UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

TREBALL FINAL DE GRAU

Grau en Enginyeria de l'Energia

CONSEQÜÈNCIES DE L'AUGMENT DE VEHICLES ELÈCTRICS SOBRE EL SUBMINISTRAMENT ENERGÈTIC EN LA PRÒXIMA DÈCADA. ANÀLISI DE DIFERENTS ESCENARIS.

Memòria

Autor: Pol Heredia Julbe
Director: Jose Lopez Lopez

Convocatòria: Gener 2021

Resum

L'augment exponencial del nombre de vehicles elèctrics en la societat comporta una sèrie d'avantatges i inconvenients; entre els principals problemes es troba l'alteració de la corba de demanda elèctrica, la qual augmentarà de forma progressiva els seus valors de pic de potència si no s'estableix algun tipus de regulació en el sistema de recàrrega dels vehicles elèctrics. Partint d'aquest repte, en aquest treball es realitza un estudi sobre la manera en que es modificarà la corba de demanda fins l'any 2030 segons tres escenaris amb un sistema de recàrrega propi.

Un cop analitzades les conseqüències de cada escenari de cara a la xarxa i escollit l'escenari òptim, s'estudia quin tipus de central de generació està capacitada per afrontar aquesta demanda i quins canvis s'hauran d'aplicar per fer aquesta generació més renovable, creant tres escenaris de generació i analitzant les seves conseqüències per la xarxa, econòmiques i mediambientals. Els resultats del treball serveixen per marcar el full de ruta sobre com ha de canviar el sistema de recàrrega dels vehicles elèctrics i el sistema de generació d'energia a Espanya en un futur proper per poder mitigar els problemes de l'augment de vehicles elèctrics.

Resumen

El aumento exponencial del número de vehículos eléctricos en la sociedad conlleva una serie de ventajas e inconvenientes; entre los principales problemas se encuentra la alteración de la curva de demanda eléctrica, que aumentará de forma progresiva sus valores de pico de potencia si no se establece algún tipo de regulación en el sistema de recarga de los vehículos eléctricos. Partiendo de este reto, en este trabajo se realiza un estudio sobre la manera en que se modificará la curva de demanda hasta el año 2030 según tres escenarios con un sistema de recarga propio.

Una vez analizadas las consecuencias de cada escenario de cara a la red y escogido el escenario óptimo, se estudia qué tipo de central de generación está capacitada para afrontar esta demanda y qué cambios se deberán aplicar para hacer esta generación más renovable, creando tres escenarios de generación y analizando sus consecuencias para la red, económicas y medioambientales. Los resultados del trabajo sirven para marcar la hoja de ruta sobre cómo debe cambiar el sistema de recarga de los vehículos eléctricos y el sistema de generación de energía en España en un futuro próximo para poder mitigar los problemas del aumento de vehículos eléctricos.

Abstract

The exponential increase in the number of electric vehicles in society has a number of advantages and disadvantages; among the main problems is the alteration of the electric demand curve, which will progressively increase its peak power values if no regulation is established in the charging system of electric vehicles. Based on this challenge, in this work a study is carried out on how the demand curve will be modified until 2030 according to three scenarios with its own recharging system.

Once the consequences for the network of each scenario have been analysed and the optimal scenario has been chosen, it is studied what type of generation plant is capable of meeting this demand and what changes will have to be applied to make this generation more renewable, creating three generation scenarios and analysing their network, economic and environmental consequences. The results of the work serve to mark the roadmap on how the charging system for electric vehicles and the power generation system in Spain should change in the near future in order to mitigate the problems of the increase of electric vehicles.

Agraïments

Per començar, agrair a en Jose Lopez, director del projecte, per la dedicació i comprensió que has mostrat al llarg del treball. Tot i que les condicions de treball han sigut adverses, sempre que ho he necessitat m'has ofert ajuda i consell.

A la família i amics, ja que us he sentit al meu costat en tot moment, i heu aconseguit que els problemes dels últims 4 anys hagin estat més fàcils de superar.

Glossari

VE - Vehicle Elèctric

VC - Vehicle de Combustió

Índex

RESUM I

RESUMEN II

ABSTRACT III

AGRAÏMENTS V

GLOSSARI VII

1. PREFACI 1

1.1. Origen del treball 1

2. INTRODUCCIÓ 3

2.1. Objectius del treball 3

3. EL VEHICLE ELÈCTRIC EN L'ACTUALITAT 6

3.1. El vehicle elèctric 6

3.2. Vehicles elèctrics més venuts 7

3.3. Sistema de recàrrega 8

3.4. Punts de recàrrega públics 10

3.5. Evolució de la flota de vehicles elèctrics a Espanya 10

4. ESCENARIS FUTURS DE DEMANDA 14

4.1. Càlcul de l'augment de demanda 14

4.2. Demandes energètiques base 16

4.3. Sistema de recàrrega actual 20

4.3.1. Perfils de recàrrega 21

4.3.2. Detalls de la recàrrega 23

4.4. Creació dels escenaris futurs de demanda 25

4.4.1. Escenari de demanda 1 25

4.4.2. Escenari de demanda 2 29

4.4.3. Escenari de demanda 3 37

4.5. Comparació entre els escenaris de demanda 44

4.5.1. Avantatges i inconvenients de l'escenari de demanda 1 44

4.5.2. Avantatges i inconvenients de l'escenari de demanda 2 46

4.5.3. Avantatges i inconvenients de l'escenari de demanda 3 48

4.5.4. Comparació entre els escenaris de demanda 49

5. SUBMINISTRAMENT D'ENERGIA 55

5.1. Mix de generació elèctrica actual a Espanya 55

5.1.1. Generació renovable 56

5.1.2. Generació no renovable 57

5.2. Comportament del mix energètic actual segons la demanda 60

5.3. Mix energètic aplicat a la demanda futura 67

5.4. Creació dels escenaris futurs de generació 70

5.4.1. Escenari de generació 1 70

5.4.2. Escenari de generació 2 76

5.4.3. Escenari de generació 3 83

6. ANÀLISI ECONÒMICA 91

6.1. Pressupostos de l'Estat Espanyol 91

6.2. Estudi econòmic de l'escenari de generació 1 92

6.2.1. Costos de l'escenari de generació 1 92

6.2.2. Estalvi de l'escenari de generació 1 92

6.2.3. Balanç econòmic de l'escenari de generació 1 95

6.3. Estudi econòmic de l'escenari de generació 2 96

6.3.1. Costos de l'escenari de generació 2 96

6.3.2. Estalvi de l'escenari de generació 2 96

6.3.3. Balanç econòmic de l'escenari de generació 2 97

6.4. Estudi econòmic de l'escenari de generació 3 98

6.4.1. Costos de l'escenari de generació 3 98

6.4.2. Estalvi de l'escenari de generació 3 99

6.4.3. Balanç econòmic de l'escenari de generació 3 100

7. ANÀLISI DE L'IMPACTE AMBIENTAL 101

7.1. Conseqüències mediambientals de la substitució de vehicles de combustió per vehicles elèctrics 101

7.2. Estudi mediambiental dels escenaris de generació 105

7.2.1. Estudi mediambiental de l'escenari de generació 1 105

7.2.2. Estudi mediambiental de l'escenari de generació 2 107

7.2.3. Estudi mediambiental de l'escenari de generació 3 109

8. COMPARACIÓ DELS ESCENARIS DE GENERACIÓ 112

8.1. Comparació de l'anàlisi econòmica 112

8.2. Comparació de l'anàlisi de l'impacte ambiental 112

CONCLUSIONS _____ **115**

BIBLIOGRAFIA _____ **120**

1. Prefaci

1.1. Origen del treball

La transició en la societat de vehicles de combustió a vehicles elèctrics és un tema que sempre s'ha presentat com el futur de l'automobilisme, degut sobretot als avantatges mediambientals que suposa. Tant a nivell global com europeu, al llarg de la última dècada el nombre de VE en circulació ha augmentat considerablement, tot i quedar encara lluny dels nivells de venta dels VC.

Tal com s'explica en l'article "El vehiculo eléctrico: Análisis, evolución y perspectives de futuro" [1], tot i presentar una sèrie d'avantatges molt prometedors, encara hi ha un conjunt de barreres que frenen el ritme de creixement. Per una part hi ha el problema en la infraestructura, que a dia d'avui és baixa i requereix un període d'inversions. Un dels principals problemes derivats és la dificultat de realitzar viatges de distancia llarga degut a la falta de punts de recàrrega en carreteres.

Relacionat amb la recàrrega, el temps de recàrrega és un repte que s'ha de tenir en compte de cara al futur; encara que s'augmenti el nombre de punts de recàrrega, si no s'optimitza la duració d'aquesta, la mobilitat elèctrica no serà eficaç i atractiva pels usuaris. Per tant, la investigació s'ha de centrar en la millora del sistema de recàrrega, de la mateixa manera que s'ha d'incrementar la capacitat de les bateries dels vehicles. La millora en aquest aspecte en els darrers anys és evident, però les capacitats de bateria actuals encara es poden quedar curtes per assegurar una autonomia suficient pels viatges llargs.

Finalment, es troba el problema de la xarxa elèctrica; l'augment de VE implica un augment en el consum energètic, que s'accentuarà cada vegada més a mesura que els VE millorin els seus punts febles. La xarxa ha d'estar preparada pel creixement de la demanda i les conseqüències que portarà, a nivells d'infraestructura, econòmics i mediambientals.

El treball que es presenta a continuació neix de la inquietud que creen la sèrie d'incògnites de la introducció del VE en la societat. S'intentarà conèixer de forma detallada l'efecte dels vehicles elèctrics en la corba de demanda i com s'haurà de modificar el sistema de recàrrega i el mix de generació per mitigar les conseqüències negatives.

2. Introducció

Per tal de donar resposta a les inquietuds presentades en l'apartat anterior, s'han combinat els coneixements assolits al llarg de la carrera amb la recerca d'informació. Aquest treball analitza amb detall la situació actual dels vehicles elèctrics a Espanya, i planteja diferents escenaris futurs en que varien tant el sistema de recàrrega com el mix de generació d'energia en un període de temps fins l'any 2030. Tot seguit, s'exposen els objectius del projecte.

2.1. Objectius del treball

L'estudi del conjunt de conseqüències que tindrà l'increment de VE en la societat s'ha plantejat a partir dels següents objectius:

- **Analitzar la situació actual dels vehicles elèctrics.**
  Abans de començar a plantejar els escenaris futurs, és necessari realitzar un estudi de la situació a dia d'avui dels VE. Això implica conèixer les característiques dels models actuals, quin ús del vehicle fan els seus usuaris, com és el sistema de recàrrega a l'estat espanyol i quines prediccions de creixement de la flota hi ha de cara a l'any 2030. A part, també és necessari estudiar com és la corba de demanda elèctrica actual i com es comporta depenent de la magnitud del consum elèctric diari.

- **Crear escenaris de demanda futura.**
  A partir de l'estudi de la situació actual, es crearan tres escenaris futurs en que canviarà el sistema de recàrrega dels vehicles elèctrics. Cada escenari obtindrà unes corbes de demanda resultants pels anys 2025 i 2030, les quals es compararan i es determinarà l'escenari més viable i òptim de cara a la xarxa.

- **Analitzar el mix energètic espanyol actual**
  S'estudiarà el sistema de subministrament energètic espanyol i la forma en que actua depenent del consum elèctric que hi hagi.

- **Crear escenaris de generació futura.**
  Basant-se en els coneixements extrets de l'anàlisi del mix energètic, es crearan tres escenaris futurs (pels anys 2025 i 2030) en que canviarà la potència instal·lada d'algunes fonts d'energia per tal d'aconseguir una generació més renovable aplicada a la demanda elèctrica resultant dels escenaris de demanda. Es compararan els resultats de cada escenari i s'analitzaran els seus efectes econòmics i mediambientals.

3. El vehicle elèctric en l'actualitat

En aquest apartat s'estudiarà quin és el paper del vehicle elèctric en l'actualitat, explicant les seves característiques i les prediccions del seu creixement en el futur.

3.1. El vehicle elèctric

Es considera un vehicle elèctric aquell que està propulsat de manera total o parcial per energia elèctrica. Aquesta energia pot provenir del sistema de bateries que forma part del mateix vehicle, d'una font externa capaç de subministrar electricitat a l'automòbil, d'un generador elèctric que transformi el combustible en electricitat o inclús de mòduls solars connectats de forma directa al vehicle. El mètode més habitual de subministrament d'energia elèctrica és el que es basa en bateries instal·lades directament en el vehicle. D'aquest tipus de vehicles elèctrics es poden diferenciar tres models diferents.

El primer és l'anomenat vehicle elèctric pur, que està propulsat per un motor elèctric i utilitza com a única font d'energia externa l'electricitat, és a dir, és un model de vehicle completament diferent al convencional que utilitza un combustible fòssil com a font d'energia. Els VE purs tenen actualment una autonomia que varia entre els 200 km i els 500 km, tal com s'indica en l'article "Guía de mobilidad eléctrica para las entidades locales", realitzat per l'IDAE, la FEMP i Red Eléctrica de España [2]. Com que l'única font d'energia que necessiten és l'electricitat, la bateria s'ha de recarregar mitjançant la connexió a la xarxa elèctrica. Pel que fa a les bateries, actualment tenen una capacitat del voltant de 50 kWh en els models de turismes més venuts. S'espera que aquest valor augmenti fins als 70 kWh en els nous models dels pròxims anys.

A continuació destaca el model de vehicle elèctric híbrid endollable (PHEV). Aquest tipus de VE està propulsat a través d'un motor elèctric i/o un motor de combustió interna alternatiu. Per tant, les fonts d'energia que necessita l'automòbil per tal de desplaçar-se són l'energia elèctrica que s'obté de la xarxa i els combustibles fòssils. Les bateries que formen part d'aquests vehicles normalment tenen una capacitat d'entre 10 kWh i 12 kWh.

Finalment es troben els vehicles elèctrics amb autonomia estesa, que de la mateixa manera que els vehicles elèctrics purs, es propulsen mitjançant únicament un motor elèctric. La diferència es troba en la bateria, ja que a part de poder-se recarregar amb la connexió a la xarxa elèctrica, també ho pot fer utilitzant el motor de combustió que porta incorporat. Això significa que les fonts d'energia que necessita aquest model de vehicle són l'electricitat i el combustible fòssil. El motor tèrmic que forma part del vehicle s'utilitza per augmentar-ne l'autonomia recarregant la bateria.

Entre els avantatges que impliquen els VE, destaquen una reducció de més del 65% de les emissions de gasos d'efecte hivernacle respecte els vehicles de motor de combustió i una eficiència del 60% en energia utilitzada respecte a l'energia reposada. Això suposa tres vegades més eficiència que els vehicles convencionals, que tenen una eficiència del voltant del 20% [2].

3.2. Vehicles elèctrics més venuts

Per tal de tenir una idea més clara sobre quin és l'estat actual de la tecnologia dels VE, s'han analitzat les característiques dels tres models més venuts en tot el mon al llarg de l'any 2020 [3]. Per començar cal destacar el model Tesla Model 3, que és amb diferència el vehicle elèctric més venut de l'any amb més de 149000 unitats venudes. Aquest automòbil consta de dues versions amb bateries diferents; la primera i més habitual és la que consta d'una capacitat de 50kWh, atorgant així d'una autonomia de 415km. La segona es tracta d'una bateria de 75kWh de capacitat capaç d'arribar als 554km d'autonomia.

Després del Tesla Model 3, el model més venut és el Renault Zoe, amb aproximadament 38000 unitats venudes en tot l'any; cal destacar la gran diferència de ventes entre el primer model i el segon, arribant el primer a vendre gairebé 4 vegades més unitats. El Renault Zoe consta d'una bateria de 41kWh de capacitat, proporcionant una autonomia que arriba als 300km.

Per acabar, en la tercera posició dels VE més venuts al llarg del 2020 es troba el Wolkswagen e-Golf, amb 30800 vehicles venuts. La bateria d'aquest automòbil té una capacitat de 36kWh, obtenint d'aquesta manera una autonomia de 232km.

En la següent gràfica es poden veure representades les dades de ventes de vehicles elèctrics a tot el món l'any 2020.

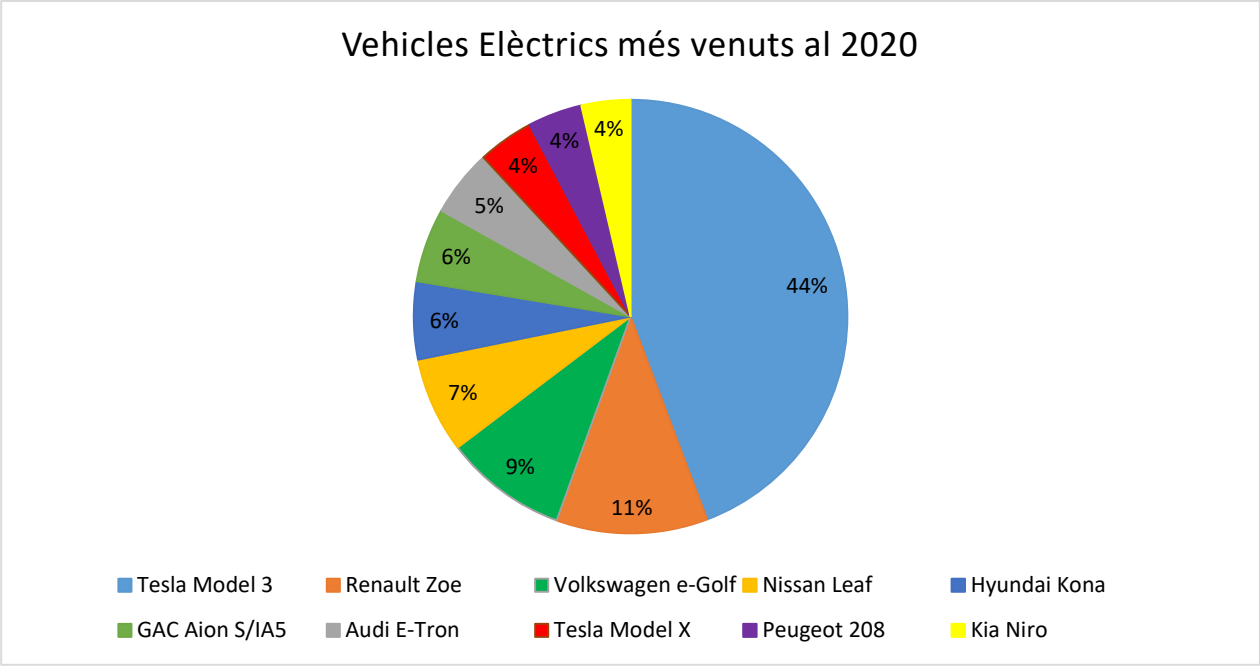

Figura 3.1. Vehicles elèctrics més venuts al món l'any 2020. (Font: Elaboració pròpia)

3.3. Sistema de recàrrega

La funcionalitat dels vehicles elèctrics es basa en poder obtenir energia elèctrica a través de connectors, els quals la majoria de cops s'endollen a la xarxa elèctrica. A partir d'aquesta connexió s'obté l'energia necessària per recarregar la bateria de l'automòbil i poder així activar el motor. Aquesta recàrrega, però, es pot realitzar en llocs diferents, que es poden classificar en tres grans categories.

Per començar, el lloc més habitual per recarregar el vehicle és l'espai privat, ja sigui el domicili de l'usuari o una empresa; a continuació destaquen els llocs de recàrrega públics, que es poden diferenciar entre les zones urbanes i els corredors interurbans. Les zones urbanes inclouen tots els punts de recàrrega que es troben en la via pública, com poden ser els aparcaments públics, els centres comercials, els pàrquings públics... Per altra banda, els corredors interurbans inclouen els punts situats en les vies de comunicació entre urbanitzacions, que normalment s'agrupen en àrees anomenades *hubs* de recàrrega.

Una altra manera de distingir les formes de recàrrega és segons la potència que es subministri, podent diferenciar així fins a quatre tipus de recàrrega. Un fet a tenir en compte és que com més alta sigui la potència, més baix serà el temps de recàrrega i més alt seran els costos d'adquisició i manteniment de la infraestructura. La necessitat de mobilitat mitjana a Espanya és de 40 km diaris, distància que suposa una energia diària de 6 kWh [2].

Per analitzar els diferents tipus de recàrrega, s'ha realitzat una taula on es comparen les potències, els temps de recàrrega del 100% d'una bateria de 50kWh i el cost aproximat del sistema [2].

	Tipus de recàrrega			
	Bàsica	**Semi-ràpida**	**Ràpida**	**Super-ràpida**
Potència	2,3 - 7,4 kW	22 kW	40 – 50 kW	100 – 150 kW
Temps de recàrrega	21,7 – 6,7 h	2,3 h	1,3 – 1 h	30 – 20 min
Cost del sistema	500 – 1500 €	+ 2500 €	20000 – 30000 €	+ 100000 €

Taula 3.1. Característiques dels tipus de recàrrega.

Per començar, la recàrrega bàsica inclou des de la utilització dels connectors més senzills com poden ser els endolls habituals d'ús domèstic (connectors Schuko) fins a connectors que també es poden trobar en l'àmbit domèstic però ja estan expressament dissenyats per tal de recarregar un vehicle elèctric. Normalment l'ús de connectors Schuko per recarregar VE s'utilitza en motos petites, bicicletes elèctriques, patinets elèctrics i qualsevol altre tipus de vehicle petit. Com que aquest connector no garanteix la seguretat, es desaconsellable endollar-hi vehicles o motos de més potència. Com es pot observar en la taula, el cost del sistema és força baix, però el temps de recàrrega del 100% de la bateria s'eleva en el millor cas fins les 6 hores i 45 minuts, un marge de temps considerablement alt.

Seguint amb els models de recàrrega, la semi-ràpida és la que s'ofereix de manera obligatòria en els punts de recàrrega d'ús públic, segons la Instrucció Tècnica Complementaria ITC-BT 52 [4]. A part, també es pot instal·lar un carregador semi-ràpid en el domicili particular, obtenint d'aquesta manera una recàrrega de la bateria considerablement més ràpida que en el mode bàsic.

Pel que fa als dos tipus restants, el seu ús es realitza fora dels habitatges particulars, ja que la potència és massa elevada. Es poden trobar en l'actualitat en estacions exteriors d'ús públic, oferint un servei de recàrrega entre trajectes o a mode d'emergència. Cal destacar que un model de recàrrega super-ràpida de forma diària acabaria fent malbé les bateries actuals, per tant el seu ús ha de ser moderat.

