Barcelona sempre s'ha aprofitat del recurs natural que representa disposar de dues grans fonts d'aigua dolça com són el riu Llobregat i el riu Besòs, així com del mar proper. Durant molt de temps s'ha sabut que la barreja d'aigua dolça i aigua salada allibera energia, justament el fenomen que succeeix per exemple quan un riu desemboca al mar. El repte ha consistit en trobar el mètode per a la utilització d'aquesta energia i la seva conversió en electricitat, ja que l'energia que s'allibera de la barreja de les dues masses d'aigua només condueix a un augment molt petit de la temperatura de l'aigua, i a un nivell local.

La quantitat d'electricitat que pot arribar a produir-se depèn d'un elevat nombre de factors, incloent-hi la salinitat del riu i del mar, la temperatura respectiva, la quantitat i qualitat de l'aigua del riu, les ràtios existents entre l'aigua de riu i l'aigua de mar, la composició en sals de l'aigua de mar, l'evolució del gradient de salinitat, la demanda energètica i infraestructures locals i els possibles impactes ambientals.

Tot i així, es possible realitzar una primera aproximació mitjançant la fórmula comentada anteriorment (veure l'apartat 5.3). Donat que hi ha almenys dues fonts hipersalines aprofitables (efluent ITAM i col·lector de salmorres), s'escull la que presenta major potencialitat (col·lector de salmorres) en combinació amb l'efluent de la depuradora del Prat.

⁴⁰ Vidal Vidal, E. (2011). Valorització de Ca, Mg i SO₄ en residus salins. Tesis. Universitat Politècnica de Catalunya. Departament d'Enginyeria Química

Les mines de Súria, Sallent, Balsareny i Cardona (aquestes últimes pràcticament esgotades) són potàssiques i s'hi explota principalment la silvinita (KCl-NaCl), de la qual se n'intenta aprofitar el màxim possible de potassi, donat que aquest és el producte desitjat. Per tant, es realitzarà una aproximació a grosso modo considerant que tot l'ió clor del col·lector es troba en forma de NaCl, tot i que en realitat es pot trobar combinat amb forces cations; malauradament no es disposa de dades de les diferents fraccions.

Com s'ha indicat anteriorment, si que es coneix que l'any 2000 el col·lector abocava 3,5 hm³ amb una concentració aproximada de 120 g/l de Cl⁻. Per tant, si el pes molecular del NaCl es d'aproximadament 58,5 g/mol dels quals 35,5 g són de Cl⁻ i 23 g de Na⁺, en unes condicions ideals per 120 gr/l de Cl⁻ hi corresponen 77,75 g/l de Na⁺. Així, en un litre hi tindrem aproximadament 198 g de NaCl (3,4 mols) i 802 g d'H₂O (44,5 mols). Per tant, reproduint l'exercici executat a l'apartat 5.3, la fracció molar de l'aigua a l'efluent del col·lector és:

$$X_{H_2O} = 44,5 / (44,5 + 3,4) = 0,929$$

Seguint amb l'exercici executat a l'apartat 5.3 i substituint la fracció molar a l'equació, s'obté que:

$$\Delta G_{\max} = 8,1314 \times 293 \times \ln(0,929) = -8,1314 \times 293 \times 7,365 \times 10^{-2} J/mol = -175,46 J/mol$$

I per gram d'aigua (1 mol de H₂O conté 18 g, formats per 2 g de H i 16 g de O), això és:

$$\Delta G_{\max} = -175,46 / 18 J/g = -9,75 J/g$$

A l'igual que en l'exercici anterior, el valor negatiu indica que l'energia és alliberada i que, per tant, la barreja tindrà lloc espontàniament, tal i com indica el sentit comú. També és important el fet de que indica que una instal·lació dissenyada per recuperar l'energia que allibera aquesta barreja pot recuperar fins a 1,5 Joules (Ws) màxims teòrics per cada gram d'aigua dolça (el que es suposa enlloc de l'efluent de l'EDAR) que es barregi amb aigua salada.

De forma similar, però amb un desenvolupament teòric més extens, Post (2009) proposa un model amb el que és possible realitzar una comparació respecte l'aprofitament del gradient de salinitat per part de les tècniques d'OPR i RED. Així, aplica formulacions equivalents per a una i altra tècnica per tal de poder calcular comparativament, i sota condicions idèntiques, l'obtenció d'energia que permeten.

No s'exposarà aquí el desenvolupament teòric complet que realitza l'autor (disponible d'altra banda a la publicació⁴¹), però sí considerem d'interès concretar les condicions sota les quals han estat aplicades:

- Es considera que les solucions utilitzades son una barreja pura de clorur sòdic (NaCl) i aigua, utilitzant fraccions molars per a representar les diferents concentracions
- S'utilitzen solucions d'aigua dolça de riu (0,05 mol/l), aigua salada marina (0,5 mol/l) i salmorra (5,0 mol/l)
- Com a temperatura de les solucions es considera 293°K
- La taxa de barreja del volum de la solució concentrada a la solució diluïda és de 1:1
- Les característiques de les membranes s'estableixen a partir de Mehta i col. (1979)⁴² per a OPR i Jadurodzinski i col. (1986)⁴³ per a EDR
- Per a l'avaluació del model utilitzat s'utilitza com a paràmetres:
 - o la densitat de potència (W/m²): l'energia generada per unitat de superfície es facilita en xifres brutes enlloc de netes, és a dir, que no es té en compte les pèrdues d'eficiència internes (pèrdues per fricció, eficiències de turbines i bombes, etc.)
 - o l'energia recuperada (%). La recuperació d'energia η (%) es calcula com a la ratio de l'energia produïda al llarg d'un interval de temps en comparació a l'energia lliure disponible a les condicions inicials (en el moment "0")

Habitualment, els diferents estudis utilitzen sistemes d'alimentació continua en els que s'opera amb temps de residència curts, de manera que no es donen canvis apreciables en les concentracions d'ambdues solucions (concentrada i dissolta); per aquesta raó es pot dir que aquests sistemes estan en un estadi estacionari pel que fa a la densitat de potència, que serà màxima. Així, el fet de que es donin únicament petits canvis en les concentracions vol dir que tant sols s'aprofita una molt petita part de l'energia que es pot obtenir de la barreja d'ambdues solucions, si bé, a la pràctica, el que es vol és aprofitar una fracció considerable de l'energia disponible.

En cas d'optar per això darrer, és lògic pensar que s'hauran de produir variacions apreciables en les concentracions i per tant també en la densitat de potència. Amb l'increment del temps de residència, la densitat de potència es reduirà mentre que la

⁴¹ Post, J.W. (2009). Blue Energy: electricity production from salinity gradients by reverse electrodialysis, 224 pages. Thesis, Wageningen University, Wageningen, NL.

http://www.waddenacademie.nl/fileadmin/inhoud/pdf/06-wadwetent/Proefschriften/thesis_jan_Post.pdf

⁴² Mehta, G.D. and S. Loeb, Performance of permasep b-9 and b-10 membranes in various osmotic regions and at high osmotic pressures, Journal Of MembraneScience 4(3) (1979), p. 335-349.

⁴³ Jagurodzinski, J. and R. Kramer, Novel process for direct conversion of free-energy of mixing into electric-power, Industrial & Engineering Chemistry Process Design And Development 25(2) (1986), p. 443-449.

recuperació d'energia del procés augmentarà. És a dir, que ambdues variables es troben determinades pel temps de residència i interrelacionades entre elles.

A la Figura XY es mostra la densitat de potència màxima per la combinació d'aigua de riu i marina; com es pot observar, el resultat és major per EDR que per OPR. En canvi, en el cas d'utilitzar salmorres a la barreja, s'obté el resultat contrari.

