



Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

IMPACTE DEL CANVI CLIMÀTIC SOBRE L'ENERGIA DE L'ONATGE A LA COSTA MEDITERRÀNIA DE MARROC

Treball realitzat per:

RICARD CASTRILLO HELGADÓTTIR

Dirigit per:

**JOAN PAU SIERRA PEDRICO i MARC MESTRES
RIDGE**

Grau en:

Enginyeria Civil

Barcelona, **Setembre 2019**

Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i
Ambiental

TREBALL FINAL DE GRAU

Agraïments

Aquest treball marca el final del meu Grau en Enginyeria Civil a l'ETSECCB (UPC Barcelona). Al llarg d'aquests quatre anys he pogut créixer tant personalment com acadèmicament, així que m'agradaria agrair a diverses persones, sense les quals, aquest capítol de la meua vida no hagués estat possible.

Al Doctor Joan Pau Sierra Pedrico, el meu més profund agraïment per la seva paciència, comprensió, temps i dedicació que ha fet possible la realització d'aquest treball. Gràcies per la seva orientació i ajuda en aquest intens camí.

Als professors, companys i amics que he tingut el plaer de conèixer al llarg d'aquests anys a la universitat pel seu acompanyament, la seva energia i el seu recolzament.

A la meua família, i especialment als meus pares Adolf i Astrid, els meus germans Laura i Eric, i a la Maria pel seu suport incondicional al llarg d'aquests anys. Per encoratjar-me i donar-me suport a fi d'aconseguir qualsevol repte que em proposo. Sense ells, no seria la persona que sóc avui.

A totes les increïbles persones que vaig conèixer durant els sis mesos que vaig tenir l'oportunitat d'estudiar i viure al Brasil durant el meu intercanvi a la *Universidade de Sao Paulo*.

Resum:

Impacte del Canvi Climàtic sobre l'energia de l'onatge a la costa mediterrània de Marroc

Autor: Ricard Castrillo Helgadóttir

Tutors: Joan Pau Sierra Pedrico i Marc Mestres Ridge

Paraules claus: Canvi Climàtic, Energia de l'Onatge, Marroc, Potencial de l'Onatge

Al llarg d'aquests darrers anys, nombrosos estudis i publicacions científiques publicades arreu del món concorden en què el Canvi Climàtic és una realitat i que les conseqüències d'aquest són imprevisibles i esfereïdores. Aquest, en la seva gran majoria és causat per les emissions de gasos d'efecte hivernacle produïdes en la combustió dels combustibles fòssils per a generar energia que cobreixi la demanda d'una població, que creix ininterrompudament.

La situació actual és tan insostenible, que ja no en tenim prou amb parar de contaminar, sinó que hem de buscar solucions per a tornar a nivells de contaminació que no es veuen des de fa dècades, mentre que seguim cobrint la creixent demanda energètica de la població.

D'entre totes les fonts d'energia renovable estudiades fins a dia d'avui, hem decidit fer un estudi sobre l'energia de les onades. És una font d'energia emergent, i sabem que els mars i oceans contenen una gran quantitat d'energia desaprofitada, encara que aquesta encara no es troba en fase de comercialització, ja que els prototips per a extreure aquesta energia estan en fase precomercial.

En aquest treball hem realitzat un anàlisi del potencial energètic de la costa mediterrània del Marroc i la seva variació en funció del canvi climàtic. La intenció és que en un futur pròxim, quan aquesta energia renovable es trobi en fase de comercialització, es pugui determinar si pot ser una alternativa al mix energètic del Marroc en la zona de l'estudi.

Per a fer-ho hem estudiat les dades provinents de quatre models numèrics diferents (CMCC, CNRM, GUF, LMD) en tres escenaris, el present (1986 - 2005), i el futur RCP 4.5 i RCP 8.5 (2081 - 2100). En els resultats hem determinat quines serien, a priori, les localitzacions més idònies per a implantar dispositius convertidors de l'energia renovable (WEC).

Resumen:

Impacto del Cambio Climático sobre la energía del oleaje en la costa mediterránea de Marruecos

Autor: Ricard Castrillo Helgadóttir

Tutores: Juan Pablo Sierra Pedrico y Marc Maestros Ridge

Palabras claves: Cambio Climático, Energía del Oleaje, Marruecos, Potencial del Oleaje

A lo largo de estos últimos años, numerosos estudios y publicaciones científicas publicadas en todo el mundo concuerdan en que el Cambio Climático es una realidad y que las consecuencias de este son imprevisibles y estremecedoras. Este, en su gran mayoría es causado por las emisiones de gases de efecto invernadero producidas por la quema de combustibles fósiles para generar energía que cubra la demanda de una población, que crece ininterrumpidamente.

La situación actual es tan insostenible, que ya no nos basta con parar de contaminar, sino que tenemos que buscar soluciones para volver a niveles de contaminación que no se ven desde hace décadas, mientras que seguimos cubriendo la creciente demanda energética de la población.

De entre todas las fuentes de energía renovable estudiadas hasta día de hoy, hemos decidido hacer un estudio sobre la energía de las olas. Se trata de una fuente emergente y sabemos que los mares y océanos contienen una gran cantidad de energía desperdiciada, aunque esta aún no se encuentra en fase de comercialización, ya que los prototipos para extraer esta energía están en fase precomercial.

En este trabajo hemos realizado un análisis del potencial energético de la costa mediterránea de Marruecos y su variación en función del cambio climático. La intención es que en un futuro próximo, cuando esta energía renovable se encuentre en fase de comercialización, se pueda determinar si es una alternativa al mix energético de Marruecos en la zona del estudio.

Para hacerlo hemos estudiado los datos provenientes de cuatro modelos numéricos diferentes (CMCC, CNRM, GUF, LMD) en tres escenarios, el presente (1986 a 2005), y el futuro RCP 4.5 y RCP 8.5 (2081 hasta 2100). En los resultados hemos determinado cuáles serían, a priori, las localizaciones más idóneas para implantar dispositivos convertidores de la energía renovable (WEC).

Abstract:

Climate Change effects on wave energy resource on the Mediterranean coast of Morocco

Author: Ricard Castrillo Helgadóttir

Tutors: Juan Pau Sierra Pedrico y Marc Maestros Ridge

Keywords: Climate Change, Wave energy resource, Morocco, Wave power

Over the past few years, numerous studies and scientific publications worldwide support that Climate Change is a reality and its consequences are unpredictable and alarming. Climate Change is mostly caused by greenhouses emissions, produced by burning fossil fuels to generate energy to satisfy the demand of the world's growing population.

The current situation is unsustainable and it is no longer enough to stop contaminating. We have to find solutions to return to levels of pollution that have not been seen for decades, while we continue to provide the growing energy demand of the population.

Among all the renewable energy sources studied to date, we have decided to do a study about the wave energy resource. It is an emerging source and we know that seas and oceans contain a lot of wasted energy, although this source is not yet in the commercialization phase, since the prototypes to extract this energy are in the pre-commercial phase.

In this paper we have carried out an analysis of the energy potential of the Mediterranean coast of Morocco and its variation depending on climate change. The intention is that, in the near future, when this renewable energy will be in the commercialization phase, we could be able to determine if it is an alternative to the Moroccan energy mix in the study area.

To do this we have studied the data from four different numerical models (CMCC, CNRM, GUF, LMD) in three scenarios, the present (1986 to 2005), and the future RCP 4.5 and RCP 8.5 (2081 to 2100). In the results we have determined which would be, a priori, the most suitable locations to implement wave energy converter (WEC) devices.

Índex

ÍNDEX	7
1.- INTRODUCCIÓ	1
1.1.- PLANTEJAMENT DEL PROBLEMA	1
1.1.1.- <i>Canvi Climàtic</i>	2
1.1.2.- <i>Transició a les Energies Renovables</i>	7
1.1.3.- <i>Efecte del Canvi Climàtic en les energies renovables</i>	8
1.1.4.- <i>Situació actual Marroc</i>	9
1.2.- OBJECTIU GENERALS	10
1.3.- OBJECTIUS ESPECÍFICS	10
1.4.- ESTRUCTURA DE LA TESINA.....	11
2.- ANTECEDENTS	12
2.1.- ESCENARIS DEL CANVI CLIMÀTIC	12
2.2.- ESTUDIS PREVIS DE LES ENERGIES RENOVABLES DE L'ONATGE.....	16
2.3.- EFECTE DEL CANVI CLIMÀTIC EN L'ENERGIA DE L'ONATGE.....	20
3.- DESCRIPCIÓ DE LA ZONA D'ESTUDI	22
3.1.- ZONA D'ESTUDI.....	22
3.2.- MAPA DELS PUNTS	24
3.3.- CARACTERÍSTIQUES DE L'ONATGE A LA ZONA.....	25
4.- METODOLOGIA DE TREBALL	28
4.1.- DADES UTILITZADES	28
4.2.- ESCENARIS	31
4.3.- FÓRMULES UTILITZADES.....	32
4.3.1.- <i>Potència mitjana anual</i>	32
4.3.2.- <i>Variabilitat temporal de la potència mitjana</i>	35
4.3.3.- <i>Distribució direccional de l'onatge</i>	39
5.- RESULTATS	43
5.1.- POTÈNCIA MITJANA ANUAL	43
5.2.- PRODUCCIÓ ANUAL TEÒRICA	47
5.3.- DISTRIBUCIONS TEMPORALS DE LA POTÈNCIA MITJANA.....	47
5.4.- VARIABILITAT TEMPORAL DE LA POTÈNCIA MITJANA.....	49
5.5.- DISTRIBUCIÓ DIRECCIONAL DE L'ONATGE.....	49
6.- ANÀLISIS DELS RESULTATS	61
6.1.- POTÈNCIA MITJANA ANUAL	61
6.2.- PRODUCCIÓ ANUAL TEÒRICA	62
6.3.- DISTRIBUCIONS TEMPORALS DE LA POTÈNCIA MITJANA.....	63
6.4.- VARIABILITAT TEMPORAL DE LA POTÈNCIA MITJANA.....	64
6.5.- DISTRIBUCIÓ DIRECCIONAL DE L'ONATGE.....	64
7.- CONCLUSIONS I TREBALL FUTUR	66
7.1.- CONCLUSIONS	66
7.2.- TREBALL FUTUR	68
8.- REFERÈNCIES	69

1.- Introducció

1.1.- Plantejament del problema

L'arribada de les noves generacions, conscienciades sobre els problemes energètics a escala global i coneixedora dels efectes negatius que aquests poden desencadenar sobre el nostre planeta terra, podia fer pensar en un canvi de tendència energètica.

La realitat però, és una altra. L'Agència internacional de l'Energia (AIE), que és una organització internacional creada després de la crisi del petroli de l'any 1973, i encarregada de coordinar les polítiques energètiques, en el seu informe 'World Energy Outlook 2018' en el qual examina les tendències energètiques a escala global, ens diu que els combustibles fòssils segueixen dominant la demanda mundial d'energia. I no només això, sinó que ho fan amb una participació de més del 80%, percentatge que s'ha mantingut durant més de 3 dècades.

També cal recalcar que, segons l'Organització dels Països Exportadors de Petroli (OPEP), el preu del petroli cru ha sofert un increment del 165% des del 2016. A més a més, cal tenir en compte que, avui en dia ja, el consum dels combustibles fòssils és superior a la seva producció, fet que els converteix en limitats. I aquesta limitació, en un futur pròxim esdevindrà en un augment ininterromput del seu preu.

A aquesta dependència sobre els combustibles fòssils juntament amb l'increment del seu preu, cal afegir-li el creixement desmesurat que està patint la població mundial. Que esdevé en un augment de la demanda energètica.

Ens trobem per tant, davant d'una situació insostenible en la qual, la població mundial està augmentant ininterrompudament, la demanda d'energia està creixent exponencialment i la producció d'aquesta depèn d'un recurs limitat i contaminant. En efecte, la utilització de combustibles fòssils en la producció d'energia, provoca un augment en la generació de diòxid de carboni (CO₂), que ha duplicat la seva concentració des de principis del segle XX fins ara. Aquest augment té com a conseqüència un excés de temperatura o escalfament global, comunament conegut com a Canvi Climàtic.

1.1.1.- Canvi Climàtic

El canvi climàtic és el nom que utilitzem per a referir-nos a la variació global del clima i les temperatures de la Terra. Al llarg de la història, la Terra ha sofert nombrosos canvis climàtics, seria per tant un error creure que és un terme recent.

Tots aquests canvis climàtics han estat causats per fenòmens naturals com poden ser les variacions en els paràmetres orbitals de la terra, els canvis de circulació oceànica, erupcions volcàniques o simplement l'impacte d'un meteorit.

Actualment, existeixen nombroses evidències científiques, que ens fan creure que estem immersos en un nou canvi climàtic. El problema és que aquest cop és diferent dels anteriors, ja que aquest és causat per l'activitat de l'ésser humà. I, a més a més, l'escala temporal dels canvis és molt més petita, és a dir, aquests canvis es produeixen molt més ràpidament que en èpoques anteriors.

Aquestes evidències científiques, es remunten als anys 80 del segle passat. De fet, l'any 1988 el Programa de les Nacions Unides sobre el Medi Ambient i l'Organització Meteorològica Mundial van crear el Grup Intergovernamental d'Experts sobre Canvi Climàtic (GIECC), comunament conegut com a IPCC, de l'anglès 'International Panel on Climate Change'.

La funció de l'IPCC és analitzar la informació científica, tècnica i socioeconòmica, per a poder entendre quins són els elements científics de risc que suposa el canvi climàtic resultant de les activitats humanes. I també, estudiar quines en són les seves possibles conseqüències, com podem aturar-lo o com a mínim atenuar-lo.

L'any 1996 l'IPCC va publicar el seu segon informe on avaluava la situació actual i la previsió futura del canvi climàtic, l'IPCC 1996. En aquest informe, entre d'altres conclusions, es va determinar que la temperatura de la terra havia augmentat en 0,6°C, procés conegut com a escalfament global, 'Global warming' en anglès. També es va concloure que l'augment dels gasos d'efecte hivernacle, deguts a l'activitat de l'home, provocarien un augment d'entre 1°C i 3,5°C durant el segle XXI.

Des que el IPCC va ser fundat ha publicat cinc informes (Assessment reports en anglès, o AR en forma abreviada), i està en procés de redactar el sisè. Les dades i les projeccions que es poden extreure del seu cinquè informe, l'AR5 són les que hem utilitzat per a realitzar aquesta tesina.

Analitzant l'AR5 veiem que la influència humana sobre el canvi climàtic i l'escalfament global és clara, ja que les emissions antropogèniques recents de gasos d'efecte hivernacle són les més altes de la història. En concret, analitzant la figura 1.1, podem veure que aquestes emissions han sofert un increment continuat des del 1970 fins al 2010.

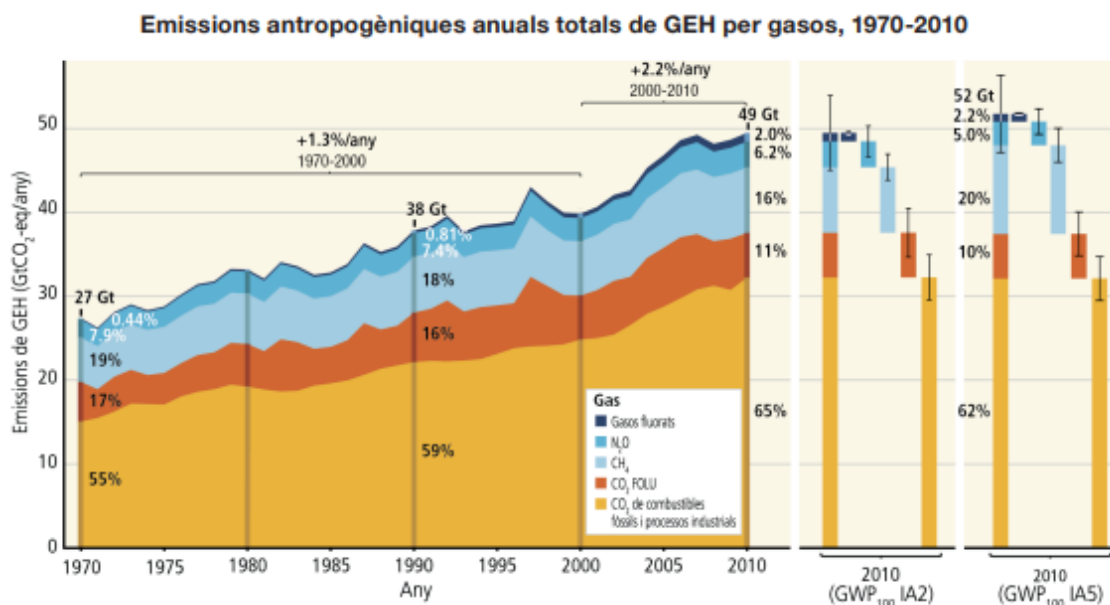


Figura 1.1. Evolució de les emissions antropogèniques totals anuals de gasos d'efecte hivernacle (GEH) durant el període 1970-2010. [Font: AR5, IPCC]

I no només això, sinó que els increments absoluts màxims es troben entre els anys 2000 i 2010. D'altra banda, cal destacar també que el 78% d'aquests gasos d'efecte hivernacle són provinents de la crema de combustibles fòssils i de l'activitat industrial.

Per tant, és evident veure la relació del canvi climàtic amb el creixement demogràfic i econòmic, ja que la població creix de manera ininterrompuda, així com també l'activitat industrial i en conseqüència l'activitat econòmica global.

L'augment en l'emissió de gasos d'efecte hivernacle ha donat lloc a concentracions atmosfèriques de diòxid de carboni (CO₂), metà (CH₄) i òxid nítrós (N₂O) que no tenen precedents en almenys els últims 800.000 anys.

Aquests efectes de l'activitat humana a la terra són molt probablement, la principal causa de l'escalfament global observat des de mitjans del segle XX a la terra (figura 1.2).

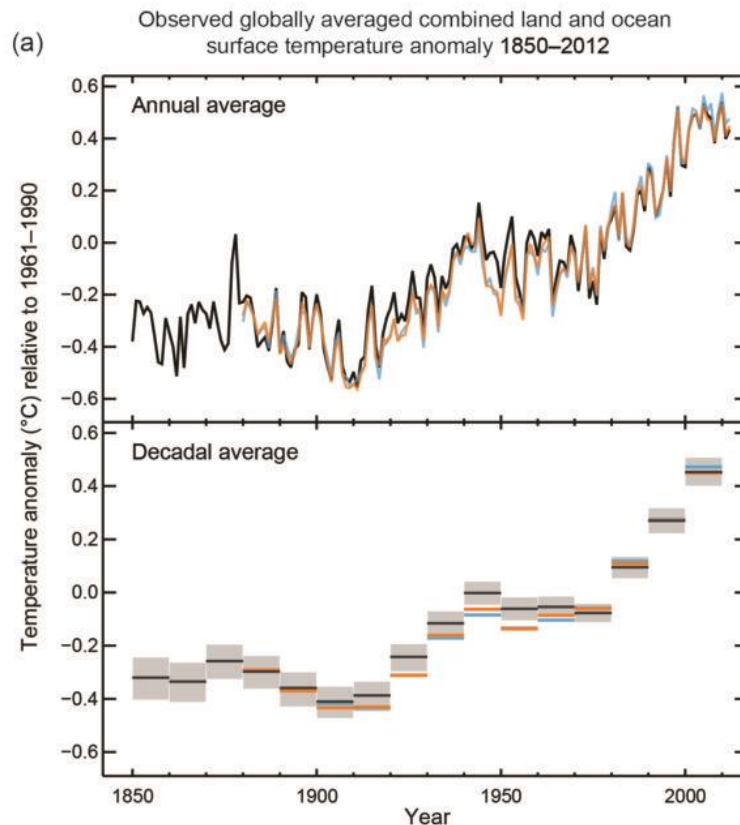


Figura 1.2. Anomalia de la mitjana mundial de temperatures en superfície, terrestres i oceàniques combinades durant el període 1850-2010. [Font: AR5, IPCC]

En el gràfic inferior de la figura 1.2 tenim representades les temperatures mitjanes de cada dècada en el període comprès entre els anys 1850-2010. Fàcilment podem veure que en qualsevol de les últimes tres dècades, la temperatura a la superfície de la terra ha estat més calenta que qualsevol de les dècades precedents des del 1850.

Un altre fet rellevant és que els oceans han estat el sistema que ha emmagatzemat més energia entre el 1971 i el 2010, en total, més d'un 90% de l'energia. Això s'ha traduït amb un augment de la temperatura mitjana dels oceans, sobretot més gran a prop de la superfície terrestre.

Aquest augment de temperatura dels oceans ha provocat la disminució de la superfície mitjana de gel de l'Àrtic en totes les estacions de l'any. En concret ha disminuït entre un 3,5-4,1% per dècada, successivament des de l'any 1979. D'altra banda, l'Antàrtida ha sofert pèrdua de superfície de gel en algunes regions, mentre que n'ha guanyat a d'altres. A més a més, l'increment de temperatura de l'aigua oceànica ha produït un augment del seu volum (anomenat efecte estèric) que s'ha traduït en una pujada del nivell del mar.

Per tant, el Canvi Climàtic, entre altres efectes ha causat un escalfament global. L'escalfament global ha propiciat el desglaç de les zones marines àrtiques i aquest, juntament amb l'efecte estèric, la pujada del nivell mitjà del mar.

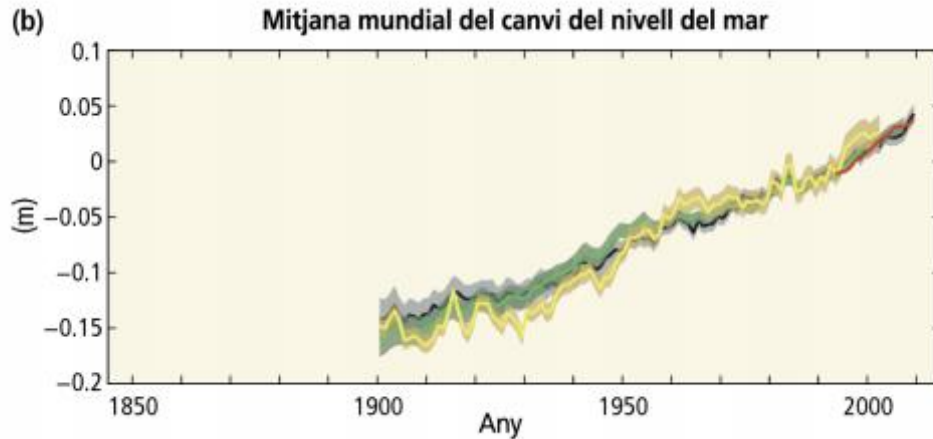


Figura 1.3. Mitjana anual i mundial del canvi del nivell del mar durant el període 1986-205, en relació a diferents conjunts de dades. Els conjunts de dades han estat alineats per tenir el mateix valor l'any 1993, primer any en el qual es van obtenir dades per satèl·lit (representat en color vermell). [Font: AR5, IPCC]

A la figura 1.3, es presenta la variació que ha experimentat el nivell mitjà del mar al llarg del període compres entre els anys 1900-2010. Com podem observar, de l'any 1901 al 2010 el nivell mitjà global del mar s'ha incrementat en 0,19m.

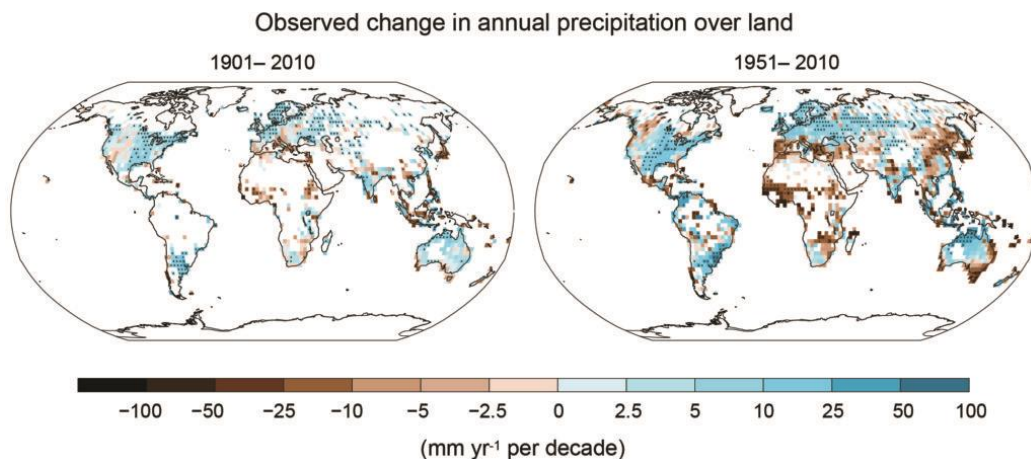


Figura 1.4. Variació anual observada en les precipitacions sobre la superfície terrestre en l'interval 1901-2010 i 1951-2010. [Font: AR5, IPCC]

D'altra banda, a la figura 1.4, podem apreciar clarament com les precipitacions durant les últimes dècades s'han intensificat a les zones on ja plovia en abundància, i per contra, han disminuït a les zones on plovia poc. Per tant, el canvi climàtic també ens està portant a un clima d'extrems, en el que per exemple, les zones del món on hi ha superfícies de sequera augmentaran considerablement i en les zones en què és habitual que hi hagi tempestes, aquestes es produiran amb més freqüència.