3.4. Punts de recàrrega públics

Amb l'objectiu d'aconseguir que la societat vagi reemplaçant els vehicles convencionals de motor de combustió pels vehicles elèctrics, els punts de recàrrega instal·lats en l'entorn públic juguen un paper fonamental. De la mateixa manera que la circulació de vehicles actual no seria possible sense el paper que juguen les gasolineres, una circulació majoritàriament elèctrica no és viable sense la quantitat suficient de punts de recàrrega que permetin connectar el vehicle a la xarxa en cas de necessitat.

La situació actual a Espanya te molt de marge de millora, sobretot si es compara amb la resta de països de la Unió Europea. A Espanya hi ha instal·lats mes de 5000 punts de recàrrega públics [2]. D'aquests, la majoria es troben en entorns urbans, però cal destacar l'increment de punts en corredors interurbans en els últims anys, arribant a una mitjana actual de 5 punts per cada 100km d'autovia. Que Espanya tingui actualment poc més de 5000 punts de recàrrega instal·lats representa un nombre molt baix comparat amb els altres països de la Unió Europea; per exemple, a França hi ha casi 25000 punts, i a Alemanya es troben més de 27000. Pel que fa a la Unió Europea, actualment hi ha més de 140000 punts de servei de recàrrega.

Si s'analitzen quins tipus de carregadors s'utilitzen en els punts de recàrrega a Espanya, es veu com un 15,6% son de recàrrega ràpida, és a dir de més de 22kW de potència; la resta d'instal·lacions consten de carregadors semi-ràpids. En aquest aspecte, Espanya no es queda tant enrere, ja que per exemple a França només un 9,18% dels carregadors són de recàrrega ràpida i a Alemanya un 15,8%, valor gairebé idèntic al d'Espanya. Un país que destaca per l'alt percentatge de punts amb recàrrega ràpida és Noruega, amb un 22,8% [2].

3.5. Evolució de la flota de vehicles elèctrics a Espanya

Com s'ha comentat, l'augment progressiu del nombre de vehicles elèctrics a la flota nacional és un fet comprovat i que ha donat peu a molts estudis. Aquest creixement està provocat per diversos factors que incentiven als ciutadans a la seva compra. Per començar, en els últims anys s'ha produït un abaratiment important en el sector del VE; no només el preu de compra del vehicle s'ha reduït considerablement, sinó que hi ha una sèrie d'avantatges econòmiques que creen una diferència amb els vehicles de combustió. Entre les més destacades es troben el fet de no haver de pagar l'impost de matriculació, un descompte en l'impost de circulació, la possibilitat d'aparcar gratuïtament al carrer i la possibilitat d'obtenir la ITV més barata [2]. A l'hora de circular també surt més a compte el VE, ja que el cost econòmic del combustible és quatre vegades menor, tenint uns valors de 2€/100km respecte els 8€/100km dels VC [2].

A part de la faceta econòmica, la preocupació en la societat respecte el medi ambient ha provocat que molta gent es decanti per fer el pas cap als vehicles elèctrics per tal de portar un estil de vida més sostenible. Els VE tenen unes emissions de CO_2 associades un 65% menors a les dels vehicles de combustió, amb uns valors de 36,1 gCO_2/km i de 114,4 g CO_2/km respectivament [2].

Si a aquests factors s'hi sumen l'augment de capacitat de les bateries i de punts de recàrrega públics, s'obté que les previsions de creixement de la flota espanyola contemplin uns valors entre els 2,5 i 4,5 milions de VE per l'any 2030, suposant un fort creixement respecte els 63000 VE que hi ha en l'actualitat [2]. Com que l'article és de fa dos anys i les dades de venta de VE de l'any 2020 són molt elevades, arribant al 7,32% de les ventes totals [5], per aquest estudi s'ha establert que a l'any 2030 hi haurà a Espanya 4,5 milions de VE.

Per tal de conèixer el nombre de VE aproximat que hi haurà en cadascun dels pròxims 10 anys, i sobretot els que hi haurà l'any 2025, s'ha establert un creixement exponencial entre els anys 2018 i 2030; amb la funció de la corba exponencial, s'ha calculat la quantitat de VE que hi haurà anualment en la flota espanyola. Els resultats es poden observar en la gràfica següent.

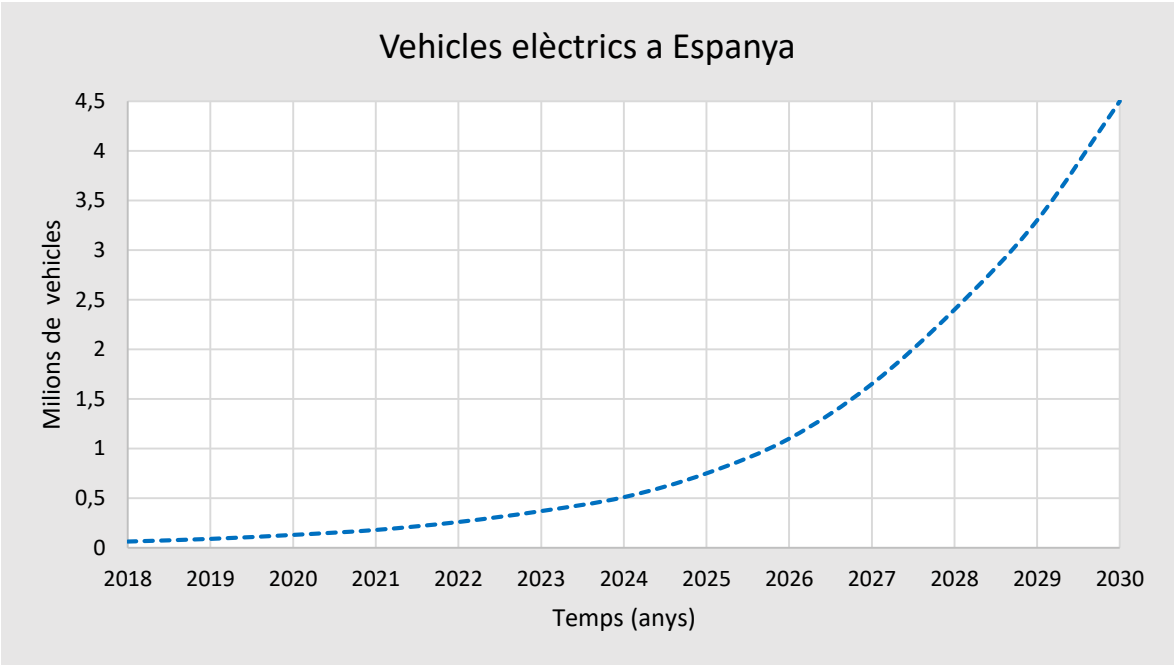

Figura 3.2. Evolució de la flota de vehicles elèctrics a Espanya. (Font: Elaboració pròpia)

Per tant, els valors que s'utilitzaran per aquest estudi seran de 700 mil vehicles elèctrics per l'any 2025 i de 4,5 milions per l'any 2030.

Per tenir una idea més clara sobre quin percentatge representaran aquests valors sobre el nombre total de vehicles que hi haurà a Espanya, s'ha realitzat una previsió de l'augment que tindrà la flota de vehicles fins l'any 2030, tant de combustió com elèctrics. Per fer-ho, s'ha obtingut de la base de dades de la DGT el nombre de vehicles matriculats a Espanya des del 2013 [6]. A partir d'aquestes dades, s'ha extrapolat la tendència de creixement dels últims 7 anys, però no de forma lineal, sinó creant una saturació en l'any 2035. S'ha descartat la projecció de creixement completament lineal perquè el nombre de vehicles no creixerà infinitament i els valors que s'obtenien amb un creixement lineal eren massa elevats (de gairebé un vehicle per persona al 2030). Tot seguit es mostra en una gràfica els valors reals del nombre de vehicles en els últims anys i la seva tendència de creixement futur.

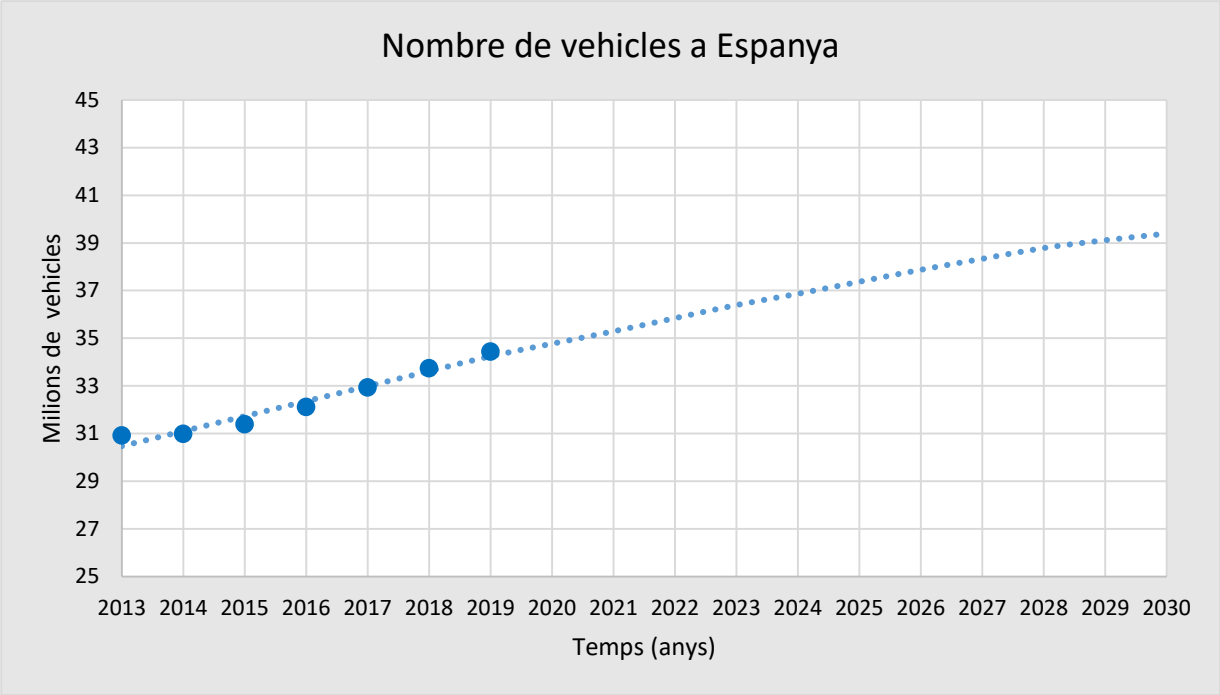

Figura 3.3. Projecció del nombre de vehicles a Espanya. (Font: Elaboració pròpia)

Com s'aprecia en la gràfica, a Espanya l'any 2030 hi hauria aproximadament poc més de 39 milions de vehicles matriculats.

Coneixent el nombre total de vehicles que hi haurà a Espanya en un futur proper, s'ha calculat el percentatge que representaran els vehicles elèctrics cada any. En la gràfica següent es mostren els resultats.

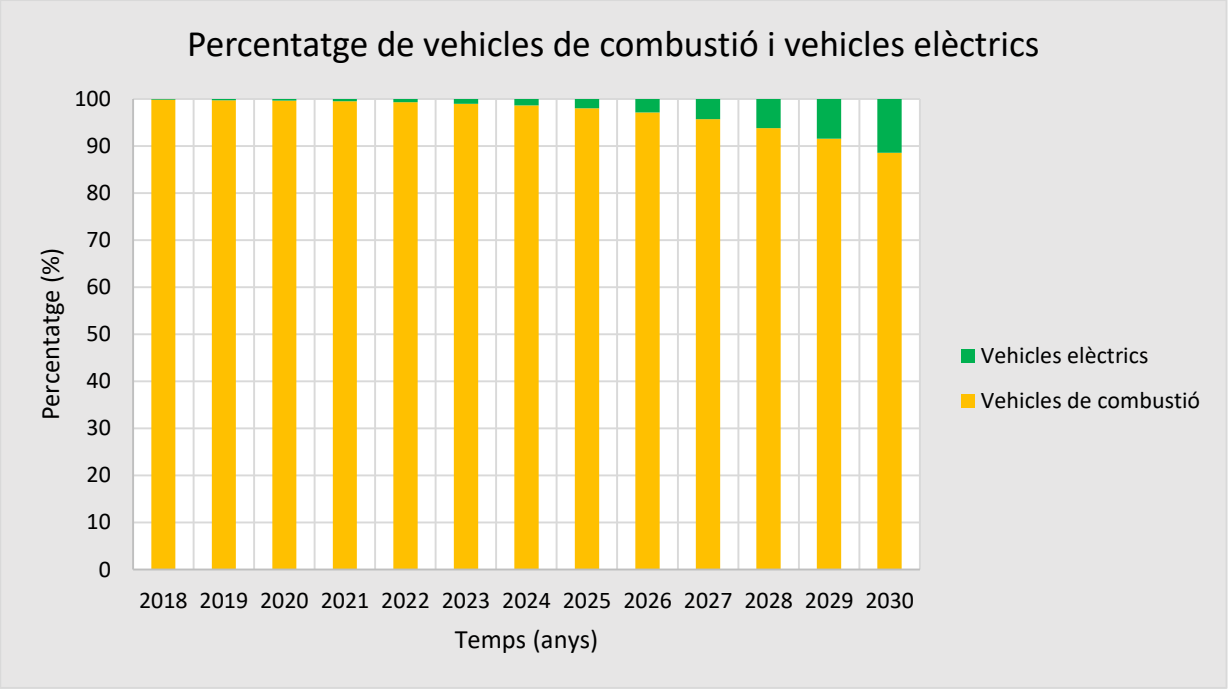

Figura 3.4. Percentatge de VC i de VE a Espanya. (Font: Elaboració pròpia)

Com es pot observar, els vehicles elèctrics aniran augmentant fins arribar a representar aproximadament l'11% del total de vehicles que hi haurà matriculats a Espanya l'any 2030.

4. Escenaris futurs de demanda

Segons l'estudi que s'ha realitzat anteriorment a partir de les dades proporcionades per Red Eléctrica Española, a Espanya en el 2025 hi haurà uns 700000 vehicles elèctrics, nombre que anirà augmentant fins arribar als 4,5 milions a l'any 2030. Aquest increment suposa, entre varies coses, un augment considerable de la demanda elèctrica. La transició dels vehicles convencionals de combustió cap als elèctrics implica que cada cop més vehicles necessitaran energia elèctrica de la xarxa per tal de desplaçar-se, deixant enrere l'ús de combustibles fòssils. Aquest nou consum alterarà de manera notable la corba de demanda d'energia diària. Per tal de conèixer de quina manera variarà la corba, s'ha realitzat un estudi on es plantegen tres escenaris futurs diferents, on el que canvia és la manera en que es recarreguen els vehicles elèctrics.

En el primer escenari, el VE es comença a recarregar en el moment en que es connecta a la xarxa, en el segon es recarrega depenent del preu que tingui l'energia en aquell moment i en el tercer s'introdueixen unes tarifes que incentiven la recàrrega durant la nit. A continuació, s'explica de manera detallada l'estudi realitzat.

4.1. Càlcul de l'augment de demanda

Aquest estudi es centra en la creació de diferents escenaris futurs en els quals els diversos sistemes de recàrrega dels vehicles elèctrics modificaran la corba de demanda d'una forma o altra. Per fer-ho fa falta disposar d'una corba base la qual es modifiqui depenent dels VE que hi hagi recarregant-se en cada instant. Aquesta corba, es podria obtenir de forma directa agafant un dia tipus de la base de dades que ofereix Red Eléctrica, però seria un estudi poc realista, ja que la demanda base (és a dir, sense tenir en compte l'increment de vehicles elèctrics) en els anys 2025 i 2030 no serà la mateixa que en l'actualitat.

Deixant a banda els VE, la demanda que requereixen la resta de sistemes energètics es veurà modificada o bé a l'alça o bé a la baixa en els propers anys; degut a l'alta electrificació que ha patit i està patint la societat en els països desenvolupats, tot indica que la demanda elèctrica tendeix a augmentar a mesura que passen els anys. Tot i això, diversos factors socials i polítics, com per exemple podria ser una crisis econòmica, poden provocar la disminució del consum energètic durant un període de temps. Partint d'aquesta base, es planteja la incògnita sobre quina serà la tendència evolutiva de la demanda elèctrica a Espanya en un futur proper.

Amb l'objectiu de calcular aquesta demanda base futura, s'ha decidit analitzar l'evolució del consum energètic anual a Espanya dels últims 7 anys per tal d'establir una tendència lineal que permeti fer una aproximació sobre quina serà la demanda en els propers anys. S'ha decidit iniciar el període d'estudi a

l'any 2013 perquè Espanya va entrar en una crisi econòmica aproximadament l'any 2008, i va durar uns quatre anys. Un dels efectes que va tenir aquesta crisis va ser la disminució del consum energètic, que va tenir una tendència general negativa fins l'any 2014, a partir del qual es va començar a recuperar. Per aquests motius, s'han considerat els consums anuals previs al 2013 com a conseqüències d'una situació extraordinària i s'han descartat per l'estudi.

A partir d'aquesta premissa, s'han obtingut de la base de dades de Red Eléctrica els valors del consum energètic anual entre els anys 2013 i 2019, a partir dels quals s'ha calculat la seva equació lineal i s'ha extrapolat fins l'any 2030 [7]. Els resultats es poden observar en la gràfica següent.

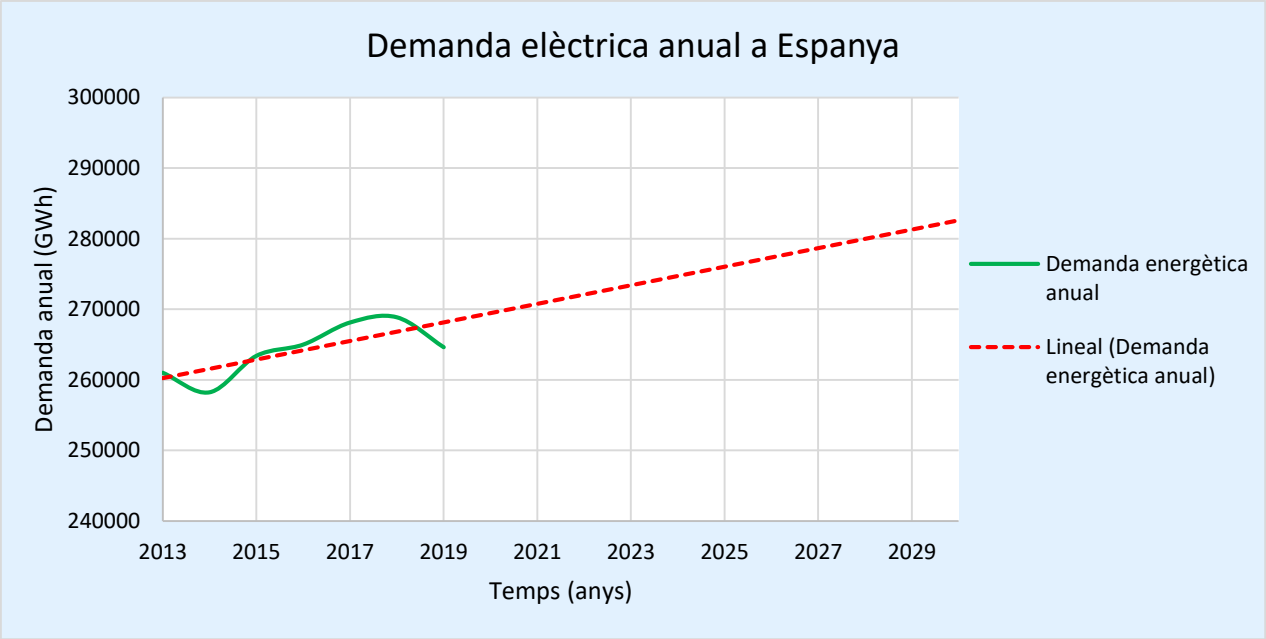

Figura 4.1. Projecció de la demanda elèctrica anual a Espanya. (Font: Elaboració pròpia)

Gràcies a l'equació lineal, s'ha calculat el valor exacte de la demanda anual pels anys 2025 i 2030 que s'utilitzarà per la resta de l'estudi. Com que l'objectiu d'aquest procediment és establir una corba de demanda base que hagi tingut un creixement respecte l'actualitat d'acord amb les dades històriques, s'ha calculat el percentatge d'augment de la demanda anual respecte l'any 2019 en els anys d'objectiu d'estudi. Les dades es mostren en la següent taula.

Any	Demanda elèctrica anual (GWh)	Augment respecte el 2019 (%)
2019	$264{,}6 \cdot 10^3$	0
2025	$276 \cdot 10^3$	4,30
2030	$282{,}6 \cdot 10^3$	6,79

Taula 4.1. Percentatge d'augment de la demanda elèctrica anual a Espanya respecte l'any 2019.

Un cop obtinguts els percentatges d'augment, el següent pas és establir les demandes base pels anys 2025 i 2030.

4.2. Demandes energètiques base

L'estudi de predir com es modificarà la corba de demanda elèctrica segons diferents escenaris futurs es basarà en dos tipus de corba. La primera serà una corba amb una demanda molt elevada, que servirà per analitzar els efectes dels vehicles elèctrics en un dia amb una demanda màxima, i s'observaran a quins nivells de pic de potència es podria arribar. La segona serà una corba amb una demanda mitjana, amb la qual es podrà establir quina forma aproximada tindria la corba un dia on el consum energètic sigui mitjà.

Per tal de trobar dos dies on la demanda es correspongui amb els criteris establerts, s'ha realitzat una recerca per la base de dades de Red Eléctrica sobre tots els dies de l'any 2019, que és l'any més recent del qual es tenen les dades de tots els dies. El dia 10 de gener de 2019 va ser el dia en que es va registrar la demanda més elevada de tot l'any, arribant a un pic de 40237 MW de potència a les 20:40 [7]. Per aquest motiu, les dades de la demanda d'aquest dia serviran per calcular les corbes de demanda màxima base pels anys 2025 i 2030.