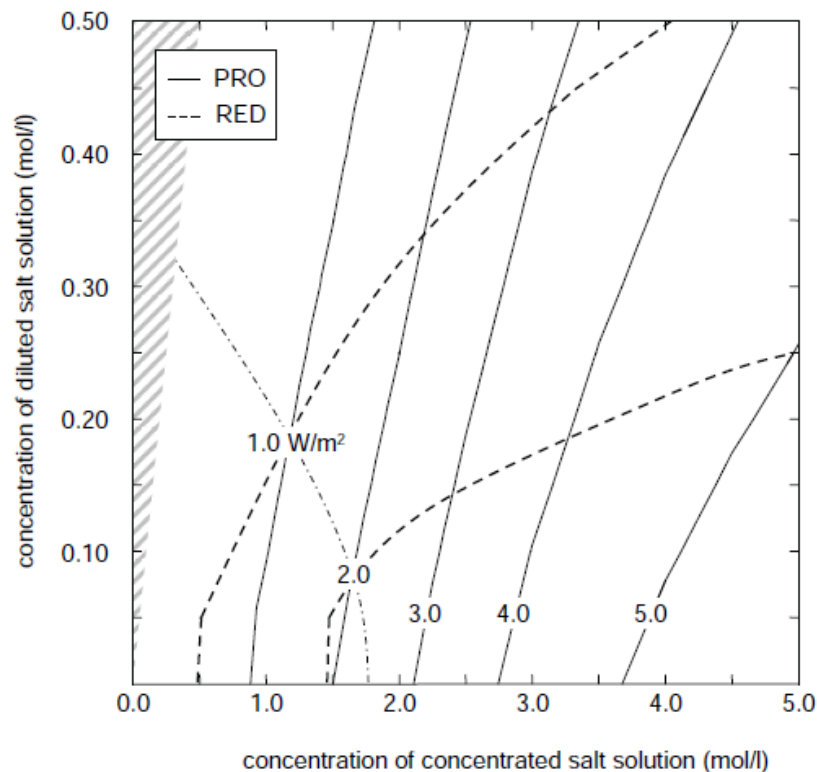


Figura 62. Densitat de potència màxima (W/m^2). Per sota de la línia puntejada, l'EDR (o RED en anglès) té una densitat energètica màxima superior que OPR (o PRO), mentre que per sobre d'aquesta es dona el cas contrari. L'àrea ombrejada està fora d'anàlisi donat que representa àrees on la concentració de sals de la solució més concentrada és inferior a la de la solució diluïda

Així doncs, la densitat de potència màxima de l'EDR és més sensible a la concentració de la solució diluïda i menys sensible a la concentració de la solució concentrada (orientació més horitzontal), en comparació amb l'OPR que és més sensible a la concentració de la solució concentrada.

Com ja s'ha comentat abans però, la densitat de potència màxima s'assoleix a les concentracions inicials (o gairebé, veure Figura 62) per a ambdues solucions. Si la barreja continua, com s'ha comentat anteriorment els valors de la densitat de potència es reduiran. A la Figura 63 es pot veure que si bé la densitat de potència màxima d'EDR és gairebé el doble de la corresponent de la OPR, cap al final del procés la densitat de

potència mitjana és gairebé la mateixa després de la conversió d'una quantitat d'energia similar (àrea per sota les corbes). És a dir, que cal considerar ambdós factors per tal de tenir una valoració encertada del procés.

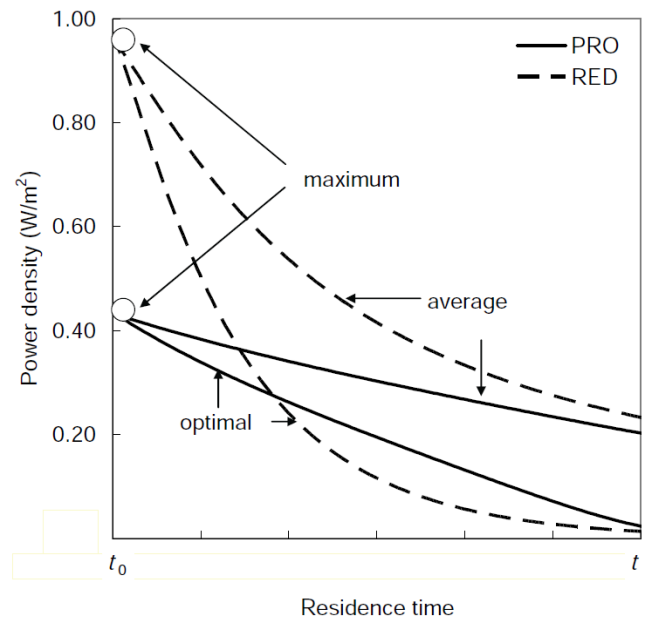


Figura 63. Reducció de la densitat de potència a mesura que avança el temps de residència d'ambdós volums (aigua de mar i de riu). L'àrea per sota de les corbes respectives representa la quantitat d'energia convertida (η , en %), que augmenta amb el temps

Finalment, a la Figura 64 s'observa que la recuperació màxima d'energia sembla ser del 50% per a la barreja d'aigua de mar i aigua de riu. En concret, per OPR s'obté un 43%, mentre que per EDR s'obté un 49%. Tant la densitat de potència mitjana com la recuperació d'energia són superiors per a l'EDR que per a l'OPR.

L'ús de salmorra presenta un resultat diferent, obtenint una densitat de potència mitjana i recuperació d'energia clarament superiors per a l'OPR, si bé en comparació a la barreja anterior pel que fa a la recuperació d'energia en aquest cas l'OPR obté un resultat menor, del 36%, i l'EDR obté un resultat encara inferior.

Per tant, a partir dels càlculs generats amb les dades de membranes actualment disponibles, en la generació d'energia a partir de la barreja d'aigua de mar i aigua de riu s'observa un millor resultat per ERD que per OPR, tant pel que fa a la densitat de potència com a la recuperació d'energia. Pel contrari, s'obtenen els resultats oposats en cas de barrejar-se aigua salabrosa i aigua de riu (veure Figura 64).

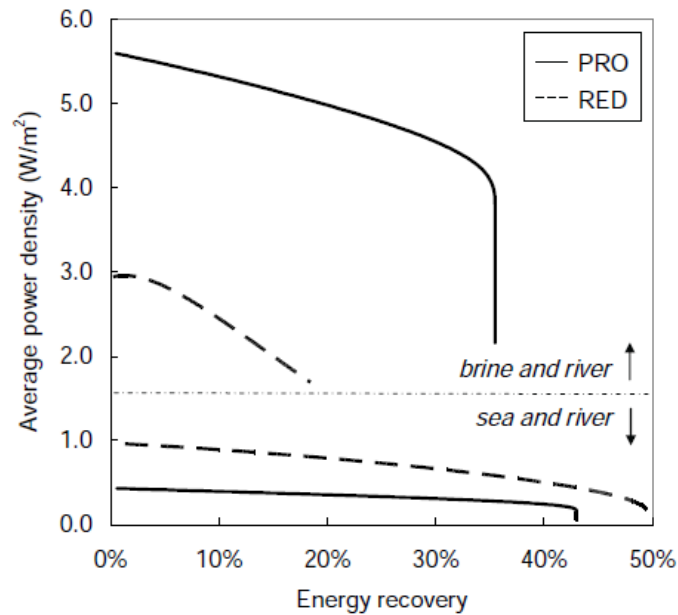


Figura 64. Resultats obtinguts pel càlcul de la densitat de potència mitjana i la recuperació energètica per OPR i EDR en base a les característiques de membranes actualment disponibles, per a la barreja d'aigua de mar (0,5 mol/l NaCl) i aigua de riu (0,05 mol/l NaCl) i per a la barreja d'aigua salabrosa (5 mol/l NaCl) amb aigua de riu

7.2. Valoració inicial dels costos d'exploració

Finalment, en aquest apartat, s'intentarà valorar la viabilitat econòmica de l'exploració dels recursos energètics marins davant de l'Àrea Metropolitana de Barcelona. Tal i com s'ha comentat en l'apartat 7.1, l'únic recurs potencialment explotable en l'àmbit d'estudi prové de l'energia undimotriu, ja que la resta de processos no ofereixen els mínims per poder ser aprofitats.