En concret, en els últims 60 anys, s'han observat canvis significatius en els esdeveniments meteorològics extrems. Les temperatures mínimes han baixat i les temperatures màximes han pujat.

Per tant després d'explicar que és el canvi climàtic, com s'ha originat, quines estan sent les seves conseqüències i d'estudiar la situació actual en la qual ens trobem, podem treure les següents conclusions:

- a) És evident que estem immersos en un procés de canvi climàtic.
- b) És evident que aquest canvi climàtic és causat per activitats d'origen antropogènic.
- c) És evident que un dels principals causants d'aquest canvi climàtic són les elevades emissions de gasos d'efecte hivernacle, en gran mesura produïts per la crema de combustibles fòssils.

Les conseqüències del Canvi Climàtic per al futur són esfereïdores i incertes. El que és evident és que les emissions acumulades de CO₂ determinaran en gran mesura les conseqüències d'aquest. Per tant, si seguim amb la mateixa tendència energètica, es preveuen sequeres, inundacions, incendis, augment de la temperatura i del nivell del mar, etc.

Aquests greus impactes seran irreversibles per a persones i ecosistemes. Però ens equivocariem si només concebéssim el canvi climàtic com un problema mediambiental, ja que aquest, ve lligat de conseqüències econòmiques i socials, principalment en els països càlids i emergents, ja que aquests estan dotats d'una pitjor infraestructura per suportar aquests fenòmens naturals.

Aquesta problemàtica és un repte per la societat, i en el nostre cas, en l'àmbit de l'enginyeria, és un desafiament en la recerca d'alternatives i solucions per a eliminar aquesta dependència sobre els combustibles fòssils i les emissions contaminants que aquests generen.

En altres paraules, és hora de centrar bona part dels nostres recursos en l'estudi de les energies renovables.

1.1.2.- Transició a les Energies Renovables

Les energies renovables són el conjunt de fonts d'energia netes, inesgotables i cada vegada més competitives, que els humans som capaços de transformar en energia útil. Es diferencien dels combustibles fòssils en gran mesura per la seva diversitat, el seu potencial d'aprofitament arreu del món, perquè no produeixen emissions de gasos d'efecte hivernacle, ni emissions contaminants i, sobretot, perquè no s'esgoten, ja que la seva taxa de reposició és superior a la del seu consum.

A més a més, el seu preu està anant a la baixa, mentre que el preu dels combustibles fòssils segueix amb la seva tendència ascendent. Aquest és un factor clau en països emergents, que es troben en ple desenvolupament.

No queda dubte doncs, que el desenvolupament de les energies renovables és imprescindible per fer front al Canvi Climàtic i deixar enrere la situació insostenible a la qual hem arribat. Ens trobem per tant, davant d'una transició cap a un sistema energètic basat en les energies renovables.

Actualment tenim 7 grans tipus d'energia renovable:

Energia solar: És aquella provinent del sol. Generalment absorbim la radiació solar mitjançant plaques solars. També existeix l'energia solar termoelectrica, que utilitza la radiació solar per a escalfar un fluid, fins a generar vapor i aquest conseqüentment acciona una turbina.

Energia eòlica: És aquella que utilitza la força del vent mitjançant aerogeneradors.

Energia hidroelèctrica: És aquella que utilitza la força de l'aigua. Un exemple en serien les preses.

Biomassa: Consisteix en la combustió de residus orgànics d'origen animal i vegetal.

Biogàs: Produïm energia mitjançant un gas combustible que obtenim bio degradant matèria orgànica.

Energia del mar: Dintre de les energies del mar trobem per una banda l'energia mareomotriu, que és aquella que utilitza la força de les mareas. D'altra banda trobem l'energia undimotriu o onamotriu en la qual utilitzem l'energia de les onades per a generar electricitat. Menys desenvolupades estan l'energia tèrmica oceànica i la obtinguda a partir de gradients salins.

Energia geotèrmica: És aquella que utilitza les altes temperatures de l'interior de la terra. Generalment a terrenys volcànics.

D'entre totes les energies renovables esmentades, en aquesta tesina ens centrarem en aquelles que provenen del mar. En concret, ens centrarem en l'energia provinent de l'onatge, la qual analitzarem en detall més endavant.

1.1.3.- Efecte del Canvi Climàtic en les energies renovables

El Canvi Climàtic ha tingut un més que notable impacte en les energies renovables. A mesura que la preocupació per les conseqüències del Canvi Climàtic ha anat agafant força, les energies renovables han crescut en tots els sentits.

Hi ha hagut una major inversió en la investigació de les energies renovables, que ha esdevingut en un avanç tecnològic important i amb una baixada dels preus per la competència dintre del sector.

S'ha canviat la legislació per incentivar l'ús de les energies renovables. Per exemple la Unió Europea ha plantejat objectius d'ús de les energies renovables que són d'obligat compliment per als seus membres. Bàsicament aquests objectius fan referència al tant per cent de participació de les energies renovables en la producció d'energia.

També cal recalcar la implicació de les empreses. Actualment les empreses prefereixen l'ús de productes i processos que són més respectuosos amb el medi ambient.

Per últim, també hi ha la incertesa dels efectes directes que pot tenir sobre certes fonts d'energia renovables. Per exemple, en el nostre cas d'estudi, és sabut que el Canvi Climàtic ha tingut un impacte directe en els oceans i en el clima.

L'energia de les onades, en gran mesura, ve condicionada per la seva altura. Com més gran és l'altura d'ona, més elevada és l'energia d'aquesta. D'altra banda, les onades són causades pel vent, i aquest està sent afectat pel canvi climàtic. Per tant, no és difícil

imaginar, que el canvi climàtic pot jugar un paper important en el futur de l'energia de les onades.

1.1.4.- Situació actual Marroc

Hem considerat oportú realitzar el nostre estudi al Marroc, ja que és un país emergent amb una gran dependència dels combustibles fòssil, dels quals no n'és productora.

Com podem apreciar a la figura 1.5, Marroc està experimentat un creixement demogràfic gairebé lineal durant aquestes últimes dècades. De l'any 1960 a l'actualitat ha augmentat la seva població en un 192%.

Aquest creixement demogràfic, juntament amb el creixement econòmic i la constant arribada de noves tecnologies està significant un augment constant de la demanda d'energia. En concret, l'energia total consumida ha augmentat en un 32,4% des del 2006.

Aquest creixement el podem considerar crític, ja que el mix energètic de matèries primeres actual al Marroc està compost en un 90% per combustibles fòssils, i en el cas de la demanda d'electricitat en un 80%.

El més significant però, és que el Marroc no té combustibles fòssils, sinó que els importa. L'any 2017 la factura d'importació d'energia al país va ser de 6,3 billons d'Euros.

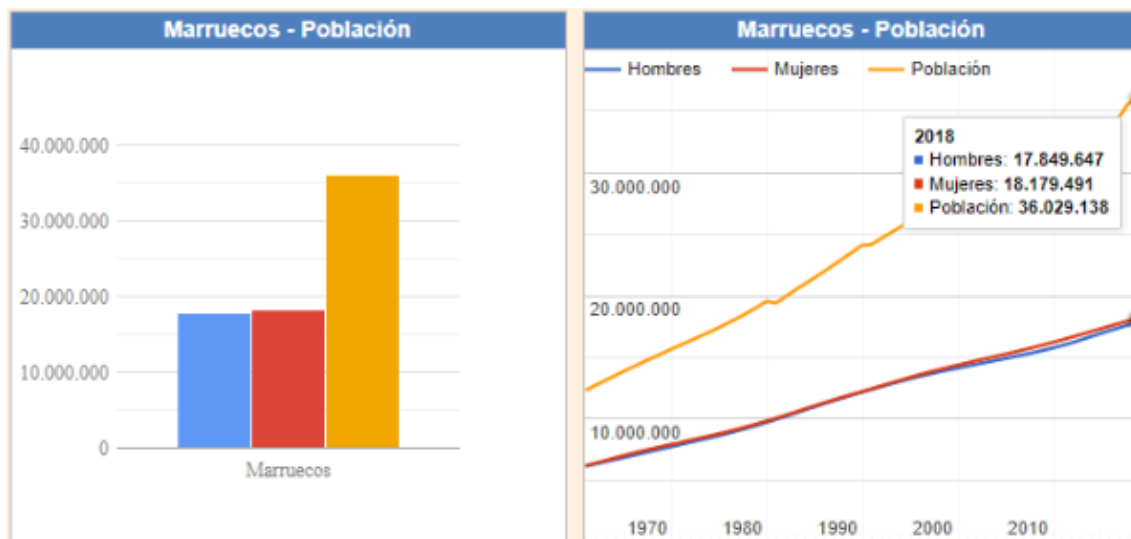


Figura 1.5. Evolució demogràfica del Marroc al llarg dels últims 58 anys.

[Font: Expansión, “Marruecos – Población”, 2019]

Per tant, ens trobem davant d'un país amb una demanda creixent d'energia, una dependència altíssima sobre els combustibles fòssils, i també una dependència en la importació d'aquests, que suposa un preu desorbitat.

Tot i això, la política energètica del país ha vist grans progressos des que l'Agència Internacional de l'Energia (AIE) va desenvolupar un estudi profund sobre la situació energètica del país l'any 2014.

L'any 2015, el monarca Mohamed VI va redefinir la política energètica amb la intenció que al 2020 el mix energètic total del país estigues compost en un 52% per energies renovables (20% solar, 20% eòlica i 12% hidràulica).

Davant d'aquesta previsió d'implementació de l'energia renovable en el mix energètic, com a solució a la dependència en els combustibles fòssils, la intenció d'aquesta tesina és aportar una solució alternativa a les fonts d'energia considerades anteriorment.

1.2.- Objectiu generals

L'objectiu principal d'aquesta tesina és analitzar la capacitat energètica de l'onatge a la costa mediterrània del Marroc en la situació present i futura, tenint en compte l'efecte que el canvi climàtic tindrà sobre aquesta. També s'analitzarà la possibilitat d'extreure'n energia renovable per a proporcionar una solució a la dependència del Marroc en la importació d'energia, i al nostre planeta en la dependència dels combustibles fòssils.

1.3.- Objectius específics

El nostre objectiu general anirà lligat als següents objectius específics:

- Conèixer l'estat actual del canvi climàtic, i l'evolució que s'espera d'aquest en un futur.
- Conèixer els estudis previs sobre l'extracció d'energia de les ones arreu del món.
- Estudiar la relació entre el canvi climàtic i l'energia de les ones.
- Conèixer les característiques de l'onatge en l'àrea d'estudi.

- Analitzar l'efecte del canvi climàtic en l'energia de les onades (a la zona d'estudi) comparant la situació present i futura.
- Analitzar la viabilitat d'extreure energia de les onades a la zona d'estudi.

1.4.- Estructura de la tesina

La tesina s'ha dividit en els següents capítols:

- El primer capítol ha estat una presentació a la problemàtica que aquesta tesina pretén estudiar, així com també s'ha explicat l'estructura i els objectius generals i específics d'aquesta.
- En el segon capítol s'estudiaran els antecedents. Aquest capítol estarà subdividit en tres temàtiques diferents. La primera d'elles consistirà en estudiar els escenaris en què es projecta el canvi climàtic, la segona serà un repàs als estudis previs realitzats sobre l'energia de l'onatge i per últim analitzarem els efectes del canvi climàtic en l'energia de l'onatge.
- En el tercer capítol farem una descripció de la zona d'estudi i de les característiques de l'onatge a la zona.
- En el quart capítol s'exposarà el material i la metodologia emprada per a realitzar aquesta tesina. Això inclou les dades que hem fet servir, els escenaris que hem estudiat, les fórmules que hem fet servir per a obtenir els resultats desitjats, així com les comparacions que hem fet.
- En el cinquè capítol es presentaran els resultats obtinguts a partir de la metodologia exposada en l'apartat anterior. Aquests resultats vindran acompanyats de taules i gràfics.
- En el sisè capítol farem una anàlisi/discussió dels resultats obtinguts.
- I per acabar, en el setè i últim capítol, presentarem les conclusions a les quals s'ha arribat realitzant aquesta tesina.

2.- Antecedents

2.1.- Escenaris del Canvi Climàtic

Les emissions antropogèniques dels gasos d'efecte hivernacle venen condicionades principalment per les dimensions de la població, l'activitat econòmica, l'estil de vida, l'ús d'energia, la tecnologia i la política sobre el clima.

En funció d'aquestes variables, l'IPCC ha generat unes trajectòries de concentració de gasos representatives anomenades RCP de l'anglès 'Representative Concentration Pathways', que ens permeten fer projeccions.

Mitjançant aquestes projeccions podem analitzar les possibles futures tendències en les emissions de gasos d'efecte hivernacle i les respectives acumulacions atmosfèriques i les emissions de contaminants a l'aire al segle XXI. Aquestes projeccions són representades en quatre escenaris diferents:

- RCP-2.6: Escenari en el qual les emissions d'efecte hivernacle es redueixen dràsticament. Aquesta trajectòria representa l'escenari que té com a objectiu (per al any 2100) mantenir l'escalfament global per sota dels 2°C respecte a les temperatures preindustrials.
- RCP-4.5: Escenari intermedi.
- RCP-6.0: Escenari intermedi.
- RCP-8.5: Escenari en el qual les emissions d'efecte hivernacle augmenten considerablement.

Per fer-nos una idea, si seguíssim la tendència actual del planeta, sense prendre mesures addicionals per a mitigar les emissions dels GEH, ens trobaríem en una trajectòria situada entre les RCP-6.0 i RCP-8.5. El valor que acompanya a cada escenari, és l'estimació de la diferència entre l'energia radiada rebuda a la Terra i l'energia radiada retornada a l'espai l'any 2100 en unitats de W/m², respecte als mateixos valors en la època preindustrial.

En la figura 2.1, podem veure un gràfic, en el qual hi ha representada la tendència que seguirà cada un dels escenaris anteriorment descrits (línies) pel que fa a les emissions de gasos d'efecte hivernacle per any, al llarg del segle XXI. També hi ha una classificació (zones acolorides) de les emissions anuals segons el GTIII (III Grup Intergovernamental de Treball d'Experts sobre el Canvi Climàtic).

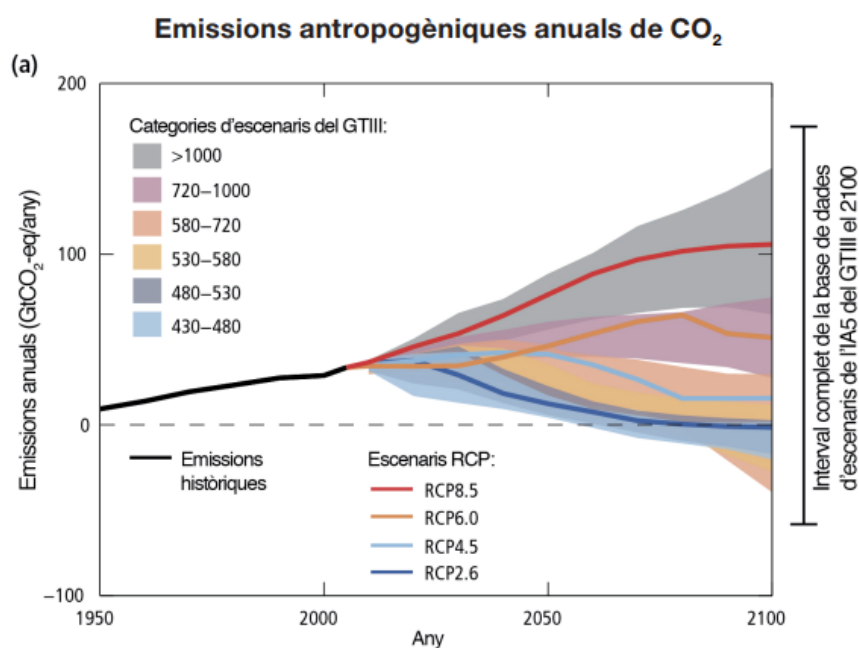


Figura 2.1. Emissions de diòxid de carboni (CO₂) en funció de les trajectòries RCP i les categories associades als escenaris pel GTIII. [Font: AR5, IPCC, 2013]

D'altra banda, a la figura 2.2, podem fàcilment apreciar que hi ha una relació pràcticament lineal entre l'augment de temperatura mitjana mundial, i l'augment de la concentració d'emissions antropogèniques de CO₂. A més a més, podem afirmar que per cada nivell de variabilitat de la temperatura, existeix un rang d'emissions de CO₂ antropogèniques acumulades.

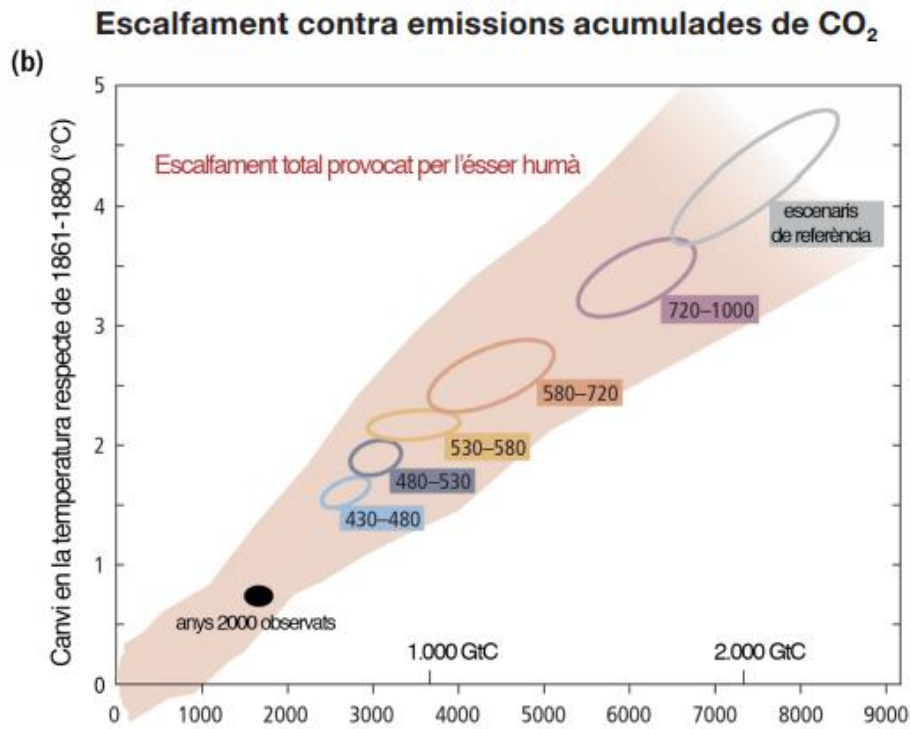


Figura 2.2. Augment de la temperatura mitjana mundial en superfície en funció de les emissions acumulades de diòxid de carboni (CO₂) expressades en GtCO₂. [Font: AR5, IPCC, 2013]

Si ens fixem en les temperatures mitjanes mundials de cada escenari, podem apreciar, que ni en el millor dels escenaris d'emissions descrits anteriorment, podem mantenir la temperatura mitjana mundial. És a dir, en la millor de les previsions, l'escalfament global continuarà. En les nostres mans però, està decidir quin en serà l'augment.

Per tant, la IPCC el que ens dóna són quatre escenaris en els quals el canvi climàtic jugarà un paper diferent en funció de les emissions de GEH.

Com no pot ser d'altra manera, a la figura 2.3, si ens fixem en el gràfic (a) podem veure, que si fem una comparativa en l'evolució que tindrà la temperatura mitjana de la superfície terrestre, entre els escenaris RCP-2.6 i RCP-8.5, en el cas del RCP-8.5 les temperatures mitjanes seran més elevades. Cal recalcar que l'hemisferi nord en ambdós casos patirà un escalfament global més significatiu.

A més a més l'escenari RCP-8.5 també ens portara un increment més considerable en el número de precipitacions per any, també més accentuat a l'hemisferi nord (figura 2.3b).

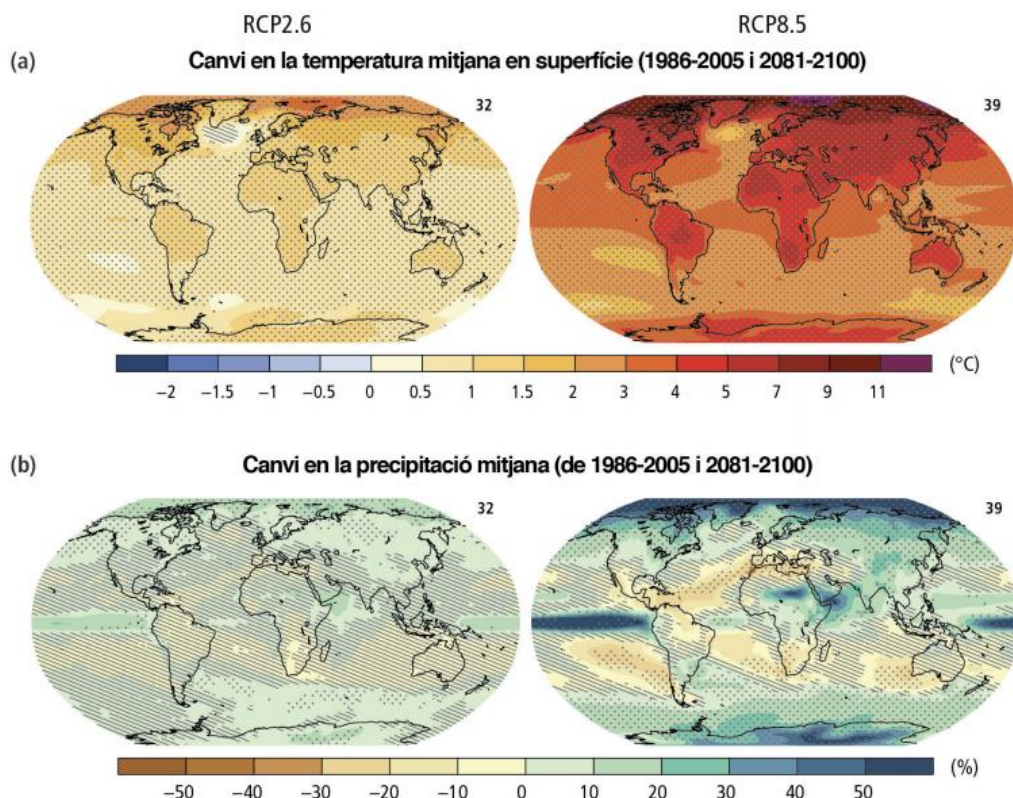


Figura 2.3. (a) Canvi de la temperatura mitjana en superfície per al període 2081-2100 comparat amb el període 1986-2005. Segons l'RCP-2.6 i l'RCP-8.5. (b) Canvi de la precipitació mitjana per al període 2081-2100 comparat amb el període 1986-2005. Segons l'RCP-2.6 i l'RCP-8.5.

[Font: AR5, IPCC, 2013]

Després d'analitzar l'última figura, podem treure una conclusió molt representativa. Com majors siguin les emissions de GEH (RCP-8.5), majors seran les temperatures i més freqüents seran les precipitacions. Per tant, si no actuem, estem abocats a un clima en el qual es produiran extrems càlids amb més freqüència, tindrem onades de calor més regularment i els episodis de precipitació extrema seran més intensos i freqüents arreu del planeta. Això no és d'estranyar, ja que com hem explicat en l'apartat 2.1 una de les conseqüències del canvi climàtic, és que accentua els extrems.

Un cop hem entès com funciona la proposta dels escenaris de l'IPCC, podem afirmar que el nostre clima canviarà raonablement al llarg del segle XXI en funció de l'escenari d'emissions que escollim.

Els escenaris del canvi climàtic aniran divergint fins al 2100 i més enllà. Per tant seria bo poder establir uns rangs, de manera que puguem entendre millor com els escenaris

divergeixen entre si. Els rangs els hem establert en funció de dues variables significatives, les temperatures mitjanes mundials de la superfície terrestre i el nivell mitja global del mar.

	Scenario	2046–2065		2081–2100	
		Mean	Likely range ^c	Mean	Likely range ^c
Global Mean Surface Temperature Change (°C) ^a	RCP2.6	1.0	0.4 to 1.6	1.0	0.3 to 1.7
	RCP4.5	1.4	0.9 to 2.0	1.8	1.1 to 2.6
	RCP6.0	1.3	0.8 to 1.8	2.2	1.4 to 3.1
	RCP8.5	2.0	1.4 to 2.6	3.7	2.6 to 4.8
	Scenario	Mean	Likely range ^d	Mean	Likely range ^d
Global Mean Sea Level Rise (m) ^b	RCP2.6	0.24	0.17 to 0.32	0.40	0.26 to 0.55
	RCP4.5	0.26	0.19 to 0.33	0.47	0.32 to 0.63
	RCP6.0	0.25	0.18 to 0.32	0.48	0.33 to 0.63
	RCP8.5	0.30	0.22 to 0.38	0.63	0.45 to 0.82

Taula 2.1. Comparatiu dels canvis projectats en les temperatures mitjanes mundials de la superfície terrestre i el nivell mitja global del mar en els períodes 2046-2065 i 2081-2100, respecte al període 1986-2005. [Font: AR5, IPCC, 2013]

A la Taula 2.1, podem veure com a llarg termini els efectes desfavorables van augmentant en una escala proporcional a l'escenari al qual ens trobem, és a dir, com més gran és el valor del RCP, més extremes en seran les conseqüències.