Per altra banda, s'ha establert com a corba amb una demanda mitjana la del dia 26 de gener de 2019, ja que el consum al llarg del dia va tenir uns valors moderats, arribant a un pic de 32573 MW de potència a les 21:20. A continuació, es poden observar les corbes de demanda dels dos dies seleccionats.

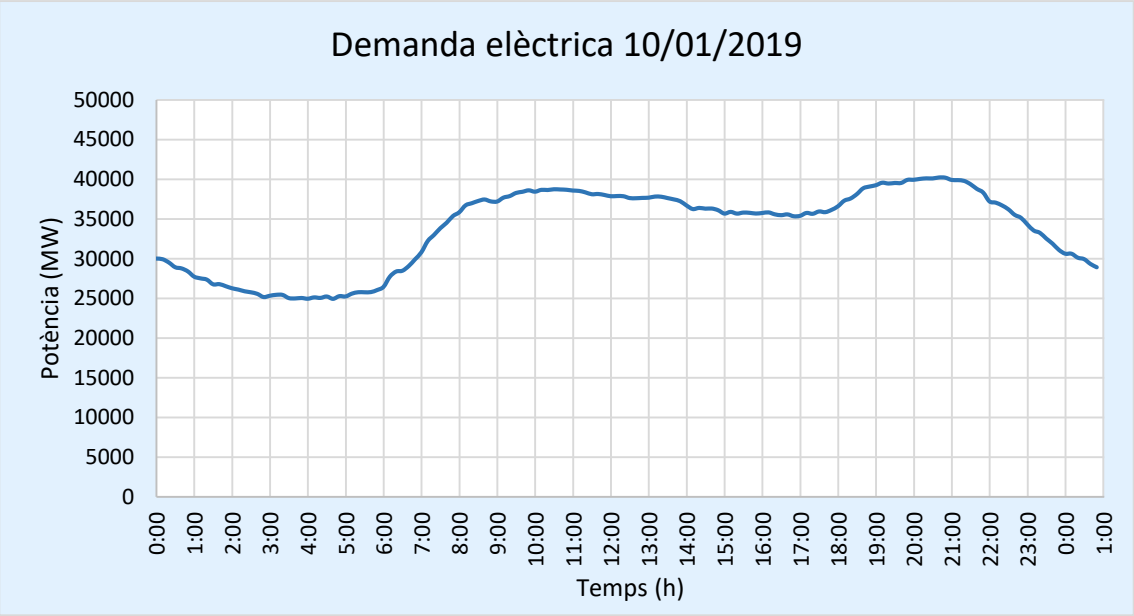

Figura 4.2. Demanda elèctrica del 10 de gener de 2019. (Font: Elaboració pròpia)

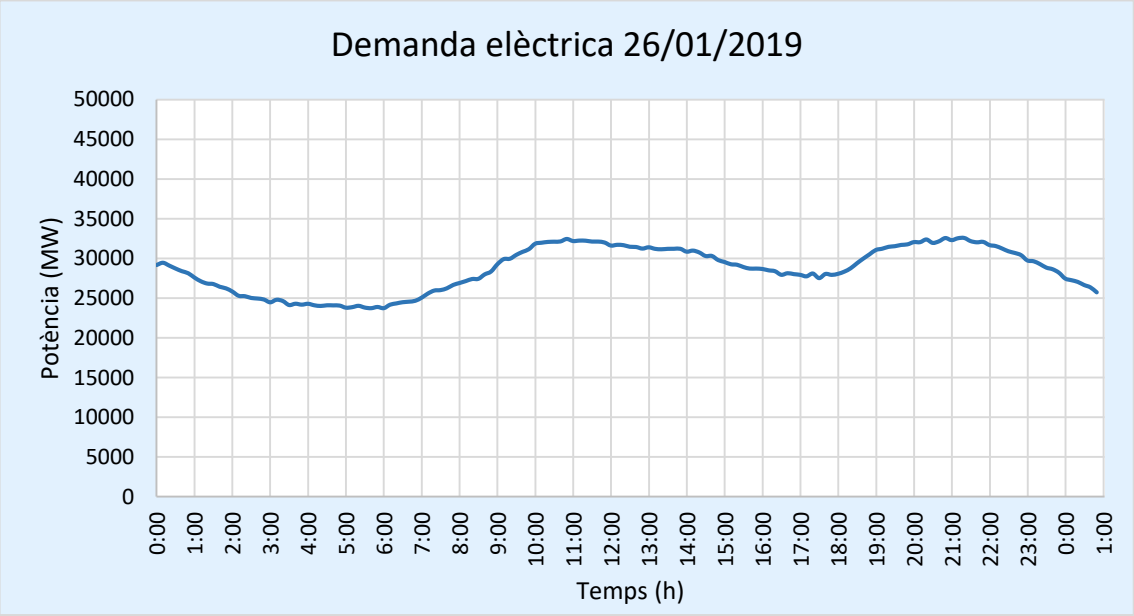

Figura 4.3. Demanda elèctrica del 26 de gener de 2019. (Font: Elaboració pròpia)

Un fet a tenir en compte és que aquestes dues corbes ja inclouen el consum energètic que representen els vehicles elèctrics que hi ha a l'actualitat, és a dir 63 mil VE. Per tant, quan més endavant es vulgui afegir a la demanda base el consum que impliquen els VE, s'haurà de restar de la flota total aquests 63 mil vehicles.

Un cop definits els dos tipus de corba, es poden extrapolar els valors de la potència demandada a l'any 2019 fins als anys 2025 i 2030 utilitzant els percentatges d'augment de la demanda calculats anteriorment. Com que el càlcul consisteix en multiplicar el valor de la potència en cada instant pel percentatge de creixement, la forma de la corba màxima i mitjana serà la mateixa al llarg dels anys. Seguidament, es mostren les corbes base resultants pels diferents escenaris futurs.

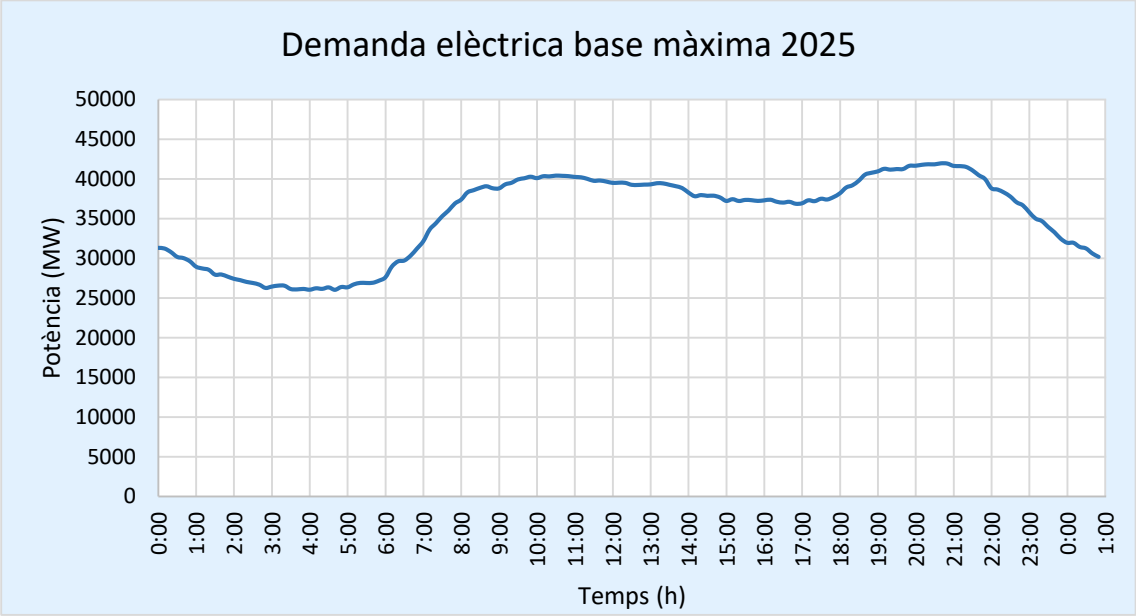

Figura 4.4. Demanda elèctrica base màxima pel 2025. (Font: Elaboració pròpia)

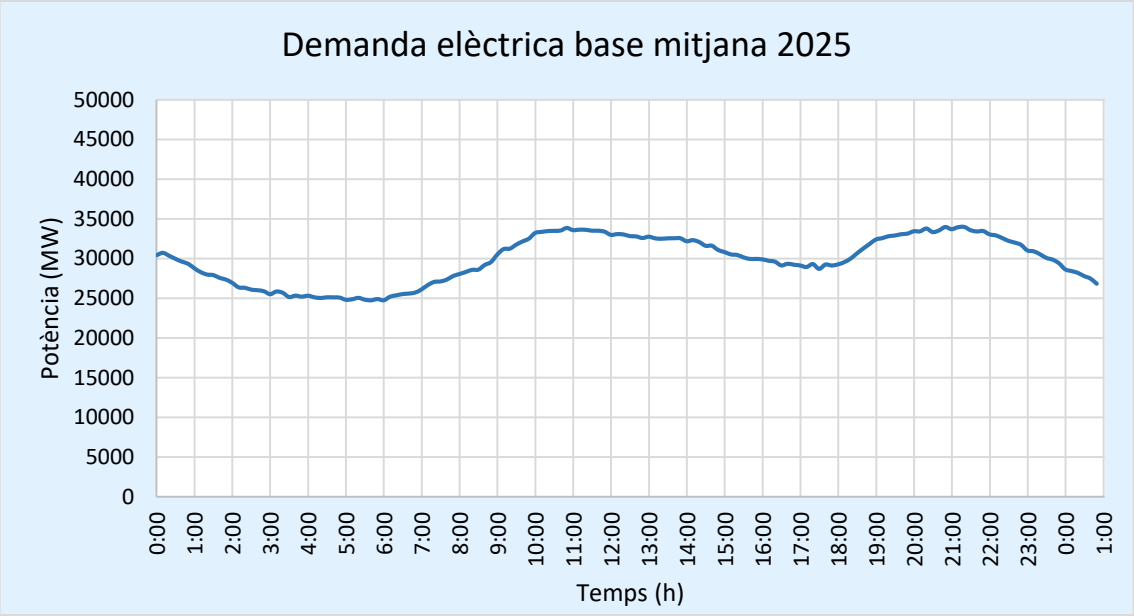

Figura 4.5. Demanda elèctrica base mitjana pel 2025. (Font: Elaboració pròpia)

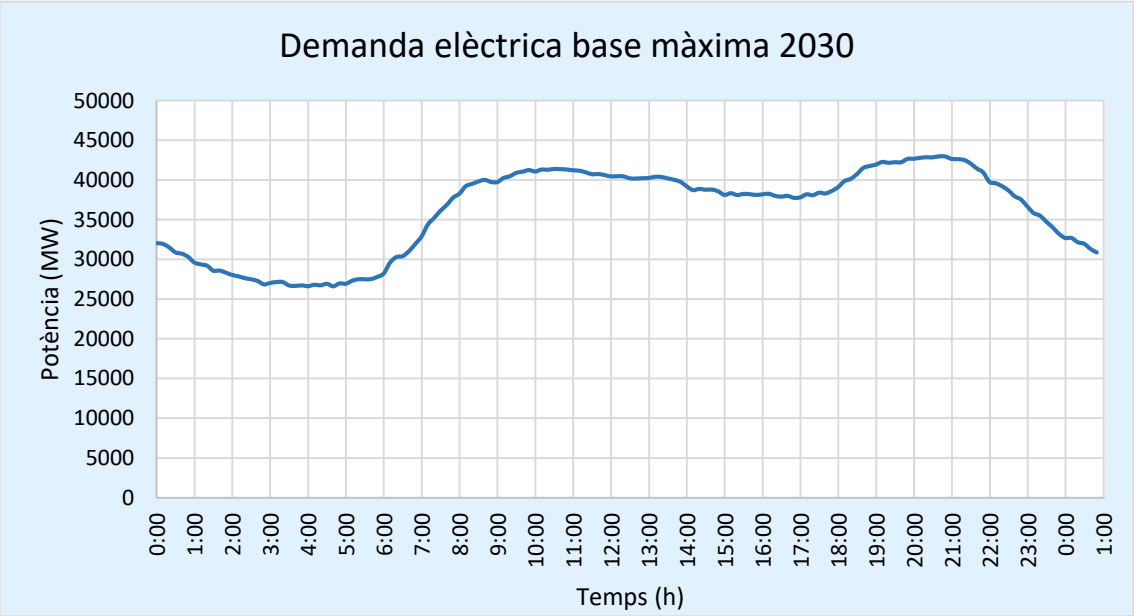

Figura 4.6. Demanda elèctrica base màxima pel 2030. (Font: Elaboració pròpia)

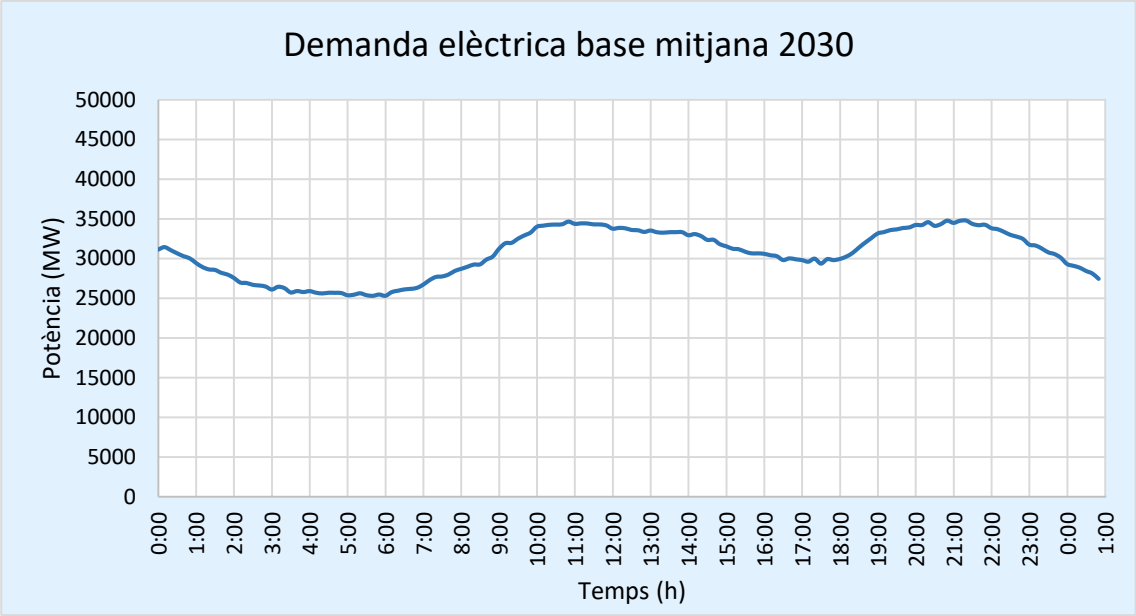

Figura 4.7. Demanda elèctrica base mitjana pel 2030. (Font: Elaboració pròpia)

Un valor interessant a tenir en compte és el del pic de potència demandada segons els diferents escenaris. Els valors es poden veure resumits en la taula següent.

Pic de potència (GW)		
Any	**Demanda màxima**	**Demanda mitja**
2025	41,97	33,97
2030	42,97	34,78

Taula 4.2. Pics de potència de les demandes elèctriques base.

Com era d'esperar, el valor més alt es troba en la corba de potència màxima de l'any 2030. Un fet a destacar, és que el pic de demanda màxima del 2025 té un valor més elevat que el pic de demanda mitjana del 2030; això significa que la tendència de creixement que te la demanda a Espanya és prou moderada, ja que els dies amb un consum energètic molt alt al 2025 arribaran a valors de potència més elevats que un dia de cada dia al 2030. En totes aquestes suposicions cal tenir en compte que encara no s'han afegit els vehicles elèctrics que s'incorporaran a la flota fins al 2030, per tant els valors mostrats es veuran modificats.

4.3. Sistema de recàrrega actual

En aquest apartat s'explicaran els detalls del sistema de recàrrega actual, que són necessaris per tal de realitzar unes simulacions fidels amb la realitat.

4.3.1. Perfils de recàrrega

Per poder determinar com es modifica la demanda elèctrica de manera horària a causa dels vehicles elèctrics, fa falta establir els diferents perfils de recàrrega que tenen aquests; això significa definir per cada hora del dia, quants VE s'endollen a la xarxa i durant quant de temps es troben connectats. Aquestes dades s'han obtingut de l'article "European electric vehicle fleet: driving and charging behaviors", realitzat per l'IREC [8]; en aquest estudi, es van monitoritzar vehicles elèctrics en diferents ciutats de la Unió Europea, entre elles quatre ciutats espanyoles (Barcelona, Ataun, Madrid i Malaga), durant tres anys per fer un anàlisi de les dades de recàrrega.

Un fet a destacar és que les dades dels perfils de recàrrega no indicaran si el vehicle s'està recarregant o no en els diferents escenaris, només el moment en que es connecta a la xarxa i la duració d'aquesta connexió; això es deu a que l'inici i la durada de la connexió depenen únicament de la vida i les decisions personals que prengui l'usuari, en canvi els instants en que es recarrega cada vehicle es veuen condicionats segons l'escenari futur en que es trobi i les condicions d'aquest.

En la següent gràfica es mostren les dades ofertes per l'article referents al percentatge de VE que inicien la seva connexió a la xarxa de forma horària.

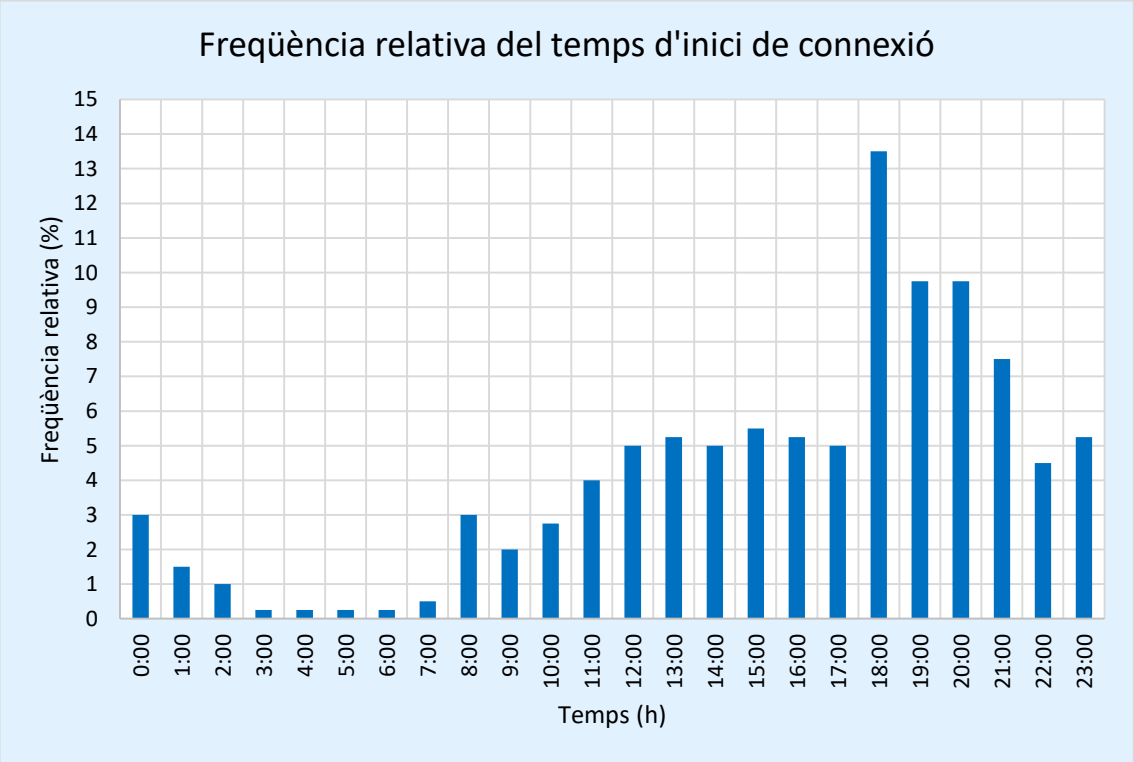

Figura 4.8. Freqüència relativa del temps d'inici de connexió a la xarxa. (Font: Elaboració pròpia)

Cal destacar que en aquesta gràfica només es tenen en compte els automòbils que inicien la seva connexió en una hora determinada, no el total de VE que hi ha connectats a la xarxa a cada hora. Per tant, per exemple, encara que a les 8:00 es connectin un 3% del total de vehicles no significa que hi hagi un 3% de la flota total d'Espanya connectada a xarxa. Observant la gràfica es pot veure com la majoria dels vehicles s'endollen en el període de 18:00 a 21:00, fet esperat ja que son les hores en que els usuaris acostumen a arribar a les seves respectives cases després d'utilitzar el VE durant el dia i l'endollen per poder tenir la bateria recarregada per l'endemà.

Per saber el nombre total de vehicles elèctrics que hi ha endollats per cada hora del dia és necessari combinar les dades anteriors amb les dades sobre la duració que tenen aquestes càrregues. Aquesta informació es troba representada en la gràfica següent.