Així doncs, la valoració econòmica es basarà en la instal·lació d'una sistema d'extracció o aprofitament de l'energia de les onades que ofereixi un rendiment òptim i es contrarestarà els possibles beneficis de la venda de l'energia produïda, amb les costos d'exploració i manteniment, per veure si la inversió inicial arriba a ser rentable.

El primer que s'ha de fer doncs, és escollir quina tecnologia s'hi pot instal·lar, per valorar-ne la inversió inicial, i posteriorment calcular els costos d'exploració i manteniment, així com els rendiment i la productivitat energètica que ens oferirà els ingressos de l'exploració. De la valoració de les diverses tecnologies existents que s'exposa en l'apartat 6.1, es conclou que la millor de les tecnologies existents correspon al sistema Wave Star, en primer lloc perquè és una de les dues que sembla que pugui extreure energia en onatges de poca intensitat, i en segon lloc perquè es tracte d'una tecnologia avançada, contrastada i solvent, i que a més ens proporciona l'estimació dels costos d'inversió i

manteniment, així com uns rendiments esperats, basats en l'experiència dels prototipus que tenen instal·lats des de fa quasi 5 anys.

En concret es realitzarà l'estudi de la viabilitat econòmica, considerant que s'instal·larà el mòdul comercial Wave Star C5, que està format per una plataforma en la què s'hi ubiquen 20 flotadors de 5 m de diàmetre cadascun i braços de 10 m de longitud, amb un pes total de 1.600 Tn (Figura 52). La potència nominal instal·lada és de 600 kW.

Segons la informació proporcionada per l'empresa Wave Star Energy, la inversió inicial d'aquest tipus de mòdul és de 2.680.760 € *. Per tenir una idea dels costos d'inversió, es mostra en la Taula 10, els ratis d'inversió de diferents tipus d'energia.

Sector energètic	Rati inversió, €/kW
Wave Star	4.468 *
Eòlica	937 **
Minihidràulica	1.500 **
Fotovoltaica	3.500 **

Taula 10. Valors de referència del potencial energètic en diferents zones

Fonts: * *WaveStar*; ** *Plan de Energías Renovables en España 2005-2010*

Tal i com mostren els valors dels ratis d'inversió, l'energia undimotriu és encara força cara, sobretot si es compara amb l'eòlica. Alhora, també s'observa l'elevat cost de la fotovoltaica, tot i que ha estat altament impulsada per l'estat via subvencions, que d'alguna manera reflecteix la bombolla creada en aquest sector. Per tal de que això no succeeixi amb l'energia undimotriu, s'haurà d'esperar a què els costos d'inversió es redueixin, o a què el preu de l'energia pugi molt, com per a què s'incentivi definitivament l'ús de tecnologies per aprofitar el recurs energètic natural de les onades.

D'altra banda, Wave Star, té valorats els costos de producció i manteniment actuals i els que espera assolir en el futur durant l'explotació de la seva tecnologia. A la Figura 65, es mostra l'evolució d'aquests costos, on clarament la tendència futura és a la baixa, però en especial en el preu de la inversió i en el manteniment, mentre que els costos de producció es mantindran relativament similars amb una lleugera reducció.

En l'actualitat el preu del kWh és superior a 1 €, cosa que situa els costos de producció i manteniment molt per sobre d'altres tipus d'energia, ja que per exemple, els costos en l'eòlica estan vora els 0.0632 €/kWh. A més, donat que el preu actual al què es cobra l'energia a Espanya (desembre 2012) és de 0.1456 €/kWh, fa del tot inviable l'explotació, fins que com a mínim els costos no baixin del preu de venda.

Això ens trasllada cap a finals de la dècada per a poder fer un estudi de viabilitat amb garanties de poder recuperar la inversió inicial.

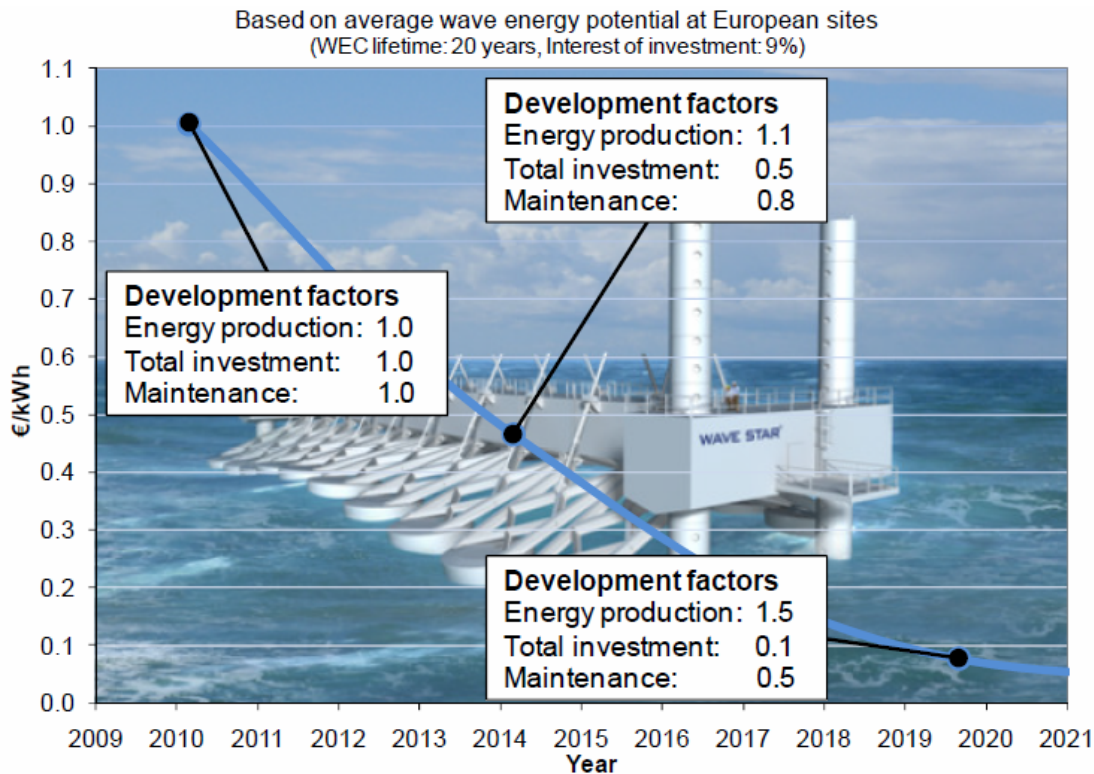


Figura 65. Evolució en costos de producció i manteniment de WaveStar. Font: *WaveStar*

Així doncs, l'estudi de viabilitat s'ha realitzat a partir de l'any 2020 i s'han considerat les següents premisses:

- Vida útil: 20 anys
- Tassa d'actualització: 4% (és important de dir que és un valor molt baix, que seria ajustat per la conjuntura actual i el preu del diner, però possiblement pel 2020 un valor de 6% seria més adequat)
- Augment anual del preu de l'energia: 4% (aquest valor podria ser fins i tot superior, o clarament superior, si es compleixen els pronòstics de que el preu de l'energia anirà pujant de manera considerable en el futur)
- S'han pres els preus dels costos de producció de la Figura 65, on per l'any 2020 s'espera que estiguin vora els 7 c€/kWh i que es redueixin fins a 5 c€/kWh al cap de 5 anys, a partir d'on serà constant
- Despeses generals: 100.000 €/mes
- Impostos: 30%
- Amortitzacions: 100% de la inversió a 20 anys (5% anual)

La finalitat de l'estudi és cercar a partir de quin punt seria viable la inversió segons aquestes consideracions, tenint en compte que els ingressos seran proporcionals a la venda de l'energia produïda que depèn del rendiment en la producció.