Per a realitzar aquesta tesina, hem utilitzat dades basades en les trajectòries RCP-4.5 i RCP-8.5. Això ha estat així, ja que hem considerat que l'escenari RCP-2.5 creiem que no és un escenari possible tenint en compte les polítiques energètiques i climàtiques actual, i també, creiem que la societat no està suficientment conscienciada com per a fer un canvi tan radical en el dia a dia.

Dels tres escenaris restants ens hem quedat amb l'RCP-4.5, ja que hem considerat oportú posar-nos en la situació més favorable dintre de les dues intermèdies, i també hem escollit l'RCP-8.5, ja que era la situació més perjudicial.

2.2.- Estudis previs de les energies renovables de l'onatge

L'energia del mar o oceànica és aquella que engloba totes les fonts d'energia renovables provinents dels mars o oceans.

Els oceans són grans extensions de massa d'aigua en moviment que cobreixen aproximadament el setanta-cinc per cent de la superfície del planeta. D'altra banda, si a

la gran dimensió d'aquests li afegim que el 37% de la població global del món viu en comunitats costaneres, seria una incoherència no considerar-los una solució o alternativa a la creixent demanda energètica.

D'entre totes les fonts d'energia renovables oriündes dels oceans, esmentades al capítol 1, en aquesta tesina ens centrarem en l'estudi de l'energia renovable provinent de l'onatge.

Les ones són pertorbacions de la superfície d'un líquid, generalment en la interfase amb un gas. Són un moviment oscil·latori ja que, en general, encara que les partícules situades a la columna d'aigua es mouen endavant i endarrere, no hi ha transport net de massa d'aigua.

Aquestes ones poden ser generades per diversos factors com ara el vent, que genera les ones conegudes com a ones de vent, en anglès 'wind waves'.

Les ones de vent es formen als mars, oceans, rius, canals, llacs o qualsevol altre cos líquid degut a la força que realitza el vent sobre les superfícies d'aquests. Als oceans però, és on aquestes onades es fan més grans, ja que és on tenen una superfície més gran per a la seva formació.

Per tant, la formació de les onades vindrà condicionada per diversos factors:

- a) Velocitat del vent que actua sobre la superfície de l'oceà. Aquest en determinarà la seva intensitat.
- b) Àrea de la superfície de l'oceà sobre la qual el vent pot fer efecte, en anglès "*fetch*".
- c) Temps que disposa el vent per bufar.
- d) Profunditat de l'aigua.

L'energia generada per les onades és coneguda com a energia undimotriu o energia onamotriu, i és aquella que permet l'obtenció d'electricitat a partir de l'energia mecànica (cinètica i potencial) de les onades.

En concret, l'energia que contenen les onades, és aquella energia que ha estat transmesa pel vent a l'oceà. A mesura que el vent bufa sobre l'oceà, es crea una interacció

entre els dos fluids, que permet la transmissió de l'energia del vent a l'aigua, creant les onades.

Aquestes onades emmagatzemen l'energia com a energia potencial (aigua desplaçada del nivell mitjà de la superfície de l'aigua) i energia cinètica (moviment de les partícules de l'aigua).

L'altura i el període de les ones serà per tant funció de l'energia transmesa, que com hem comentat abans, és funció de la velocitat del vent, del temps que bufa el vent, l'àrea que te el vent per bufar i la profunditat de la massa d'aigua.

Les onades que presenten una major quantitat d'energia són les anomenades ones de gravetat, que són aquelles que tenen una longitud d'ona superior als 1,73cm, o bé un període d'ona d'entre 1 i 30 segons. Aquestes són generades per l'acció del vent, i tenen la gravetat com a força restauradora.

Explica't d'una manera més entenedora, tenim per una banda el vent aixecant la superfície de l'aigua, i d'altra banda la gravetat intentant tornar a posar-la en la situació d'equilibri. I aquest cicle d'anar pujant i baixant la superfície de l'aigua mentre es trasllada, va generant l'energia cinètica i potencial d'aquesta.

L'energia undimotriu però presenta grans avantatges respecte a altres fonts d'energia renovable:

- a) Possibilitat de conèixer el clima d'onatge i, per tant, de determinar les zones amb condicions òptimes per a una major producció d'energia.
- b) Per extreure'n l'energia no necessitem combustibles i, per tant, no es produeixen emissions durant la fase d'operació.
- c) És un recurs totalment renovable i, en conseqüència, inesgotable.
- d) Pot produir-se una gran quantitat d'energia, ja que el potencial energètic de les ones al oceà és molt alt.
- e) El seu punt d'instal·lació és flexible.

D'altra banda, aquesta també presenta certs inconvenients:

- a) És una tecnologia en fase de proves i encara no hi ha moltes plantes pilot.
- b) La instal·lació pot patir danys durant els temporals.

- c) Té un cert impacte ambiental visual, en cas que la instal·lació estigui en aigües someres.

Els mars i oceans però, no presenten una energia de l'onatge constant arreu del planeta (espai), ni al llarg de totes les estacions de l'any (temps), sinó que hi ha zones i èpoques més propícies per a la utilització d'aquest tipus d'energia renovable.

El que interessa però, com a qualsevol sistema d'energia renovable que vulguem implantar, és trobar una posició en la qual les condicions de l'onatge al llarg de l'any siguin el més estable possibles, per a que l'extracció d'energia pugui ser el més constant possible.

A la figura 2.4, podem veure representada la distribució de l'energia global mitja anual de l'onatge arreu del planeta.

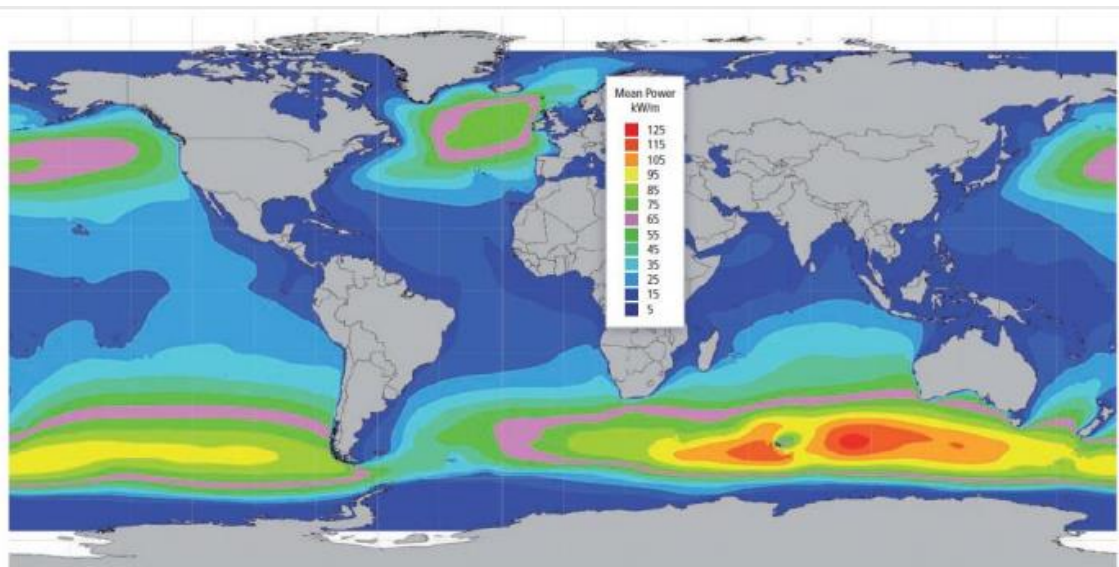


Figura 2.4. Mapa de la distribució global de la mitjana anual d'energia de l'onatge. [Font: Renewal Energy Sources and Climate Change Mitigation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Group III]

Com podem apreciar, la potència energètica mitja anual en KW/m és més elevada a l'hemisferi sud, arribant a valors pròxims als 120KW/m. Per contra, la potència mitja anual més estesa al llarg del planeta està al voltant dels 15 - 35 KW/m.

La variabilitat estacional és més elevada, en general, a l'hemisferi nord. Si més no, la zona en la qual les onades més energètiques de la terra són generades, és entre les latituds

30° i 60°. Això és degut al fet que, entre aquestes latituds es produeixen les tempestes més energètiques.

Cal esmentar que a la bibliografia es poden trobar nombrosos estudis que s'han fet per avaluar la potència energètica de les ones, tant a nivell global (Cornett et al., 2008; Arinaga i Cheung, 2012; Gunn i Stock-Williams, 2012) com local o regional (Iglesias i Carballo, 2010, 2011; Rusu i Guedes Soares 2012a, 2012b; Liberti et al., 2013; Stopa et al., 2013; Vicinanza et al., 2013; Sierra et al., 2013, 2014, 2017a; Gonçalves et al., 2014; Gillou i Chapalain, 2015; Silva et al., 2015; Besio et al., 2016.

Més endavant, al capítol tres, analitzarem en detall les característiques de l'onatge de la nostra zona d'estudi.

L'Onatge, per tant, és una de les fonts d'energia renovable més noves de la qual se n'espera una petita participació en la matriu energètica global a curt termini. Això és degut al fet que al llarg d'aquests últims anys s'ha vist condicionada per la falta de recursos econòmics per a la recerca, fet que ha provocat que avui en dia encara es trobi en fase de desenvolupament. De fet, tots els dispositius tecnològics per extreure l'energia de les onades es troben en fase precomercial, ja que són en la gran majoria prototips en continua millora.

2.3.- Efecte del canvi climàtic en l'energia de l'onatge

Com ja em explicat anteriorment, l'energia de l'onatge jugarà un paper clau a l'hora de diversificar la matriu energètica del planeta en un mig termini, amb l'objectiu d'aconseguir els nivells mínims de consum de combustibles fòssils establerts per les lleis de transició energètica. Degut a això, cal analitzar si aquesta energia renovable estarà condicionada pels efectes del canvi climàtic.

Durant els últims 40 anys s'han experimentat canvis significatius respecte a el patró de l'onatge als oceans. Si bé, és cert, que actualment no es té una evidència clara que aquests canvis hagin estat provocats pel canvi climàtic, si que està comprovat que la concentració de CO₂ a l'atmosfera condiciona els patrons de circulació atmosfèrica (Déqué et al, 2007) i, en conseqüència, la possibilitat de que l'increment de les emissions afecti al clima d'onatge és força elevada.

Per tant, si no canviem els patrons de consum dels combustibles fòssils, al llarg dels pròxims anys el nivell mitjà global del mar pujarà i, a més a més, l'altura d'ona mitjana pot variar, afectant al potencial energètic de les ones. Alguns experts (Nikulin et al., 2011; Casas-Prat i Sierra, 2013) apunten que les tempestes seran menys freqüents, però quan tinguin lloc seran més intenses, degut als canvis en els patrons del vent que cal esperar.

És evident, per tant, que tots aquests efectes del canvi climàtic afectaran l'energia de l'onatge, ja que, la formació de les onades ve condicionada pel vent (velocitat i temps que bufa), i les característiques de l'oceà ("fetch" i profunditat) com hem comentat al primer capítol. Malgrat això, pocs estudis han abordat el potencial impacte del Canvi climàtic en l'onatge (Harrison i Wallace, 2005; Mackay et al., 2010a, 2010b; Sierra et al., 2017b).

D'altra banda, el canvi climàtic també ha tingut un impacte politicosocial respecte a les energies renovables. La intensificació als últims anys de les conseqüències d'aquest ha esdevingut en una major inversió en la investigació sobre les energies renovables, canvis en la legislació per a incentivar l'ús de les energies netes i, per últim, també una major inversió de les grans empreses en les energies renovables.

3.- Descripció de la zona d'estudi

3.1.- Zona d'estudi

Després d'explicar la problemàtica que hi ha al darrera d'aquesta tesina, així com també de posar-nos en context de com està la situació del sector actualment i quines en són les seves possibles projeccions futures, ha arribat l'hora d'explicar quin serà l'emplaçament en el qual farem el nostre estudi.

El Regne del Marroc, és un estat del litoral nord-oest d'Àfrica. Com podem veure a la figura 3.1, limita amb el mar Mediterrani i les ciutats autònomes Ceuta i Melilla d'Espanya al nord, a l'oest amb l'Oceà Atlàntic, amb Algèria a l'est i amb el Sàhara occidental i Mauritània al sud.



Figura 3.1. Fronteres del Regne del Marroc. [Font: Mapa de Marruecos, Alamy]

Els 446.550 km² que conté la superfície del Marroc, són en dues tercers parts considerats muntanyosos. No és d'estranyar per tant, que el país es pugui dividir geogràficament per les seves cadenes muntanyoses.

D'aquestes cadenes muntanyoses se'n poden destacar dues, el Rif i el massís de l'Atlas, que aquest últim es divideix en tres serralades: L'Atlas mitjà, l'Alt Atlas i l'Anti-Atlas.



Figura 3.2. Mapa del Marroc amb les seves serralades. [Font: Mapa de Marruecos, *Visitmorocco*]

El Marroc queda per tant dividit en quatre zones diferenciades. La primera d'elles és la regió geogràfica compresa entre l'Oceà Atlàntic, l'Alt Atlas (Gran Atlas a la figura 3.2) i les fronteres d'Algèria i el Sàhara Occidental.

La segona regió és aquella limitada entre l'Alt Atlas al Sud, l'Atlas Mitja l'Est, el complex muntanyós del Rif al Nord i que s'obre al Mar Mediterrani a l'Oest.

La tercera regió queda a l'Est de l'Atlas Mitja i, per tant, té frontera amb Algèria.

Per últim, la quarta regió que ens queda per analitzar és aquella que queda oberta al Mar Mediterrani i arraconada pel complex muntanyós del Rif. Aquesta serà la nostra àrea d'interès, ja que com bé sabem, el nostre estudi es desenvoluparà a la costa mediterrània del país.

3.2.- Mapa dels punts

La costa mediterrània del Marroc conte aproximadament 582 km, que s'estenen des de Saïda, a la frontera amb Algèria, fins al Cap Espartel, que pertany a la ciutat de Tànger.

Hem escollit la costa mediterrània, ja que es tracta d'una zona de la qual disposem de la informació d'onatge de catorze punts situats al llarg d'aquesta, fet que ens pot permetre realitzar l'estudi i treure conclusions rellevants i significatives.

A continuació, a la taula 3.1, podem veure les característiques principals de cadascun dels punts en els que es disposa de les dades necessàries.

PUNT	LATITUD (N)	LONGITUD (W)	PROFUNDITAT (M)	DISTANCIA (KM)
P1	36°00'	5°15'	830	11
P2	35°45'	5°15'	180	7,5
P3	35°30'	5°00'	200	9,5
P4	35°30'	4°45'	420	25
P5	35°15'	4°30'	150	8
P6	35°15'	4°15'	240	7
P7	35°30'	4°00'	290	27
P8	35°30'	3°45'	320	24
P9	35°30'	3°30'	700	29
P10	35°30'	3°15'	600	24,5
P11	35°30'	3°00'	200	7
P12	35°15'	2°45'	100	10
P13	35°15'	2°30'	120	13
P14	35°15'	2°15'	140	15,5

Taula 3.1. Característiques principals dels 14 punts utilitzats en l'estudi.

La latitud i la longitud, ens permeten situar els punts al mapa. D'altra banda tenim la profunditat que té l'aigua a cada punt, així com també la distància a la qual es troba de la costa. Aquests dos últims paràmetres ens poden semblar irrellevants, però més endavant veurem que poden ajudar-nos a entendre alguns dels nostres resultats.

Així doncs, un cop coneguda la posició dels nostres punts, és hora de situar-els al mapa. A la figura 3.3, a la pàgina següent, podem veure els catorze punts, del primer al catorzè, numerats d'esquerra a dreta respectivament.

3.3.- Característiques de l'onatge a la zona

Al Mediterrani les onades es formen principalment per mars de vent que podem associar amb borrasques que entren al Mediterrani des de l'Atlàntic per l'estret de Gibraltar, a l'inici de la nostra zona d'estudi.

Aquestes borrasques tenen més possibilitats d'aparèixer a l'hivern, ja que és quan tenim un clima més inestable, amb borrasques més fortes i freqüentment orientades cap al sud.

Que les nostres onades habituals siguin de mars de vent, fa que aquestes siguin caòtiques, tinguin períodes més curts i puguin venir en diferents direccions.

Pel contrari, un onatge en el qual les nostres onades vinguessin ordenades i amb una mateixa direcció podria ser utilitzat per un ventall més ample d'aparells, ja que alguns dels dispositius que existeixen per extreure l'energia de les onades són direccionals, és a dir, només actuen en una direcció.

En conseqüència, les onades que ens convindrien són les de mar de fons, ja que a més a més de tenir una sola direcció predominant, normalment tenen períodes més grans i, per tant, a igualtat d'altura d'ona, tenen més potència. Malauradament, al Mediterrani no tenim prou espai per a que les onades puguin recórrer molts quilòmetres més enllà de la seva àrea de generació i per això predominen o el mar de vent o els estats mixtes (combinació de mar de vent i de fons). Degut a aquestes limitacions de fetch i, per tant, d'altura d'ona, no és d'estranyar que el potencial energètic del Mar Mediterrani no sigui tant elevat com a altres zones com, per exemple, l'Atlàntic Nord. En qualsevol cas, falta veure com el Canvi Climàtic afectarà a la potència de l'onatge.



Figura 3.3. Mapa de punts [Font: Elaboració pròpia a partir de *Google Maps*]

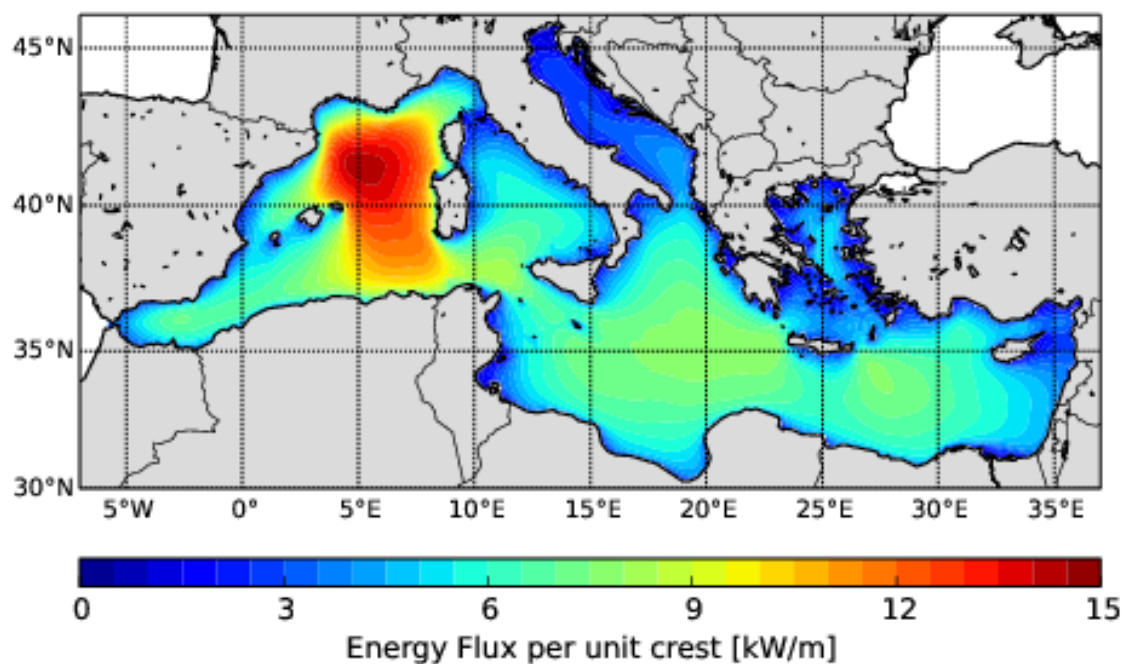


Figura 3.4. Mapa de la distribució global de la mitjana anual d'energia de l'onatge al mar Mediterrani.

[Font: DICCA MeteOcean Re-Analysis 1979-2018; DICCA]

Per acabar, a la figura 3.4, podem veure la distribució global de la mitjana anual de potència de l'onatge al Mar Mediterrani corresponent a l'anàlisi d'una base de dades horària de 35 anys (1979 – 2014) mitjançant models numèrics. Diversos autors (Liberti et al., 2013; Vicinanza et al., 2013; Sierra et al., 2014) han analitzat el potencial energètic de les ones a diverses zones del Mediterrani, encara que cap ho ha fet encara a la costa mediterrània del Marroc. A aquest país, l'únic estudi del potencial energètic de les ones està centrat en la seva costa atlàntica (Sierra et al., 2016).

4.- Metodologia de treball

4.1.- Dades utilitzades

Per a realitzar la part pròpiament analítica de la nostra tesina necessitem dades referents a l'onaatge de la nostra zona d'estudi. Aquestes dades però, han de ser representatives de la situació actual, així com també d'una situació futura que tingui en compte l'acció del Canvi Climàtic.

Els models de circulació general (MCG), de l'anglès 'General circulation models (GCM)', són models de tipus matemàtic sobre la circulació d'una atmosfera (AGCMs), d'un oceà planetari (OGCMs), o d'ambdós (AOGCMs). Són basats en les equacions de Navier-Stokes sobre una malla (generalment en coordenades esfèriques) que cobreix el domini d'estudi. Les equacions d'aquests models serveixen de base per a complexos programes computacionals que normalment utilitzem per a simular condicions de l'atmosfera, els oceans i la terra.

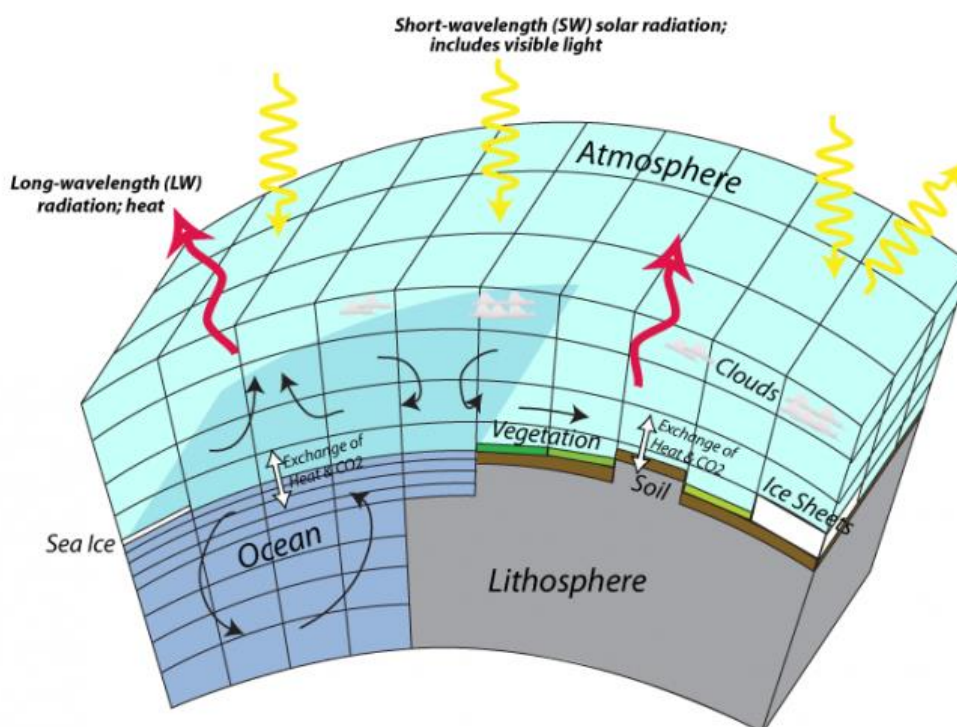


Figura 4.1. Estructura esquemàtica d'un Model de circulació general (MCG). [Font: Introduction to General Circulation Models, Earth in the future]

Explicat d'una altra manera, i perquè ho entenguem millor, els MCG són models que divideixen la terra en una quadrícula 3D, per tractar després cada cel·la particularment

mitjançant un procés de resolució d'equacions matemàtiques que representen els cicles de l'atmosfera i/o els oceans. A la figura 4.1, podem veure una representació esquemàtica del que vindria a ser un MCG.

Com podem veure, aquests models inclouen terra, aire i oceans. I cadascun d'aquests dominis es tracta posteriorment d'una manera separada, ja que dintre de cada domini actuen uns processos diferents. Aquests MCG per tant, són components claus del model del clima global, ja que són àmpliament utilitzats per al pronòstic del clima, per comprendre el temps, i per últim per a projectar el Canvi Climàtic durant hores, dies, anys, dècades o segles.