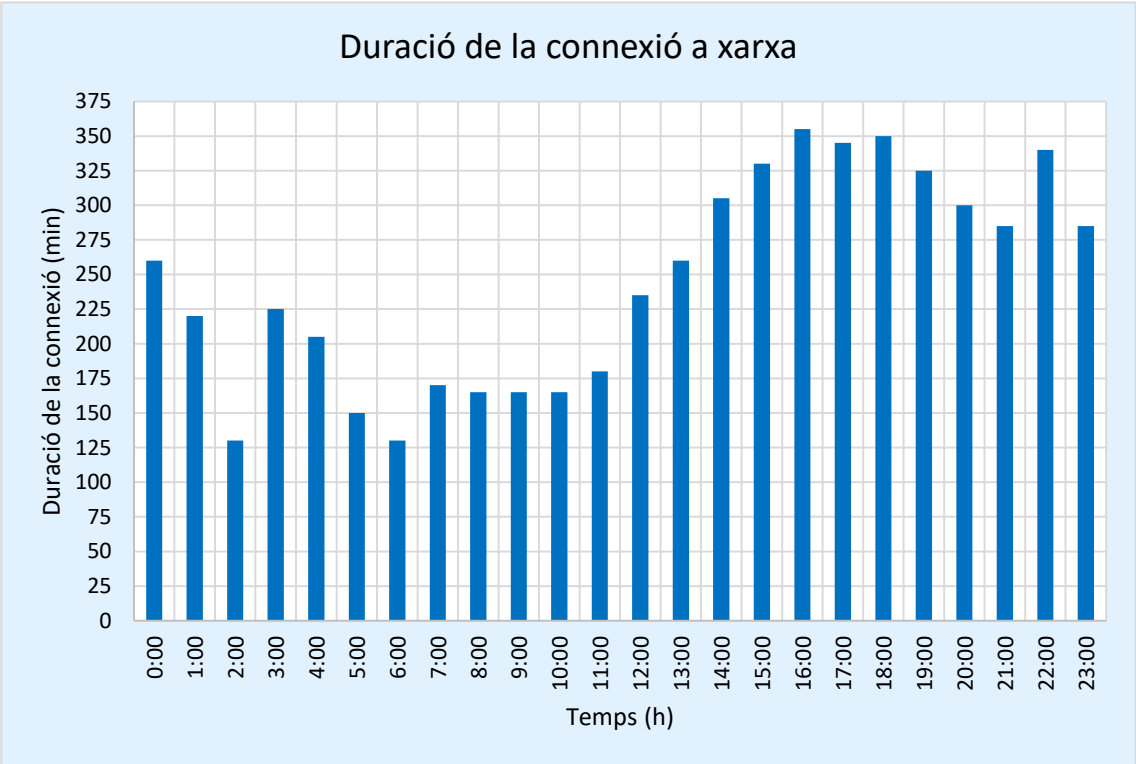

Figura 4.9. Duració de la connexió a xarxa. (Font: Elaboració pròpia)

De la mateixa manera que durant la tarda és quan més vehicles s'endollen a la xarxa, durant el mateix període és quan es troben les connexions més llargues del dia, sobretot entre les 15:00 i les 19:00.

Un cop es coneix quants vehicles es connecten a la xarxa cada hora i quant dura aquesta connexió, es pot calcular el nombre total de VE endollats per cada hora del dia, recordant que la flota espanyola de VE estarà formada als anys 2025 i 2030 per 700 mil i 4,5 milions de vehicles respectivament. Els resultats es mostren en la gràfica següent.

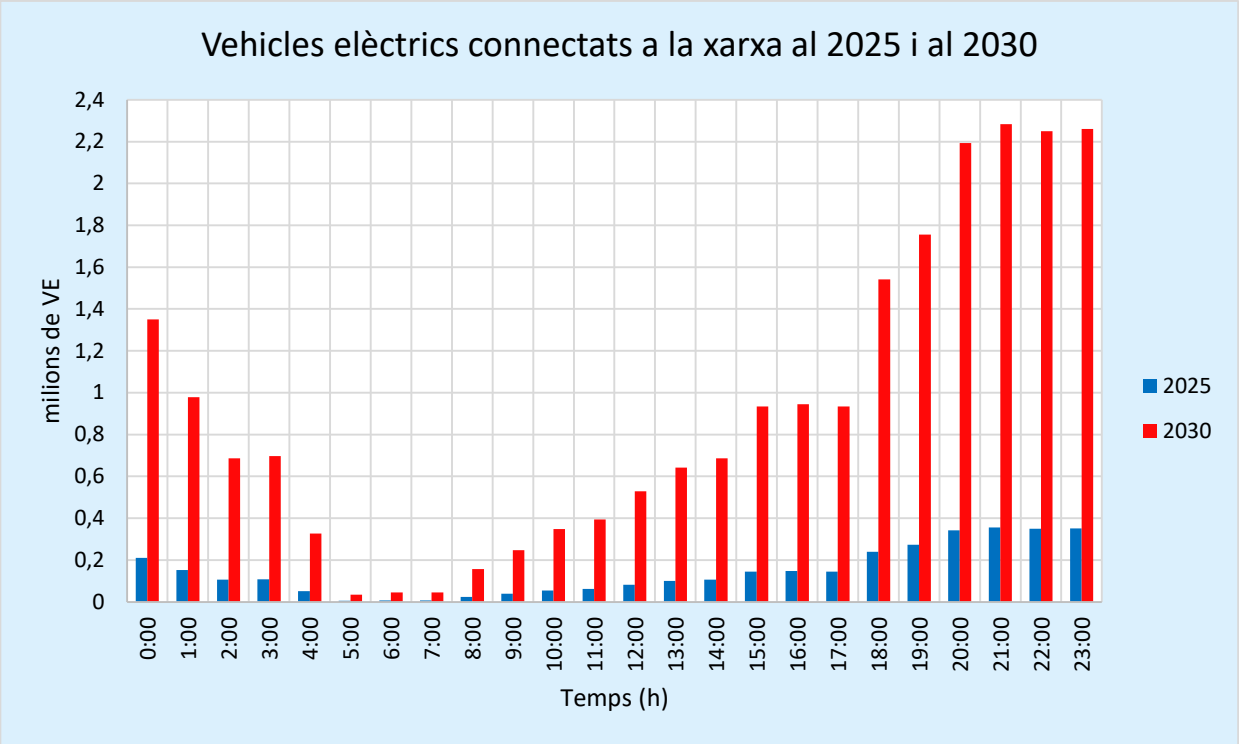

Figura 4.10. Vehicles elèctrics connectats a xarxa al 2025 i al 2030. (Font: Elaboració pròpia)

Com es pot apreciar, el patró que segueixen les gràfiques en els dos escenaris és exactament el mateix, ja que el percentatge de vehicles connectats per cada hora és igual en els dos casos, variant només el nombre total de vehicles elèctrics que hi haurà a Espanya depenent de l'any de l'escenari. Analitzant les dades es pot observar com l'hora on hi haurà més vehicles endollats serà a les 21:00, arribant a un total de 355 mil VE al 2025 i de 2,3 milions de VE al 2030. Tot i ser les 21:00 l'hora amb un nombre total més elevat, en el període entre les 20:00 i les 00:00 els valors son molt similars, rondant els 350 mil VE al 2025 i els 2,2 milions al 2030.

Aquestes dades signifiquen que si en el futur no s'estableix algun tipus de control o regulació sobre el sistema de recàrrega dels vehicles elèctrics, cada dia entre les 20:00 i les 00:00 la demanda elèctrica augmentarà considerablement degut a la gran quantitat de VE que es trobaran connectats.

4.3.2. Detalls de la recàrrega

Com s'ha explicat anteriorment, la recàrrega dels vehicles es pot diferenciar en diferents categories, cadascuna d'elles amb una potència diferent. Per poder realitzar l'estudi, és necessari establir una potència de recàrrega fixa que s'apliqui a tots els vehicles per igual; d'aquesta manera es podrà

determinar la demanda exacta que requereix cada vehicle quan s'està recarregant i el temps de duració d'aquesta recàrrega.

El rang de potències de recàrrega actual és molt ampli, ja que pot anar des d'aproximadament 2,3 kW fins a uns 150 kW; tot i això, es poden descartar diferents tipus de recàrrega per poder focalitzar les potències d'interès. Per començar, s'han descartat les categories de recàrrega ràpida i super-ràpida, que comprenen les potències des de 40 kW fins als 150 kW. Aquests nivells de potència tan elevats provoquen que no es puguin instal·lar punts de recàrrega d'aquests models en domicilis i que el seu ús quedi restringit únicament a punts de recàrrega públics d'emergència. A més a més, si es sotmetés constantment la bateria d'un vehicle a una recàrrega super-ràpida, aquesta es veuria perjudicada amb el pas del temps.

Centrant la recerca en els models bàsics i semi-ràpids, s'ha de tenir en compte diversos aspectes. Per començar, molts vehicles elèctrics del mercat tenen limitada la potència de recàrrega a 7,4 kW, a vegades inclús menys. Tot i que és habitual trobar punts de recàrrega públics amb una potència de fins a 22 kW, en els domicilis espanyols les potències contractades acostumen a variar entre els 2,3 kW i els 6,9 kW, recomanant en cas que el domicili consti d'un VE contractar una potència superior als 4,6 kW. Havent puntualitzat aquestes premisses, s'ha considerat per realitzar l'estudi que la potència de recàrrega dels VE serà de 5 kW.

Per aquest estudi, es considerarà que tots els vehicles recarregaran cada dia 6 kWh, que és l'energia de consum mitjana a Espanya [2]. Tot i que habitualment els usuaris de VE no el recarreguen cada dia, sinó que s'esperen fins que la bateria s'hagi descarregat fins a un nivell considerable, utilitzant el valor de consum mitjà l'estudi serà realista en quant al consum diari total de la flota de VE.

Un cop definits els valors de la potència de recàrrega i l'energia de consum diària, es pot calcular el temps de duració que tindrà la recàrrega amb la següent fórmula.

$$t_r = \frac{E_r}{P_r} \qquad \textbf{\textit{(Eq. 4.1)}}$$

On t_r és el temps de recàrrega mitjà, E_r l'energia de recàrrega mitjana i P_r la potència de recàrrega mitjana. Substituint el valors, s'obté:

$$t_r = \frac{6\ kWh}{5\ kW} = 1{,}2\ h = 1\ h\ 12\ min$$

Per tant, els vehicles s'estaran recarregant durant 1 hora i 12 minuts a una potència de 5 kW; aquests valors es mantindran fixes tant pel 2025 com pel 2030.

4.4. Creació dels escenaris futurs de demanda

Tal com s'ha mencionat anteriorment, en aquesta part de l'estudi es plantejaran tres possibles escenaris futurs; cada escenari tindrà un mètode característic de recàrrega dels vehicles elèctrics, provocant d'aquesta manera diferents alteracions de la corba de demanda depenent de l'escenari en qüestió. Aquestes simulacions s'han realitzat amb l'objectiu de buscar el sistema de recàrrega òptim de cara a la no creació de pics de potència molt elevats al llarg del dia. Per aquest motiu, en cada escenari s'ha representat gràficament la comparació entre la corba de demanda base i la corba de demanda base amb l'addició de la recàrrega dels VE. Per fer-ho, s'han tingut en compte en tot moment les dades sobre els perfils de recàrrega reals que tenen els usuaris de VE en l'actualitat, mencionades prèviament.

Cal recordar que per cadascun dels tres escenaris, s'obtindran quatre gràfiques diferents, ja que es representaran les corbes de demanda d'un dia amb un consum màxim i amb un consum mitjà pels anys 2025 i 2030. Per tant, havent definit les demandes base i tots els detalls referents amb la recàrrega dels vehicles, es procedeix a explicar els diferents escenaris.

4.4.1. Escenari de demanda 1

El primer escenari plantejat es pot considerar el més senzill dels tres i idèntic a l'escenari que hi ha en l'actualitat, ja que la recàrrega del vehicle elèctric no depèn de cap variable. Això significa que en l'instant en que l'usuari connecta l'automòbil a la xarxa, aquest es comença a recarregar. Aquesta recàrrega durarà fins que l'estat de càrrega de la bateria arribi al 100% o bé fins que l'usuari decideixi desendollar el vehicle.

Per tant, com que es coneixen la quantitat de vehicles que es connecten a la xarxa per cada hora, que la recàrrega té una duració de 1 hora i 12 minuts i que cada vehicle suposa una demanda de potència de 5 kW, es pot calcular la demanda total que suposen els VE fent un sumatori de tots els consums que representen per cada 10 minuts. Realitzant la simulació, s'afegeix aquesta nova demanda a la demanda base obtinguda prèviament, i s'obtenen les corbes de demanda representades a continuació.

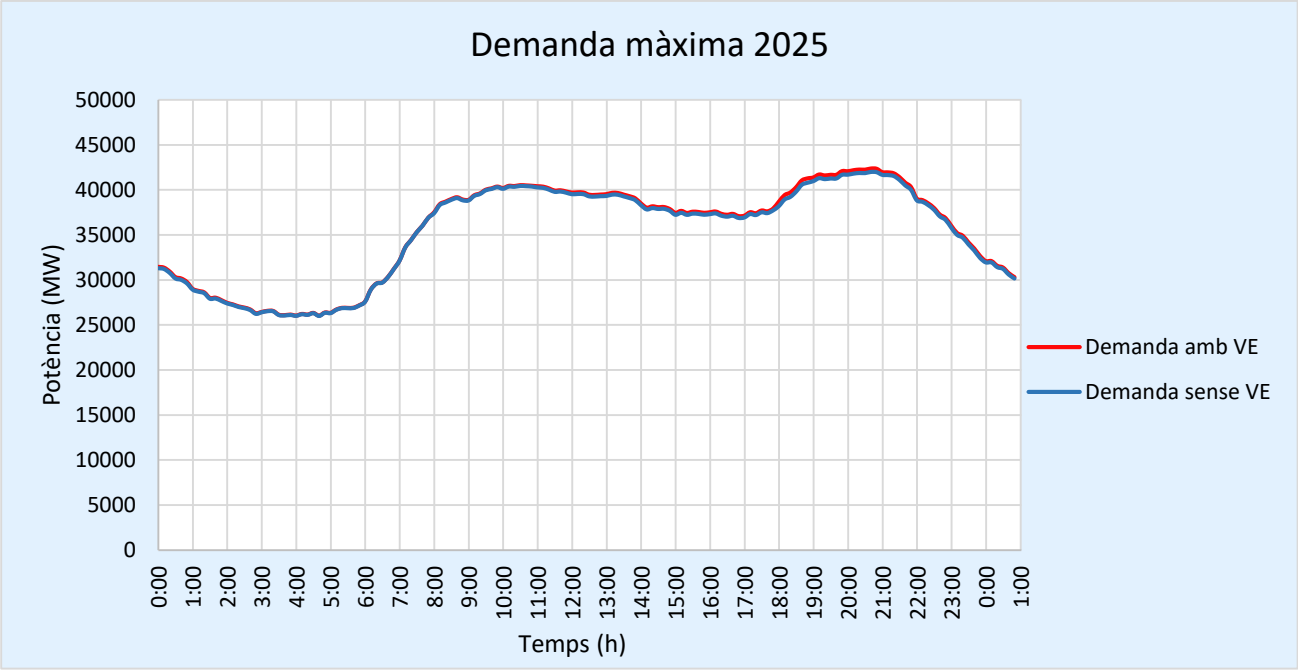

Figura 4.11. Demanda màxima al 2025 en l'escenari de demanda 1. (Font: Elaboració pròpia)

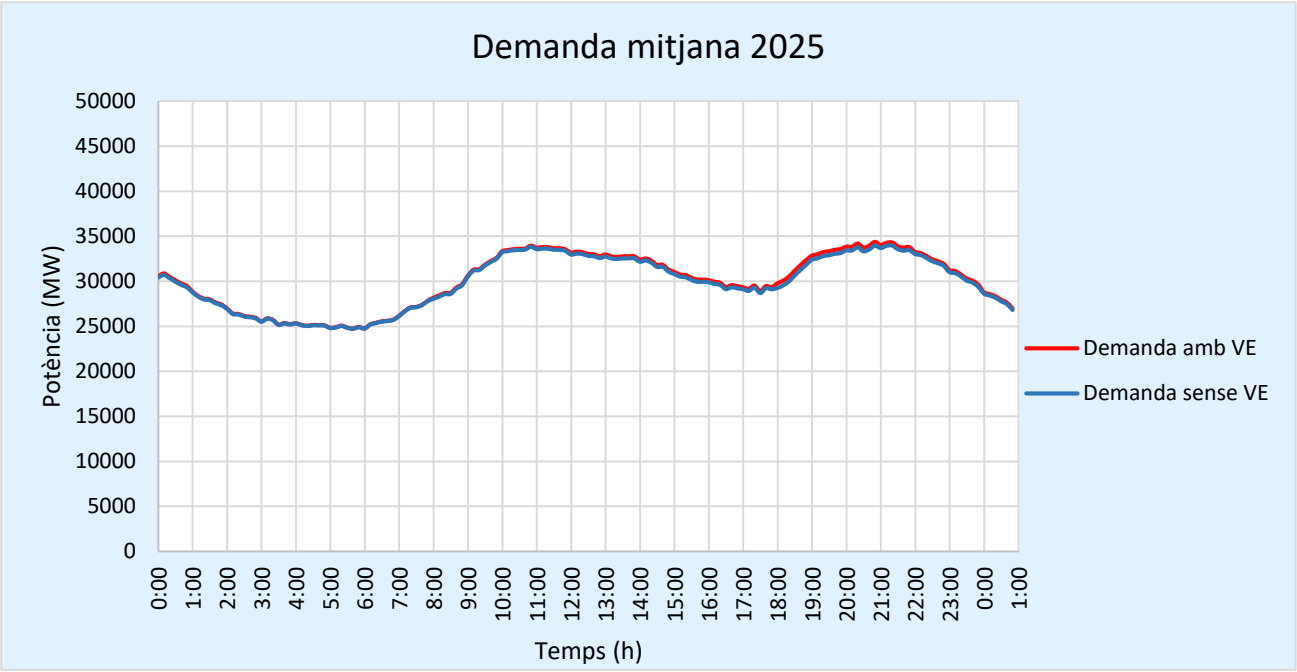

Figura 4.12. Demanda mitjana al 2025 en l'escenari de demanda 1. (Font: Elaboració pròpia)

Tal com s'observa en les gràfiques de l'any 2025, com era d'esperar els VE augmentaran la demanda sobretot en el pic de la tarda, entre les 18:00 i les 22:00; això es deu en l'alta concentració de vehicles endollats en aquestes hores. Durant la resta del dia el consum que suposaran els VE és pràcticament inapreciable.

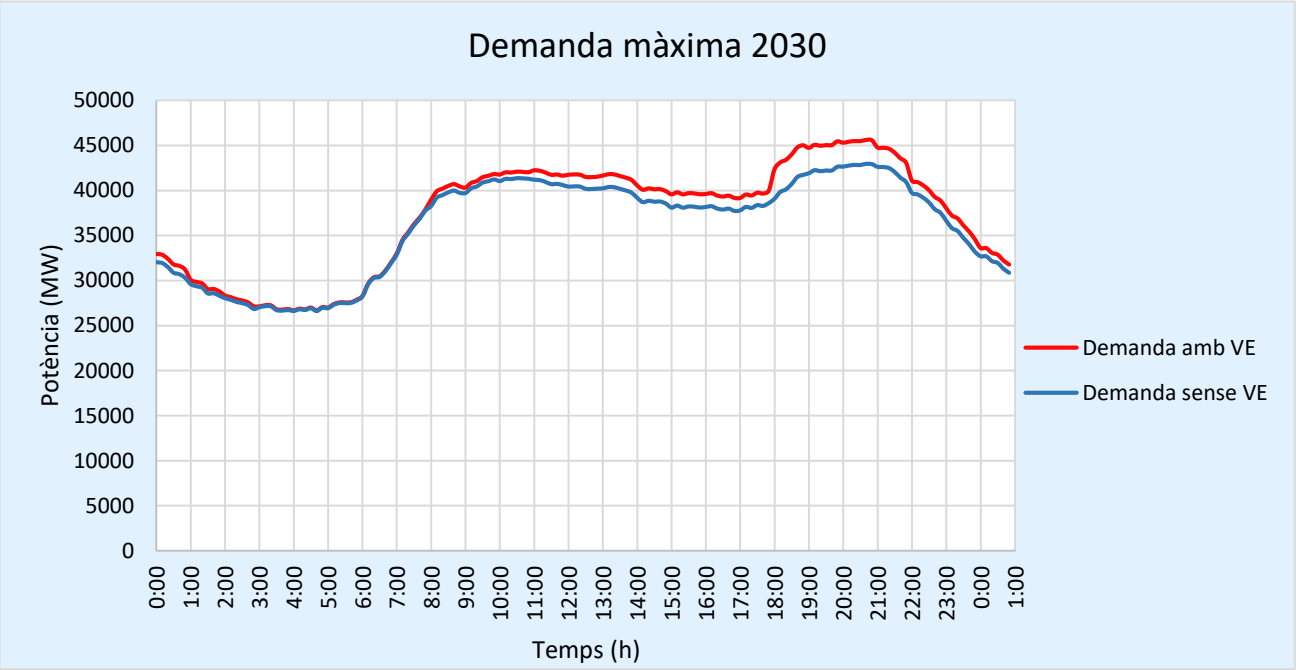

Figura 4.13. Demanda màxima al 2030 en l'escenari de demanda 1. (Font: Elaboració pròpia)

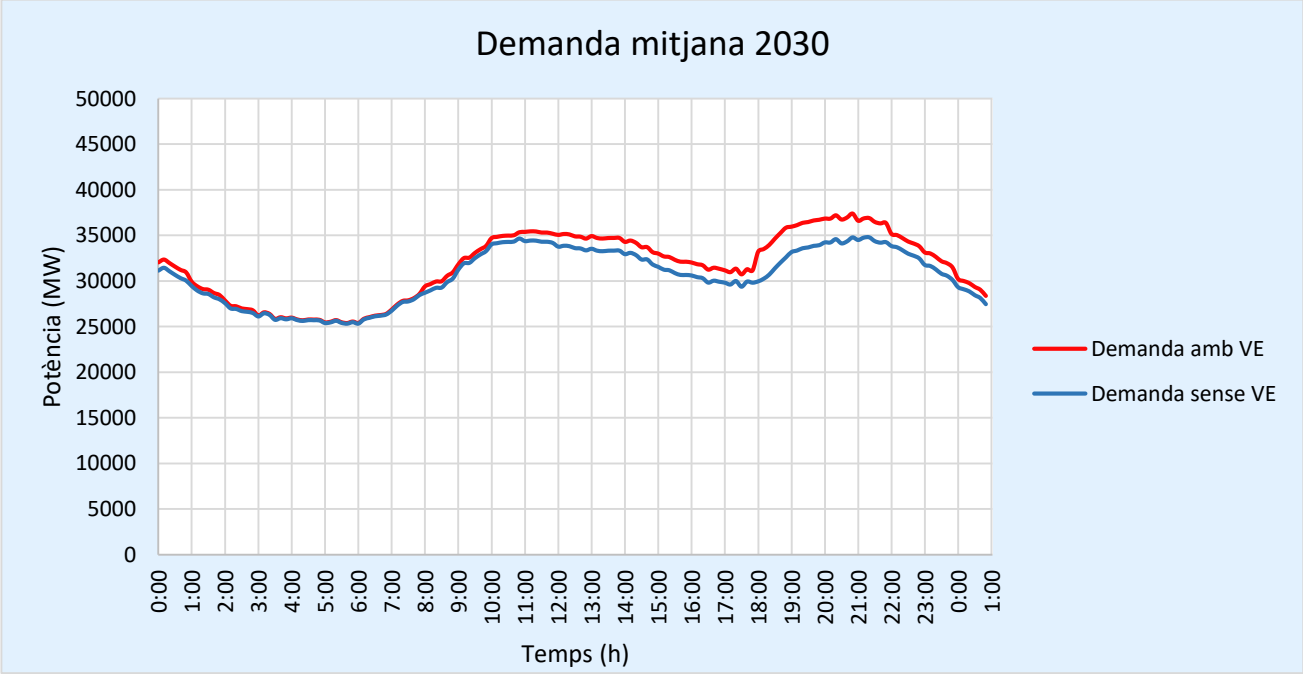

Figura 4.14. Demanda mitjana al 2030 en l'escenari de demanda 1. (Font: Elaboració pròpia)

Les gràfiques del 2030 mostren una clara diferència amb les de l'any 2025, degut al gran increment de VE en la flota espanyola en aquest període, passant de 700 mil unitats a 4,5 milions. Tot i que el consum energètic dels VE es seguirà concentrant en el pic de la tarda, durant la resta del dia es pot apreciar com els vehicles modificaran la corba cap a l'alça, sobretot en les hores del matí.