En l'actualitat el rendiment de Wave Star és força baix, ja que està prop del 10% tant sols, així que partint d'aquest valor, s'anirà augmentant el percentatge del rendiment fins que la viabilitat de la inversió resulti rentable a 20 anys. El valor del rendiment inclou:

1. Les pèrdues d'energia, que es representen per mitjà de la diferència entre el potencial energètic de les onades (calculat en l'apartat anterior) i l'energia realment produïda; segons els resultats de l'explotació del prototipus instal·lat a les costes daneses, aquest valor està al voltant del 70%
2. El règim de l'onatge; recordem que la corba de potència de Wave Star, indica un màxim productiu per valors d'alçada d'ona entre 2 m i 3 m, amb producció instantània d'entre 15 i 20 kW. Per damunt de 3 m, la producció s'atura per seguretat, i per sota el rendiment es redueix de manera gairebé lineal fins anul·lar-se per sota de 0.5 m.

En les costes de l'Àrea Metropolitana de Barcelona, el 40% del temps, l'onatge és inferior a 0.5 m, i per sota de 1 m s'hi està el 83% del temps. Per aquest motiu el rendiment actual d'aquesta tecnologia és tant baix, prop del 10%.

El mètode utilitzat d'avaluació de la viabilitat econòmica i financera de la inversió, és el VAN (Valor Actual Net), que dóna el valor de tots els fluxos de caixa en el moment inicial, és a dir, ens indica quant valor (amb diner actualitzat) es crea en el projecte. Es determinarà també la TIR (Taxa interna de rendibilitat), que és la taxa que fa que el VAN sigui zero i que ens indica la rendibilitat del projecte. Així mateix es calcula el Payback, o període de recuperació de la inversió, que en el nostre cas quedarà fixat a 20 anys, ja que l'estudi de viabilitat es donarà per bo en el moment en què es recuperi la inversió en la vida útil de la tecnologia, 20 anys.

Segons el valor actual del rendiment no es fa viable la inversió inicial, i s'ha anat apujat el seu valor fins que el valor del VAN ha estat positiu. El valor resultant ha estat de 26.1%, cosa que implica que l'eficiència de la tecnologia hauria de ser molt superior a l'actual, fins al punt que la producció anual es situés al voltant de 1.372.000 kWh a l'any. Donat que el rendiment és tant baix principalment degut al règim de l'onatge i aquest no canviarà, l'única possibilitat d'assolir el percentatge de 26.1% és millorant l'eficiència de la tecnologia.

A les taules següents es mostra l'estudi de viabilitat econòmica i financera i la projecció a 20 anys, on s'aprecien els fluxos de caixa projectats al llarg de la vida útil, i els valors del VAN (9.200,98€) i la TIR (4.03%), un cop es fixa el rendiment en el percentatge necessari per a fer viable la inversió.

Per altra banda, s'ha estudiat el cas, de suposant que la producció i rendiment de la tecnologia es manté, quan hauria d'apujar-se el preu de l'energia per a què la inversió fós viable. Segons aquest anàlisi, el preu de l'energia hauria de patir una pujada de com a mínim el 8.75% anual, per a què la tecnologia actual fos rentable. Els últims fulls de càlcul mostren aquesta valoració.

	Any 2020	Any 2021	Any 2022	Any 2023	Any 2024	Any 2025	Any 2026	Any 2027	Any 2028	Any 2029
Preu kWh	0.20 €	0.21 €	0.22 €	0.22 €	0.23 €	0.24 €	0.25 €	0.26 €	0.27 €	0.28 €
Cost kWh	0.07 €	0.06 €	0.06 €	0.06 €	0.05 €	0.05 €	0.05 €	0.05 €	0.05 €	0.05 €
Prod. kWh/any	1 371.816	1 371.816	1 371.816	1 371.816	1 371.816	1 371.816	1 371.816	1 371.816	1 371.816	1 371.816
Vendes	273 311.77 €	284 244.24 €	295 614.01 €	307 438.57 €	319 736.11 €	332 525.55 €	345 826.57 €	359 659.64 €	374 046.02 €	389 007.86 €
Cost s/Ven	96 027.12 €	82 308.96 €	82 308.96 €	82 308.96 €	68 590.80 €	68 590.80 €	68 590.80 €	68 590.80 €	68 590.80 €	68 590.80 €
Desp. Gen.	100 000.00 €	100 000.00 €	100 000.00 €	100 000.00 €	100 000.00 €	100 000.00 €	100 000.00 €	100 000.00 €	100 000.00 €	100 000.00 €
EBITDA	77 284.65 €	101 935.28 €	113 305.05 €	125 129.61 €	151 145.31 €	163 934.75 €	177 235.77 €	191 068.84 €	205 455.22 €	220 417.06 €
Amortitz.	134 038.00 €	134 038.00 €	134 038.00 €	134 038.00 €	134 038.00 €	134 038.00 €	134 038.00 €	134 038.00 €	134 038.00 €	134 038.00 €
EBIT	-56 753.35 €	-32 102.72 €	-20 732.95 €	-8 908.39 €	17 107.31 €	29 896.75 €	43 197.77 €	57 030.84 €	71 417.22 €	86 379.06 €
Impostos	-17 026.01 €	-9 630.82 €	-6 219.89 €	-2 672.52 €	5 132.19 €	8 969.03 €	12 959.33 €	17 109.25 €	21 425.17 €	25 913.72 €
EBIAT	-39 727.35 €	-22 471.91 €	-14 513.07 €	-6 235.88 €	11 975.12 €	20 927.73 €	30 238.44 €	39 921.59 €	49 992.06 €	60 465.34 €
Amortitz.	134 038.00 €	134 038.00 €	134 038.00 €	134 038.00 €	134 038.00 €	134 038.00 €	134 038.00 €	134 038.00 €	134 038.00 €	134 038.00 €
CF Operatiu	94 310.65 €	111 566.09 €	119 524.93 €	127 802.12 €	146 013.12 €	154 965.73 €	164 276.44 €	173 959.59 €	184 030.06 €	194 503.34 €
Inversió AF	2 680 760.00 €									
Clients	22 775.98 €	23 687.02 €	24 634.50 €	25 619.88 €	26 644.68 €	27 710.46 €	28 818.88 €	29 971.64 €	31 170.50 €	32 417.32 €
Proveïdors	-1 600.45 €	-1 371.82 €	-1 371.82 €	-1 371.82 €	-1 143.18 €	-1 143.18 €	-1 143.18 €	-1 143.18 €	-1 143.18 €	-1 143.18 €
CT Total	21 175.53 €	22 315.20 €	23 262.68 €	24 248.06 €	25 501.50 €	26 567.28 €	27 675.70 €	28 828.46 €	30 027.32 €	31 274.14 €
CT Marginal	21 175.53 €	1 139.68 €	947.48 €	985.38 €	1 253.43 €	1 065.79 €	1 108.42 €	1 152.76 €	1 198.87 €	1 246.82 €
FCF	-2 680 760.00 €	110 426.42 €	118 577.45 €	126 816.74 €	144 759.68 €	153 899.94 €	163 168.02 €	172 806.83 €	182 831.19 €	193 256.52 €
FCF Acumulat	-2 680 760.00 €	-2 497 198.46 €	-2 378 621.01 €	-2 251 804.26 €	-2 107 044.58 €	-1 953 144.64 €	-1 789 976.62 €	-1 617 169.79 €	-1 434 338.60 €	-1 241 082.07 €