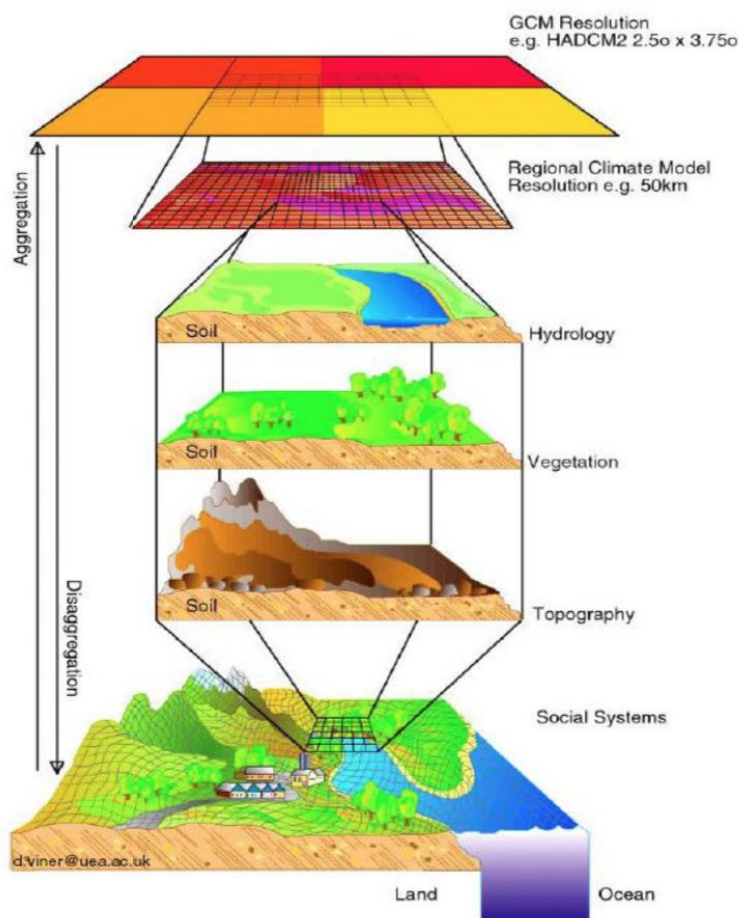


Figura 4.2. Esquema de la tècnica 'downscaling'. En la imatge podem apreciar el nivell de resolució d'un MCG i d'un RCM. [Font: A review of downscaling methods for climate change projections, USAID]

D'altra banda, a mesura que el nostre model entra en més detall (més cel·les), la seva aproximació a la Terra és millor, el problema és que no tenim ordinadors suficientment potents com per aproximar-nos a una gran resolució. No obstant això, a mesura que els ordinadors s'han tornat més capaços, i s'ha entès millor la física de l'atmosfera els MCG s'han anat tornant

més precisos. Tot i això, són models amb una resolució d'entre 50 i 100 km, per tant, tenen una capacitat limitada per a resoldre estudis d'impacte local com ara muntanyes, cossos d'aigua, infraestructures, etc.

Per a buscar una solució a aquesta problemàtica s'han desenvolupat tècniques de reducció d'escala, de l'anglès 'downscaling', que ens permeten obtenir el clima a escala local. Aquesta tècnica és particularment útil en el nivell de la superfície, en el qual tenim variables atmosfèriques a escala regional proporcionades pels GCM.

Existeixen dues tècniques de 'downscaling', la reducció d'escala dinàmica (Lionello et al., 2008; Hemer et al., 2013; Casas-Prat i Sierra, 2013) i l'estadística (Wang et al., 2010; Mori et al., 2013; Casas-Prat et al., 2014). Per a la nostra tesina ens centrarem en la tècnica de reducció d'escala dinàmica, ja que es basa en la utilització dels Models climàtics regionals, de l'anglès 'Regional circulation models' (RCM).

Aquests, el que fan és utilitzar els paràmetres atmosfèrics de sortida dels MCG per a impulsar un nou model regional i numèric d'una resolució espacial més alta que, per tant, pot simular condicions locals amb millor detall. Per a fer-ho, realitza càlculs de la dinàmica atmosfèrica i resol les equacions descrites per l'atmosfera. Finalment arriba a una resolució d'uns 10 a 25 km. Per entendre millor el concepte del 'downscaling', podem fixar-nos en la figura 4.2, en la que es pot apreciar reducció d'escala esmentada, i també l'augment en la resolució.

Per a aquesta tesina hem utilitzat les dades de quatre RCM diferents:

- a) CMCC: '*Cambiamenti Climatici Climate Model*' del Centro Euro-Mediterraneo (Itàlia).
- b) CNRM: *Center National de Recherches météorologiques* desenvolupat al '*Centre Européen de Recherche et Formation Avancée en Calcul Scientifique*' i després actualitzat pel '*Center National Wather Research*' (França).
- c) GUF: '*Goethe Universität Frankfurt am Main*' (Alemanya).
- d) LMD: '*Laboratoire de Météorologie Dynamique*' compost per les següents universitats:
 - '*École polytechnique*'
 - '*École Normale Supérieure*'
 - '*Université Pierre et Marie Curie*'

- 'École Nationale des Ponts et Chaussées' (França).

Per tant, tindrem quatre fonts de dades, respectivament proporcionades per cada una de les quatre institucions esmentades.

Com havíem comentat anteriorment, per a la realització d'aquesta tesina, ens hem basat en les trajectòries que descriuen el Canvi Climàtic proporcionades per l'IPCC (2013) en el seu AR5. No obstant això, no ens ha calgut adaptar aquestes bases de dades proporcionades, ja que, per a cadascuna d'aquestes, al llarg d'aquests últims anys s'han realitzat un gran número de simulacions de les condicions atmosfèriques basades en les projeccions dels RCM.

Un cop coneguts els valors dels paràmetres atmosfèrics (vent i pressió atmosfèrica) per a cada una de les trajectòries de l'IPCC escollides, cal utilitzar un altre model per a poder projectar les condicions de l'onatge i, per tant, poder extreure les variables necessàries per a poder començar amb els càlculs. Per a fer-ho s'ha utilitzat el model de tercera generació d'ones SWAN, de l'anglès 'Simulating WAVes Nearshore', de la 'Delft University of Technology' (Booij et al., 1999) que és un model de propagació d'onatge espectral que simula l'energia continguda a les onades en la seva propagació des de superfícies oceàniques fins a zones costaneres.

Aplicant el model SWAN als resultats de cadascun dels RCM hem pogut obtenir les nostres variables d'interès:

- a) L'altura d'ona significant (H_s).
- b) El període de pic (T_p).
- c) La direcció mitja de l'onatge (α).

4.2.- Escenaris

D'aquestes quatre bases de dades esmentades, ens hem quedat amb les dades corresponents a dos períodes, el període present i el període futur.

El període present del clima d'onatge comprendrà les dades corresponents a l'interval d'anys del 1986 al 2005. D'altra banda, el període futur del clima d'onatge, que fa referència a les trajectòries RCP 4.5 i RCP 8.5, comprendrà les dades corresponents a l'interval d'anys

del 2081 al 2100. Aquests intervals de temps s'han escollit perquè són els utilitzats pel IPCC (2013) en el AR5.

Per tant tindrem 4 models, amb tres escenaris diferents (present, RCP 4.5, RCP 8.5), catorze punts d'estudi i tres variables a tractar. A més a més, cada una d'aquestes situacions comptarà amb una resolució temporal de tres hores. És a dir, tenim 168 situacions diferents a analitzar amb aproximadament 58.400 dades per cada variable, el que acaben sent uns 9,8 milions de dades aproximadament.

4.3.- Fórmules utilitzades

Ja que estem estudiant el potencial energètic a la costa mediterrània del Marroc per a poder analitzar la possibilitat d'extreure energia mitjançant dispositius WEC, de l'anglès '*Wave energy converter*', el nostre objectiu serà calcular quina és la potència que podem arribar a generar en cada un dels punts estudiats.

4.3.1.- Potència mitjana anual

Per a poder garantir un adequat aprofitament d'un dispositiu WEC, necessitem que la potència que porten les onades en el nostre punt d'abstracció sigui regular, per a poder assegurar un aprofitament continu. És a dir, no ens interessa una zona d'estudi, en la qual hi hagi èpoques de l'any en què tenim molta energia disponible, i èpoques de l'any en les que el mar està parat.

Per tant, si bé el factor més determinant és la potència mitjana anual, també ens interessa saber com es distribueix aquesta potència al llarg del temps. La potència mitjana anual, teòricament representa la mitja de tots els registres de potència calculats, cada tres hores, al llarg de les mostres de 20 anys de la que disposem.

Per a poder procedir amb el càlcul d'aquesta, comptem amb fulls de càlcul de cada situació. Uns exemples en podrien ser els següents:

- a) Full de càlcul del model de circulació regional del CMCC projectat mitjançant el model SWAN, en l'escenari present per al punt d'estudi primer (Figura 4.3).

- b) Full de càlcul del model de circulació regional del LMD projectat mitjançant el model SWAN, en l'escenari RCP 4.5 per al punt d'estudi vuitè.

	A	B	C	D	E	F	G
1	ANY	MES	DIA	HORA	HS	TP	TETA
2	1986	1	1	0	0,01	3,99	147,76
3	1986	1	1	3	0,01	4,04	149,83
4	1986	1	1	6	0,02	4,12	137,32
5	1986	1	1	9	0,02	4,25	58,51
6	1986	1	1	12	0,02	4,20	33,44
7	1986	1	1	15	0,02	4,19	31,06
8	1986	1	1	18	0,02	4,36	65,90
9	1986	1	1	21	0,03	4,31	153,38
10	1986	1	2	0	0,07	4,20	156,79

Figura 4.3. Exemple del full de càlcul del model circular regional del CMCC projectat mitjançant el model SWAN, en l'escenari present per al punt d'estudi primer, emprat per a realitzar el càlcul pertinent de la potència mitjana anual.

Com podem comprovar a la figura 4.3, i com hem comentat a l'apartat anterior, disposem en cada cas de la data del registre i l'hora, l'altura significant d'ona, el període de pic, i la direcció de l'onatge.

La potència de l'onatge és un flux d'energia, per tant el primer que hem de fer, és convertir el nostre període de pic en un període energètic. Aquest període energètic representa el període d'una ona sinusoidal que conté el mateix contingut energètic que l'estat del mar en el qual es troba l'onada en qüestió. Aquest s'hauria de calcular en funció dels moments espectrals però, com aquestes dades no estan disponibles, podem fer-ho amb l'expressió (1).

$$T_e = \alpha T_p \approx 0,9 T_p \quad (1)$$

On T_e és el període energètic, α és un coeficient que depèn de la forma de l'espectre de l'ona i T_p és el període de pic. El coeficient α varia entre 0,86 i 1 en funció de l'amplada espectral (Cornett, 2008). Aquest serà més proper a la unitat si la banda de l'espectre és més

estreta. Per al nostre estudi prendrem el conservador valor de 0,9, ja que a la nostra zona d'estudi predominen les onades de vent del Mar Mediterrani mesclades amb mar de fons. Ara, per tant, podem calcular el nostre T_e per a cada T_p .

Per a calcular la nostra potència, utilitzarem l'expressió del flux d'energia teòric d'una ona en aigües profundes (2), ja que és on es troben els nostres punts d'estudi. Aquesta no considera els efectes dels processos de refracció i difracció, ja que en aigües profundes aquests no incideixen en el comportament de les onades.

$$P = \frac{\rho g^2}{64\pi} T_e H_s^2 \quad (2)$$

On P és el flux d'energia de l'onada per unitat de longitud de cresta mesurada en kW/m, ρ és la densitat de l'aigua marina (1025 kg/m³), g és l'acceleració gravitatòria (9,81m/s²), H_s és l'altura significant d'ona en metres i T_e és el període energètic. Per tant, podem simplificar l'expressió:

$$P \cong 0,491 T_e H_s^2 \quad (kW/m) \quad (3)$$

Així doncs, com podem comprovar, la nostra expressió (3) només depèn de l'altura significant d'ona, i del període energètic, que són dues de les tres dades que disposem. Ja podem per tant calcular els nostres fluxos d'energia per a cada parell de dades dels que disposem, com es mostra a la figura 4.4.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	X
1	ANY	MES	DIA	HORA	HS	TP	TETA	TE	P(KW/M)	
2	1986	1	1	01	0,01	3,99	147,76	3,5892	=0,491*0,9*F2*(E2^2)	
3	1986	1	1	3	0,01	4,04	149,83	3,6324	0,00034957	
4	1986	1	1	6	0,02	4,12	137,32	3,7053	0,00046574	
5	1986	1	1	9	0,02	4,25	58,51	3,8286	0,00067862	
6	1986	1	1	12	0,02	4,20	33,44	3,7818	0,00081888	
7	1986	1	1	15	0,02	4,19	31,06	3,7665	0,00066762	
8	1986	1	1	18	0,02	4,36	65,90	3,9249	0,00062439	

Figura 4.4. Càlcul dels fluxos d'energia de les onades per unitat de longitud de cresta de la situació 1 (Model de la institució CMCC, en l'escenari present per al punt 1 d'estudi). Mesurada en kW/m.

Un cop tenim el flux d'energia per cada parell de dades H_s - T_p per a cada situació, ara ja podem calcular la potència mitjana per a cada situació (present, RCP 4.5, RCP 8.5), per al

model de cada una de les institucions (CMCC, CNRM, GUF, LMD) i per a cada punt d'estudi (P1 al P14). La calcularem mitjançant la següent expressió, i per tant també en kW/m:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{n} \quad (4)$$

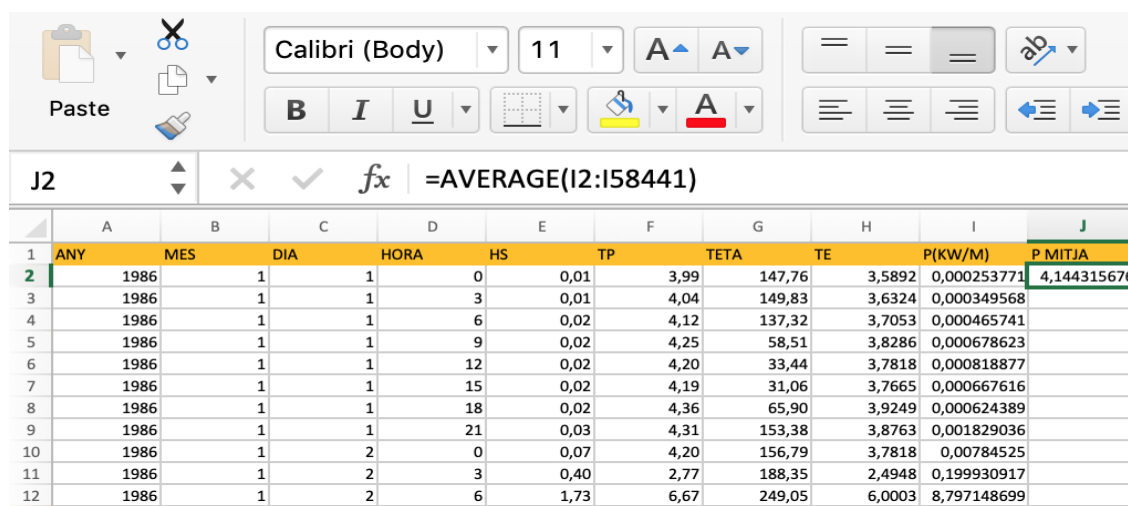


Figura 4.5. Càlcul de la potència mitjana de la situació 1 (Model de la institució CMCC, en l'escenari present per al punt 1 d'estudi) mesurada en kW/m.

En la qual P1,P2,...Pn són els fluxos d'energia calculats per a cada registre de la situació, i n el número de registres dels quals disposem. A la figura 4.5 podem veure el càlcul d'aquesta en el full de càlcul.

4.3.2.- Variabilitat temporal de la potència mitjana

Anteriorment hem comentat que el paràmetre més important a l'hora d'escollir l'emplaçament dels nostres dispositius WEC és la potència mitjana anual que presenten els nostres punts d'estudi. Això és correcte, però no és el paràmetre únic per a la nostra presa de decisió, ja que podem tenir un punt que presenti una potència mitja anual elevada, però que la nostra mostra de valors sigui molt amplia i que per tant tinguem èpoques de l'any en què no hi hagi una potència suficient per a extreure energia.

L'anàlisi de la variabilitat temporal de la potència de l'onatge ens ajudarà a entendre aquesta problemàtica. Per això s'utilitzen diferents paràmetres com, per exemple, el coeficient de variabilitat. És un paràmetre que mesura la dispersió d'una mostra, ja que ens indica si la nostra mostra té valors que divergeixen molt respecte a un cert valor (la potència mitja anual). Per a

calcular-lo utilitzem la següent expressió, tenint en compte que el nostre rang de valors sempre ha de ser positiu:

$$CV = \frac{\sigma(P(t))}{P} \quad (5)$$

Com podem veure, aquest coeficient depèn de dos paràmetres, al numerador la desviació estàndard de la mostra i al denominador la potència mitjana, calculada anteriorment. La desviació estàndard és la mesura de dispersió més comuna, ja que indica quan es desvien els valors d'una mostra en relació a la mitja d'aquesta.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	ANY	MES	DIA	HORA	HS	TP	TETA	TE	P(KW/M)	DESVIACIÓ ESTÀNDAR DE P
2	1986	1	1	0	0,01	3,99	147,76	3,5892	0,000253	11.9676123
3	1986	1	1	3	0,01	4,04	149,83	3,6324	0,000349	MITJA
4	1986	1	1	6	0,02	4,12	137,32	3,7053	0,000465	4.14431567
5	1986	1	1	9	0,02	4,25	58,51	3,8286	0,000678	COEFICIENT DE VARIABILITAT DE P
6	1986	1	1	12	0,02	4,20	33,44	3,7818	0,0008189	2.74
7	1986	1	1	15	0,02	4,19	31,06	3,7665	0,0006676	
8	1986	1	1	18	0,02	4,36	65,90	3,9249	0,0006244	

Figura 4.6. Càlcul del coeficient de variabilitat de la potència mitjana de la situació 1 (Model de la institució CMCC, en l'escenari present per al punt 1 d'estudi).

En cas que el resultat del nostre coeficient de variabilitat sigui elevat, ens trobarem davant d'una mostra ampla, és a dir que les seves dades són variades i que s'allunyen sovint dels valors de la seva mitja. Això seria representatiu d'un punt d'estudi amb un onatge molt variable al llarg del temps. Estaríem davant d'una irregularitat energètica, que no és la més adient per a l'extracció d'energia. A la figura 4.6 podem veure com s'ha calculat el coeficient de variabilitat amb els nostres fulls de càlcul.

Un cop tenim calculats i analitzats la potència mitjana anual i el coeficient de variabilitat d'aquesta, és moment per a aprofundir més en l'estudi. Ara ja sabem si la nostra mostra de dades és ampla, és a dir si els nostres valors s'allunyen molt de la mitja, i per tant si el nostre onatge és variable al llarg del temps. Però com sabem quan aquest és irregular? Ho és tot l'any?

Per a respondre a aquestes preguntes que ens sorgeixen hem de recórrer a les distribucions temporals de la potència. Una distribució temporal com bé indica el seu nom és una distribució

de dades en el temps. Per tant, no és un terme nou per nosaltres, ja que ja n'hem calculat una anteriorment, la potència mitjana anual. El que farem ara però, és fer aquestes distribucions temporals més curtes. En concret estudiarem les nostres potències mensualment i estacionalment.

Primer de tot, calcularem les potències mitjanes mensuals, per a fer-ho utilitzarem l'expressió (6), que podem trobar a continuació:

$$P_{mitja\ mensual} = \frac{\sum_{i=1}^m P_{mes\ i}}{m} \quad (6)$$

Com podem veure, per a calcular aquestes, l'únic que hem de fer és sumar totes les potències que tenim del mes en qüestió de tots els anys de la mostra, i dividir-los per el número de dades (m) del mes en qüestió.

Per a fer el càlcul més fàcil en el nostre full de càlcul com podrem comprovar analitzant les dades, l'únic que hem hagut de fer ha estat ordenar les nostres dades de menor a major a la columna que fa referència als mesos.

Un cop teníem calculades les potències mitjanes, hem calculat les potències mitjanes estacionals, per a fer-ho hem utilitzat l'expressió (7), que podem trobar a continuació:

$$P_{mitja\ estacional} = \frac{\sum_{i=1}^s P_{estació\ i}}{s} \quad (7)$$

L'expressió funciona anàlogament a l'expressió (6). L'única diferència que hem de comentar en aquest cas és la manera en què hem dividit les nostres estacions, i que és el número de dades de l'estació que l'anomenarem s. La distribució ha estat la següent:

- a) Hivern: Desembre, Gener i Febrer.
- b) Primavera: Març, Abril i Maig.
- c) Estiu: Juny, Juliol i Agost.
- d) Tardor: Setembre, Octubre i Novembre.

Com més diferents siguin entre ells els valors mitjans mensuals o estacionals, més irregular serà el nostre onatge al llarg de l'any.

El coeficient de variabilitat mensual és un indicador que ens serveix per a veure si l'energia de l'onatge pateix variacions grans o petites al llarg dels dotze mesos que dura l'any. Per a calcular-lo hem d'utilitzar l'expressió següent:

$$MV = \frac{P_{M1} - P_{M12}}{P} \quad (8)$$

De l'expressió numero (8), $PM1$ és la potència mitjana del mes més energètic de l'any, $PM12$ és la potència mitja del mes menys energètic de l'any. D'altra banda P és la potència mitjana anual.

Per últim, el coeficient de variabilitat estacional és el mateix concepte que el coeficient de variabilitat mensual però per una distribució temporal més gran. Per a calcular-lo hem d'utilitzar l'expressió següent:

$$SV = \frac{P_{Est1} - P_{Est4}}{P} \quad (9)$$

A l'expressió (9), $PEst1$ és la potència mitjana de l'estació més energètica de l'any, $PEst4$ és la potència mitjana de l'estació menys energètica de l'any. D'altra banda P és la potència mitjana anual.

El rang de valors d'ambdós coeficients només contempla els números més grans que zero, és a dir positius. Per a entendre el resultat d'aquests, simplement hem de veure que com més propers a zero siguin aquests coeficients, més petita serà la diferència entre aquestes estacions o mesos. D'altra banda, com més elevat sigui el valor d'aquests coeficients, més gran serà la diferència entre els mesos o estacions en qüestió, i per tant més variable serà el nostre onatge en les diferents escales temporals analitzades (mensual o estacional). A la figura 4.7, podem veure el càlcul de les potències mitjanes mensuals i estacionals, així com també dels coeficients de variabilitat mensual i estacional.

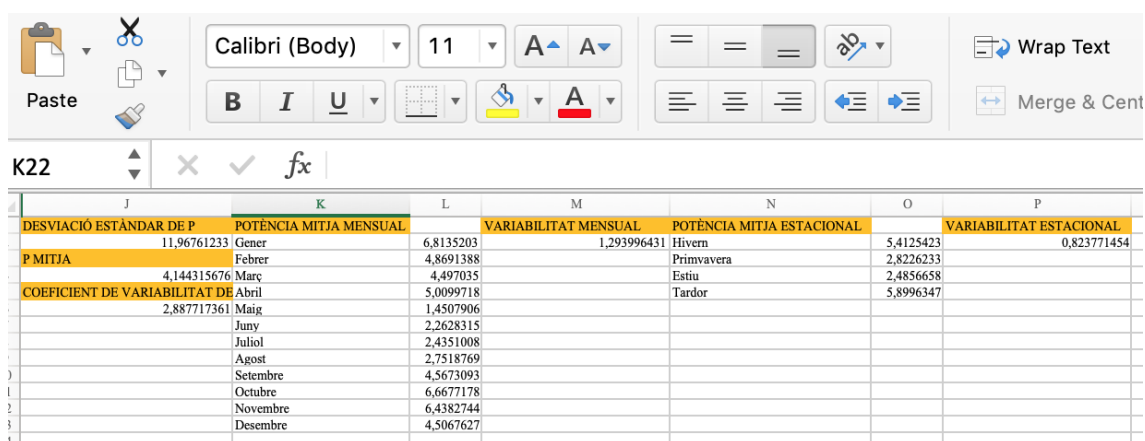


Figura 4.7. Càlcul de les potències mitges mensuals i estacionals, així com també dels coeficients MV i SV de la situació 1 (Model de la institució CMCC, en l'escenari present per al punt 1 d'estudi).

4.3.3.- Distribució direccional de l'onatge

Com ja hem comentat diverses vegades en aquest treball, la direcció de l'onatge és un factor diferencial a tenir en compte. Això és així, ja que alguns dels dispositius d'extracció d'energia han d'estar orientats a una certa direcció. Per tant, és important per al nostre estudi que el nostre onatge sigui el més direccional possible per a poder augmentar al màxim el nostre rendiment, en cas de fer servir un d'aquests dispositius direccionals.

Per a poder aprofundir en aquest aspecte, hem estudiat la distribució direccional de l'onatge. El primer que hem hagut de fer ha estat definir les nostres direccions. Per a fer-ho hem dividit els nostres 360 (°) en 16 sectors, cada una d'elles de 22,5 (°). A continuació a la taula 4.1 podem veure les característiques principals de cada sector.

D'altra banda, a la figura 4.8, podem veure una representació d'una rosa dels vents amb les direccions que hem emprat per al nostre estudi.