Una dada interessant a analitzar és la del pic de potència que s'arribaria en cadascun dels quatre casos, ja que es pot comparar amb els valors de pic actuals i estudiar si la xarxa estaria preparada per assumir els consums obtinguts. A continuació, es mostren en una taula els valors dels pics de potència dels quatre casos de l'escenari de demanda 1, comparant entre les corbes de demanda sense tenir en compte els VE i tenint-los en compte, i la diferència entre aquests valors.

Pics de potència (GW)				
	Màxima 2025	**Mitjana 2025**	**Màxima 2030**	**Mitjana 2030**
Sense VE	41,97	33,97	42,97	34,78
Amb VE	42,38	34,37	45,6	37,41
Diferència	0,41	0,39	2,63	2,62

Taula 4.3. Pics de potència en l'escenari de demanda 1.

Hi ha varis aspectes a comentar sobre els valors de la taula. Per començar, es pot analitzar la diferència energètica que suposarà l'addició dels vehicles elèctrics dins un mateix any entre els dies que tinguin una demanda mitjana i els dies que tinguin una demanda màxima. Es pot observar com, tant pel 2025 com pel 2030, aquesta diferència serà molt baixa, del voltant d'uns 0,01 GW. Aquest fet era d'esperar, ja que en aquest escenari no es te en compte cap variable a l'hora de recarregar, per tant el fet de trobar-se en un dia amb una demanda mitjana o molt elevada és irrellevant perquè el vehicle es recarregarà de totes maneres.

Un altre fet a comparar son els valors dels pics de potència als que s'arribarà en els quatre casos diferents. Primerament, tal com passava amb les corbes de demanda base, el pic de potència d'un dia amb un consum mitjà al 2030 serà notòriament menor al pic d'un dia amb un consum molt elevat al 2025, aproximadament 5 GW menor. Aquest aspecte és força rellevant, ja que significa que encara que l'augment de VE a Espanya segueix una tendència exponencial i el creixement entre el 2025 i el 2030 serà molt alt, no és suficient com per generar una demanda diària tant alta com els dies de màxim consum del 2025.

Per tal de tenir una idea més clara sobre el que suposen aquests valors de pic als que s'arribaran, s'han comparat amb el valor de potència màxim al que s'ha arribat mai a Espanya. Aquest pic es va

aconseguir el 17 de desembre de 2007 entre les 19:00 i les 20:00, i va tenir un valor de 44,88 GW [7]. Això significa que aquest record històric es veuria superat l'any 2030 en els dies amb una demanda molt elevada, amb una diferència d'uns 0,8 GW.

4.4.2. Escenari de demanda 2

El segon escenari de demanda és més complex que el primer, ja que el sistema de recàrrega està basat en el preu de l'energia. Això significa que en aquest escenari, el fet de connectar el vehicle amb la xarxa no significa necessàriament que aquest comenci a rebre energia, sinó que s'afegeix la condició prèvia de comparar el preu de l'energia en temps real.

Aquest tipus de recarrega es considera com recàrrega intel·ligent, i es pot veure com una primera aproximació cap a la integració del vehicle elèctric en el mercat, ja que aquest respon a la variable del preu de l'energia. Per tal d'aclarir el funcionament de la recàrrega en aquest escenari, a continuació s'explicarà de forma més detallada en que consisteix la tecnologia de la recàrrega intel·ligent i en quin estat de desenvolupament i aplicació es troba actualment.

- **Tecnologia de recàrrega intel·ligent**

El desenvolupament d'un sistema de recàrrega intel·ligent es considera indispensable per tal d'obtenir beneficis amb la integració del VE en el conjunt del sistema elèctric. Aquesta recàrrega intel·ligent te l'objectiu de fomentar la recàrrega dels vehicles en les hores en que la demanda elèctrica és menor, per tant en les hores en que el preu de l'energia és més baix.

Per fer-ho possible, es requereix el desenvolupament de comptadors i dispositius de recàrrega que tinguin la capacitat de comunicar el VE amb l'operador del sistema. A més a més, aquests comptadors han de poder introduir senyals de preu de l'energia, potenciant d'aquesta manera la creació de tarifes amb discriminació horària que serviran per motivar als usuaris a dur a terme una recàrrega intel·ligent. Amb la creació d'aquestes tarifes, els usuaris de VE queden subjectes als preus de l'energia, mesurats en €/kWh, i que varien en funció del temps.

En l'actualitat, aquesta recàrrega intel·ligent és molt difícil de dur a terme, ja que els dispositius de recàrrega no consten d'una comunicació amb l'operador del sistema elèctric i per tant no tenen accés als preus de l'energia en temps real; això té com a conseqüència que les tarifes que incentiven l'ús d'aquesta tecnologia tampoc es trobin disponibles.

- **Aplicació de la tecnologia a l'escenari**

Tenint en compte com seria el possible funcionament de la tecnologia de recàrrega intel·ligent, s'ha aplicat aquesta metodologia per crear els perfils de recàrrega dels VE en aquest escenari. Per fer-ho, s'han obtingut els preus de l'energia de la base de dades de la web d'OMIE en els dies 10 de gener i 26 de gener del 2019, que son els dies en que es basa la demanda màxima i mitjana, respectivament. D'entre aquests valors, s'ha calculat el valor del preu mitjà diari per cadascun dels dies, obtenint com a resultat 62,4 €/kWh pel dia de màxima demanda i 61,5 €/kWh pel dia de demanda mitjana.

El valor del preu mitjà serà el factor que determinarà si el vehicle es recarrega o no. Si el valor del preu de l'energia en una hora concreta es troba per sota del valor mitjà diari, tots els vehicles que es trobin connectats a la xarxa es recarregaran, a excepció dels que ja portin rebent energia més d'una hora i 12 minuts, que ja hauran recarregat els 6 kWh diaris i no rebran més energia. Per altra banda, si el preu de l'energia en una hora és superior al valor mitjà diari, els VE endollats a la xarxa no es podran recarregar, sense cap excepció.

Com que els valors del preu s'ofereixen en €/kWh, son fixes per tota una hora; això significa que, tot i treballar en aquest estudi amb instants de 10 minuts, la condició de recarregar-se o no recarregar-se afectarà de la mateixa forma a tots els vehicles que es connectin a la xarxa en la mateixa hora.

Tot i haver afegit la variable del preu a l'estudi, en aquest escenari es segueixen tenint en compte els perfils de recàrrega dels usuaris detallats anteriorment i emprats en l'escenari de futur 1. Per tant, els resultats de la simulació serveixen per veure com afectaria la recàrrega intel·ligent en la demanda elèctrica si els usuaris de VE no modifiquen la seva rutina de recàrrega.

Havent definit la metodologia del sistema de recàrrega en aquest escenari, a continuació es mostren les quatre gràfiques resultants obtingudes. Cal destacar que en les gràfiques d'aquest escenari, per tenir clar les hores en que el preu de l'energia és superior o inferior al preu mitjà, s'ha afegit un segon eix vertical que indica el preu en €/kWh; d'aquesta manera es poden diferenciar les hores en que els vehicles elèctrics s'estaran recarregant i les que no.

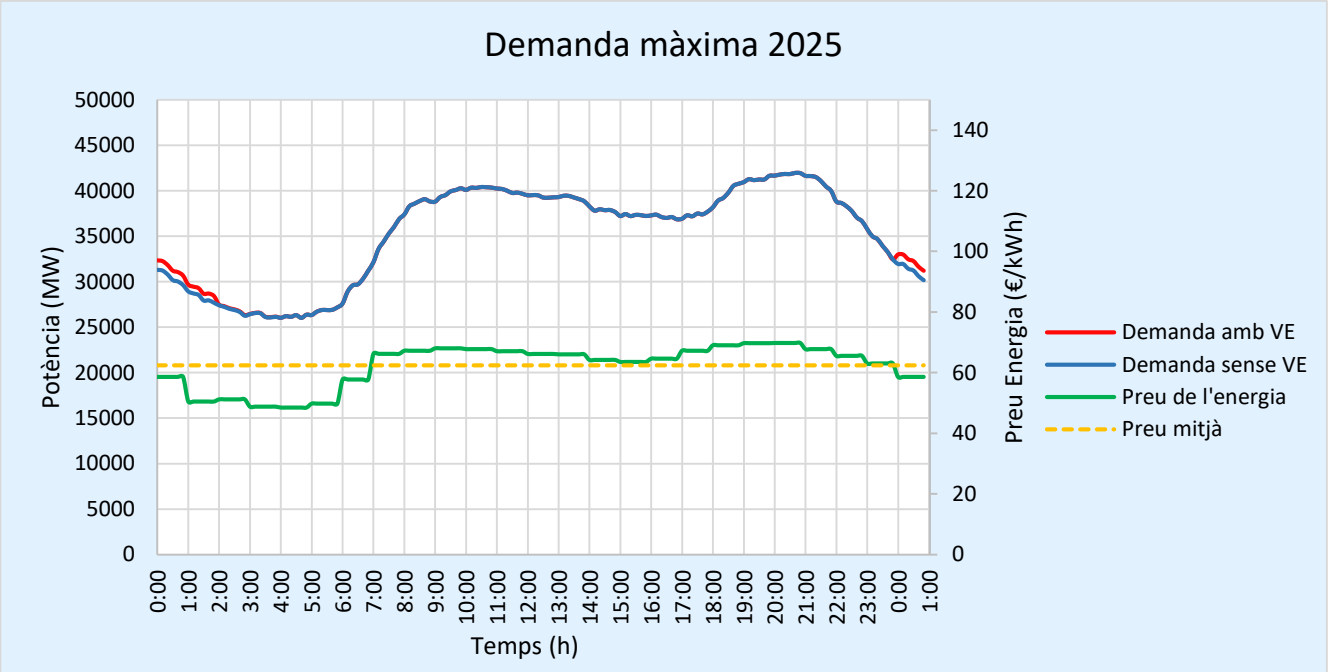

Figura 4.15. Demanda màxima al 2025 en l'escenari de demanda 2. (Font: Elaboració pròpia)

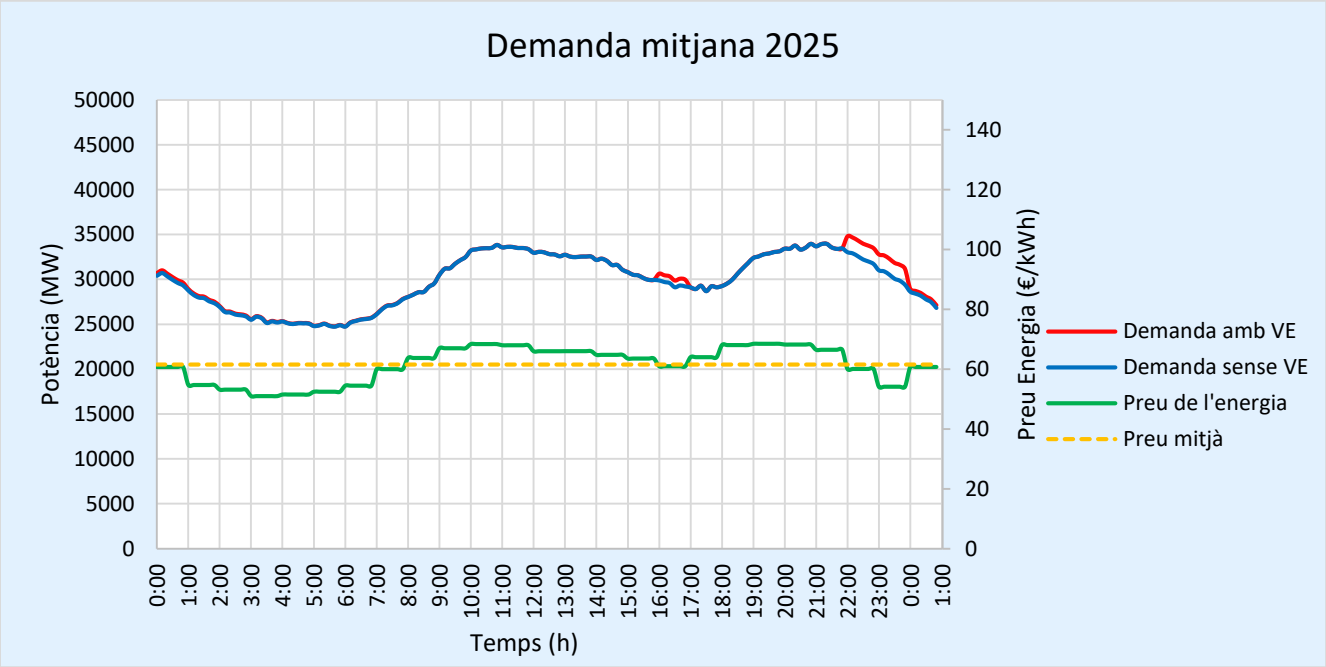

Figura 4.16. Demanda mitjana al 2025 en l'escenari de demanda 2. (Font: Elaboració pròpia)

Com bé es pot apreciar en les gràfiques del 2025, els vehicles elèctrics modificaran de manera molt lleu la corba de demanda. Pel cas dels dies amb un consum molt elevat, l'alteració es produiria lleugerament a la nit, concretament entre les 0:00 i les 2:00; per la resta del dia, els VE tindrien una incidència en la corba pràcticament nul·la. En els dies amb una demanda mitjana, es produiria un efecte similar, ja que els VE elevarien el consum sobretot en les últimes hores del dia, entre les 22:00 i les 0:00. Tot i que es pot destacar un augment del consum degut als VE entre les 16:00 i les 17:00, per la resta del dia no es modificaria la corba.

La poca incidència que tindran els VE en la corba de demanda segons aquest escenari es deu a la limitació que suposen els preus de l'energia. Si s'analitzen, es pot veure com aquests només permeten la recàrrega dels VE durant la nit i, en l'escenari de demanda mitjana, a partir de les 22:00 i entre les 16:00 i les 17:00.

Això implica que, segons els perfils utilitzats de recàrrega dels usuaris, en aquest escenari hi ha un gran nombre de vehicles que no es recarregaran en cap moment del dia. Això passa si es dona la situació que el preu de l'energia és superior al preu mitjà durant tota l'estona que el vehicle es troba endollat a la xarxa. Per tenir una idea més clara sobre quina quantitat es veu afectada, s'han realitzat unes taules que indiquen, en terme binari, si els vehicles que es connecten a la xarxa en una hora en concret es recarreguen en algun moment del dia o no, sent el valor 1 pels vehicles que no es recarreguen i el 0 pels que si. Tot seguit, s'han convertit els valors binaris per la quantitat de vehicles que representen.

Vehicles elèctrics que no es recarreguen en tot el dia				
	Demanda màxima		**Demanda mitjana**	
Hora	**Condició de no recàrrega**	**Milers de VE**	**Condició de no recàrrega**	**Milers de VE**
0:00	0	0	0	0
1:00	0	0	0	0
2:00	0	0	0	0
3:00	0	0	0	0
4:00	0	0	0	0
5:00	0	0	0	0
6:00	0	0	0	0
7:00	1	3,5	0	0
8:00	1	21	1	21
9:00	1	14	1	14
10:00	1	19,3	1	19,3
11:00	1	28	1	28
12:00	1	35	1	35
13:00	1	36,7	0	0
14:00	1	35	0	0

15:00	1	38,5	0	0
16:00	1	36,7	0	0
17:00	1	35	0	0
18:00	1	94,5	0	0
19:00	1	68,3	0	0
20:00	0	0	0	0
21:00	0	0	0	0
22:00	0	0	0	0
23:00	0	0	0	0
TOTAL (VE)		**465,5**	**TOTAL (VE)**	**117,3**
TOTAL (%)		**66,5**	**TOTAL (%)**	**16,75**

Taula 4.4. VE que no es recarreguen al 2025 en l'escenari de demanda 2.

Com es pot observar, la quantitat de VE que no es recarrega en aquest escenari és molt elevada, sobretot pels dies amb una demanda màxima, arribant al 66,5% de VE no recarregats. Tot i que pel cas dels dies amb demanda mitjana el percentatge es disminueix fins al 16,75%, el fet de tenir tants vehicles que no es poden recarregar en tot el dia suposa un greu problema a l'hora de realitzar prediccions de cara al futur.

A continuació, es mostren les gràfiques corresponents a l'any 2030.

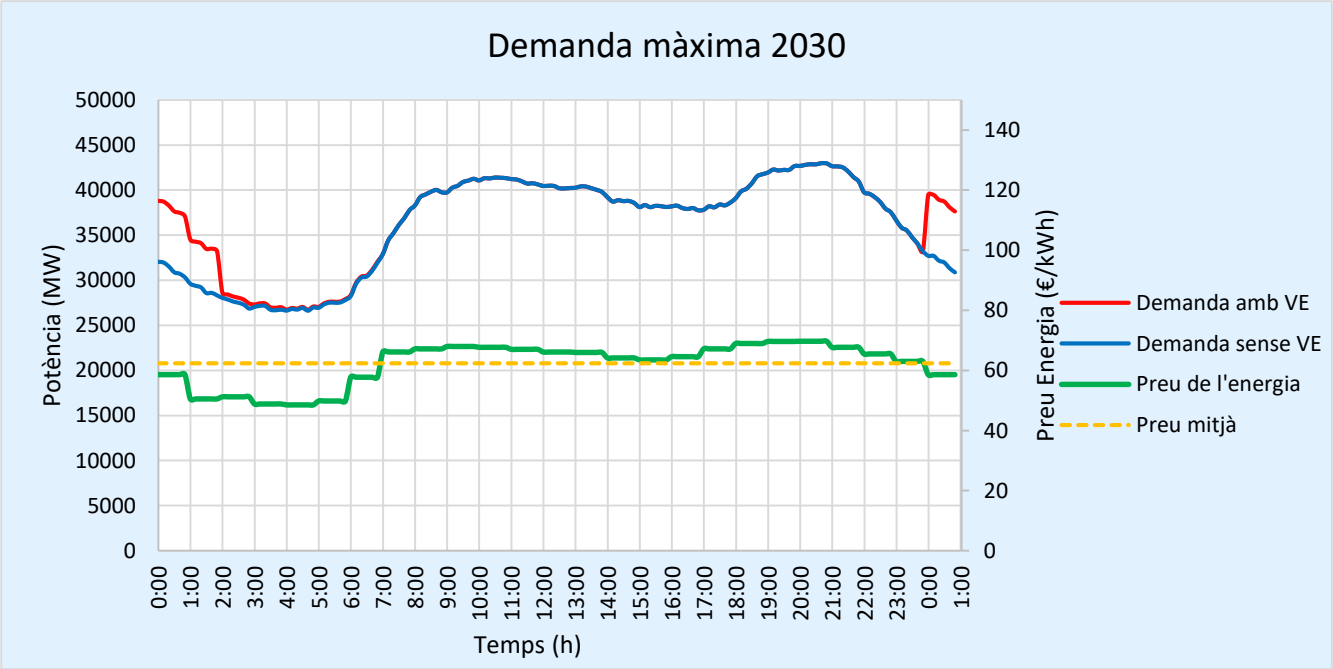

Figura 4.17. Demanda màxima al 2030 en l'escenari de demanda 2. (Font: Elaboració pròpia)

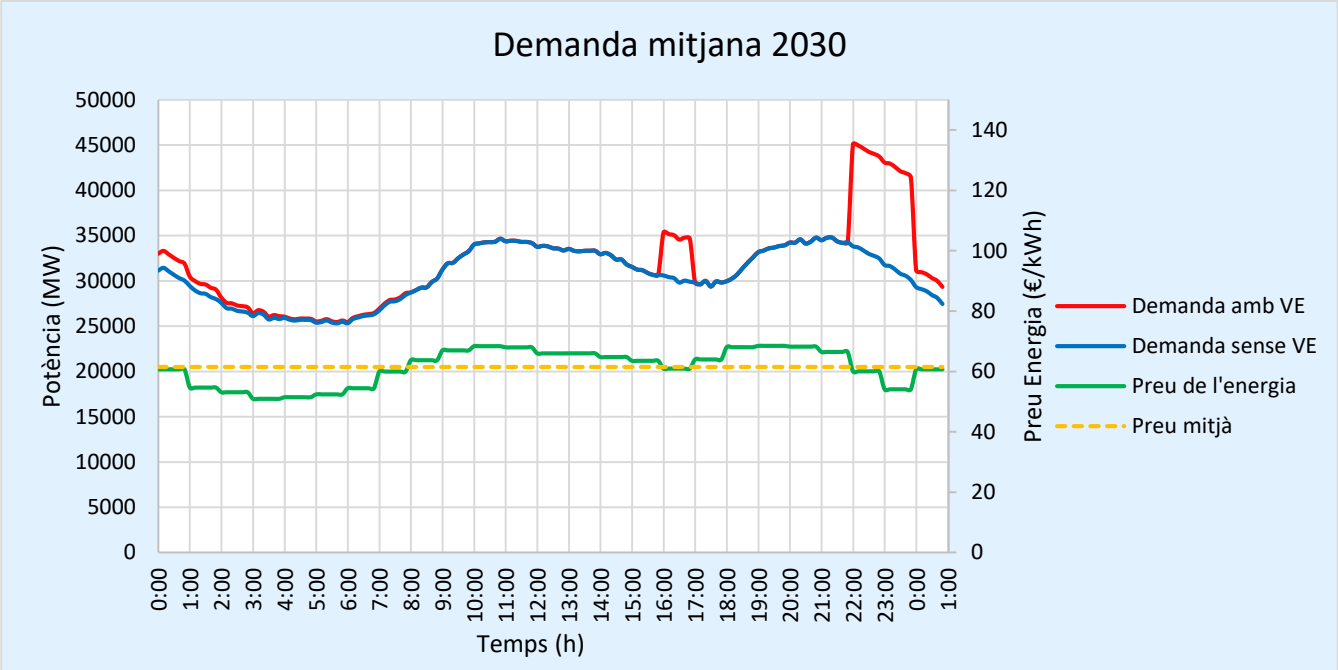

Figura 4.18. Demanda mitjana al 2030 en l'escenari de demanda 2. (Font: Elaboració pròpia)

Tal com es pot apreciar, el patró que segueix la demanda elèctrica dels VE és idèntic al de les gràfiques de l'any 2025, però aquesta vegada augmentant considerablement la demanda en les hores de consum. Aquesta similitud amb les corbes del 2025 era d'esperar, ja que els preus de l'energia utilitzats son els mateixos, cosa que significa que les hores en que els VE es podran recarregar també seran iguals.