VAN	9 200.98 €
TIR	4.03%
Payback	20 anys
Tassa Rendiment % Preu Energia	4.0% 26.1% 4.0%

VALORACIÓ ECONÒMICA SEGONS OPTIMITZACIÓ DEL RENDIMENT DE LA TECNOLOGIA

	Any 2030	Any 2031	Any 2032	Any 2033	Any 2034	Any 2035	Any 2036	Any 2037	Any 2038	Any 2039	Any 2040
Preu kWh	0.29 €	0.31 €	0.32 €	0.33 €	0.35 €	0.36 €	0.37 €	0.39 €	0.40 €	0.42 €	0.44 €
Cost kWh	0.05 €	0.05 €	0.05 €	0.05 €	0.05 €	0.05 €	0.05 €	0.05 €	0.05 €	0.05 €	0.05 €
Prod. kWh/any	1.371.816	1.371.816	1.371.816	1.371.816	1.371.816	1.371.816	1.371.816	1.371.816	1.371.816	1.371.816	1.371.816
Vendes	404.568,18 €	420.750,91 €	437.580,94 €	455.084,18 €	473.287,55 €	492.219,05 €	511.907,81 €	532.384,12 €	553.679,49 €	575.826,67 €	598.859,73 €
Cost s/Ven	68.590,80 €	68.590,80 €	68.590,80 €	68.590,80 €	68.590,80 €	68.590,80 €	68.590,80 €	68.590,80 €	68.590,80 €	68.590,80 €	68.590,80 €
Desp. Gen.	100.000,00 €	100.000,00 €	100.000,00 €	100.000,00 €	100.000,00 €	100.000,00 €	100.000,00 €	100.000,00 €	100.000,00 €	100.000,00 €	100.000,00 €
EBITDA	235.977,38 €	252.160,11 €	268.990,14 €	286.493,38 €	304.696,75 €	323.628,25 €	343.317,01 €	363.793,32 €	385.088,69 €	407.235,87 €	430.268,93 €
Amortitz.	134.038,00 €	134.038,00 €	134.038,00 €	134.038,00 €	134.038,00 €	134.038,00 €	134.038,00 €	134.038,00 €	134.038,00 €	134.038,00 €	134.038,00 €
EBIT	101.939,38 €	118.122,11 €	134.952,14 €	152.455,38 €	170.658,75 €	189.590,25 €	209.279,01 €	229.765,32 €	251.050,69 €	273.197,87 €	296.230,93 €
Impostos	30.581,81 €	35.436,63 €	40.485,64 €	45.736,61 €	51.197,62 €	56.877,07 €	62.783,70 €	68.926,60 €	75.315,21 €	81.959,36 €	88.869,28 €
EBIAT	71.357,56 €	82.685,47 €	94.466,50 €	106.718,77 €	119.461,12 €	132.713,17 €	146.495,31 €	160.828,73 €	175.735,48 €	191.238,51 €	207.361,65 €
Amortitz.	134.038,00 €	134.038,00 €	134.038,00 €	134.038,00 €	134.038,00 €	134.038,00 €	134.038,00 €	134.038,00 €	134.038,00 €	134.038,00 €	134.038,00 €
CF Operatiu	205.395,56 €	216.723,47 €	228.504,50 €	240.756,77 €	253.499,12 €	266.751,17 €	280.533,31 €	294.866,73 €	309.773,48 €	325.276,51 €	341.399,65 €
Inversió AF											
Clients	33.714,01 €	35.062,58 €	36.465,08 €	37.923,68 €	39.440,63 €	41.018,25 €	42.658,98 €	44.365,34 €	46.139,96 €	47.985,56 €	49.904,98 €
Proveïdors	-1.143,18 €	-1.143,18 €	-1.143,18 €	-1.143,18 €	-1.143,18 €	-1.143,18 €	-1.143,18 €	-1.143,18 €	-1.143,18 €	-1.143,18 €	-1.143,18 €
CT Total	32.570,83 €	33.919,40 €	35.321,90 €	36.780,50 €	38.297,45 €	39.875,07 €	41.515,80 €	43.222,16 €	44.996,78 €	46.842,38 €	48.761,80 €
CT Marginal	1.296,69 €	1.348,56 €	1.402,50 €	1.458,60 €	1.516,95 €	1.577,63 €	1.640,73 €	1.706,36 €	1.774,61 €	1.845,60 €	1.919,42 €
FCF	204.098,87 €	215.374,91 €	227.102,00 €	239.298,16 €	251.982,18 €	265.173,55 €	278.892,58 €	293.160,37 €	307.998,87 €	323.430,91 €	339.480,23 €
FCF Acumulat	-1.036.983,20 €	-821.608,29 €	-594.506,29 €	-355.208,13 €	-103.225,95 €	161.947,60 €	440.840,17 €	734.000,54 €	1.041.999,41 €	1.365.430,32 €	1.704.910,55 €

	Any 2020	Any 2021	Any 2022	Any 2023	Any 2024	Any 2025	Any 2026	Any 2027	Any 2028	Any 2029
Preu kWh	0.28 €	0.31 €	0.34 €	0.37 €	0.40 €	0.43 €	0.47 €	0.51 €	0.56 €	0.61 €
Cost kWh	0.07 €	0.06 €	0.06 €	0.06 €	0.05 €	0.05 €	0.05 €	0.05 €	0.05 €	0.05 €
Prod. kWh/any	525.600	525.600	525.600	525.600	525.600	525.600	525.600	525.600	525.600	525.600
Vendes	149.687.39 €	162.785.04 €	177.028.73 €	192.518.75 €	209.364.14 €	227.683.50 €	247.605.81 €	269.271.31 €	292.832.55 €	318.455.40 €
Cost s/Ven	36.792.00 €	31.536.00 €	31.536.00 €	31.536.00 €	26.280.00 €	26.280.00 €	26.280.00 €	26.280.00 €	26.280.00 €	26.280.00 €
Desp. Gen.	100.000.00 €	100.000.00 €	100.000.00 €	100.000.00 €	100.000.00 €	100.000.00 €	100.000.00 €	100.000.00 €	100.000.00 €	100.000.00 €
EBITDA	12.895.39 €	31.249.04 €	45.492.73 €	60.982.75 €	83.084.14 €	101.403.50 €	121.325.81 €	142.991.31 €	166.552.55 €	192.175.40 €
Amortitz.	134.038.00 €	134.038.00 €	134.038.00 €	134.038.00 €	134.038.00 €	134.038.00 €	134.038.00 €	134.038.00 €	134.038.00 €	134.038.00 €
EBIT	-121.142.61 €	-102.788.96 €	-88.545.27 €	-73.055.25 €	-50.953.86 €	-32.634.50 €	-12.712.19 €	8.953.31 €	32.514.55 €	58.137.40 €
Impostos	-36.342.78 €	-30.836.69 €	-26.563.58 €	-21.916.58 €	-15.286.16 €	-9.790.35 €	-3.813.66 €	2.685.99 €	9.754.37 €	17.441.22 €
EBIAT	-84.799.82 €	-71.952.27 €	-61.981.69 €	-51.138.68 €	-35.667.70 €	-22.844.15 €	-8.898.54 €	6.267.32 €	22.760.19 €	40.696.18 €
Amortitz.	134.038.00 €	134.038.00 €	134.038.00 €	134.038.00 €	134.038.00 €	134.038.00 €	134.038.00 €	134.038.00 €	134.038.00 €	134.038.00 €
CF Operatiu	49.238.18 €	62.085.73 €	72.056.31 €	82.895.32 €	98.370.30 €	111.193.85 €	125.139.46 €	140.305.32 €	156.798.19 €	174.734.18 €
Inversió AF	2.680.760.00 €									
Clients	12.473.95 €	13.565.42 €	14.752.39 €	16.043.23 €	17.447.01 €	18.973.62 €	20.633.82 €	22.439.28 €	24.402.71 €	26.537.95 €
Proveïdors	-613.20 €	-525.60 €	-525.60 €	-525.60 €	-438.00 €	-438.00 €	-438.00 €	-438.00 €	-438.00 €	-438.00 €
CT Total	11.860.75 €	13.039.82 €	14.226.79 €	15.517.63 €	17.009.01 €	18.535.62 €	20.195.82 €	22.001.28 €	23.964.71 €	26.099.95 €
CT Marginal	11.860.75 €	1.179.07 €	1.186.97 €	1.290.83 €	1.491.38 €	1.526.61 €	1.660.19 €	1.805.46 €	1.963.44 €	2.135.24 €
FCF	-2.680.760.00 €	37.377.43 €	70.869.34 €	81.608.49 €	96.878.91 €	109.667.24 €	123.479.27 €	138.499.86 €	154.834.75 €	172.598.94 €
FCF Acumulat	-2.680.760.00 €	-2.582.475.91 €	-2.511.606.58 €	-2.429.998.09 €	-2.333.119.17 €	-2.223.451.94 €	-2.099.972.66 €	-1.961.472.80 €	-1.806.638.05 €	-1.634.039.11 €