Secció	Direcció	Nomenclatura	Rang direccional (º)
1	Nord	N	348,8 - 11,25
2	Nord Nord-Est	NNE	11,25 - 33,75
3	Nord Est	NE	33,75 - 56,25
4	Est Nord-Est	ENE	56,25 - 78,75
5	Est	E	78,75 - 101,3
6	Est Sud-Est	ESE	101,3 - 123,8
7	Sud-Est	SE	123,8 - 146,3
8	Sud Sud-Est	SSE	146,3 - 168,8
9	Sud	S	168,8 - 191,3
10	Sud Sud-Oest	SSO	191,3 - 213,8
11	Sud-Oest	SO	213,8 - 236,3
12	Oest Sud-Oest	OSO	236,3 - 258,8
13	Oest	O	258,8 - 281,3
14	Oest Nord-Oest	ONO	281,3 - 303,8
15	Nord-Oest	NO	303,8 - 326,3
16	Nord Nord-Oest	NNO	326,3 - 348,8

Taula 4.1. Sector, direcció, nomenclatura i rang direccional de la distribució direccional de l'onatge.

Per a fer la representació de la nostra distribució direccional de l'onatge, farem servir el mateix format que segueixen les roses dels vents, mitjançant els diagrames radials dels fulls de càlcul d'Excel. Per tant, en aquestes 'roses de la potència de l'onatge' que crearem també tindrem les 16 direccions esmentades anteriorment. Per entendre millor com ho farem, utilitzarem d'exemple la figura 4.9 per a realitzar la nostra explicació.

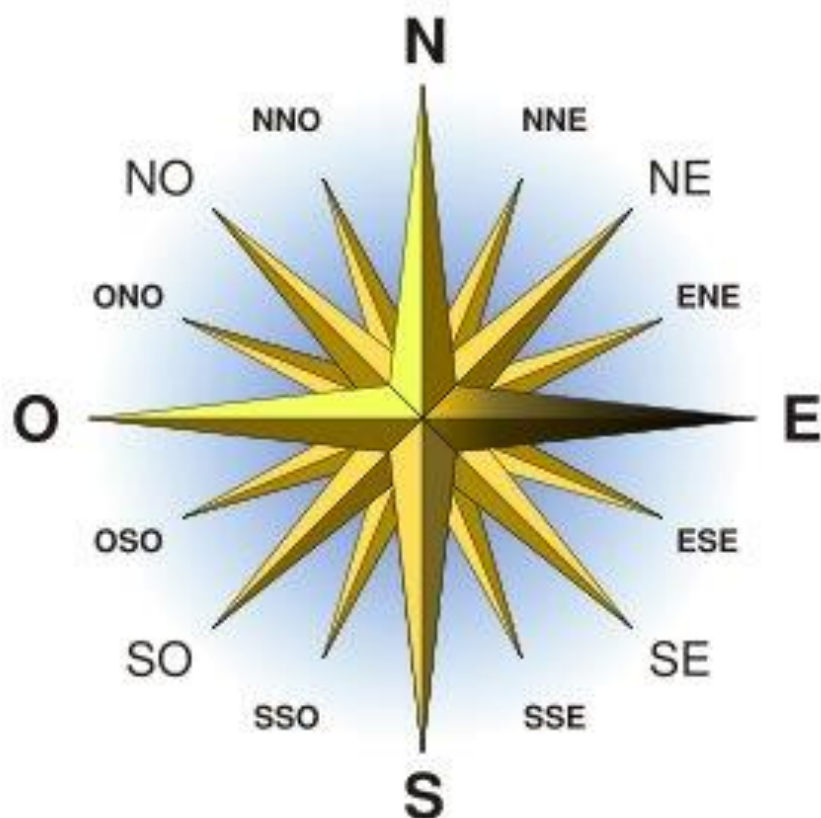


Figura 4.8. Rosa dels vents amb les direccions principals del nostre estudi.

[Font: Rosa de los vientos , La guía 2000. Geografía]

Per això, diferenciarem dues parts del diagrama. La primera part d'elles serà la part del diagrama radial que està de color gris. En aquesta part hi trobem al capdamunt el títol del gràfic, que ens posa en context d'en quin escenari i quin punt ens trobem. Després veiem que tenim les setze direccions esmentades anteriorment. Aquestes setze direccions cal comentar que són d'aproximació, és a dir, indiquen d'on ve l'onatge. D'altra banda, les setze direccions estan unides entre elles per un hexadecàgon regular. Aquest veiem que té set hexadecàgons concèntrics al seu interior. Cadascun d'aquests representa una potència mitjana. El punt del centre serien 0 kW/m, el primer hexadecàgon 1 kW/m, i així respectivament fins als 8 kW/m de l'hexadecàgon exterior.

La segona part, i última que ens falta per explicar i per tant entendre el diagrama radial, són les parts de color blau en el diagrama radial. D'aquestes n'hi ha dues, la primera d'elles són 16

punts, un per cada direcció. El que representen aquests punts és la potència mitjana que té cada direcció, per exemple, per la direcció Est veiem que el punt és molt pròxim a 8 kW/m, això és perquè la potència mitjana anual, en el punt 1, en la direcció Est, és de 7,945 kW/m.

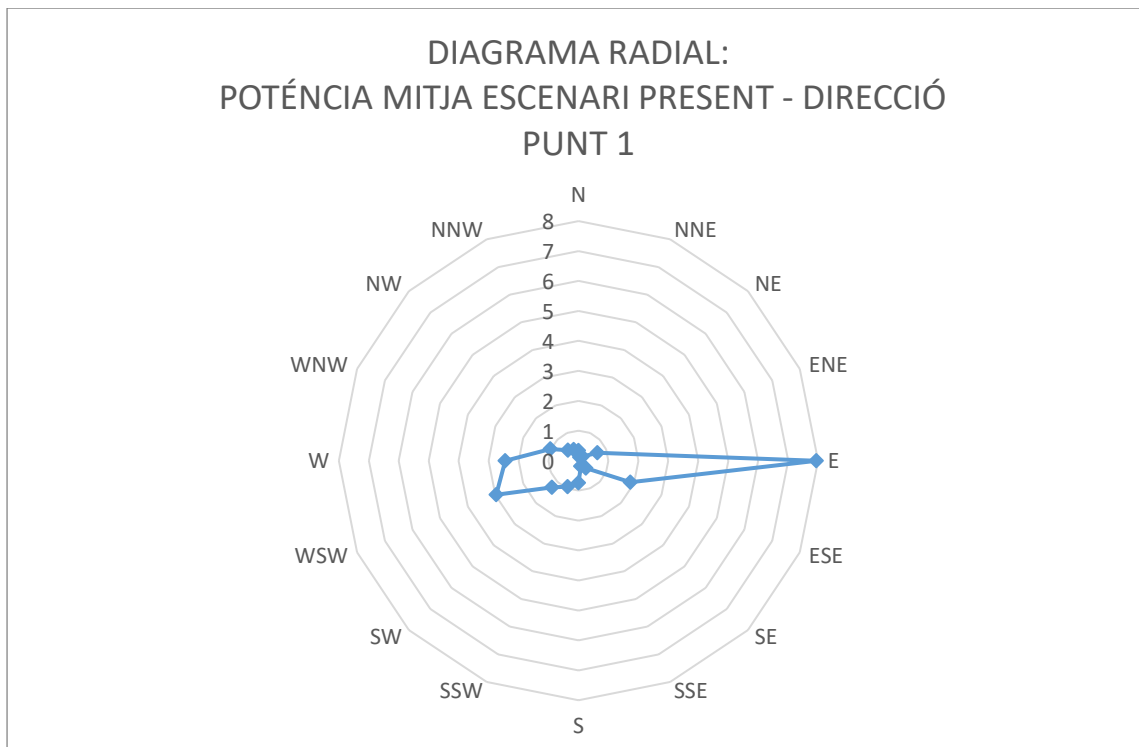


Figura 4.9. Diagrama radial de l'escenari present.

Per últim, només queda fer un comentari respecte a la potència mitjana anual considerada. Com hem comentat anteriorment, aquests gràfics són representatius d'un escenari (present, RCP 4.5, RCP 8.5), i no d'un model com estàvem acostumats anteriorment. Per a poder fer això, el que hem fet ha estat calcular les potències mitges anuals de cada punt per cada escenari, com les mitges dels quatre models emprats en l'estudi.

Per tant, en el nostre exemple de la figura 4.9, estem tenint en compte com a dades, la potència mitjana de cada direcció, calculada com la mitjana dels models CMCC, CNRM, GUF, LMD en la situació present.

5.- Resultats

Després d'explicar al quart capítol d'on provenen les dades que hem utilitzat per a la realització d'aquesta tesina, els processos i expressions mitjançant els quals hem pogut fer els càlculs, ha arribat el moment d'exposar els resultats.

Presentarem els resultats per a després analitzar-los detalladament en el sisè capítol, utilitzant taules i gràfics així com també algunes explicacions. Per a exposar els resultats, seguirem el mateix ordre que al capítol anterior.

5.1.- Potència mitjana anual

A les taules 5.1, 5.2 i 5.3, podem veure les potències mitjanes de cada model en els escenaris present, futur RCP 4.5 i futur RCP 8.5. Per a distingir quin model presenta una potència mitjana anual més elevada en cada punt, hem aplicat una escala de colors a cada fila, de manera que el model que presenta una potència més elevada té un color verd fosc, i el que presenta una potència més baixa queda pintat de color vermell.

Potència mitjana dels models estudiats en cada punt (kW/m) - Escenari present					
PUNT	Model				Promig
	CMCC	CNMR	GUF	LMD	
1	4,14	4,45	3,52	2,11	3,55
2	3,23	3,58	2,74	1,85	2,85
3	2,86	3,49	2,58	1,77	2,67
4	3,03	4,65	2,71	2,23	3,16
5	1,02	1,69	0,87	0,90	1,12
6	3,07	5,71	2,84	2,36	3,49
7	4,15	6,90	3,82	3,00	4,47
8	4,40	7,29	4,32	3,21	4,80
9	4,57	7,80	4,82	3,36	5,14
10	4,16	8,28	4,66	3,54	5,16
11	3,97	8,43	4,5	3,60	5,13
12	2,20	3,91	2,40	1,86	2,59
13	2,49	4,84	2,87	1,98	3,04
14	2,61	5,32	3,13	1,96	3,25

Taula 5.1. Potències mitjanes dels quatre models i del promig d'aquests en l'escenari present. Valors expressats en kW/m.

D'altra banda, a la última columna hem calculat el potencial energètic promig de tots els models, és a dir, la mitjana dels quatre models a cada punt, per a veure quin és el que presenta un potencial energètic més elevat. Aquest valor l'hem pintat de color blau.

Potència mitjana dels models estudiats en cada punt (kW/m) - Escenari futur 4.5					
PUNT	Model				Promig
	CMCC	CNMR	GUF	LMD	
1	4,03	4,56	3,17	2,22	3,49
2	3,17	3,81	2,53	1,98	2,87
3	2,79	3,68	2,37	1,95	2,69
4	2,95	4,80	2,48	2,44	3,16
5	1,00	1,76	0,81	1,00	1,14
6	2,98	5,66	2,59	2,65	3,47
7	4,00	6,73	3,46	3,36	4,38
8	4,22	7,05	3,89	3,61	4,69
9	4,34	7,47	4,31	3,78	4,97
10	3,94	7,88	4,15	4,00	4,99
11	3,78	8,00	4,03	4,06	4,97
12	2,15	3,88	2,22	2,08	2,58
13	2,40	4,70	2,60	2,19	2,97
14	2,47	5,10	2,78	2,16	3,13

Taula 5.2. Potències mitjanes dels quatre models i del promig d'aquests en l'escenari futur RCP 4.5.

Valors expressats en kW/m.

Potència mitjana dels models estudiats en cada punt (kW/m) - Escenari futur 8.5					
PUNT	Model				Promig
	CMCC	CNMR	GUF	LMD	
1	4,20	4,66	3,75	2,22	3,71
2	3,33	4,00	2,99	1,98	3,08
3	2,96	3,82	2,74	1,95	2,87
4	3,14	4,89	2,82	2,44	3,32
5	1,07	1,80	0,91	1,00	1,19
6	3,16	5,61	2,84	2,65	3,56
7	4,21	6,58	3,78	3,36	4,48
8	4,39	6,81	4,17	3,61	4,74
9	4,46	7,10	4,51	3,78	4,96
10	4,02	7,40	4,29	4,00	4,93
11	3,88	7,44	4,17	4,06	4,89
12	2,27	3,82	2,36	2,08	2,63
13	2,48	4,48	2,68	2,19	2,96
14	2,52	4,74	2,80	2,16	3,06

Taula 5.3. Potències mitjanes dels quatre models i del promig d'aquests en l'escenari futur RCP 8.5.

Valors expressats en kW/m.

Complementàriament a les taules aportades anteriorment, també aportem les figures 5.1, 5.2, 5.3 en els quals podem apreciar més gràficament quins són els punts més energètics per a cada situació.

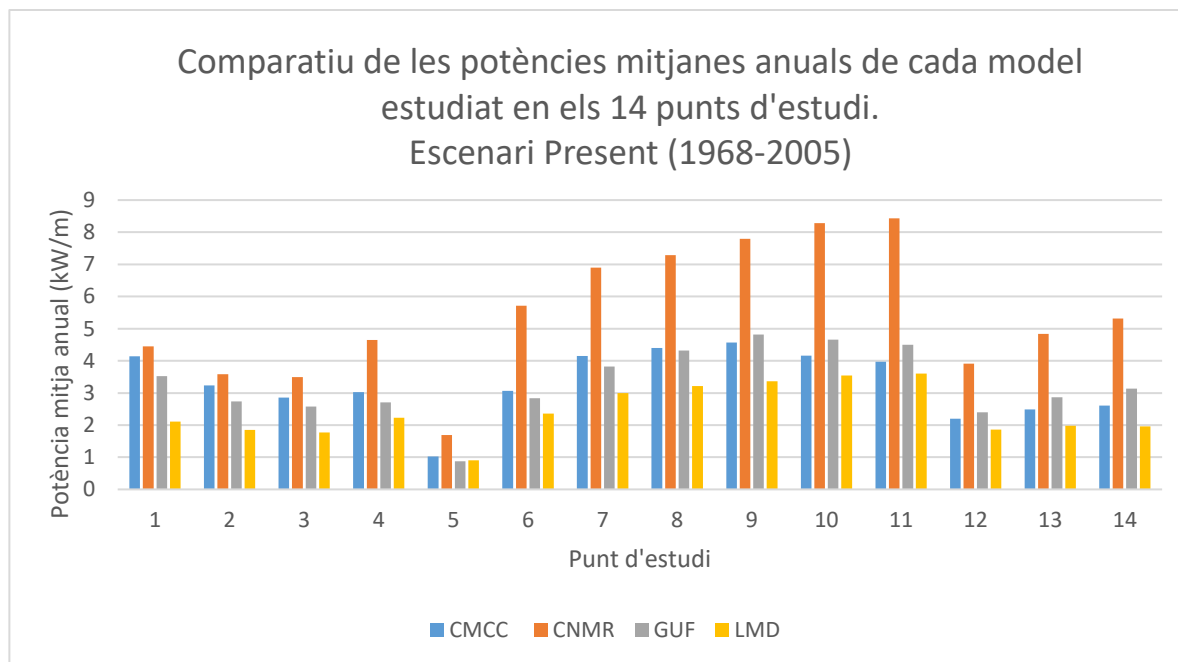


Figura 5.1. Potències mitjanes dels quatre models i del promig d'aquests en l'escenari present. Valors expressats en kW/m.

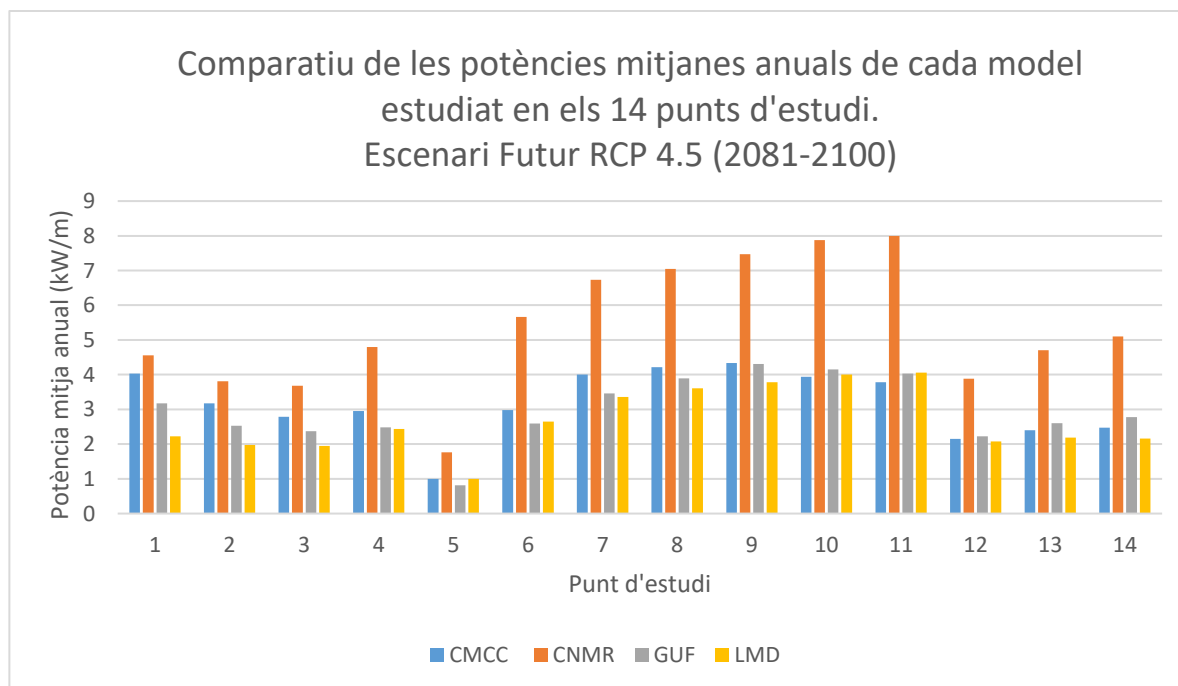


Figura 5.2. Potències mitjanes dels quatre models i del promig d'aquests en l'escenari futur RCP 4.5. Valors expressats en kW/m.

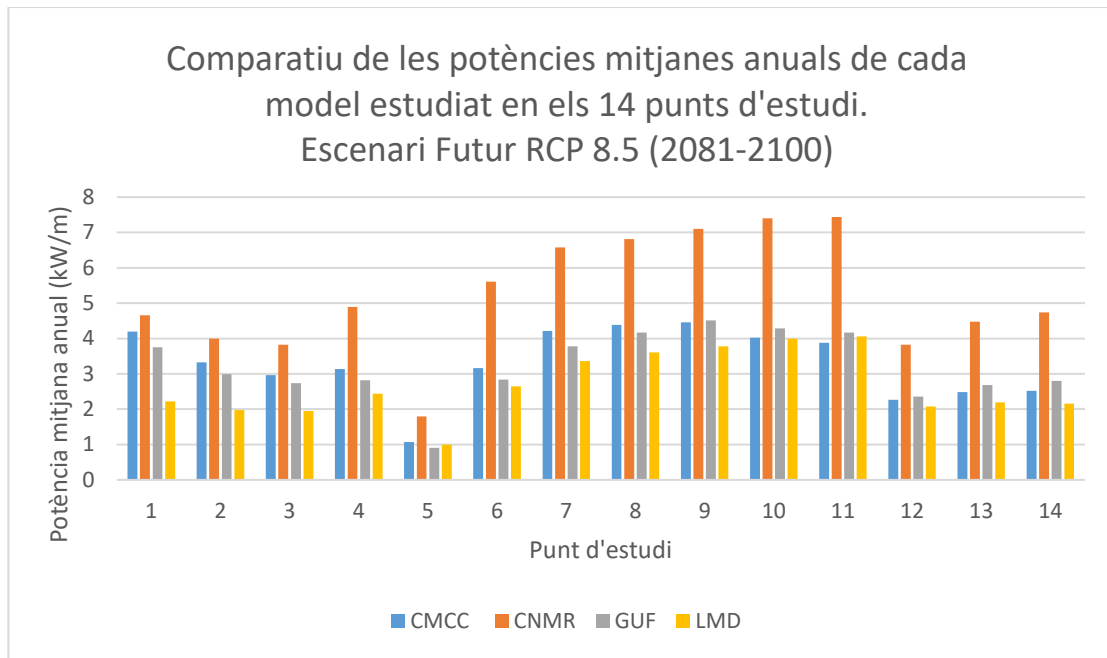


Figura 5.3. Potències mitjanes dels quatre models i del promig d'aquests en l'escenari futur RCP 4.5. Valors expressats en kW/m.

Finalment, també presentem la figura 5.4 (gràfic de barres) i la taula 5.4. En totes dues podem analitzar les potències mitjanes dels tres escenaris en cada punt estudiat.

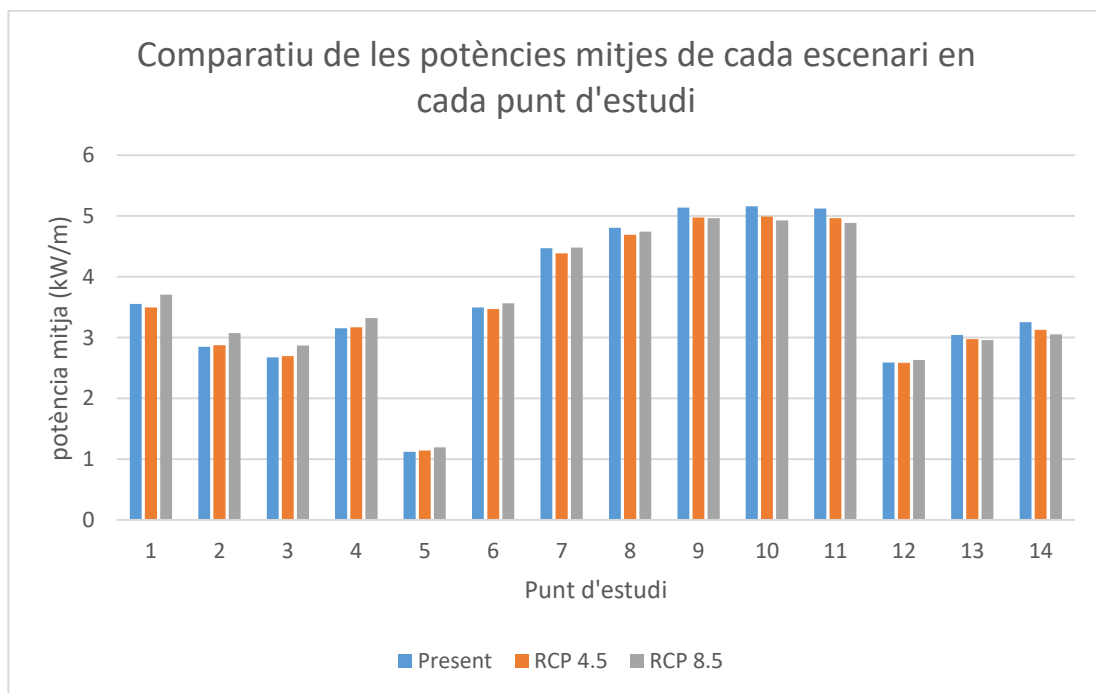


Figura 5.4. Potències mitjanes dels tres escenaris en els 14 punts d'estudi. Valors expressats en kW/m.

Punt	Escenari				
	Present	Futur	%	Futur	%
1	3,56	3,50	-1,69	3,71	4,29
2	2,85	2,87	0,79	3,08	7,89
3	2,68	2,70	0,84	2,87	7,20
4	3,16	3,17	0,40	3,32	5,31
5	1,12	1,14	2,01	1,20	6,70
6	3,50	3,47	-0,72	3,57	2,00
7	4,47	4,39	-1,79	4,48	0,34
8	4,81	4,69	-2,34	4,75	-1,25
9	5,14	4,98	-3,16	4,96	-3,41
10	5,16	4,99	-3,25	4,93	-4,51
11	5,13	4,97	-3,07	4,89	-4,63
12	2,59	2,58	-0,39	2,63	1,54
13	3,05	2,97	-2,38	2,96	-2,87
14	3,26	3,13	-3,92	3,06	-6,14
Mitjana	3,60	3,54	-1,77	3,59	-0,11

Taula 5.4. Potències mitjanes dels tres escenaris i del promig dels escenaris futurs en els 14 punts d'estudi. Valors expressats en kW/m. El color verd significa un augment en la variació, i vermell una disminució d'aquesta. En color groc tenim ressaltat el punt que presenta una potència més elevada.

5.2.- Producció anual teòrica

Per a tenir alguns valors de producció teòrica representatius presentem la taula 5.5, en la qual hem multiplicat els valors de les potències mitjanes dels escenaris de la taula 5.4 per les 8760 h que té un any. Les dades estan en unitats de MW.h/m any.

5.3.- Distribucions temporals de la potència mitjana

A la figura 5.5 es mostra un gràfic de barres en el qual podem apreciar les potències mitjanes associades a cada mes de l'any segons per als tres escenaris estudiats (Present, futur RCP 4.5 i futur 8.5). Seguidament, al gràfic de la figura 5.6 podem apreciar les potències mitjanes associades a cada estació de l'any per als tres escenaris estudiats.