Ara bé, al estar en el cas del 2030, tenir una flota de 4,5 milions de vehicles implica un augment considerable del consum elèctric, que es pot veure reflectit en els pics de potència tant elevats que es formen en les corbes resultants. Els valors dels pics en qüestió s'exposaran i s'analitzaran de forma detallada més endavant.

De la mateixa manera que en l'any 2025, hi ha molts vehicles que dins els paràmetres d'aquest escenari no es recarreguen en cap moment del dia. Aquesta quantitat de vehicles es pot veure reflectida en la taula que es mostra a continuació.

Vehicles elèctrics que no es recarreguen en tot el dia				
	Demanda màxima		Demanda mitjana	
Hora	Condició de no recàrrega	Milers de VE	Condició de no recàrrega	Milers de VE
0:00	0	0	0	0
1:00	0	0	0	0
2:00	0	0	0	0
3:00	0	0	0	0
4:00	0	0	0	0
5:00	0	0	0	0
6:00	0	0	0	0
7:00	1	22,5	0	0
8:00	1	135	1	135
9:00	1	90	1	90
10:00	1	123,7	1	123,8
11:00	1	180	1	180
12:00	1	225	1	225
13:00	1	236,3	0	0
14:00	1	225	0	0
15:00	1	247,5	0	0
16:00	1	236,3	0	0
17:00	1	225	0	0
18:00	1	607,5	0	0
19:00	1	438,8	0	0
20:00	0	0	0	0
21:00	0	0	0	0
22:00	0	0	0	0
23:00	0	0	0	0
TOTAL (VE)		**2992,5**	**TOTAL (VE)**	**753,8**
TOTAL (%)		**66,5**	**TOTAL (%)**	**16,75**

Taula 4.5. VE que no es recarreguen al 2030 en l'escenari de demanda 2.

El percentatge de vehicles que no es recarreguen és el mateix que el de l'any 2025 degut a que els vehicles dels dos anys es troben condicionats pels mateixos preus de l'energia, per tant els valors binaris de la condició de no recàrrega també seran iguals. Tot i això, el nombre total de VE que no es recarregarà en aquest escenari si que varia, arribant als 2,9 milions pels dies de molta demanda i als 750 mil pels dies amb una demanda mitjana.

Com s'ha comentat anteriorment, en el cas del 2030, en aquest escenari es crearien uns pics de potència molt elevats. Per tant, és interessant analitzar i comparar els valors d'aquests pics en els anys 2025 i 2030.

Pics de potència (GW)				
	Màxima 2025	**Mitjana 2025**	**Màxima 2030**	**Mitjana 2030**
Sense VE	41,97	33,97	42,97	34,78
Amb VE	41,97	34,79	42,97	45,08
Diferència	0	0,81	0	10,29

Taula 4.6. Pics de potència en l'escenari de demanda 2.

Per començar, una dada que crida l'atenció és la diferència entre les demandes màximes sense els VE i amb els VE, ja que tant per l'any 2025 com pel 2030 la diferència és nul·la. Això es podria considerar com un aspecte positiu sobre aquest escenari, ja que significa que gràcies a la introducció de la recàrrega intel·ligent, la recàrrega dels VE s'ha desplaçat cap a les hores on el consum energètic és menor; no obstant, aquest bon resultat és enganyós, ja que s'ha comprovat que un 66,5% dels vehicles no es recarrega en els dies de demanda màxima.

Un altre punt que crida l'atenció és el gran increment de demanda que suposen els VE en el cas d'un dia amb demanda mitjana al 2030, arribant als 10 GW de diferència. Això és una conseqüència directa de la introducció de la recàrrega intel·ligent, ja que al limitar les hores en que els vehicles poden rebre energia de la xarxa, s'ha provocat una acumulació d'aquests en les hores en que el preu de l'energia és baix.

De la mateixa manera que s'ha fet en l'escenari futur 1, per posar en context la dimensió que suposen aquests valors, es poden comparar els pics de potència obtinguts amb el valor de pic més alt que s'ha registrat mai a Espanya, que té un valor de 44,88 GW; com es pot observar, aquest valor es supera pel pic de potència d'un dia amb demanda mitjana al 2030. Això significa que, segons aquest escenari, al 2030 en els dies en que la demanda sigui mitjana es superaria el valor de pic màxim històric de Espanya de forma habitual.

La funcionalitat i viabilitat i d'aquest escenari es comentaran més endavant, en l'apartat de les conclusions i comparacions entre els diferents escenaris.

4.4.3. Escenari de demanda 3

El tercer i últim escenari de futur consisteix en modificar l'escenari futur 2 per tal d'assegurar que tots els vehicles elèctrics que es trobin en la flota espanyola en un futur proper recarreguin la seva energia mitjana durant el dia. Per tant, en l'escenari en qüestió també s'aplicarà un sistema de recàrrega intel·ligent basat en el preu de l'energia en temps real, amb un funcionament idèntic al de l'escenari de futur 2.

Amb l'objectiu d'assegurar que tots els vehicles es recarreguin al llarg del dia, s'han introduït unes tarifes que tindrien l'objectiu d'incentivar la recàrrega dels VE durant la nit. Això s'ha plasmat en l'escenari desplaçant l'instant d'inici de recàrrega d'un 75% dels vehicles que en l'escenari anterior no s'estaven recarregant, entre la 1:00 i les 6:00 de la nit. S'ha decidit aquest marge de temps per dos motius principals. El primer és que entre aquestes hores el consum energètic arriba als nivells més baixos del dia; per tant, el marge de creixement de la demanda que suposaran els nous vehicles desplaçats és més elevat. Aleshores, al situar aquesta nova demanda en els instants en que el consum és més baix, s'està afavorint la no creació de pics de potència i, d'aquesta manera, un millor funcionament de la xarxa elèctrica.

El segon motiu és que, pensant en la comoditat de l'usuari del vehicle, es considera que si l'usuari ha de modificar el seu perfil de recàrrega, és a dir canviar l'hora en que connecta el vehicle a la xarxa, suposa menys esforç si el nou instant de connexió és a la nit, ja que el més habitual és que l'usuari es trobi en el seu domicili i hi tingui el vehicle estacionat.

Cal destacar que, per distribuir de forma més homogènia els vehicles en el marge de 5 hores en el que s'han establert, s'ha dividit el nombre total dels VE desplaçats entre 5 i s'ha repartit aquest valor equitativament per cadascuna de les 5 hores en qüestió.

El fet de desplaçar un 75% dels vehicles que no s'estaven recarregant i no la seva totalitat es deu a que s'entén que hi haurà alguns usuaris que, degut al seu estil de vida i a les seves activitats, no podran canviar el moment d'inici de recàrrega del vehicle i ho seguiran fent igual que en l'actualitat. Tenint això en compte, en la programació per obtenir les gràfiques d'aquest escenari s'ha permès a aquest 25% dels vehicles que no s'ha desplaçat, recarregar les bateries en instants en que el preu de l'energia es troba per sobre del preu mitjà. Per la resta de vehicles s'ha seguit utilitzant la condició de trobar-se per sota el preu mitjà per poder-se recarregar, de la mateixa manera que s'ha fet en l'escenari futur 2.

Ara bé, per tal de dur a terme un sistema de recàrrega com aquest, es necessiten una sèrie de condicions, ja que si no s'ofereix algun avantatge o compensació, els usuaris dels vehicles no modificaran la seva rutina diària i no desplaçaran l'inici de la recàrrega a la nit. El que faria falta serien unes tarifes que premiessin a aquelles persones que recarreguessin el seu vehicle per la nit, creant

d'aquesta manera un incentiu econòmic que motivaria a la gent a fer el canvi; les tarifes en qüestió haurien de fer que a la gent li sortís a més compte recarregar el vehicle durant la nit, provocant així que només ho fes durant el dia la gent que no te cap altre opció. Com és d'esperar, en l'actualitat no son habituals tarifes d'aquest estil, ja que la recarrega intel·ligent és una tecnologia amb poca penetració en el mercat actual i a les comercialitzadores no els surt a compte crear tarifes basades en aquest sistema.

Per tal de veure de forma clara com queda distribuït el temps d'inici de connexió dels vehicles en aquest escenari, s'ha realitzat una gràfica on es representa la freqüència relativa sobre aquesta dada.

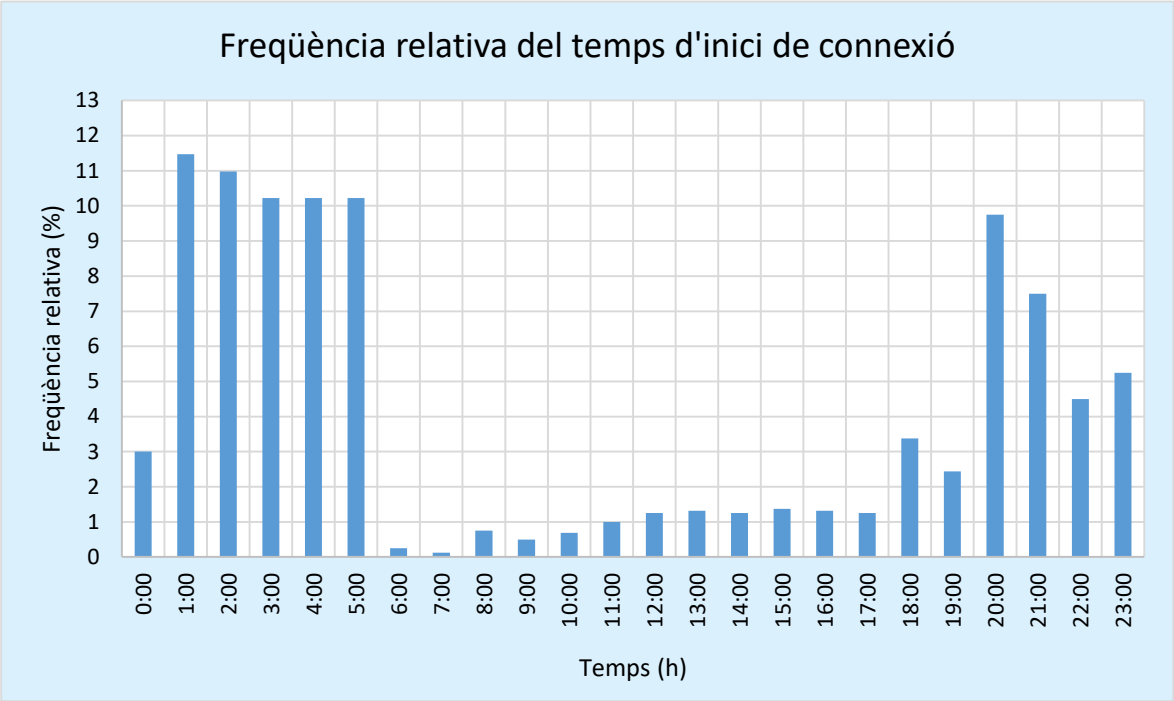

Figura 4.19. Freqüència relativa del temps d'inici de connexió en l'escenari de demanda 3. (Font: Elaboració pròpia)

Com es pot apreciar, la freqüència relativa en les hores de la nit és lleugerament superior que la de les 20:00, que fins ara era el moment en que es connectaven més vehicles a la xarxa. Encara que una proporció dels vehicles no s'hagi desplaçat cap a la nit, s'observa com el nombre de VE que iniciarà la seva recàrrega durant el dia en aquest escenari serà molt baixa, del voltant de l'1% per cada hora entre les 6:00 i les 17:00.

Havent definit detalladament el funcionament del sistema de recàrrega d'aquest escenari, es mostren les gràfiques resultants de la simulació.

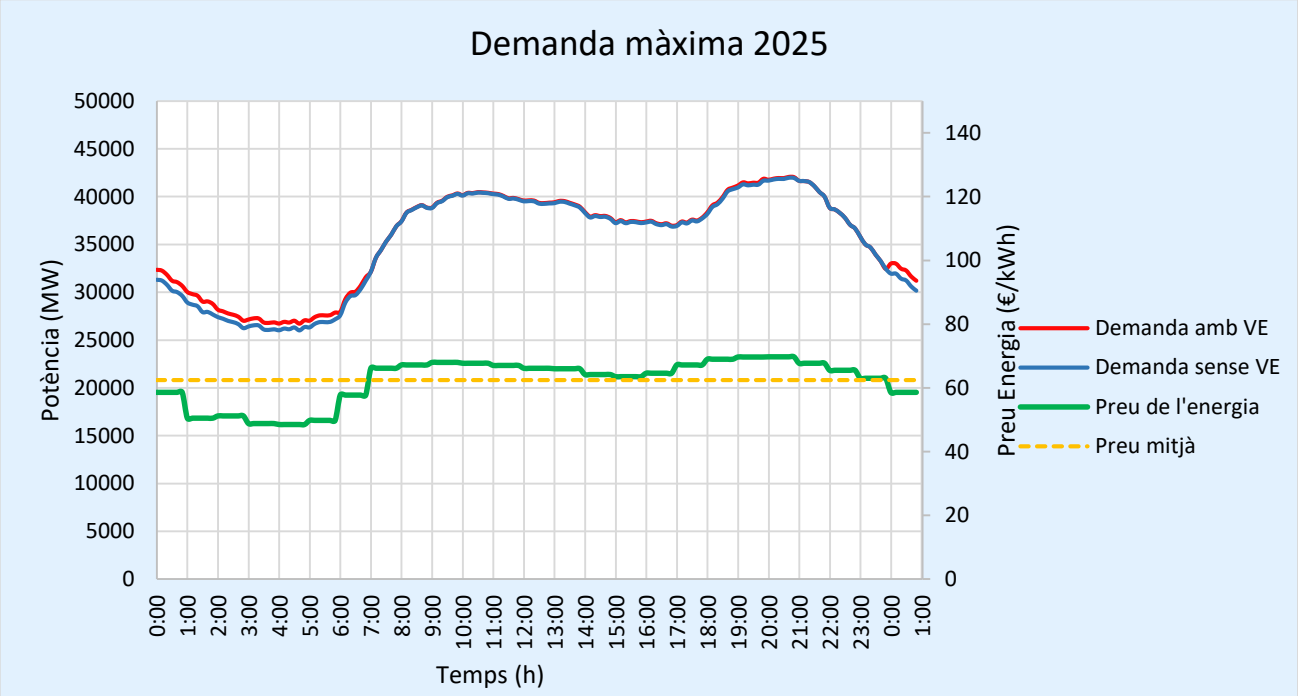

Figura 4.20. Demanda màxima al 2025 en l'escenari de demanda 3. (Font: Elaboració pròpia)

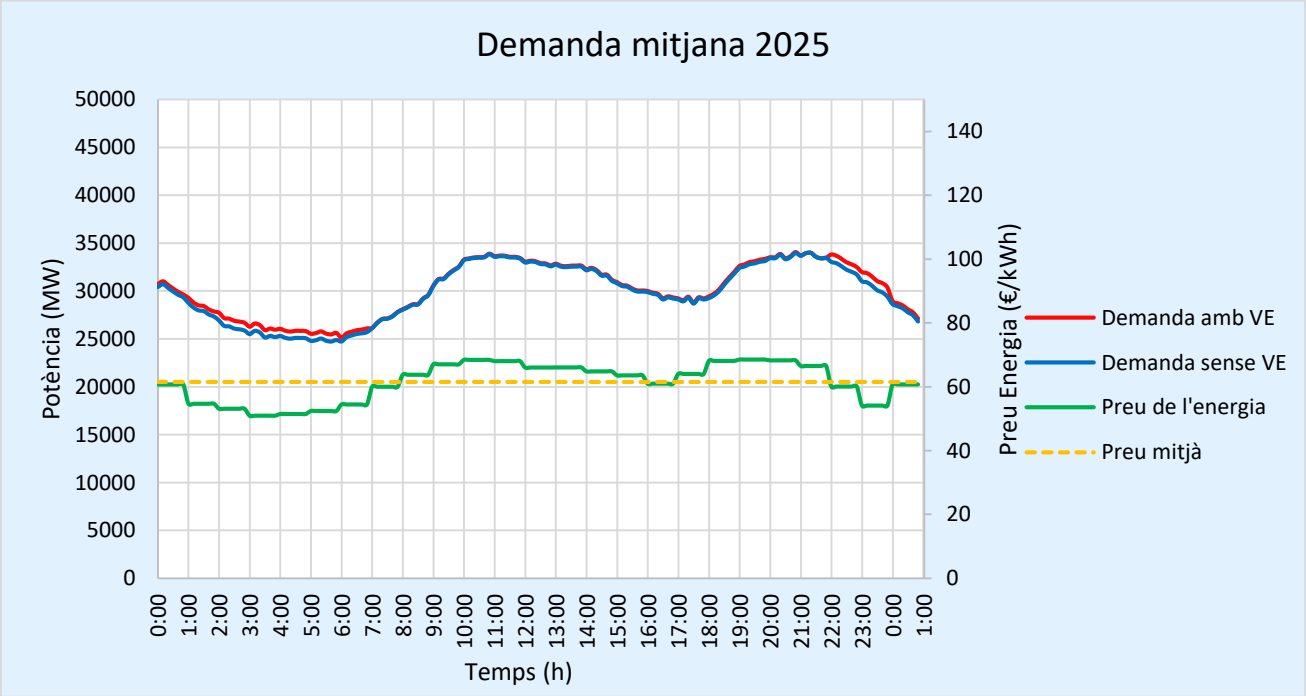

Figura 4.21. Demanda mitjana al 2025 en l'escenari de demanda 3. (Font: Elaboració pròpia)

Les gràfiques de la demanda elèctrica en l'any 2025 d'aquest escenari serveixen per comprovar que el principal objectiu s'està complint, i és que es pot observar com l'augment del consum es produeix de forma més destacada per la nit. El 25% de vehicles els quals s'ha mantingut la seva recàrrega durant el dia no provocarà un creixement molt elevat de la demanda, degut al poc nombre de vehicles que suposa en relació al total de la flota de en l'any 2025. Aquest fet era d'esperar ja que, com s'ha mostrat en la gràfica de la freqüència relativa del temps d'inici de connexió, cada hora es començaran a recarregar aproximadament un 1% dels VE.

En el cas dels dies amb una demanda màxima, les alteracions de la corba a causa dels vehicles elèctrics es notaran sobretot a la nit, concretament entre les 0:00 i les 6:00.

En els dies en que la demanda sigui mitjana, s'observa com la corba augmentarà sobretot a la nit, però entre les 22:00 i les 0:00 els VE també provocaran un augment del consum degut a la disminució del preu de l'energia.

Per comprovar que realment tots els vehicles estan recarregant els seus 6 kWh d'energia mitjana, s'ha realitzat el mateix sistema de programació que en l'escenari de futur 2. El resultat de la programació es pot veure representat en la taula que es mostra a continuació, on, de forma binaria, s'indica amb un 0 si el vehicle que inicia la seva connexió en un moment determinat es recarrega en algun moment del dia i amb un 1 si no ho fa.

Vehicles elèctrics que no es recarreguen en tot el dia				
	Demanda màxima		**Demanda mitjana**	
Hora	**Condició de no recàrrega**	**Quantitat de VE**	**Condició de no recàrrega**	**Quantitat de VE**
0:00	0	0	0	0
1:00	0	0	0	0
2:00	0	0	0	0
3:00	0	0	0	0
4:00	0	0	0	0
5:00	0	0	0	0
6:00	0	0	0	0
7:00	0	0	0	0
8:00	0	0	0	0
9:00	0	0	0	0
10:00	0	0	0	0
11:00	0	0	0	0
12:00	0	0	0	0
13:00	0	0	0	0
14:00	0	0	0	0

15:00	0	0	0	0
16:00	0	0	0	0
17:00	0	0	0	0
18:00	0	0	0	0
19:00	0	0	0	0
20:00	0	0	0	0
21:00	0	0	0	0
22:00	0	0	0	0
23:00	0	0	0	0
TOTAL (VE)		**0**	**TOTAL (VE)**	**0**
TOTAL (%)		**0**	**TOTAL (%)**	**0**

Taula 4.7. VE que no es recarreguen al 2025 en l'escenari de demanda 3.

La taula demostra de manera clara que tots els vehicles s'estan recarregant en aquest cas d'estudi. A continuació es mostren les gràfiques resultants per l'any 2030.