VALORACIÓ ECONÒMICA SEGONS OPTIMITZACIÓ DEL PREU DE L'ENERGIA

VAN	12.131.12 €
TIR	4.03%
Payback	20 anys
Tassa Rendiment	4.0%
% Preu Energia	10.0%
	8.75%

	Any 2030	Any 2031	Any 2032	Any 2033	Any 2034	Any 2035	Any 2036	Any 2037	Any 2038	Any 2039	Any 2040
Preu kWh	0,66 €	0,72 €	0,78 €	0,85 €	0,92 €	1,00 €	1,09 €	1,19 €	1,29 €	1,40 €	1,52 €
Cost kWh	0,05 €	0,05 €	0,05 €	0,05 €	0,05 €	0,05 €	0,05 €	0,05 €	0,05 €	0,05 €	0,05 €
Prod. kWh/any	525.600	525.600	525.600	525.600	525.600	525.600	525.600	525.600	525.600	525.600	525.600
Vendes	346.320,25 €	376.623,27 €	409.577,81 €	445.415,87 €	484.389,75 €	526.773,86 €	572.866,57 €	622.992,40 €	677.504,23 €	736.785,85 €	801.254,61 €
Cost s/Ven	26.280,00 €	26.280,00 €	26.280,00 €	26.280,00 €	26.280,00 €	26.280,00 €	26.280,00 €	26.280,00 €	26.280,00 €	26.280,00 €	26.280,00 €
Desp. Gen.	100.000,00 €	100.000,00 €	100.000,00 €	100.000,00 €	100.000,00 €	100.000,00 €	100.000,00 €	100.000,00 €	100.000,00 €	100.000,00 €	100.000,00 €
EBITDA	220.040,25 €	250.343,27 €	283.297,81 €	319.135,87 €	358.109,75 €	400.493,86 €	446.586,57 €	496.712,40 €	551.224,23 €	610.505,85 €	674.974,61 €
Amortitz.	134.038,00 €	134.038,00 €	134.038,00 €	134.038,00 €	134.038,00 €	134.038,00 €	134.038,00 €	134.038,00 €	134.038,00 €	134.038,00 €	134.038,00 €
EBIT	86.002,25 €	116.305,27 €	149.259,81 €	185.097,87 €	224.071,75 €	266.455,86 €	312.548,57 €	362.674,40 €	417.186,23 €	476.467,85 €	540.936,61 €
Impostos	25.800,68 €	34.891,58 €	44.777,94 €	55.529,36 €	67.221,53 €	79.936,76 €	93.764,57 €	108.802,32 €	125.155,87 €	142.940,36 €	162.280,98 €
EBIAT	60.201,58 €	81.413,69 €	104.481,87 €	129.568,51 €	156.850,23 €	186.519,10 €	218.784,00 €	253.872,08 €	292.030,36 €	333.527,50 €	378.655,63 €
Amortitz.	134.038,00 €	134.038,00 €	134.038,00 €	134.038,00 €	134.038,00 €	134.038,00 €	134.038,00 €	134.038,00 €	134.038,00 €	134.038,00 €	134.038,00 €
CF Operatiu	194.239,58 €	215.451,69 €	238.519,87 €	263.606,51 €	290.888,23 €	320.557,10 €	352.822,00 €	387.910,08 €	426.068,36 €	467.565,50 €	512.693,63 €
Inversió AF											
Clients	28.860,02 €	31.385,27 €	34.131,48 €	37.117,99 €	40.365,81 €	43.897,82 €	47.738,88 €	51.916,03 €	56.458,69 €	61.398,82 €	66.771,22 €
Proveïdors	-438,00 €	-438,00 €	-438,00 €	-438,00 €	-438,00 €	-438,00 €	-438,00 €	-438,00 €	-438,00 €	-438,00 €	-438,00 €
CT Total	28.422,02 €	30.947,27 €	33.693,48 €	36.679,99 €	39.927,81 €	43.459,82 €	47.300,88 €	51.478,03 €	56.020,69 €	60.960,82 €	66.333,22 €
CT Marginal	2.322,07 €	2.525,25 €	2.746,21 €	2.986,50 €	3.247,82 €	3.532,01 €	3.841,06 €	4.177,15 €	4.542,65 €	4.940,14 €	5.372,40 €
FCF	191.917,50 €	212.926,44 €	235.773,65 €	260.620,00 €	287.640,40 €	317.025,09 €	348.980,94 €	383.732,93 €	421.525,71 €	462.625,36 €	507.321,23 €
FCF Acumulat	-1.442.121,60 €	-1.229.195,17 €	-983.421,51 €	-732.801,51 €	-445.161,11 €	-128.136,01 €	220.844,93 €	604.577,85 €	1.026.103,56 €	1.488.728,92 €	1.986.050,15 €

8. CONCLUSIONS

Finalment es presenten a continuació les valoracions i conclusions que se'n poden extreure de l'anàlisi del potencial energètic davant les costes de l'Àrea Metropolitana de Barcelona.

- Resumint, en el present Informe s'ha intentat valorar els recursos energètics marins davant de a costa de l'AMB en un tram d'uns 45 km y en les aigües costaneres de fins a 20 km de la línia de costa
- Els recursos energètics que s'han estudiat comprenen l'energia de les onades o undimotriu, l'energia dels corrents marins, i l'energia dels gradients de temperatura i salinitat
- No s'han tingut en compte els recursos energètics renovables més utilitzats en l'actualitat com és la eòlica i la solar, donat que són dos recursos altament explotats i estudiats, i tot i que s'haurien de valorar finalment com a recurs potencialment explotable no eren objecte del present Estudi
- S'han utilitzat les dades que caracteritzen el medi marí (onatge, vent, marees, corrents, temperatura i salinitat) disponibles en tota la zona (registres històrics d'onatge, vent, i campanyes de mesura de corrents, temperatures i salinitat)
- S'ha valorat de manera independent cadascun dels recursos energètics, de tal manera, que en primer lloc s'ha determinat la metodologia per definir el potencial energètic de cadascun d'ells, i posteriorment s'ha dut a terme una recerca de les tecnologies existents més adequades per a una possible explotació d'aquests recursos a la zona de l'AMB
- D'entrada es coneix que la capacitat energètica de tots aquests recursos davant les costes barcelonines és molt reduït, però el què s'ha pretès és tenir una referència del potencial existent i determinar quines possibilitats reals d'aprofitament se'n dedueixen
- Per tal de definir aquestes possibilitats, s'han valorat els condicionants tècnics però també econòmics en la situació actual, i s'ha pretès també, definir unes expectatives de futur, que obrin les portes a una possible explotació rentable d'aquests recursos, intentant quantificar de la manera més acurada possible com haurien de variar els condicionants actuals per tal de que això fos possible
- De cara a l'avaluació dels recursos en tota l'àrea, s'ha realitzat simulacions numèriques de propagacions de l'onatge i dels corrents generats per vent i marea