Punt	Escenari				
	Present	Futur RCP4.5	%	Futur	%
1	31,14	30,62	-1,69	32,48	4,29
2	24,97	25,16	0,79	26,94	7,89
3	23,43	23,63	0,84	25,12	7,20
4	27,64	27,75	0,40	29,11	5,31
5	9,81	10,01	2,01	10,47	6,70
6	30,62	30,40	-0,72	31,23	2,00
7	39,14	38,43	-1,79	39,27	0,34
8	42,09	41,11	-2,34	41,57	-1,25
9	45,00	43,58	-3,16	43,47	-3,41
10	45,20	43,73	-3,25	43,16	-4,51
11	44,90	43,52	-3,07	42,81	-4,63
12	22,71	22,62	-0,39	23,06	1,54
13	26,67	26,04	-2,38	25,91	-2,87
14	28,51	27,40	-3,92	26,76	-6,14
Mitjana	31,56	30,99	-1,77	31,53	-0,11

Taula 5.5. Producció anual teòrica dels tres escenaris i del promig dels escenaris futurs en els 14 punts d'estudi. Valors expressats en MW.h/m any. El color verd significa un augment en la variació, i vermell una disminució d'aquesta. En color groc tenim ressaltat el punt que presenta una potència més elevada.

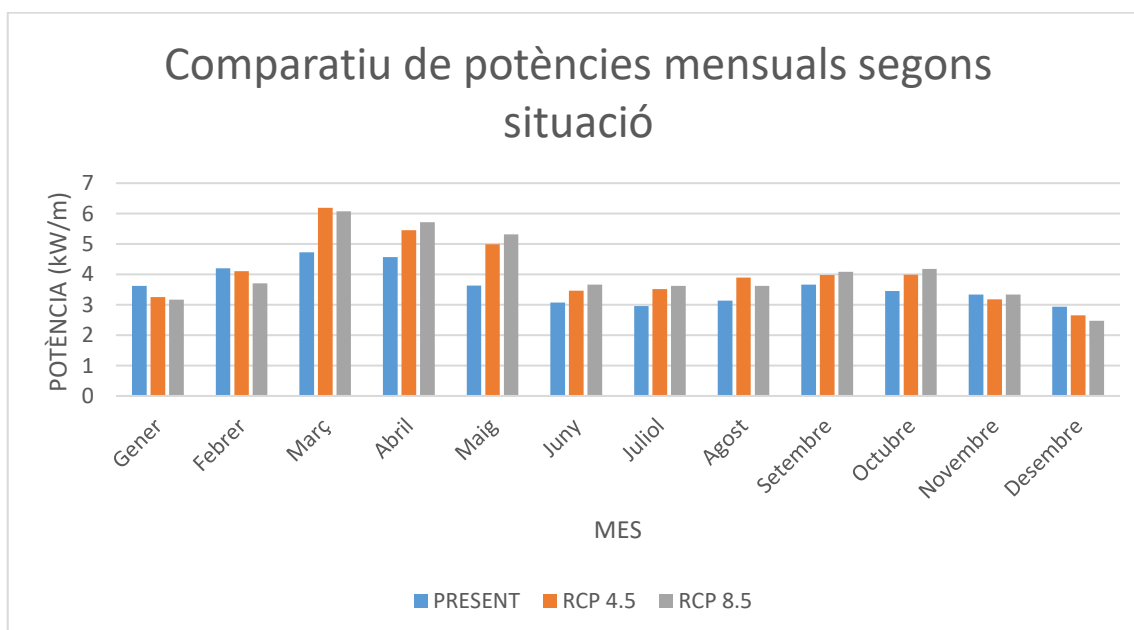


Figura 5.5. Potències mitjanes mensuals dels tres escenaris. Valors expressats en kW/m.

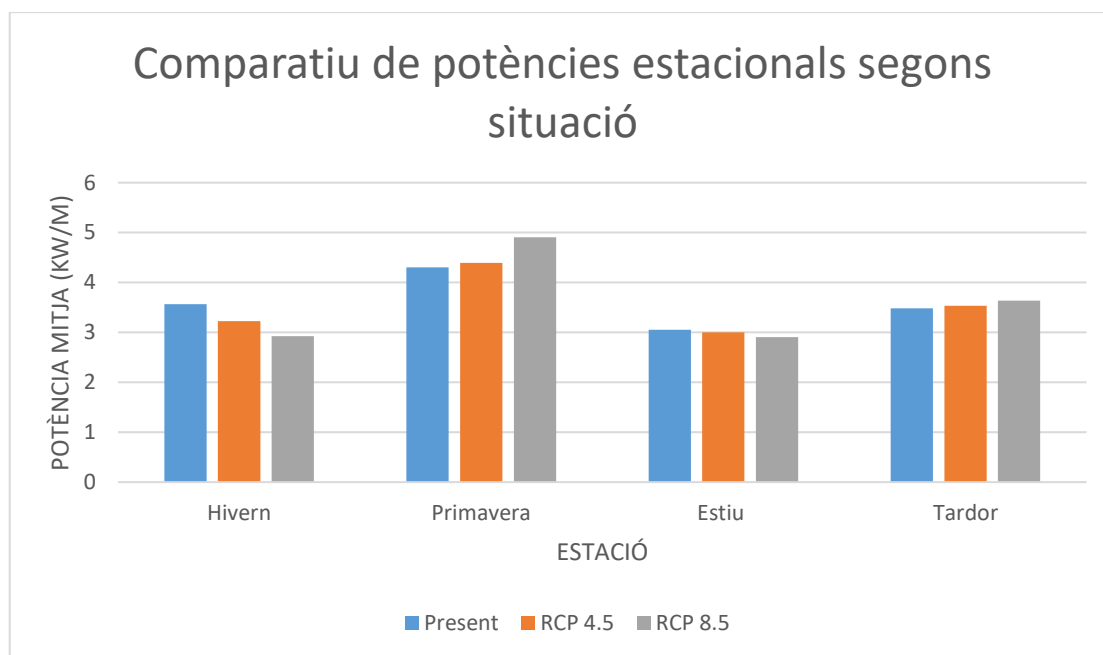


Figura 5.6. Potències mitjanes estacionals dels tres escenaris. Valors expressats en kW/m.

5.4.- Variabilitat temporal de la potència mitjana

A les figura 5.7 i 5.8 es mostren dos gràfics lineals en els quals podem comparar la variabilitat mensual (MV) i estacional (SV) dels tres escenaris analitzats en aquesta tesina (present, futur RCP 4.5 i futur RCP 8.5), per a cada punt del qual hem obtingut les nostres dades.

5.5.- Distribució direccional de l'onatge

A les taules 5.6, 5.7 i 5.8 en les quals trobem les potències mitjanes associades a cada direcció de les onades en cada un dels punts estudiats per a les situacions present, futur RCP 4.5 i futur RCP 8.5 respectivament. Per a cada punt de les taules hem aplicat una escala de colors que ens permet veure quines són les direccions que contenen un potencial energètic més elevat (color verd). Els valors estan expressats en kW/m.

Un cop presentades les taules dels tres escenaris, mostrarem les figures 5.9 a 5.22, on trobem 14 diagrames radials (un per a cada punt d'estudi) o 'roses de la potència de l'onatge'. En

aquests diagrames radials podrem veure una comparativa dels tres escenaris estudiats. Les unitats de la potència de l'onatge són kW/m.

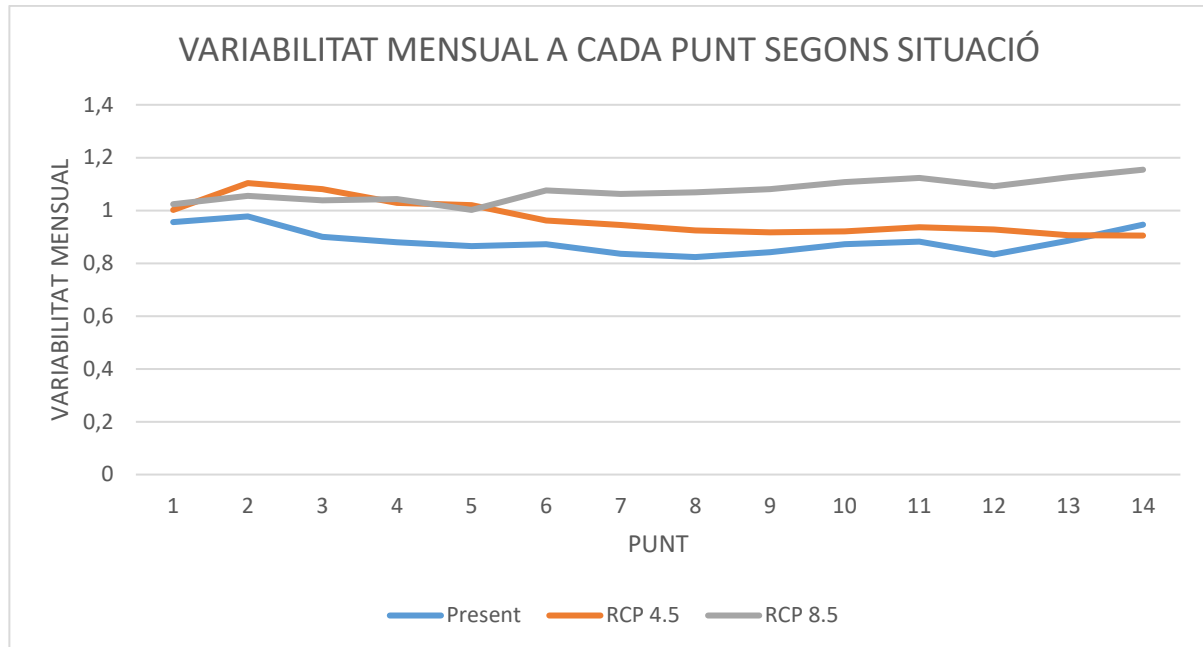


Figura 5.7. Variabilitat mensual dels tres escenaris estudiats en cada un dels 14 punts d'estudi.

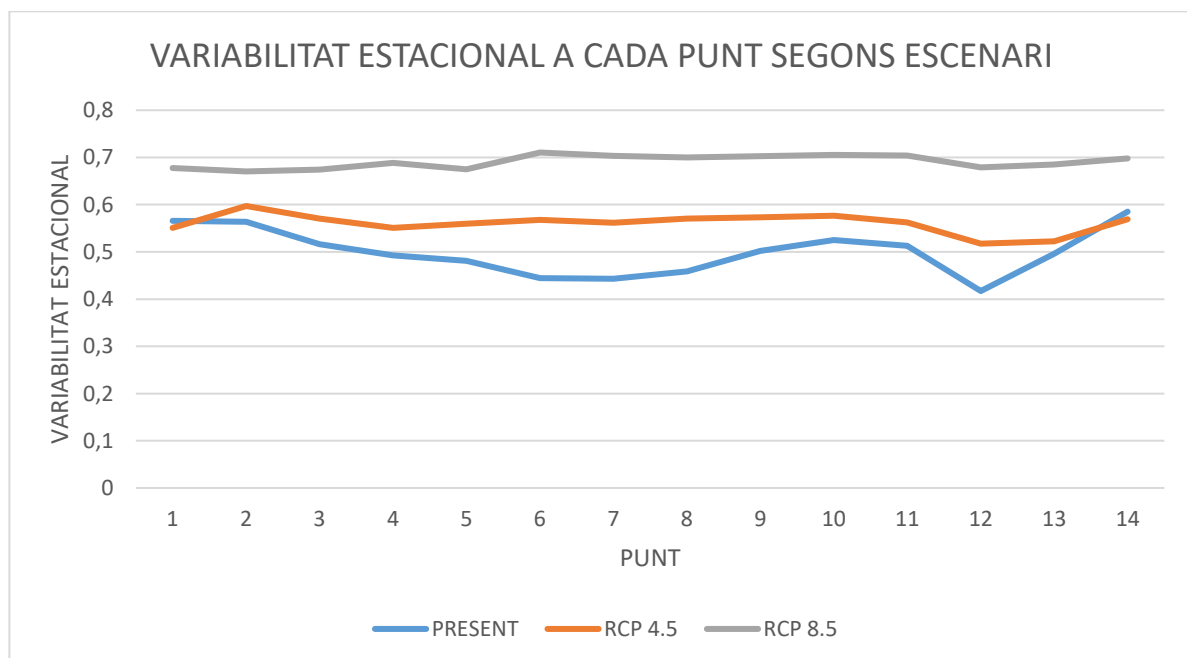


Figura 5.8. Variabilitat estacional dels tres escenaris estudiats en cada un dels 14 punts d'estudi.

DIRECCIONALITAT DE L'ONATGE A L'ESCENARI PRESENT

PUNT	POTÈNCIA MITJANA (KW/m)															
1	0,34	0,13	0,19	0,69	7,95	1,88	0,36	0,20	0,75	0,94	1,25	2,97	2,45	1,02	0,49	0,40
2	0,34	0,14	0,17	1,69	9,11	0,70	0,18	0,11	0,52	0,72	1,04	1,33	1,26	0,77	0,44	0,33
3	0,38	0,22	0,22	3,03	7,32	0,86	0,20	0,19	0,58	0,82	1,07	1,56	1,73	1,22	0,66	0,46
4	0,50	0,32	0,31	3,80	6,99	0,87	0,25	0,18	0,49	1,10	1,48	2,06	2,70	1,93	0,87	0,56
5	0,25	0,19	1,74	1,14	1,12	0,08	0,45	0,04	0,14	0,37	1,19	1,19	0,99	0,89	0,61	0,29
6	0,71	0,50	1,33	4,57	1,59	0,26	0,62	0,00	0,00	1,10	0,70	2,65	3,59	3,85	1,40	0,76
7	0,78	0,52	0,69	5,24	4,91	0,80	0,54	0,43	0,33	0,77	1,83	3,42	7,03	4,23	1,33	0,95
8	0,83	0,62	1,04	5,53	3,95	0,29	0,54	0,36	0,60	1,23	0,94	3,43	8,73	5,20	1,46	0,99
9	0,98	0,74	1,52	5,69	2,88	0,45	0,47	1,29	0,41	1,03	1,22	3,39	10,32	6,20	1,54	1,00
10	1,12	0,93	2,39	5,50	2,00	0,63	0,36	0,82	1,13	0,67	1,25	3,24	10,19	6,62	1,43	1,03
11	1,13	1,18	3,09	5,47	1,52	0,86	0,38	0,84	1,22	1,17	1,23	2,55	9,68	6,51	1,29	1,10
12	0,79	1,10	3,10	1,64	1,09	0,34	0,39	0,29	0,65	0,45	1,01	1,38	1,74	3,90	1,78	0,66
13	1,06	1,59	3,17	1,75	0,57	0,37	0,19	0,25	0,61	0,74	1,18	1,73	2,43	5,53	2,11	0,85
14	1,12	2,19	3,01	1,32	0,80	0,32	0,34	0,29	0,47	0,62	1,41	1,94	3,03	6,04	2,22	1,00
DIRECCIÓ	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW

Taula 5.6. Direccionalitat de l'onatge a l'escenari present per als 14 punts estudiats. Potències en kW/h.

DIRECCIONALITAT DE L'ONATGE A L'ESCENARI FUTUR RCP 4.5

PUNT	POTÈNCIA MITJANA (KW/m)															
1	0,38	0,15	0,15	0,58	7,51	1,77	0,47	0,14	0,73	0,71	1,35	3,03	2,30	0,90	0,51	0,39
2	0,34	0,13	0,15	1,54	8,83	0,65	0,31	0,14	0,33	0,70	1,36	1,46	1,26	0,72	0,39	0,34
3	0,37	0,18	0,18	2,96	6,98	0,88	0,52	0,27	0,53	0,52	1,52	1,71	1,73	1,15	0,57	0,45
4	0,48	0,27	0,25	3,74	6,46	0,67	0,59	0,55	0,51	0,79	1,99	2,16	2,76	1,82	0,80	0,54
5	0,23	0,15	1,76	1,17	0,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	1,41	1,31	1,11	0,91	0,56	0,28
6	0,64	0,44	1,13	4,49	1,18	0,31	0,88	0,63	0,35	0,77	0,54	2,97	3,57	3,75	1,32	0,69
7	0,71	0,42	0,53	5,14	4,86	0,55	0,62	0,36	0,72	0,93	1,08	4,13	7,13	3,94	1,27	0,85
8	0,77	0,55	0,82	5,42	3,86	0,60	0,80	0,47	0,61	0,70	0,77	3,78	8,87	4,82	1,44	0,87
9	0,90	0,66	1,28	5,57	2,85	0,56	0,65	0,85	0,49	0,61	0,95	3,50	10,25	5,76	1,56	0,88
10	1,04	0,78	2,19	5,41	1,55	0,63	0,58	0,99	0,94	0,74	0,76	3,09	10,55	6,17	1,39	0,93
11	1,14	0,96	2,99	5,39	1,32	0,86	0,85	0,94	1,12	0,48	0,95	2,65	10,17	6,04	1,29	1,04
12	0,76	1,04	3,10	1,15	0,95	0,46	0,42	0,67	0,68	0,35	0,95	1,25	1,737	3,97	1,65	0,69
13	0,96	1,49	3,14	1,21	0,912	0,25	0,24	0,57	0,70	0,69	0,94	1,77	2,62	5,39	1,99	0,88
14	1,09	2,06	2,96	1,15	0,35	0,39	0,42	0,47	0,79	0,74	1,08	1,81	3,11	5,83	2,10	0,92
DIRECCIÓ	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW

Taula 5.7. Direccionalitat de l'onatge a l'escenari present per als 14 punts estudiats. Potències en kW/h.

DIRECCIONALITAT DE L'ONATGE A L'ESCENARI FUTUR RCP 8.5

PUNT	POTÈNCIA MITJANA (KW/m)															
1	0,40	0,16	0,18	0,62	7,61	2,44	0,31	0,19	0,48	0,69	1,34	2,76	2,17	0,86	0,46	0,37
2	0,29	0,15	0,17	1,59	8,93	0,93	0,30	0,12	0,39	0,66	1,25	1,35	1,12	0,73	0,38	0,33
3	0,37	0,21	0,21	3,015	7,34	1,17	0,64	0,17	0,30	0,59	1,15	1,89	1,59	1,13	0,58	0,40
4	0,50	0,30	0,27	3,79	6,78	0,55	0,53	0,20	0,44	0,78	1,77	3,22	2,53	1,78	0,80	0,57
5	0,24	0,14	1,82	1,21	0,29	0,54	0,00	0,00	0,00	0,17	1,25	1,36	0,98	0,84	0,56	0,28
6	0,65	0,46	1,23	4,57	1,54	0,31	0,35	0,44	0,19	0,055	0,57	2,69	3,45	3,56	1,31	0,72
7	0,70	0,45	0,67	5,20	5,00	1,32	0,42	0,61	0,27	0,27	0,90	4,03	6,61	3,82	1,23	0,87
8	0,80	0,57	0,95	5,52	3,74	1,50	0,84	0,77	0,35	0,28	0,69	3,41	8,13	4,65	1,34	0,86
9	0,92	0,80	1,54	5,64	2,80	1,16	0,79	0,82	0,58	0,43	0,86	3,24	9,33	5,49	1,41	0,912
10	1,04	0,93	2,53	5,45	2,00	1,15	0,79	0,91	0,84	0,98	0,93	2,81	9,56	5,79	1,28	0,96
11	1,20	1,06	3,31	5,42	1,34	0,98	0,80	0,85	1,11	0,74	1,18	2,69	9,19	5,59	1,12	1,06
12	0,71	1,08	3,21	1,31	1,0	0,48	0,41	0,47	0,66	0,47	0,97	1,01	1,65	3,51	1,51	0,62
13	0,90	1,56	3,25	1,56	0,92	0,45	0,20	0,38	0,50	0,79	0,96	1,31	2,63	4,74	1,84	0,79
14	1,01	2,13	3,07	1,28	0,50	0,55	0,61	0,38	0,82	0,42	1,13	1,51	2,95	5,34	1,93	0,86
DIRECCIÓ	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW

Taula 5.8. Direccionalitat de l'onatge a l'escenari present per als 14 punts estudiats. Potències en kW/h.

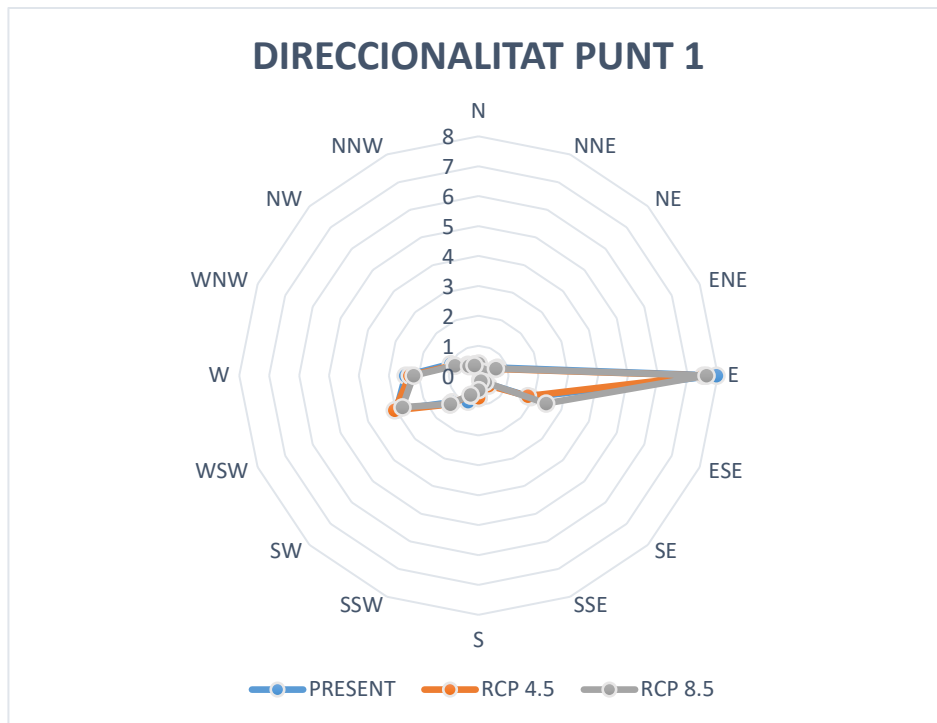


Figura 5.9. Diagrama radial comparatiu de la direccionalitat de l'onatge pels 3 escenaris analitzats al punt d'estudi 1.

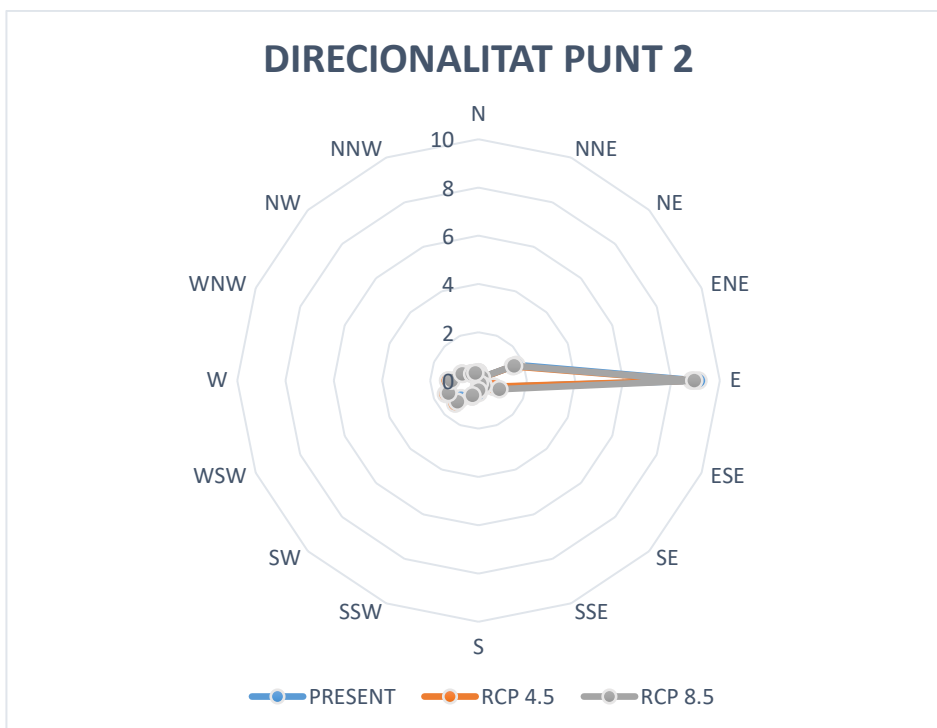


Figura 5.10. Diagrama radial comparatiu de la direccionalitat de l'onatge pels 3 escenaris analitzats al punt d'estudi 2.