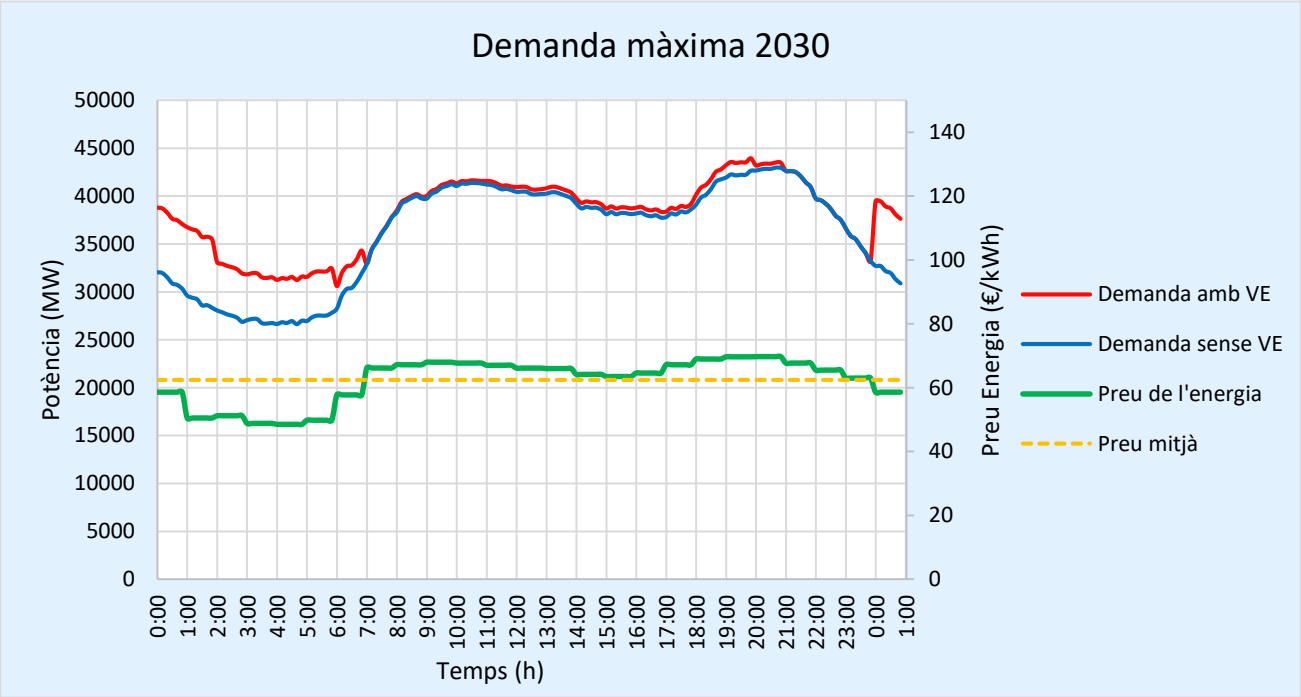

Figura 4.22. Demanda màxima al 2030 en l'escenari de demanda 3. (Font: Elaboració pròpia)

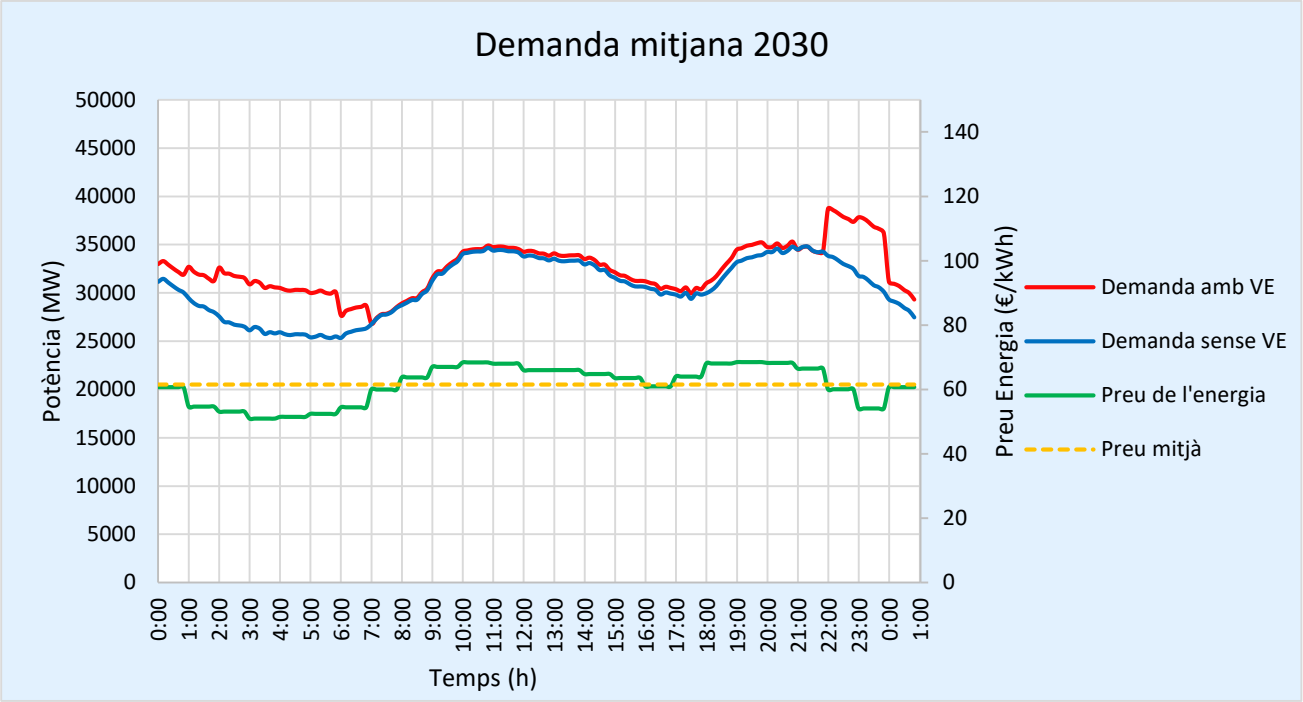

Figura 4.23. Demanda mitjana al 2030 en l'escenari de demanda 3. (Font: Elaboració pròpia)

En el cas de l'any 2030, es pot veure que la demanda amb els vehicles elèctrics seguirà el mateix patró que en l'any 2025, però aquesta vegada de forma molt més accentuada, degut al gran augment de la flota de VE entre els anys 2025 i 2030. En els dies en que el consum elèctric sigui màxim, es produirà un gran augment de la demanda durant la nit, arribant per exemple a les 0:00 a valors més elevats que els que es donaran entre les 14:00 i les 18:00. En el començament del pic de la tarda, concretament entre les 18:00 i les 20:00, els VE elevaran lleugerament la corba de consum, provocant d'aquesta manera l'augment del màxim pic de potència diari.

Pel que fa als dies amb una demanda mitjana, durant la nit també es produirà un gran augment de la demanda elèctrica, arribant a superar en alguns instants el consum que es tindrà entre les 16:00 i les 18:00. Un fet distintiu entre aquesta corba i la del dia amb demanda màxima és que en aquesta es produirà un creixement de la corba molt accentuat entre les 22:00 i les 0:00; això es deu a que a les 22:00 el preu de l'energia és menor al preu mitjà, per tant tots els vehicles que es connecten a la xarxa en aquesta hora i els que ja estaven connectats però no s'havien pogut recarregar, comencen a rebre energia.

De la mateixa manera que en el cas de l'any 2025, s'ha comprovat que tots els vehicles s'estiguin recarregant en la programació realitzada. Els resultats es mostren en la següent taula.

Vehicles elèctrics que no es recarreguen en tot el dia				
	Demanda màxima		Demanda mitjana	
Hora	Condició de no recàrrega	Quantitat de VE	Condició de no recàrrega	Quantitat de VE
0:00	0	0	0	0
1:00	0	0	0	0
2:00	0	0	0	0
3:00	0	0	0	0
4:00	0	0	0	0
5:00	0	0	0	0
6:00	0	0	0	0
7:00	0	0	0	0
8:00	0	0	0	0
9:00	0	0	0	0
10:00	0	0	0	0
11:00	0	0	0	0
12:00	0	0	0	0
13:00	0	0	0	0
14:00	0	0	0	0
15:00	0	0	0	0
16:00	0	0	0	0
17:00	0	0	0	0
18:00	0	0	0	0
19:00	0	0	0	0
20:00	0	0	0	0
21:00	0	0	0	0
22:00	0	0	0	0
23:00	0	0	0	0
TOTAL (VE)		**0**	**TOTAL (VE)**	**0**
TOTAL (%)		**0**	**TOTAL (%)**	**0**

Taula 4.8. VE que no es recarreguen al 2030 en l'escenari de demanda 3.

Igual que en el cas del 2025, en la programació de l'any 2030 també s'estan recarregant tots els vehicles en algun moment del dia.

De la mateixa manera que s'ha fet en els escenaris futurs anteriors, a continuació es mostraran en una taula els pics de potència als quals arriba la demanda en aquest escenari.

Pics de potència (GW)				
	Màxima 2025	**Mitjana 2025**	**Màxima 2030**	**Mitjana 2030**
Sense VE	41,97	33,98	42,97	34,78
Amb VE	42,05	34,05	43,96	38,72
Diferència	0,08	0,07	0,99	3,94

Taula 4.9. Pics de potència en l'escenari de demanda 3.

Per començar, si s'observa la diferència de demanda de pic que suposaran els VE en aquest escenari es veu com per l'any 2025 la diferència serà força baixa, arribant als 0,08 GW com a màxim en els dies en que el consum sigui molt elevat. No obstant, en l'any 2030 aquesta diferència augmentarà de forma molt considerable, sobretot en els dies amb una demanda mitjana, arribant gairebé als 4 GW.

En aquest escenari, si es comparen els valors de pic resultants amb el pic de potència més alt que s'ha registrat, de 44,88 GW, es veu com no es superaria aquest valor ni al 2025 ni al 2030. Aquest és un aspecte molt positiu sobre l'escenari, ja que significa que la recàrrega intel·ligent està aplanant la corba de demanda de forma efectiva.

4.5. Comparació entre els escenaris de demanda

Els tres escenaris de demanda creats tenen l'objectiu de reflectir com modificaran els vehicles elèctrics la corba de demanda elèctrica en un futur proper. Degut a les diferents variables que s'han introduït en cada escenari, els resultats obtinguts per cadascun d'ells són molt diferents i permeten extreure conclusions sobre quin seria l'escenari òptim de cara al bon funcionament de la xarxa elèctrica. Per tant, en aquest apartat es compararan els resultats que s'han mostrat anteriorment i es decidirà quin sistema de recàrrega es considera el més adient.

Per començar, abans de comparar els escenaris entre sí, es farà un anàlisi sobre quins son els principals avantatges i inconvenients de cada escenari.

4.5.1. Avantatges i inconvenients de l'escenari de demanda 1

Aquest escenari es pot considerar el més simple dels tres tecnològicament parlant, ja que és l'únic que no consta d'un sistema de recàrrega intel·ligent; això suposa un aspecte positiu i negatiu alhora. Per començar, com s'ha dit anteriorment la tecnologia de la recàrrega intel·ligent per VE es troba

actualment en una fase molt inicial a nivell de mercat. Els punts de recàrrega actuals no consten del software necessari per poder-la posar en pràctica, ja que no tenen la opció de rebre en temps real les dades del preu de l'energia. Tots aquests factors provoquen que aquest escenari sigui a dia d'avui l'únic dels tres que es pot assegurar que es pugui materialitzar en un futur, ja que bàsicament consisteix en un sistema de recàrrega com l'actual. Per tant, els resultats obtinguts en les simulacions poden servir per tenir una idea de com seria la corba de potència en un futur en el que la tecnologia de recàrrega no s'ha modificat i la recàrrega intel·ligent no s'ha aplicat.

L'aspecte negatiu de no tenir aplicat un sistema de recàrrega intel·ligent és que, a dia d'avui, tot indica a que el mercat avança cap a la implementació d'aquestes tecnologies, ja que s'està invertint un capital elevat en investigació i el fet d'oferir una possible millora en la demanda de la xarxa suposa un avantatge molt interessant. Tot i que la recàrrega intel·ligent encara no s'ha implementat en els vehicles elèctrics, en altres càrregues com poden ser els electrodomèstics quotidians dels domicilis, comença a ser habitual veure aquest tipus de tecnologia. No obstant, el que es fa actualment és possibilitar la programació de les càrregues per poder establir en quin moment del dia es posaran en funcionament.

La lliure elecció dels usuaris sobre el moment de començar la recàrrega del vehicle té aspectes positius pels usuaris però negatius per la xarxa. El poder escollir quan endollar el VE sense haver de tenir en compte cap aspecte que no sigui la teva comoditat, suposa a la persona estalviar-se una preocupació menys i poder compaginar fàcilment les accions del seu dia a dia amb la mobilitat amb un VE. No obstant, aquesta llibertat de l'usuari suposa un problema per la xarxa a tenir en compte, ja que els operadors de la xarxa no poden exercir cap tipus de control en el sistema de recàrrega, acció que podria ser necessària en moments d'alta demanda elèctrica o de problemes de subministrament en alguna zona.

Les corbes resultants d'aquest escenari marquen un augment de la demanda força homogeni durant les hores del dia, i més reduït per la nit. Això significa que no es creen pics de potència inesperats que no segueixen la tendència de la demanda base. Com que no hi ha control sobre el temps d'inici de la recàrrega, l'augment que es produirà en la demanda depèn únicament de les decisions personals dels usuaris, per tant és comprensible que per la nit el consum que suposen els VE sigui menor, ja que la majoria de persones endollen el vehicle al arribar al seu domicili, és a dir per la tarda; cal destacar que encara que per la nit la demanda dels VE sigui menor, no significa que aquests no es trobin connectats a la xarxa, sinó que ja han recarregat els seus 6 kWh d'energia mitjana diària.

El consum energètic dels VE incrementarà en les hores de la tarda, coincidint amb el segon pic de potència del dia. Això es pot considerar com un aspecte molt negatiu a tenir en compte en aquest escenari, ja que s'està incrementant la demanda en les hores en que aquesta ja te els valors més elevats

del dia. Seria desitjable que fos a l'inrevés i que el creixement es produís en les hores on el consum és menor, és a dir per la nit.

En aquest escenari, al 2025 l'increment de la demanda elèctrica no serà molt elevat, però al 2030 ja suposarà un augment prou considerable, sobretot per la tarda, en el segon pic del dia. Els valors dels pics que s'aconseguiran i les conseqüències que provocaran per la xarxa es discutiran i compararan més endavant amb els dels altres escenaris.

Per resumir els punts més importants que s'han anomenat en aquest apartat, l'escenari futur 1 escenifica les conseqüències que tindria si el sistema de recàrrega dels VE es mantingués com el que es té en l'actualitat en un futur proper; per tant, es pot assegurar que l'escenari es pot aplicar en la societat espanyola. No obstant, el fet de mantenir-se tant idèntic al sistema actual suposa desvincular-se dels avenços tecnològics que s'estan duent a terme en la recarrega intel·ligent, ja que tot indica que en algun moment o altre aquesta tecnologia emergent s'acabarà aplicant en els punts de recàrrega. Com que no s'aplica la recàrrega intel·ligent, els vehicles no es concentren en unes hores i no es produeixen pics inesperats de demanda.

4.5.2. Avantatges i inconvenients de l'escenari de demanda 2

La introducció de la recàrrega intel·ligent en el sistema de recàrrega provoca en aquest escenari una sèrie de conseqüències que es poden classificar tant en positives com en negatives. Per començar, els resultats de la simulació han demostrat com aquesta tecnologia és capaç de limitar la recàrrega a les hores on el preu de l'energia és més baix, acumulant així el consum dels VE en moments en que la demanda base és menor. Això per la xarxa és molt positiu, ja que al traspassar la demanda de VE de les hores en que hi ha molt de consum a les hores on hi ha menys, provoca que la corba s'aplani i que els pics no siguin tan exagerats.

No obstant, amb la simulació realitzada s'ha demostrat que una de les conseqüències de limitar les hores de recàrrega és que, si no es fa de manera controlada, es poden provocar acumulacions de VE quan després de moltes hores amb un preu d'energia alt ve un preu baix. En aquestes situacions, tots els vehicles que estaven connectats a la xarxa però que no s'han recarregat perquè el preu era car, comencen a rebre energia al mateix moment, creant un pic de potència que sumat a la demanda base pot arribar a valors molt elevats. Aquest fenomen s'ha pogut observar en la gràfica obtinguda per la demanda mitjana de l'any 2030, on a les 22:00, després de 5 hores en que el preu de l'energia era elevat, s'han començat a recarregar tots els vehicles connectats de cop i s'ha produït un creixement de la demanda addicional de 10 GW. Com que a la xarxa no li interessa que es produeixin pics de potència inesperats, aquesta característica de l'escenari suposa un gran inconvenient.

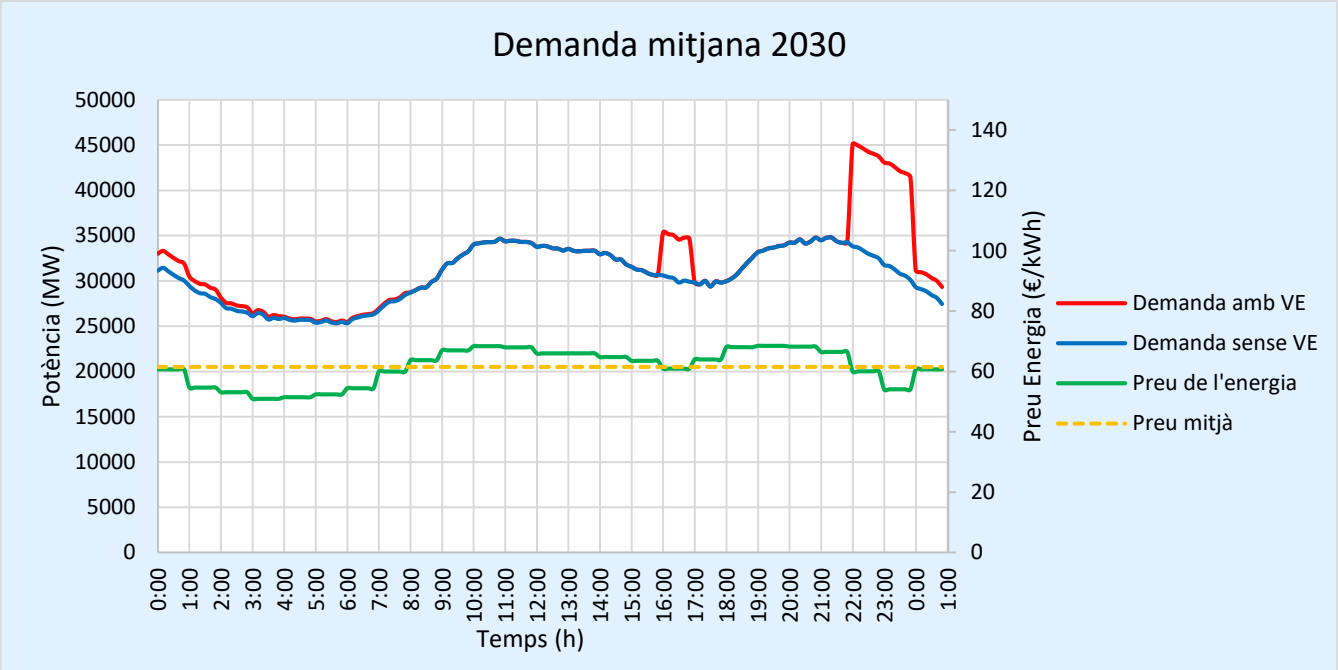

Figura 4.18. Demanda mitjana al 2030 en l'escenari de demanda 2. (Font: Elaboració pròpia)

Pel que fa a la concentració del consum dels VE a la nit, que és el moment en que la demanda és més baixa i on més interessa concentrar els vehicles, es pot observar com la recàrrega intel·ligent no assegura que això passi. Per exemple, en el cas de la demanda màxima per l'any 2030, si que s'acumula una gran quantitat de la demanda entre les 0:00 i les 2:00, afavorint així un aplanament de la corba. Ara bé, en el cas de la demanda mitjana de l'any 2030, com que es produeix un creixement molt important a les 22:00, durant la nit el consum elèctric dels VE és pràcticament nul. Per tant, en aquest escenari no hi ha manera d'assegurar que la recàrrega intel·ligent provocarà que s'aplani la corba augmentant la demanda per la nit.

Tot i això, l'aspecte més negatiu d'aquest escenari és un altre. Com s'ha demostrat anteriorment, el fet de limitar les hores en que els VE es poden recarregar, provocarà que, si no s'aplica cap mesura extra, alguns vehicles no es recarreguin en tot el dia. Amb els perfils de recàrrega actuals [8], un 66,5% de vehicles no es recarregaran en els dies amb una demanda elevada, mentre que pels dies amb una demanda mitjana el percentatge es reduirà fins al 16,75%. Això significa que, si els usuaris no modifiquen la seva rutina i els seus hàbits diaris, pot ser que en el període de temps que deixen el seu vehicle connectat a la xarxa no es recarregui.

De cara als usuaris de VE, haver de sacrificar la seva comoditat per tal de poder recarregar el vehicle pot ser motiu suficient com per decidir no comprar-lo.

Per tant, les conclusions que es poden extreure d'aquest escenari son les següents. La introducció de la recàrrega intel·ligent garanteix que en els hores on el consum elèctric sigui elevat no s'incrementarà per la recàrrega dels VE, ja que aquesta es durà a terme en hores amb poca demanda. Ara bé, si només s'aplica aquesta mesura i no s'ofereixen altres alternatives, s'ha comprovat com una gran part dels usuaris de VE es veuran afectats i amb el seu horari habitual el vehicle no es recarregarà. Per aquests motius, aquest escenari es considera poc viable.

4.5.3. Avantatges i inconvenients de l'escenari de demanda 3

L'escenari de demanda 3 proposa una solució al problema presentat en l'escenari anterior, i és que en l'escenari present s'assegura que tots els vehicles recarreguen els seus 6 kWh diaris. Com s'ha explicat anteriorment, això s'aconsegueix a partir de tarifes que beneficiarien als usuaris que recarreguessin el seu vehicle durant la nit, cosa que provocaria que una gran part dels usuaris que abans no podien recarregar el vehicle es traslladés a les hores nocturnes. Com que no tothom podria modificar la seva rutina i passar a recarregar el seu vehicle a la nit, s'ha tingut en compte que un 25% de la gent que anteriorment no podia recarregar el vehicle seguirà connectant-lo a la mateixa hora i es permetrà que rebin energia de la xarxa encara que el preu de l'energia sigui elevat.

Això suposa diversos aspectes molt positius per aquest escenari; per començar s'assegura que en un sistema basat en la recarrega intel·ligent, tots els vehicles puguin ser recarregats. Per tant, s'està podent compaginar la comoditat de l'usuari amb un sistema de recàrrega que es basa en els preus de l'energia i, com a conseqüència, garanteix que la recàrrega no es produeix en moments on la demanda és molt elevada. Per altra banda, tant els usuaris que s'hauran de desplaçar cap a la nit com els que podran seguir amb els seus horaris de recàrrega habituals es veuran beneficiats, ja que els primers es veuran recompensats econòmicament amb les tarifes dissenyades i els segons podran seguir utilitzant el VE tal com ho estan fent ara mateix.