- De l'estudi de l'energia de les onades, se'n pot concloure que el potencial energètic, fent us dels resultats de les propagacions, ha resultat ser molt baix, inferior a 5 kW per metre lineal de costa, fins i tot inferior a d'altres punts del litoral català, tant de la costa de Girona (5,5 kW/m) com de la zona de delta de l'Ebre (6 kW/m)
- Aquests valors són clarament molt baixos si es comparen amb zones amb un alt potencial energètic, com és el nord peninsular, amb quasi 30 kW/m a la zona del Cantàbric i fins a quasi 90 kW/m a la zona de l'Atlàntic, que situa la costa gallega en una de les àrees del planeta amb major capacitat de producció
- D'altra banda, les tecnologies existents, que en són moltes i de molt variades, en general es caracteritzen per requerir fortes inversions, són de molt grans dimensions, i les poques que s'han instal·lat (d'entre les quals destaca el Pelamis a Portugal) han mostrat un punt feble en les despeses de manteniment i en els valors reals del rendiment o eficiència, que fan que cap d'elles sigui avui per avui una possibilitat sostenible per l'aprofitament de l'energia undimotriu, ni tant sols a les àrees amb majors potencials
- A més, la majoria de les tecnologies estan enfocades a aprofitar l'energia de zones amb un potencial, i per tant, no serien adients per la zona mediterrània on més del 80% del temps es succeeixen valors d'alçada d'ona inferiors a 1 m. Tan sols dues tecnologies semblen adients per l'aprofitament d'aquest tipus d'energia en àrees poc energètiques, ja que poden treure'n un rendiment a partir de valors de 0.5 m d'alçada d'ona, com és el cas de la tecnologia danesa WaveStar, i fins i tot per sota, en el cas de la turca Yeti Cluster
- La més avançada de les dues és WaveStar, que compte amb múltiples prototipus provats i testats, el més actual a escala 1:2, i que ofereix alts rendiments i un funcionament prometedor. A més disposen de diferents models comercials, d'entre els què s'ha escollit el Mòdul Wave Star C5 per realitzar l'estudi de la viabilitat econòmica; aquest mòdul està format per una plataforma en la què s'hi ubiquen 20 flotadors de 5 m de diàmetre cadascun i braços de 10 m de longitud, amb un pes total de 1.600 Tn i una potència nominal instal·lada de 600 Kw
- Tenint en compte que es desitgi instal·lar un parc undimotriu segons la tecnologia Wave Star, s'ha suposat que la superfície que necessita cada mòdul C5 correspon a uns 90.000 m², de tal manera que les zones més òptimes situades a més de 5 km de la costa ofereixen valors màxims d'uns 5.96 kWh/m²
- Pel què fa a l'energia dels corrents marins, s'ha analitzat el conjunt de corrents en base als resultats de les simulacions dels corrents generats per vent i mareas, que resulten ser molt petits, i s'ha intentat definir els valors més habituals dels corrents generals, i en especial als corrents de plataforma en base als estudis que s'han fet en l'àmbit del mediterrani nord-occidental ("corrent catalana")

- Així i tot, els valors que s'hi observen són massa petits com per què les tecnologies existents en puguin extreure energia de manera rentable, i el què queda clar és que els corrents més importants, els generals, són alhora els més difícils de conèixer o predir
- De totes elles, SeaGen és la que presenta els majors rendiments, la qual està en instal·lada i en funcionament en diferents llocs, especialment a les Illes Britàniques. L'estudi del potencial energètic, s'ha realitzat amb el supòsit de disposar d'aquesta tecnologia, en concret del model comercial SeaGen "S" que ofereix una potència màxima instal·lada de 2.000 kW, i està compostat d'un màstil i dos rotors, cadascun d'ells amb unes aspes de 11 m de diàmetre, cosa que ofereix un àrea efectiva de 190 m²
- En qualsevol cas, donada la baixa capacitat productiva d'aquest tipus d'energia, no s'ha tingut en compte alhora de fer-ne una valoració econòmica, ja que en cap cas se'n podria extreure'n un rendiment viable o sostenible. Un parc energètic amb aquesta tecnologia tant sols oferiria en les zones més òptimes allunyades de la costa, valors de fins a 1.62 kWh/m²
- El mateix succeeix amb l'energia dels gradients de temperatura i salinitat, donat que és necessari un salt tèrmic de mínim 20°C i un gradient de salinitat de mínim 10 ‰. Això fa que aquest tipus d'energia sigui aprofitable a punts molt concrets del planeta, com és les zones tropicals pels gradients de temperatura de fins a 30°C que s'hi poden arribar a trobar, enfront dels màxim 15°C que es poden trobar davant la costa de Barcelona i tant sols a l'estiu. En quant a la salinitat, tant sols en estuaris amb força cabal d'aigua dolça s'hi pot aconseguir els gradients necessaris, cosa que no succeeix ni a la desembocadura del Besòs ni a la del Llobregat
- Finalment, s'ha intentat realitzar una valoració econòmica del possible aprofitament dels recursos existents, que com s'ha comentat anteriorment es redueix exclusivament a l'energia undimotriu
- La valoració econòmica contempla les despeses d'inversió inicial (compra de tecnologia), que s'hauran de recuperar amb una vida útil estimada de 20 anys, en base a la balança positiva entre ingressos (venta de l'energia produïda) i despeses (que inclouen despeses generals – personal i administratives – així com les despeses de manteniment i els costos de producció)
- Segons la situació actual, la balança d'ingressos i despeses és clarament desfavorable, així que no té sentit realitzar l'estudi econòmic i financer fins que no sigui positiva o la tendència a la baixa de les despeses i a l'alça dels ingressos ho facin viable, i així poder recuperar la inversió inicial