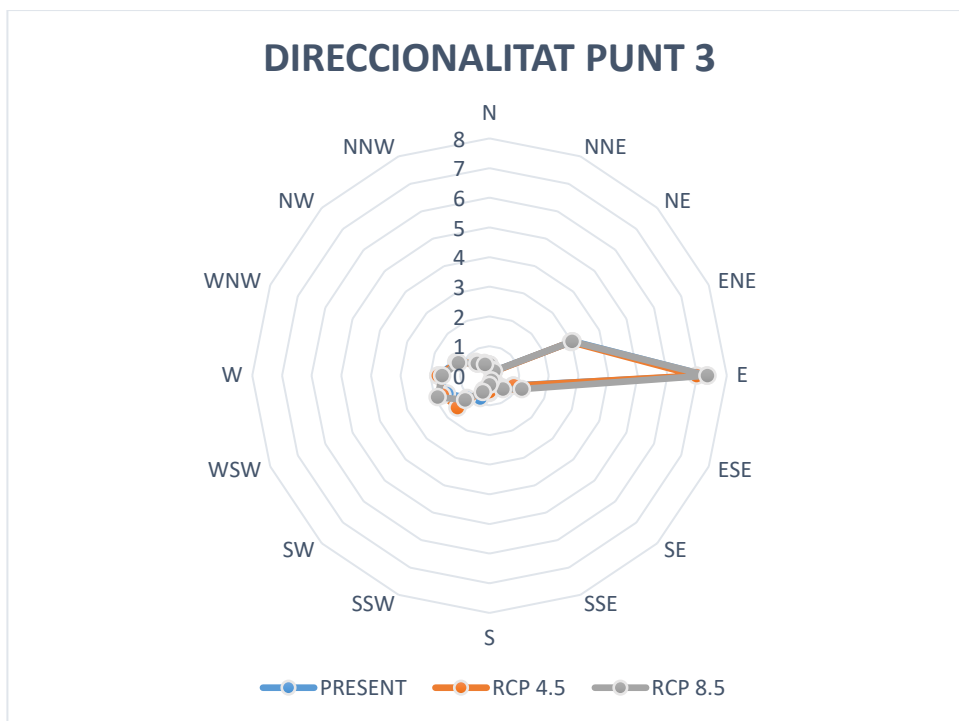


Figura 5.11. Diagrama radial comparatiu de la direccionalitat de l'onatge pels 3 escenaris analitzats al punt d'estudi 3.

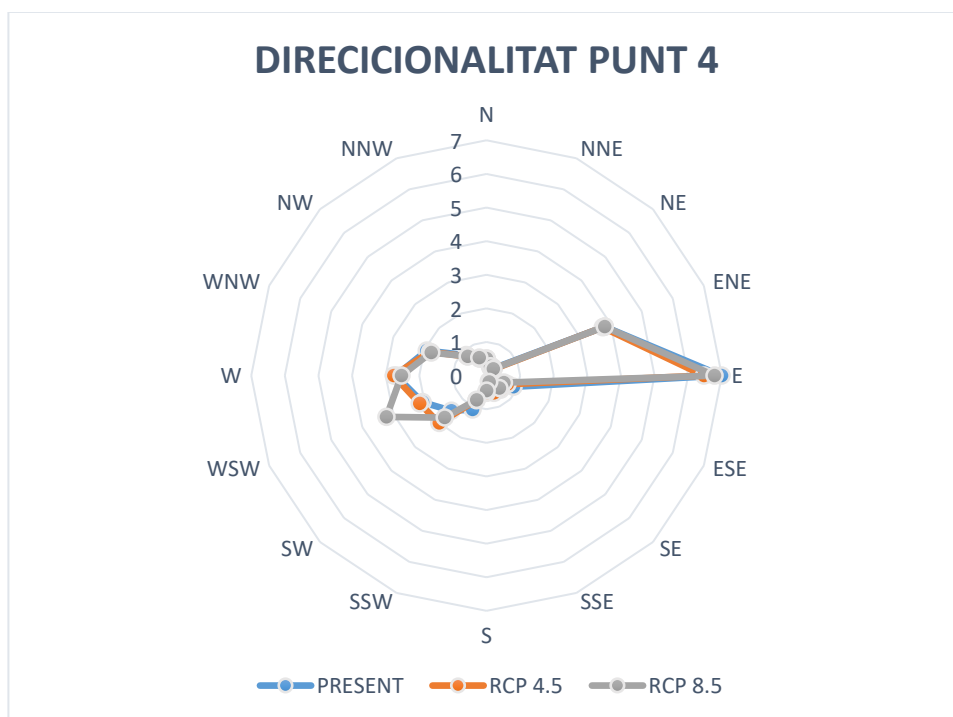


Figura 5.12. Diagrama radial comparatiu de la direccionalitat de l'onatge pels 3 escenaris analitzats al punt d'estudi 4.

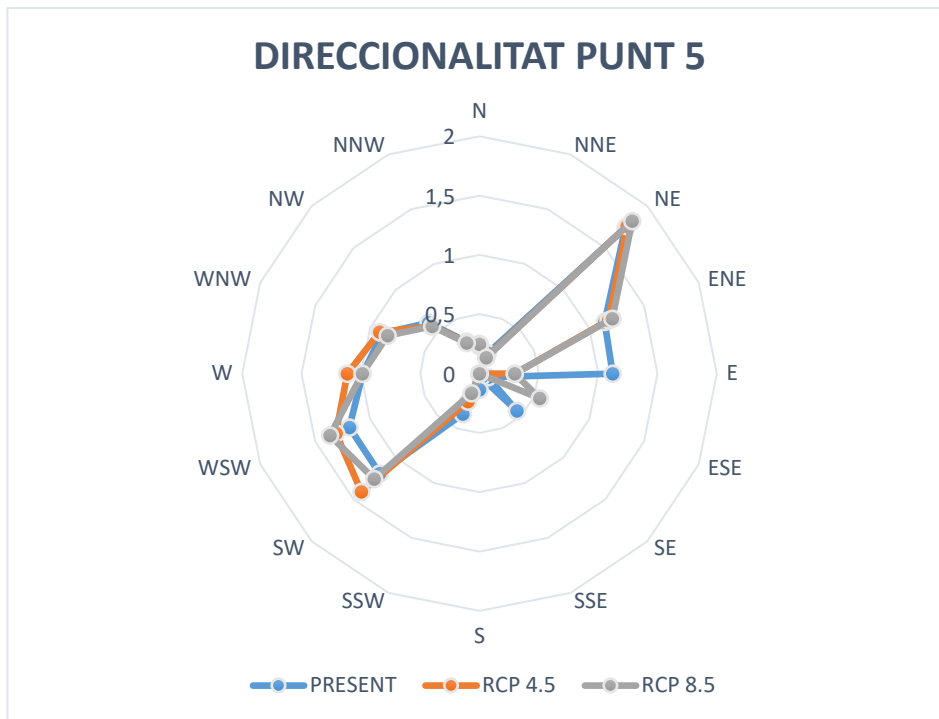


Figura 5.13. Diagrama radial comparatiu de la direccionalitat de l'onatge pels 3 escenaris analitzats al punt d'estudi 5.

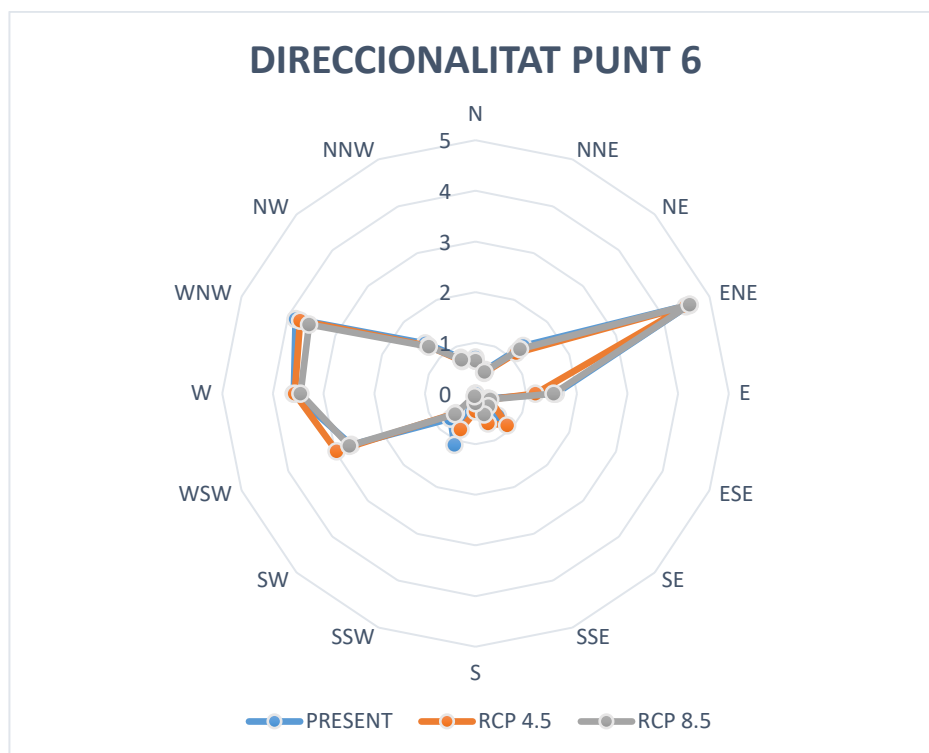


Figura 5.14. Diagrama radial comparatiu de la direccionalitat de l'onatge pels 3 escenaris analitzats al punt d'estudi 6.

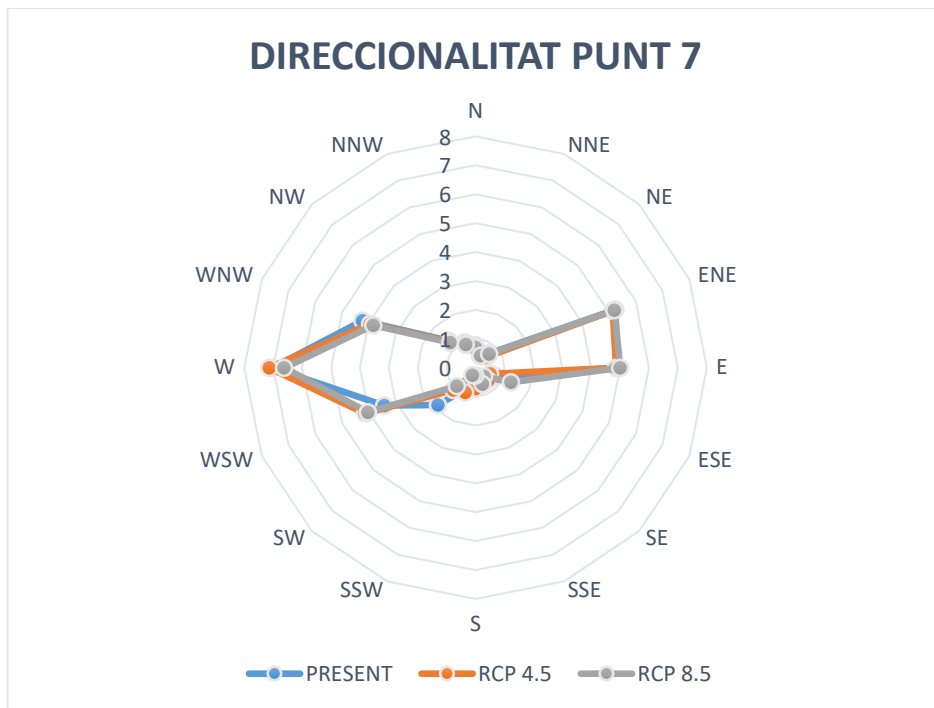


Figura 5.15. Diagrama radial comparatiu de la direccionalitat de l'onatge pels 3 escenaris analitzats al punt d'estudi 7.

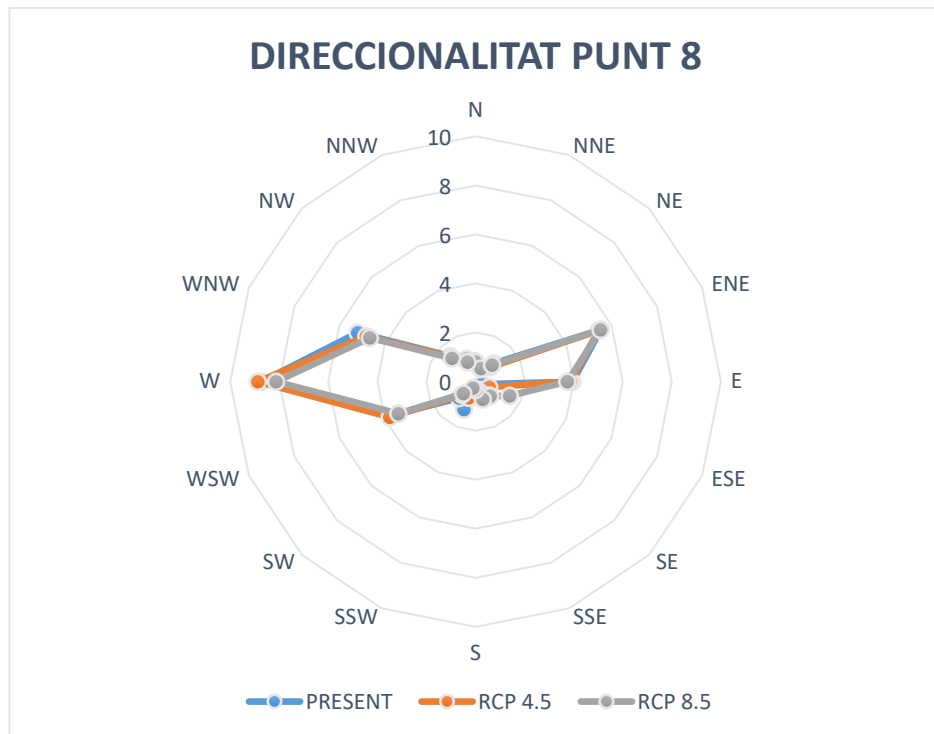


Figura 5.16. Diagrama radial comparatiu de la direccionalitat de l'onatge pels 3 escenaris analitzats al punt d'estudi 8.

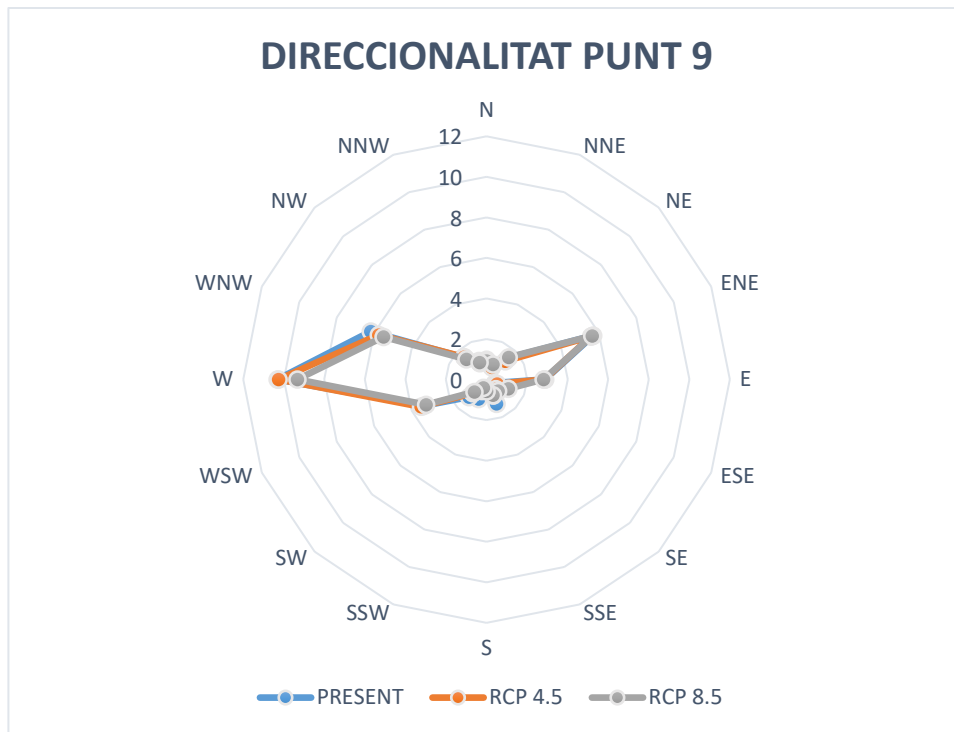


Figura 5.17. Diagrama radial comparatiu de la direccionalitat de l'onatge pels 3 escenaris analitzats al punt d'estudi 9.

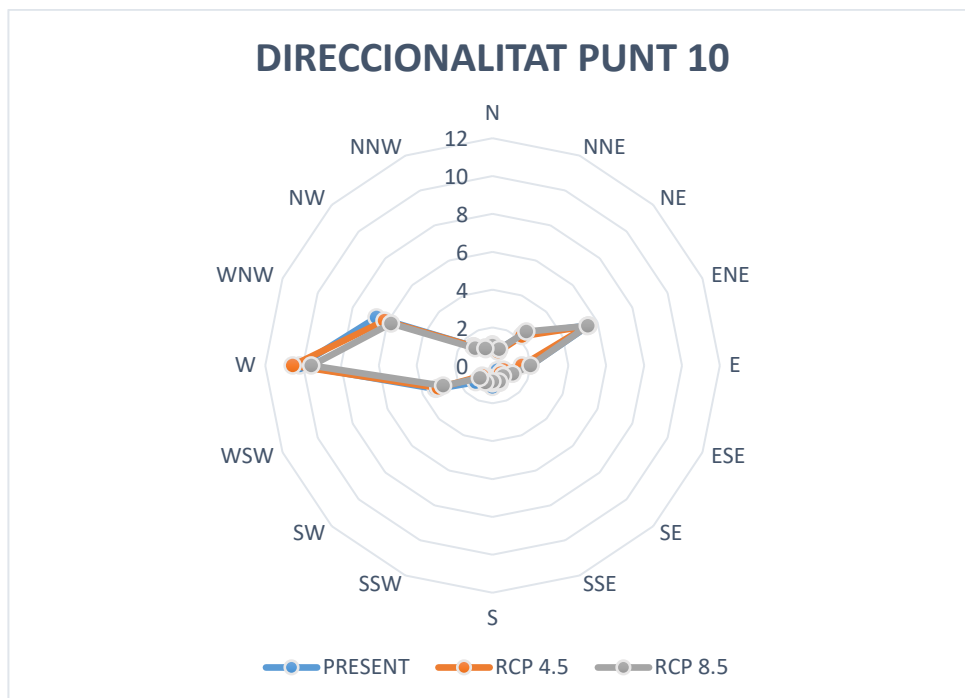


Figura 5.18. Diagrama radial comparatiu de la direccionalitat de l'onatge pels 3 escenaris analitzats al punt d'estudi 10.

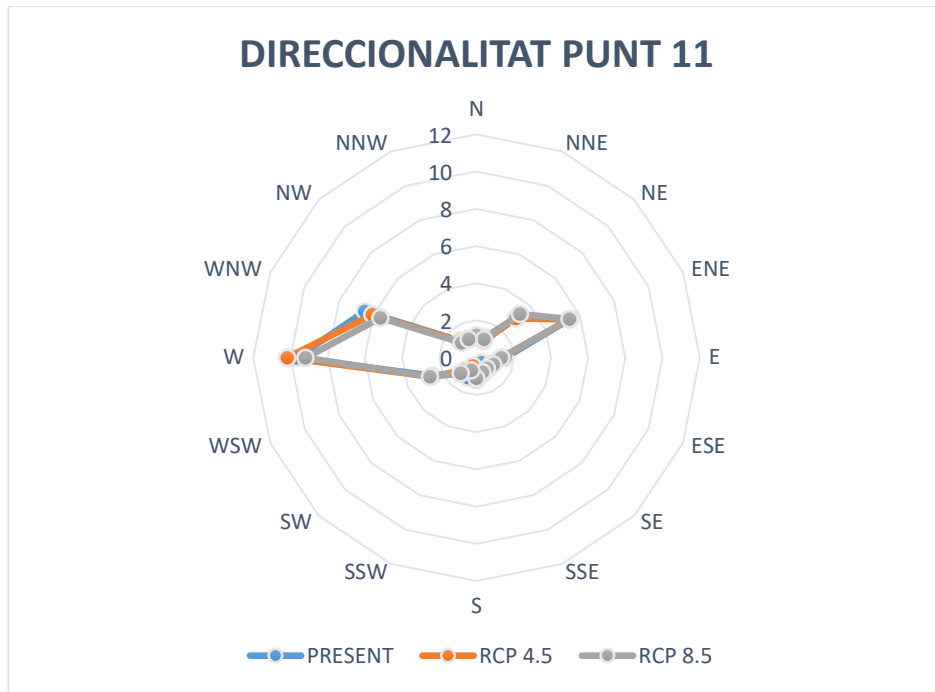


Figura 5.19. Diagrama radial comparatiu de la direccionalitat de l'onatge pels 3 escenaris analitzats al punt d'estudi 11.

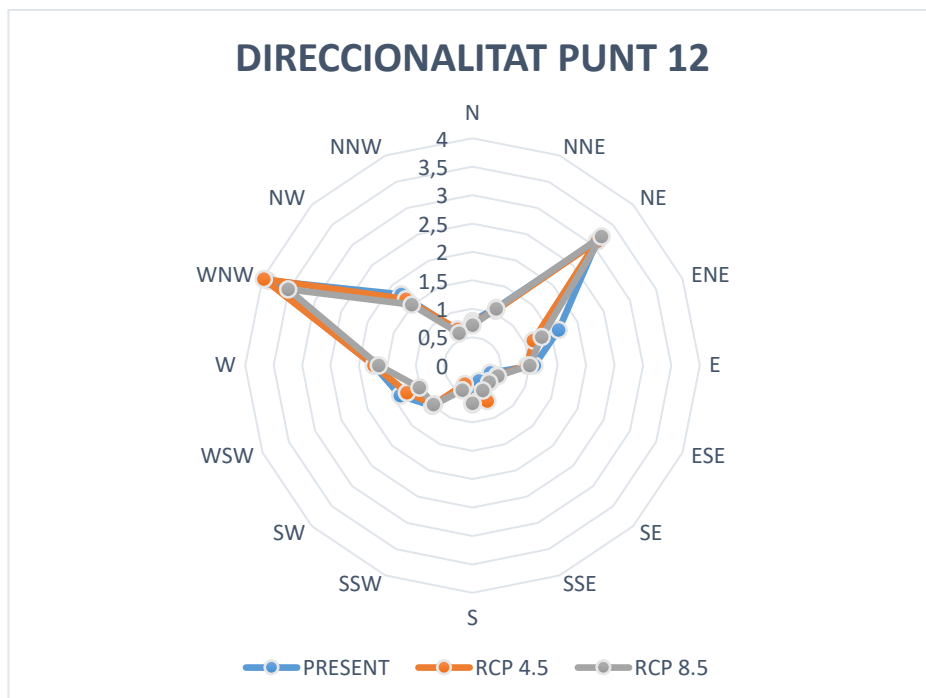


Figura 5.20. Diagrama radial comparatiu de la direccionalitat de l'onatge pels 3 escenaris analitzats al punt d'estudi 12.

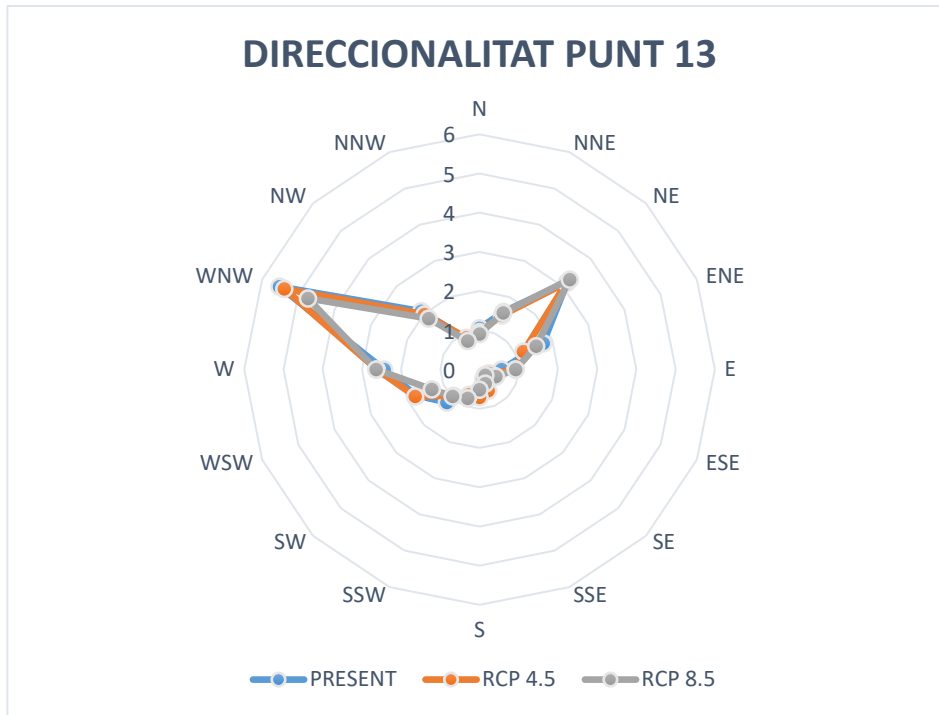


Figura 5.21. Diagrama radial comparatiu de la direccionalitat de l'onatge pels 3 escenaris analitzats al punt d'estudi 13.

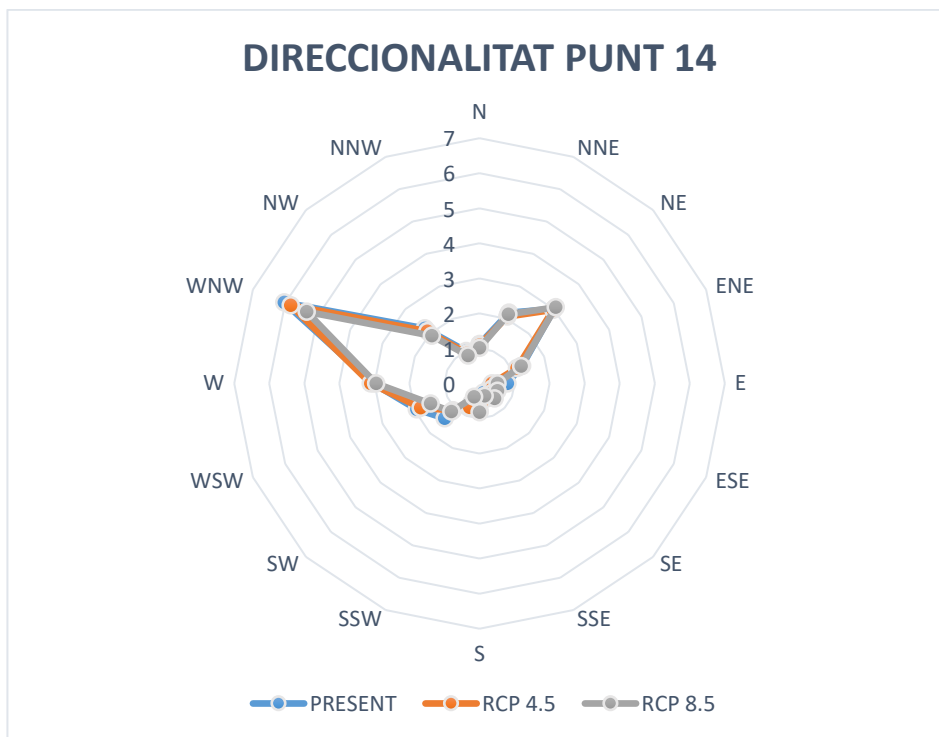


Figura 5.22. Diagrama radial comparatiu de la direccionalitat de l'onatge pels 3 escenaris analitzats al punt d'estudi 14.

6.- Anàlisi dels resultats

6.1.- Potència mitjana anual

Analitzant les taules i figures 5.1, 5.2 i 5.3 podem apreciar que els fluxos de potencial energètic mitjans en els catorze punts d'estudi varien substancialment tenint en compte el model del qual obtenim les nostres dades.

Ja sigui a l'escenari present, a l'escenari futur RCP 4.5 o a l'escenari futur RCP 8.5 les dades proporcionades pel model de la institució italiana CMCC, sempre presenten uns fluxos de potencial energètic superiors als tres altres models. És més, respecte a la institució francesa LMD és pràcticament dues vegades més elevat com a mínim en gairebé tots els punts per als tres escenaris contemplats. D'altra banda, els models de les institucions CNRM i GUF, francesa i alemanya respectivament, es situarien en tots tres escenaris en una situació intermèdia. A causa d'aquesta disparitat en els fluxos de potencial energètic mitjans, hem considerat oportú calcular un promig dels quatre models per a trobar-nos en una situació més representativa del potencial energètic de la nostra zona d'estudi.

Fixant-nos ara en el promig de cadascun dels punts analitzats, veiem dues zones diferenciades en quan a la capacitat d'aquest potencial. Per una banda tenim els punts de l'1 al 6 i del 12 al 14 que presenten unes potències mitjanes baixes, i d'altra banda tenim la zona entre els punts 7 i 11 que presenten una potència significativament acceptable per a tractar-se del Mar Mediterrani. En concret, tots els punts que es troben en aquesta zona intermèdia presenten una potència mitjana promig per sobre dels 4 kW/m i en el cas dels punts 9, 10 i 11 de pràcticament 5 kW/m. Aquests seran per tant els punts de més interès.

Pel que fa al potencial energètic del punt cinquè veiem que és especialment menor als altres. No obstant això, si recapitem fins al capítol tercer, on vàrem presentar el mapa dels punts, i les característiques de cadascun d'aquests (taula 3.1), podem veure que això és deu a què aquest punt es troba molt a prop de la costa i a poca profunditat.

Es tracta per tant, de valors baixos, si ho comparem amb els resultats del potencial que s'estima poder extreure a les Illes Madeira (60kW/m màxim; Rusu et al., 2012), o a la costa atlàntica del Marroc (30 kW/m màxim, Sierra, et al., 2015). En canvi, si ho comparem amb el potencial que s'estima poder extreure a Gran Canaria (16 kW/m

màxim; Cavia et al., 2009) o a Menorca (8,2 kW/m màxim; Sierra, et al., 2014) podem apreciar que no és tan distant.

Pel que fa a la taula i figura 5.4, i tenint en compte, com hem comentat anteriorment, el promig de cada escenari, podem calcular la variació del potencial energètic entre els escenaris futurs i el present. Comparant la variació que presenta l'escenari futur RCP 4.5 respecte a l'escenari futur RCP 8.5, podem veure que el primer d'aquests en cap dels punts augmenta el potencial energètic més que en el segon escenari. És més, l'escenari RCP 4.5 pateix una disminució del potencial energètic en deu dels catorze punts. Per contra, l'escenari RCP 8.5 augmenta el seu potencial energètic en vuit dels catorze punts estudiats, fet que ens porta a pensar que, com més extrem és l'escenari (més emissions de gasos d'efecte hivernacle a l'atmosfera), més inestable es torna el clima i, per tant, tenim més tempestes.

En concret, per al escenari RCP 4.5, els 4 punts (del 2 al 5) que augmentarien el potencial energètic de les ones ho farien entre un 0,40% i un 2,01%. A la resta de punts, per aquest escenari, la disminució de potència variaria entre un -0,39% i un -3,25%. Considerant el conjunt dels 14 punts, per al RCP 4.5 la potència de les onades disminuiria gairebé un -1.8%.

Pel que fa al escenari RCP 8.5, els 8 punts en els que la potència de les ones s'incrementaria són del 1 al 7 i el 12, amb valors entre el 0,34% i el 7,89%. A la resta de punts, les disminucions variarien entre -1,25% i -6,14%. En el conjunt dels 14 punts, el potencial seria pràcticament el mateix que a la situació present (-0,1%).

6.2.- Producció anual teòrica

De la taula 5.5 podem extreure les mateixes conclusions que de la taula 5.4 a nivell de variacions entre escenaris, ja que l'únic que hem fet ha estat multiplicar cada flux de potencial energètic per les 8760 hores que té un any, i dividir-ho entre 1000 per a realitzar el canvi d'unitats. Aleshores, simplement hem presentat la taula per a tenir un ordre de magnitud del rang màxim de producció potencial del que estariem parlant en cas que el projecte d'implantació d'algun dels sistemes d'extracció d'energia de les onades tires endavant.

Per tant, també es conserven les comparacions que hem fet amb els potencials màxims que s'esperen extreure de Gran Canaria, costa atlàntica del Marroc, Menorca i les Illes Madeira.

6.3.- Distribucions temporals de la potència mitjana

Com hem comentat anteriorment, per a l'anàlisi dels resultats d'aquesta tesina hem considerat el promig dels models estudiats per a tenir una mostra representativa de les possibles futures condicions. Un cop hem analitzat quina serà la potència mitjana i productivitat de cada un dels punts estudiats en els tres escenaris és hora d'analitzar com aquesta potència es distribueix al llarg del temps. És a dir, quins mesos i després estacions tenen més potencial energètic, i quina en serà la seva tendència en el futur.

A la figura 5.5 podem veure les potències mitjanes de cada escenari al llarg de tots els mesos de l'any. Per una banda podem apreciar que els mesos amb un potencial energètic més elevat en tots tres escenaris i per aquest ordre són Març (5,66 kW/m de promig) i Abril (5,25 kW/m de promig), essent també més potents ambdues situacions futures en respecte a la present. D'altra banda, el mes que compta amb el potencial energètic més baix de l'any, desembre, ho és per als tres escenaris, i amb un promig de 2,69 kW/m.

D'una banda, el més que presenta una variació més significativa en l'escenari RCP 4.5 en relació amb l'escenari present és el mes de Maig que augmenta el seu potencial energètic en 1,36 kW/m, seguit de l'agost (0,76 kW/m), el Juliol (0,56 kW/m) i l'Octubre (0,53 kW/m). Respecte a disminució del potencial energètic, el mes que pateix més és el Gener amb una pèrdua d'uns 0,37 kW/m.

D'altra banda, el més que presenta una variació més significativa en el escenari RCP 8.5 en relació amb l'escenari present és el mes de Maig que augmenta el seu potencial energètic en 1,68 kW/m, seguit del Març (1,34 kW/m), l'Abril (1,15 kW/m) i l'Octubre (0,73 kW/m). Pel que fa a disminució del potencial energètic, el mes que pateix més és el Febrer amb una pèrdua d'uns 0,49 kW/m.

Un cop analitzades les potències mitjanes mensuals per a cada escenari podem fixar-nos en les potències mitjanes estacionals per a cada escenari. Analitzant la figura 5.6 podem veure que l'estació més energètica de l'any en la situació present és la primavera, seguida de l'hivern, la tardor i per últim l'estiu. No obstant això, si analitzem ambdues

situacions futures, l'estació més energètica segueix sent la primavera, però la segueixen la tardor, l'estiu i per últim l'hivern, és a dir, l'ordre s'altera. L'hivern per tant passa de ser la segona estació més energètica a ser l'última, fet que és sorprenent, ja que generalment a l'hemisferi nord l'estació més energètica és l'hivern degut al mal temps.

Malgrat aquests canvis, la potència que conté la nostra zona segueix sent pràcticament la mateixa, l'únic que en canvia la seva distribució estacional.

6.4.- Variabilitat temporal de la potència mitjana

Com vàrem explicar anteriorment al capítol 4.3.2, els coeficients que ens permeten estudiar la variabilitat temporal són el Coeficient de variabilitat (CV, mesura la variabilitat temporal cada tres hores, ja que és el temps entre les nostres dades), el Coeficient de variabilitat mensual (MV) i per últim el Coeficient de variabilitat estacional (SC).

En les figures 5.7 i 5.8 s'exposen el MV i el SV respectivament. Per a les dues situacions futures, ambdós coeficients augmenten respecte a l'escenari present en tots els punts d'estudi, excepte per a l'RCP 4.5 que el MV disminueix en el punt 14, i el SV en els punts 1 i 14. Això és una informació negativa, ja que com sabem, com més grans són aquests coeficients, més variable al llarg del temps és la distribució de l'energia de l'onatge. Tot i això, això no és alarmant, ja que en el cas de les SV en tots els casos ens trobem per sota del valor 0,7 i en el cas de les MV en cap dels casos superem el valor 1,2 fet que és molt positiu, ja que ens diu que no ens trobem davant d'un onatge molt variable en el temps.

Per tant, com que aquests valors són acceptables, aquests no influiran en la nostra decisió a l'hora d'escollir els punts més propicis per a poder extreure l'energia. Així doncs seguirem tenint en compte els punts esmentats a l'apartat 6.1.

6.5.- Distribució direccional de l'onatge

Per últim, l'únic paràmetre que ens falta per estudiar quins són els punts més idonis per a l'extracció de l'energia de les ones de la nostra zona d'estudi és la direccionalitat de l'onatge.

Analitzant les taules 5.6, 5.7 i 5.8 en les quals trobem les potències mitjanes associades a cada direcció de les onades en cada un dels punts estudiats per a les situacions present, futur RCP 4.5 i futur RCP 8.5 respectivament, i les figures 5.9 a 5.22 en las quals trobem les direccionalitats a cada punt mitjançant diagrames radials, podem veure que es pot dividir els nostres punts en tres grups per a agrupar-los segons les seves direccionalitats.

El primer grup està compost pels punts 1, 2, 3 i 4, que són aquells que estan situats a la zona més occidental de la nostra zona d'estudi. En aquests predomina l'onatge amb més potencial provinent de l'est, fet que podem entendre observant el mapa dels punts presentat al capítol tercer, ja que a l'oest la nostra zona d'estudi està limitada geogràficament per l'estret de Gibraltar. On hi trobem el sud de la península Ibèrica i el nord-oest del Marroc, que fan de barrera a l'onatge.

El segon grup és el compost pels punts 13 i 14, és a dir, els punts que es troben a l'extrem més oriental de la nostra zona d'estudi. Aquests punts presenten un potencial d'onatge predominant de la direcció WNW.

Per últim ens queda un extens grup intermedi, que comprèn els punts continguts entre el cinquè i el dotze, incloent-hi ambdós. En aquesta zona intermèdia els nostres punts tenen dues direccions d'onatge predominant, la ENE i la W. No obstant això, en tots els punts hi ha una direcció d'onatge clarament predominant. Pels punts cinquè i sisè, és la direcció ENE, però a partir d'aquí, a mesura que anem més cap l'est, la direcció W va agafant força, fins a arribar al dotzè punt, on la direcció WNW ja predomina sobre les altres.

Pel que fa als punts 9, 10 i 11 del nostre estudi, que com hem comentat al primer apartat d'aquest capítol són els que presenten un potencial energètic més elevat, i per tant els de més interès, la seva direccionalitat predominant per als tres escenaris és l'Oest. En concret, les onades que provenen de la direcció W en el punt d'estudi novè tenen una potència mitjana de 9,97 kW/m, en el desè de 10,09 kW/m, i en l'onzè de 9,68 kW/m. Tot i això, en aquests tres punts, l'onatge provinent de l'ENE també presenta una potència mitjana per sobre dels 5 kW/m.

7.- Conclusions i treball futur

7.1.- Conclusions

La població humana ha experimentat un creixement ininterromput al llarg d'aquests últims anys. De la mà ha vingut l'arribada de les tecnologies, els vehicles i les indústries, que han augmentat paral·lelament al creixement de la població la demanda energètica global. Per a cobrir aquesta demanda s'han explotat al màxim les fonts de combustibles fòssils i, el pitjor de tot, és que la combustió d'aquests per a generar l'energia esmentada, genera gasos d'efecte hivernacle que ens han portat al Canvi Climàtic en el qual ens trobem immersos.

Aquest Canvi Climàtic té unes conseqüències esfereïdores, com ara, la pujada del nivell dels oceans, l'escalfament global, canvis en el patró dels vents, etc.

En aquesta tesina ens hem centrat en l'impacte d'aquestes sobre l'estat del mar, en particular sobre l'energia de l'onatge i, en concret, a la costa mediterrània del Marroc. País idoni, ja que és emergent (està creixent la població i s'està desenvolupant la tecnologia i economia), depèn en un 90% de combustibles fòssils (importats, ja que no en té) en la seva matriu energètica, i per últim, està immers en un pla energètic que facilita la inversió en energies verdes.

Per tenir en compte aquests efectes, hem utilitzat les dades d'onatge obtingudes a partir dels paràmetres de circulació atmosfèrica proporcionats per quatre models europeus (CMCC, CNRM, GUF, LMD), en tres escenaris diferents, un per al present (1986-2005), i dos per al futur (2081-2100), RCP 4.5 i RCP 8.5, definits per les trajectòries de l'IPCC en el seu AR5 (2013), per a veure com esdevindrà en un futur el potencial energètic de les onades.

En l'escenari RCP 4.5, tots els models perdran potencial energètic excepte el model LMD. Per altra banda, en l'RCP 8.5 els models CMCC i LMD guanyaran potencial energètic, i per contra el CNRM i el GUF tornaran a sofrir un minvament del recurs. Això és una conclusió negativa, ja que de vuit situacions, només en tres tenim un augment del potencial energètic. Tot i això el percentatge de minvament en ambdós escenaris futurs és inferior al 1%, fet que pot ser clau en la presa de decisió a l'hora d'implantar una planta de dispositius WEC.

L'anàlisi ens ha servit també per a veure, que els punts que presenten un potencial energètic més elevat van del vuitè al onzè (considerant per la potència de cada punt, la mitjana dels quatre models), tots ells situats de la zona central cap a l'est de la area d'estudi considerada.

Aquest conjunt de punts, en l'escenari RCP 4.5 pateix una davallada de potencial energètic en tots els punts, i en l'escenari RCP 8.5 només presenta un augment de potencial energètic per al punt setè. Tot i que els punts que pateixen una davallada més gran són els que més potencial contenen, aquests segueixen situant-se energèticament per sobre dels altres, amb un rang de potències pròximes als 5kW/m, acceptable per a tractar-se del Mar Mediterrani, però baixa comparada a escala global.

Pel que fa a la variabilitat estacional dels punts seleccionats, podem concloure, que aquesta no afectarà la nostra presa de decisió, ja que per a tots els punts, ens trobem per sota del valor 0,7. Per últim, la direcció predominant de procedència de l'onatge dels punts amb major potencial energètic és de l'Oest.

És evident, per tant, que mitjançant l'energia que seríem capaços d'extreure de l'onatge de la costa mediterrània del Marroc, no podem cobrir la demanda energètica del país ni de lluny. El que sí que podríem però, és aportar energia a la matriu energètica global del país, és a dir, proveir el país d'una nova, i emergent energia renovable alternativa.

Si més no, aquesta implantació sabem que no pot ser immediata, ja que aquesta font d'energia encara no es troba en fase de comercialització, ja que el sector de la indústria dels dispositius WEC es troba en un procés lent d'investigació, ja que està molt limitat pels recursos econòmics. Tot i això, sabem que es tracta d'una font d'energia renovable (i, en conseqüència inesgotable) que pot arribar a tenir impactes ambientals molt reduïts comparats amb els dels combustibles fòssils, i que a més a més té un impacte visual considerablement baix comparat amb els aerogeneradors de l'energia eòlica.

Així doncs, és hora de seguir investigant i invertint recursos a millorar i desenvolupar els dispositius existents. De la mateixa manera, que és important seguir conscienciant a la població de la importància de la situació en la qual estem immersos, així com també entendre, que encara que el causant del problema som nosaltres, també en podem ser la solució.

7.2.- Treball futur

Un cop hem presentat les conclusions sobre el treball, és moment per a donar-li continuïtat, així que ens agradaria presentar diferents línies de treball o d'investigació, de manera que en un futur, nosaltres mateixos puguem seguir endavant amb l'estudi, o per a que algú altre pugui utilitzar aquest treball com a base d'un futur estudi.

Com a continuació d'aquest treball es podria analitzar com afectaria el canvi climàtic a la producció d'energia per a diferents WECs, que són els aparells utilitzats per extreure energia de les ones. Ja hi ha diferents aparells en fase de proves a plantes pilot i cadascun d'ells té una matriu energètica diferent. Això vol dir que cada aparell respon de forma desigual a les condicions d'onatge (donades per l'altura, el període i la direcció). Aplicant les dades utilitzades en aquest treball als diferents WECs, es podria esbrinar quins són els models més adients per ser instal·lats en la costa mediterrània del Marroc.

Aquest treball, podria venir acompanyat també d'un estudi econòmic comparatiu entre els diferents WECs que existeixen al mercat en funció de la seva rendibilitat. Així com també, determinar el número de dispositius necessaris per a cobrir la demanda que volem satisfer.

Una altra ampliació podria ser analitzar les dades reals de l'onatge mitjançant una boia, per a després poder comparar-les amb les nostres dades obtingudes mitjançant models numèrics i models de circulació atmosfèrica. Per a fer això seria ideal que disposéssim d'una boia o varies a la zona d'estudi, a poder ser, en la zona més pròxima als nostres punts amb més potencial energètic (P7 al P11).

Com ja vàrem comentar en el primer capítol, l'IPCC ja està en procés de redactat de l'AR6. Seria interessant també poder comparar les noves trajectòries del Canvi Climàtic que es definiran en aquest, per a veure com evolucionaran els patrons de l'onatge en comparació al treball presentat.

Per últim, també podríem fer un estudi comparatiu dels resultats obtinguts en aquest treball amb els que obtindríem si treballéssim amb altres models de circulació generals, diferents models de circulació regionals, o fer les nostres pròpies projeccions de l'onatge en funció de l'impacte del Canvi Climàtic.

8.- Referències

- Arinaga RA, Cheung KF (2012). Atlas of global wave energy from 10 years of reanalysis and hindcast data. *Renewable Energy*, 39, 49-64.
- Besio G, Mentaschi L, Mazzino A (2016). Wave energy resource assessment in the Mediterranean Sea on the basis of a 35-year hindcast. *Energy*, 94, 50-63.
- Booij N, Ris RC, Holthuijsen LH (1999). A third-generation wave model for coastal regions. 1. Model description and validation. *Journal of Geophysical Research*, 104, 7649-7666.
- Casas-Prat M, Sierra JP (2013). Projected future wave climate in the NW Mediterranean Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118, 3548-3568.
- Cornett AM. A global wave energy resource assessment. In: International offshore and polar engineering conference, Vancouver, Canada; 2008. p. 318-326.
- Déqué M, et al. (2007). An intercomparison of regional climate simulations for Europe: Assessing uncertainties in model projections. *Climatic Change*, 81, 53-70.
- Gonçalves M, Martinho P, Guedes Soares C (2014) Assessment of wave energy in the Canary Islands. *Renewable Energy*, 68, 774-784.
- Guillou N, Chapalain G (2015). Numerical modelling of nearshore wave energy resource in the Sea of Iroise. *Renewable Energy* 83, 942-953.
- Gunn K, Stock-Williams C (2012). Quantifying the global wave power resource. *Renewable Energy*, 44, 296-304.
- Harrison GP, Wallace AR (2005). Sensitivity of wave energy to climate change. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 20, 870-877.
- Hemer MA, Katzfey J, Trenham C (2013). Global dynamical projections of surface ocean wave climate for a future greenhouse gas emission scenario. *Ocean Modelling*, 70, 221-245.
- Iglesias G, Carballo R (2010). Offshore and inshore wave energy assessment: Asturias (N Spain). *Energy* 2010, 35, 1964-1972.
- Iglesias G, Carballo R (2011). Wave resource in El Hierro e an island towards energy self-sufficiency. *Renewable Energy*, 36, 689-698.
- IPCC (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, New York NY.

- Liberti L, Carillo A, Sannino G (2013). Wave energy resource assessment in the Mediterranean, the Italian perspective. *Renewable Energy*, 50, 938-949.
- Lionello P, Cogo S, Galati MB, Sanna A (2008). The Mediterranean surface wave climate inferred from future scenario simulations. *Global and Planetary Change*, 63, 152–162.
- Mackay EBL, Bahaj AS, Chellenor PG (2010a). Uncertainty in wave energy resource assessment. Part 1: historic data. *Renewable Energy*, 35, 1792-1808.
- Mackay EBL, Bahaj AS, Chellenor PG (2010b). Uncertainty in wave energy resource assessment. Part 2: variability and predictability. *Renewable Energy*, 35, 1809-1819.
- Mori N, Shimura T, Yasudaa T, Masea H (2013). Multi-model climate projections of ocean surface variables under different climate scenarios—future changes of waves, sea level and wind. *Ocean Engineering*, 71, 122–129.
- Nikulin G, Kjellstrom E, Hansson U, Strandberg G, Ullerstig A (2011). Evaluation and future projections of temperature, precipitation and wind extremes over Europe in an ensemble of regional climate simulations. *Tellus A*, 63, 41–55.
- Rusu L, Guedes Soares C (2012a). Wave energy pattern around the Madeira Islands. *Energy*, 45, 771-785.
- Rusu L, Guedes Soares C (2012b). Wave energy assessments in the Azores Islands. *Renewable Energy*, 45, 183-196.
- Sierra JP, Casas-Prat M, Campins E (2017b). Impact of climate change on wave energy resource: The case of Menorca, Spain. *Renewable Energy*, 101, 275-285.
- Sierra JP, González-Marco D, Sospedra J, Gironella X, Mösso C, Sánchez-Arcilla A (2013). Wave energy resource assessment in Lanzarote (Spain). *Renewable Energy*, 55, 480-489.
- Sierra JP, Martín C, Mösso C, Mestres M, Jebbad R (2016). Wave energy potential along the Atlantic coast of Morocco. *Renewable Energy*, 96, 20-32.
- Sierra JP, Mösso C, González-Marco D (2014). Wave energy resource assessment in Menorca (Spain). *Renewable Energy*, 71, 51-60.
- Sierra JP, White A, Mösso C, Mestres M (2017a). Assessment of the intra-annual and inter-annual variability of the wave energy resource in the Bay of Biscay (France). *Energy*, 141, 853-868.
- Stopa JE, Filipot J-F, Li N, Cheung KF, Chen Y-L, Vega L (2013). Wave energy resources along the Hawaiian Island chain. *Renewable Energy*, 55, 305-321.

Vicinanza D, Contestabile P, Ferrante V (2013). Wave energy potential in the northwest of Sardinia (Italy). *Renewable Energy*, 50, 506-521.

Wang XL, Swail VR, Cox A (2010). Dynamical versus statistical downscaling methods for ocean wave heights. *International Journal of Climatology* 30, 317–332.