- L'avantatge de tot plegat és que les despeses en la inversió inicial i els costos de producció i manteniment, s'espera que es redueixin en el futur i que el preu de l'energia pugi de manera evident, cosa que farà augmentar els ingressos
- En l'actualitat el rati d'inversió en el sistema WaveStar està vora els 4.500 €/kW, que és molt alt si es compara amb l'eòlica que no arriba a 1.000 €/kW, o la hidràulica, amb 1.500 €/kW
- D'altra banda, el cost de la producció és superior a 1 €/kWh, mentre que a l'eòlica és tant sols de 0.0632 €/kWh, i el què és més important el preu de l'energia actual a Espanya és de 0.1456 €/kWh. Amb això queda clar la no viabilitat a dia d'avui de l'explotació del recurs de les onades en cap dels casos, a no ser que el govern incentivés aquest tipus d'energia primant-ne el preu de la seva producció. De tota manera, aquesta és una mesura inadequada des del punt de vista de la sostenibilitat tal i com va quedar clar en el cas de la solar
- Així doncs, fent una valoració de l'augment del preu de l'energia, fixat en un 4% anual (podria ser superior o clarament superior segons alguns indicatius de futur) i una estimació de la reducció dels costos de producció estimats per la pròpia empresa que comercialitza WaveStar, s'ha procedit a analitzar la viabilitat de la inversió a partir de l'any 2020
- En l'estudi econòmic i financer s'ha fixat una sèrie de premisses com són una taxa d'actualització del 4% (és important de dir que és un valor molt baix, que seria ajustat per la conjuntura actual, però possiblement pel 2020 un valor de 6% seria més adequat), un preu dels costos de producció de 7 c€/kWh que es reduiran fins a 5 c€/kWh, unes despeses generals de 100.000 €/mes, una taxa d'impostos del 30% i el supòsit que el 100% de la inversió s'amortitzarà a 20 anys
- Amb aquestes bases, s'ha avaluat la viabilitat econòmica i financera de la inversió, per mitjà del VAN (Valor Actual Net), que dona el valor de tots els fluxos de caixa en el moment inicial, és a dir, ens indica quant valor (amb diner actualitzat) es crea en el projecte. Es determinarà també la TIR (Taxa Interna de Rendibilitat), que és la taxa que fa que el VAN sigui zero i que ens indica la rendibilitat del projecte. Així mateix es calcula el Payback, o període de recuperació de la inversió, que en el nostre cas quedarà fixat a 20 anys, ja que l'estudi de viabilitat es donarà per bo en el moment en què es recuperi la inversió en la vida útil de la tecnologia (20 anys)
- Amb tot, tant sols queden dos paràmetres lliures que determinaran la viabilitat o no de la inversió, com és el rendiment de la tecnologia, que afecta directament a l'energia produïda i per tant als ingressos, i al preu de l'energia, que s'espera que vagi en augment. L'estudi de viabilitat econòmica s'ha realitzat fixant un d'aquest dos paràmetres i variant-ne l'altre

- El primer anàlisi ha fixat el creixement anual de l'energia en un 4% i s'ha varait el rendiment de la tecnologia. En l'actualitat aquest valor al mediterrani seria molt baix, ja que voltaria el 10%, i principalment es deu al règim de l'onatge. Utilitzant aquest valor, en cap cas es podria recuperar la inversió inicial, i el què s'ha fet és apujar-lo fins obtenir un valor lleugerament positiu del VAN, que faria viable la inversió. Això ens situa en què el rendiment hauria de pujar fins un 26.1%, i donat que el règim marítim no pot canviar, implica que tota la millora s'hauria d'obtenir de l'eficiència de la tecnologia, que en l'actualitat ja volta el 70%. Tot plegat, ens indica que potser fins d'aquí a més de 15 o 20 anys no es podrà plantejar un aprofitament rentable de l'energia undimotriu davant la costa de l'AMB, considerant que la producció anual d'energia volti els 1.372.000 kWh anuals
- D'altra banda, si es manté el rendiment de l'energia fix en un 10%, que suposa una producció de 525.600 kWh a l'any, es podria definir quin augment del preu de l'energia faria viable la inversió. En aquest cas, s'ha obtingut un valor de creixement anual mig de com a mínim 8.75% anual, per tal de què el valor del VAN sigui lleugerament positiu i es pugui recuperar la inversió segons la tecnologia actual

A continuació es presenten un seguit de reflexions i recomanacions per tal de millorar els resultats i anàlisis realitzats en el present estudi:

- És important de mencionar que seria un dels punts dèbils en l'àmbit de l'explotació dels recursos energètics és el de no disposar d'una tecnologia pròpia, cosa que faria que les despeses en la inversió inicial es reduïssin clarament, i ajudarien a fer viable la part econòmica
- D'altra banda, hi ha una manca d'informació en l'àmbit d'altres tipus d'energia, en especial dels corrents marins, que possiblement facilitaria la tasca alhora de definir el potencial energètic real
- El fet de dependre d'altres tecnologies, obliga a estar pendent en tot moment de l'evolució de les existents i de l'aparició de noves i futures tecnologies que podrien ser més econòmiques i eficients en l'aprofitament en especial de l'energia de les onades
- En l'actualitat no existeix un Marc Normatiu a Espanya en l'àmbit de les energies renovables marines, ni s'està incentivant el desenvolupament intern en I+D+i, cosa que podria ajudar a assolir una tecnologia pròpia a mig o llarg termini
- D'altra banda, sembla clar, que el preu de l'energia anirà pujant, i si el creixement és molt alt, podria accelerar la viabilitat en l'explotació d'aquests tipus d'energia, però no cal dir que representa un factor poc atractiu des del punt de vista de la sostenibilitat del Sistema Econòmic, no tant sols de país, sinó també global

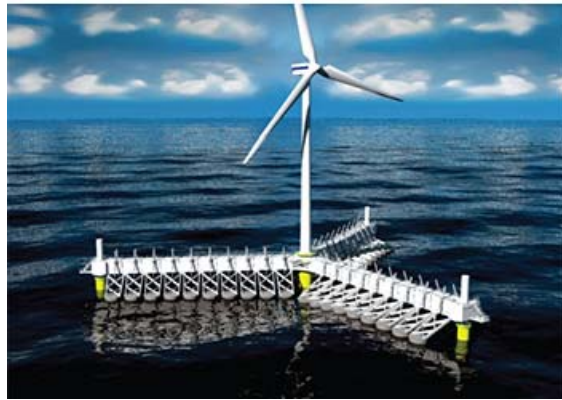
- Tot plegat fa que el dia que s'acosti la possibilitat de fer viable una possible inversió, serà necessari revisar tots els factors i premisses utilitzats en el present Informe, tenint en compte que potser no tindran res a veure cap dels paràmetres que s'han fixat com a premisses
- En cas de que la viabilitat econòmica s'assoleixi segons la màxima productivitat considerant el preu actual de l'energia, que recordem voltaria els 1.372.000 kWh a l'any, considerant un sol mòdul Wave Star C5, i considerant que el consum mitjà de les llars a Catalunya es situa vora els 2.160 kWh/any (Font: www.bcn.cat), estaríem parlant de poder donar electricitat a 635 llars, o el què és el mateix al voltant de 2.500 habitants. Així doncs, per poder donar servei a com a mínim 10.000 habitants, s'hauria d'instal·lar un parc undimotriu amb 4 mòduls C5 de Wave Star

En última instància seria interessant de reflexionar sobre la possibilitat de combinar l'aprofitament energètic d'altres recursos, com per exemple la solar i l'eòlica. En l'actualitat s'està treballant en la investigació de plataformes múltiples, que siguin capaces d'obtenir l'energia de les onades, del vent i del sol, abaratint clarament els costos d'inversió i manteniment, i augmentant-ne els ingressos amb una producció més elevada.

Naturalment, el dia que existeixi una tecnologia prou desenvolupada en aquesta direcció, seria molt interessant de realitzar un estudi complert de la viabilitat productiva, econòmica i financera, que obririen les portes a la possibilitat real d'aprofitar les energies netes en l'àmbit de l'Àrea Metropolitana de Barcelona.

És important de destacar que WaveStar és una de les tecnologies que aposta per aquesta possibilitat i ja hi són treballant en els futurs prototipus:

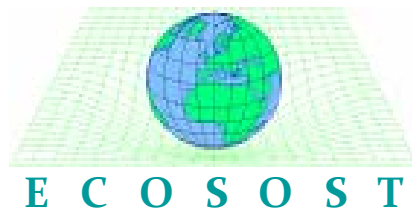




En, Barcelona, a 28 de maig de 2013

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'M. Tomé i Covelo'. The signature is stylized and written in a cursive script.

Fdo. Màrius Tomé i Covelo
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos (nº Colegiado 15.449)



C/ Camí de Lloveres, 36
Sant Feliu de Codines (Barcelona)

Tel. + 34 93 866 33 32
e-mail: seaswell@telefonica.net