Un altre avantatge d'aquest escenari és que garanteix que els pics de potència no augmentin de manera excessiva a causa dels VE. Aquest creixement es produirà sobretot a finals del pic de la tarda i durant les hores nocturnes, produint així un aplanament de la corba que és molt positiu per la xarxa elèctrica.

No obstant, perquè es puguin donar totes aquestes millores per la xarxa, faran falta que es compleixin una sèrie de requisits que a dia d'avui no es poden assegurar. Per començar, de la mateixa forma que en l'escenari anterior, la recàrrega intel·ligent és una tecnologia innovadora i prometedora, però no es pot confirmar que funcioni a nivell de mercat en un futur proper. Un fet similar passa amb les tarifes que serien necessàries per motivar als usuaris a recarregar el VE durant la nit; les tarifes depenen de la

viabilitat i efectivitat de la recàrrega intel·ligent, per tant hauria de passar un temps des de la implementació d'aquesta fins a la creació de les tarifes. Aleshores, a dia d'avui es fa difícil assegurar que d'aquí a pocs anys serà possible que les companyies hagin creat i posin a disposició de la població les tarifes en qüestió.

Per resumir, encara que pels motius mencionats es pugui garantir la viabilitat d'implementar aquest escenari en un futur proper, a nivell de xarxa ha quedat demostrat com es pot assegurar un aplanament de la corba de demanda a través de combinar la recàrrega intel·ligent amb unes tarifes que beneficiïn a la gent que recarregui el VE durant la nit. Això, juntament amb la poca probabilitat d'aparició de pics de potència inesperats fan d'aquest escenari una possibilitat molt estable i beneficiosa per la xarxa elèctrica.

4.5.4. Comparació entre els escenaris de demanda

El primer aspecte a comparar entre els tres escenaris son els valors de la demanda que s'han obtingut amb les simulacions. Les corbes de demanda resultants serveixen per exemplificar com afectaran a la corba de demanda base els VE segons els diferents escenaris. Per tant, es pot decidir quin dels sistemes de recàrrega representats obté uns resultats òptims per la xarxa elèctrica. Per facilitar aquesta tasca, s'ha realitzat una taula on es resumeixen els valors més importants de les gràfiques mostrades anteriorment.

Pics de potència dels tres escenaris (GW)			
	Any	**Demanda màxima**	**Demanda mitjana**
Escenari Futur 1	2025	42,38	34,37
	2030	45,6	37,41
Escenari Futur 2	2025	41,97	34,79
	2030	42,97	45,08
Escenari Futur 3	2025	42,05	34,05
	2030	43,96	38,72

Taula 4.10. Comparació dels pics de potència dels tres escenaris de demanda.

Com es pot observar en la taula, el valor registrat més elevat dels tres escenaris es dona en el cas dels dies amb demanda màxima pel 2030 de l'escenari 1; això suposa un inconvenient per aquest escenari a tenir en compte, ja que en els altres escenaris, pels dies amb una demanda elevada, els valors dels pics queden per sota.

Un aspecte important a valorar és en quin escenari es produeix el pic més elevat pels dies amb una demanda mitjana; en la taula es veu com, amb una amplia diferencia, això es produeix en l'escenari de demanda 2, arribant a un valor de 45 GW. El fet de tenir pics elevats en els dies amb una demanda mitjana és més perjudicial per la xarxa que tenir-los en els dies amb demanda màxima, ja que això significa que serà habitual que durant el dia la demanda augmenti de forma contundent en algunes hores. Per posar en context els valors mostrats, que en l'escenari 2 s'arribi sense problemes a pics de potència de 45 GW significa que al 2030 es superarà de forma gairebé diària el valor de pic més alt registrat a dia d'avui, que és de 44,88 GW. A més a més, si es compara amb els altres escenaris, es veu clarament com en els dies amb demanda mitjana els altres dos ofereixen uns resultats molt més positius per la xarxa, arribant a una diferència d'uns 7 GW.

Per tant, segons els pics de potència obtinguts amb les simulacions, es pot concloure que l'escenari de demanda 3 és l'òptim pel bon funcionament de la xarxa. És l'escenari més equilibrat dels tres; per una part, en els dies amb una demanda màxima els pics obtinguts son més alts que els dels dies amb una demanda mitjana. Això sembla una característica lògica, però com s'ha vist, la recàrrega intel·ligent sense control provoca que en l'escenari 2 sigui a l'inrevés. Per altra banda, si es compara l'escenari 3 directament amb l'1, es pot observar com els valors dels pics son, en general, més positius els del tercer escenari. Encara que pels dies amb demanda màxima del 2030 en l'escenari 3 s'assoleixi un pic major que el de l'escenari 1, per la resta de pics surt beneficiat el tercer escenari. Sobretot si es compara el pic dels dies amb demanda màxima del 2030, on l'escenari futur 1 supera el de l'escenari 3 per 1,7 GW.

Tot i que segons els valors dels pics de potència, l'escenari 3 sigui el que ofereix millors resultats, no significa que aquest escenari sigui el més viable dels tres. Com s'ha comentat anteriorment, cada escenari te els seus avantatges i inconvenients, que van més enllà dels valors de demanda que infligirien a la xarxa. Aquests pros i contres poden tenir una rellevància prou important com per escollir un escenari que no sigui el 3. Per aquests motius, es compararà l'escenari futur 3 amb els altres dos, tenint en compte els avantatges i desavantatges de cadascun.

- **Comparació de l'escenari 3 amb l'escenari 1**

El fet més diferencial entre els dos escenaris en qüestió és el gran control que s'aplica en el sistema de recàrrega de l'escenari 3 contraposat amb la total llibertat dels usuaris per poder recarregar el VE quan els hi sigui més convenient de l'escenari 1. Aquesta llibertat ve donada per un sistema de recàrrega continuista i exactament amb la mateixa funcionalitat que l'actual; per tant, l'escenari futur 1 suposa rebutjar la investigació tecnològica sobre la recàrrega intel·ligent que s'està duent a terme en els últims anys i apostar per un sistema que en aquests moments és l'únic dels tres que a dia d'avui es pot assegurar que es podrà aplicar en un marge de temps de 10 anys.

No obstant, els beneficis de cara a la xarxa que implica l'escenari futur 3 son molt superiors als de l'1. Per posar un exemple, la recàrrega intel·ligent combinada amb les tarifes adequades han demostrat poder aplanar la corba de demanda, que és un dels principals reptes que suposa la transició dels vehicles convencionals als vehicles elèctrics. A continuació es poden veure dues gràfiques on es veuen comparades tant la demanda màxima com la demanda mitjana dels dos escenaris; s'ha escollit representar les dades de l'any 2030.

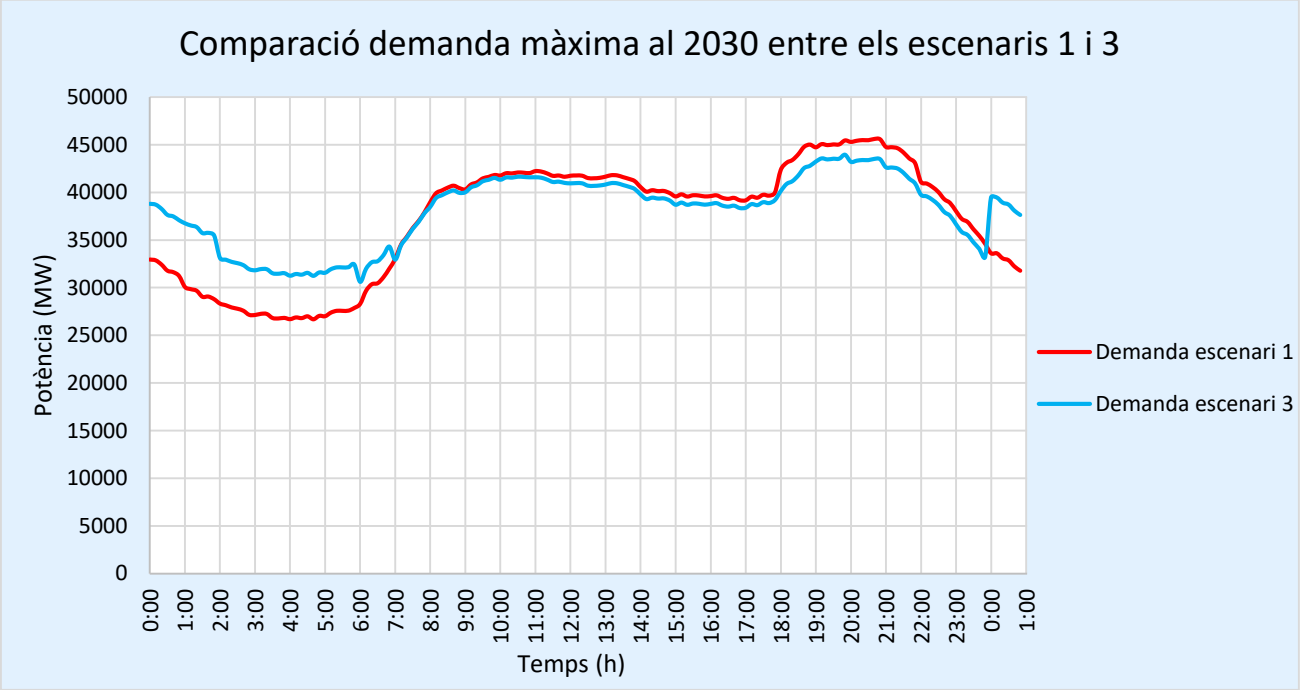

Figura 4.24. Comparació de la demanda màxima al 2030 entre els escenaris 1 i 3. (Font: Elaboració pròpia)

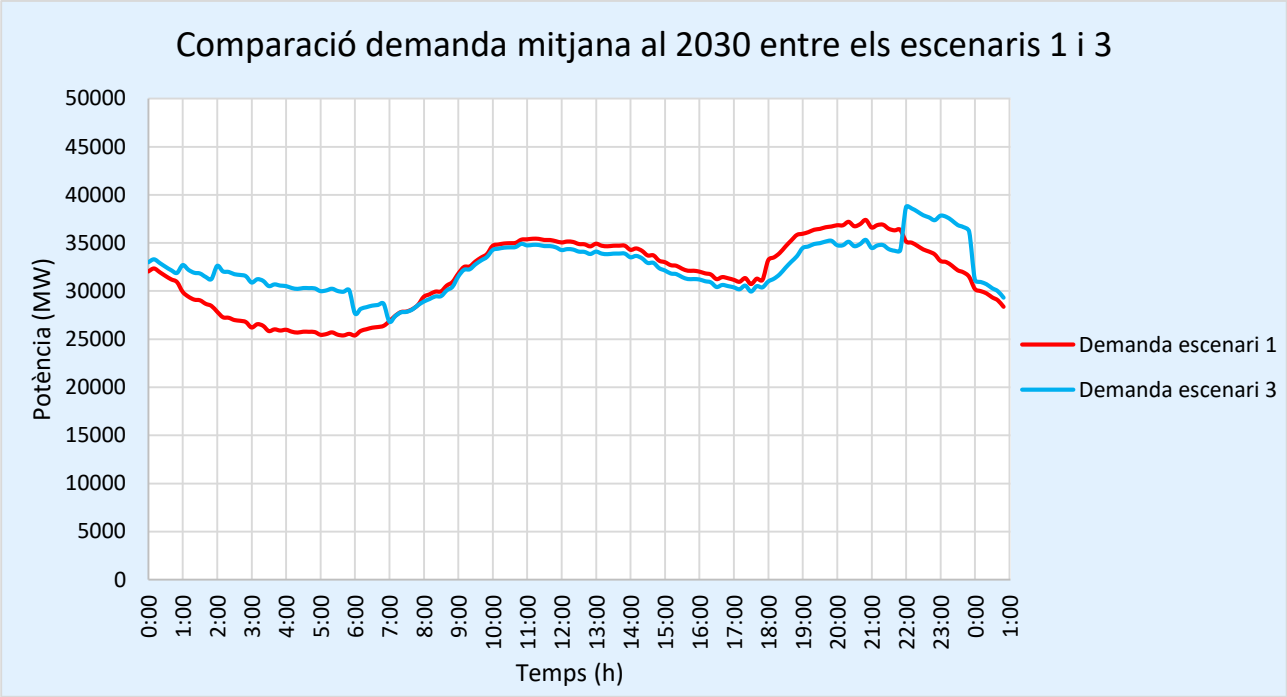

Figura 4.25. Comparació de la demanda mitjana al 2030 entre els escenaris 1 i 3. (Font: Elaboració pròpia)

Observant les gràfiques queda clar com en l'escenari 3 el sistema de recàrrega intel·ligent aconsegueix l'aplanament de la corba. Sobretot destaca la diferència del consum en les hores nocturnes, ja que en l'escenari 3 aquest és molt superior degut a les tarifes que beneficien la recarrega en aquestes hores. L'únic aspecte en el que l'escenari 3 surt perjudicat és en la creació d'acumulacions de VE en les hores en que el preu de l'energia és baix, ja que això pot provocar l'augment de la demanda de forma sobtada, tal com passa en la corba de demanda mitjana.

Havent revisat i comparat les diferents característiques entre l'escenari futur 1 i 3, es pot afirmar que el que ofereix més avantatges i millors resultats és el tercer.

- **Comparació de l'escenari 3 amb l'escenari 2**

Aquests dos escenaris són molt més similars entre si que els escenaris comparats en l'apartat anterior. Per començar, en els dos escenaris el sistema de recàrrega està basat en la tecnologia de la recàrrega intel·ligent. La gran diferència en el sistema de recàrrega és que les tarifes que s'apliquen en el 3 asseguren que tots els VE recarreguin els seus 6 kWh diaris i, a més a més, que aquesta recàrrega es produeixi durant la nit, fet molt beneficiós per la xarxa. Que en l'escenari 2 no es recarreguin tots els VE és un inconvenient molt important i es podria considerar com a inviable. L'escenari 3 està dissenyat per millorar l'escenari 2 i garantir que es soluciona aquest problema; per tant, en quant a sistema de recàrrega es refereix, l'escenari 3 és clarament superior.

A continuació, igual que s'ha fet en l'apartat anterior, es mostren les gràfiques on es comparen la demanda màxima i mitjana dels dos escenaris.

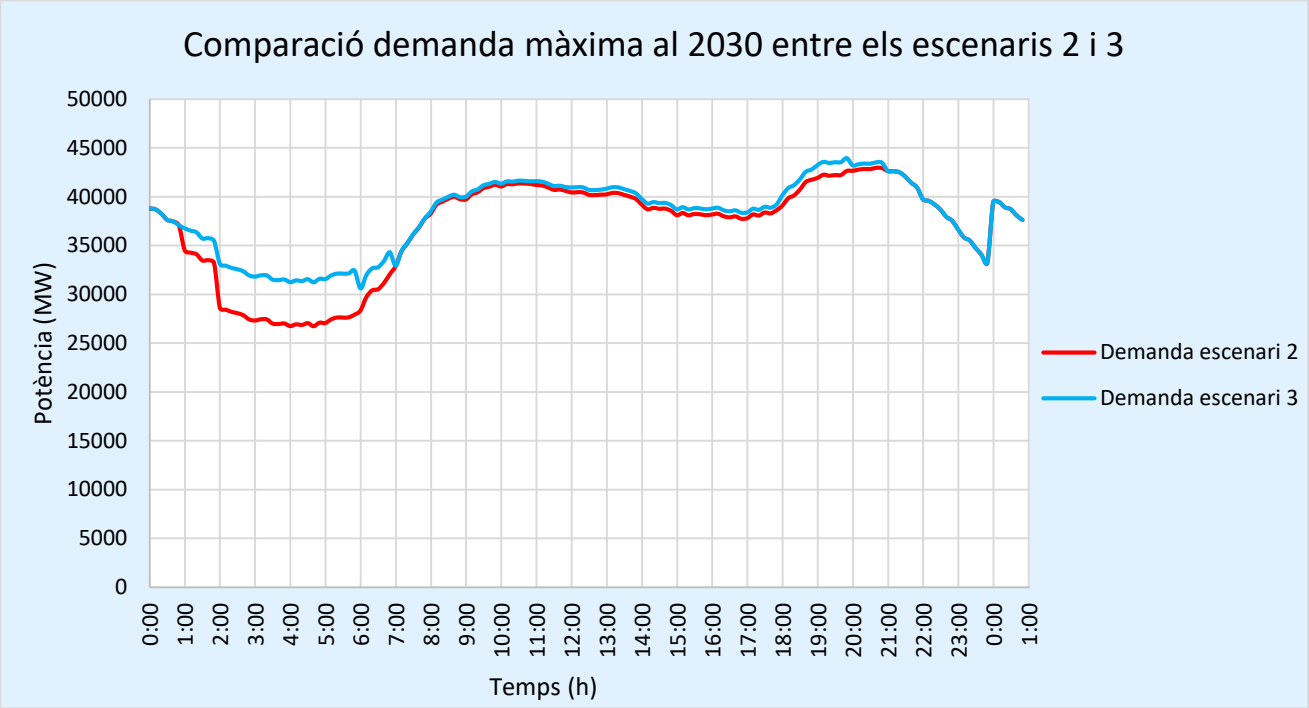

Figura 4.26. Comparació de la demanda màxima al 2030 entre els escenaris 2 i 3. (Font: Elaboració pròpia)

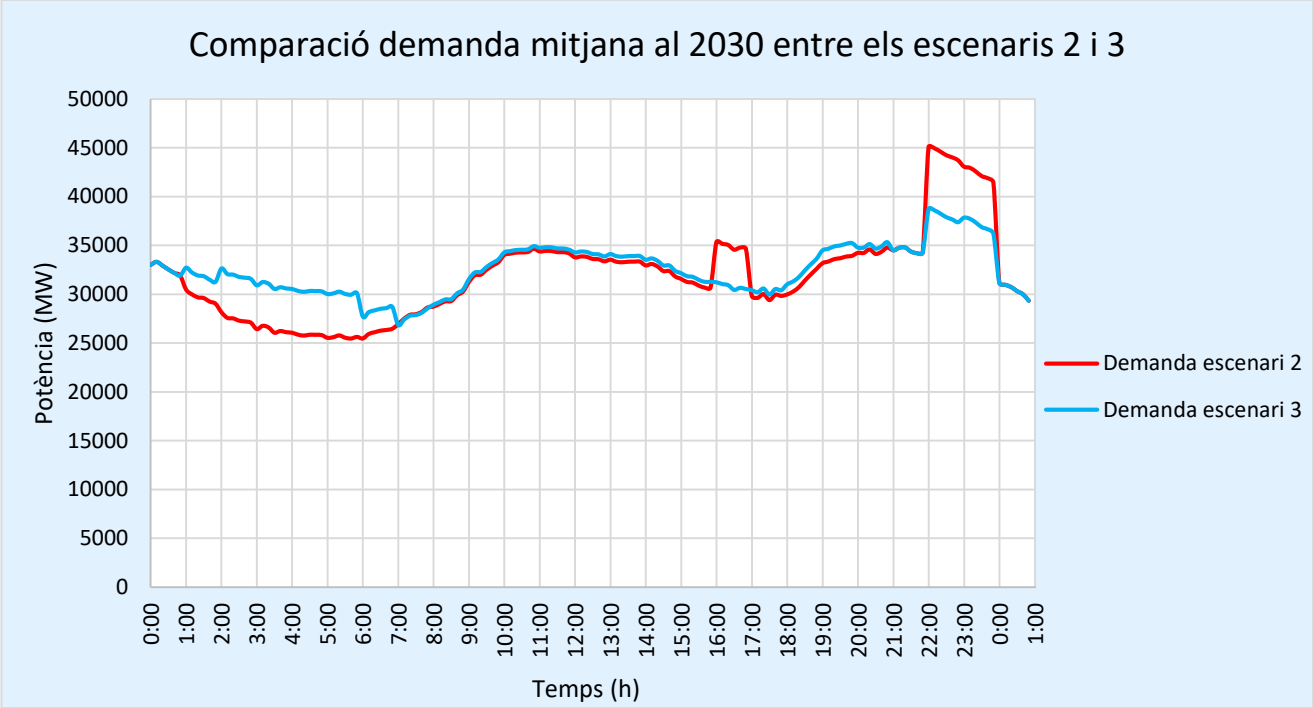

Figura 4.27. Comparació de la demanda mitjana al 2030 entre els escenaris 2 i 3. (Font: Elaboració pròpia)

Per començar, en les dues gràfiques s'observa com la demanda elèctrica per la nit és més alta en l'escenari 3. Encara que això pugui semblar un desavantatge, s'ha de tenir en compte que en l'escenari 2 no s'estan recarregant tots els vehicles, per tant el consum diari dels VE és menor que en l'escenari 3. Tot i això, el sistema de recàrrega aplicat a l'escenari 3 és tan eficaç que aconsegueix obtenir una corba de potència pels dies amb demanda màxima gairebé idèntica a la de l'escenari 2 durant les hores del dia.

En quant a la gràfica de la demanda mitjana, es pot veure de forma clara com les tarifes per traslladar la recàrrega de VE a la nit aconsegueixen que la corba del tercer escenari es mantingui molt més estable durant el dia, reduint de forma efectiva els pics de potència que es produeixen en l'escenari 2.

Per tots aquests motius, s'ha considerat que l'escenari de demanda 3 ofereix moltes més avantatges per la xarxa elèctrica. Per tant, a partir d'aquest moment de l'estudi, per realitzar noves simulacions es tindrà en compte el sistema de recàrrega aplicat en l'escenari 3.

5. Subministrament d'energia

El subministrament de l'energia elèctrica a l'Estat Espanyol està format per un conjunt de tecnologies que son capaces de generar energia elèctrica i injectar-la a la xarxa; el que diferencia a cada tecnologia és la manera en que és capaç de generar electricitat, fet que dona pas a poder agrupar-les segons diferents criteris, com podrien ser si son renovables o no, les emissions de CO_2 que generen a l'atmosfera, el tipus de combustibles fòssils que utilitzen...

S'entén com a mix energètic a la combinació de les diferents fonts d'energia que cobreixen el subministrament elèctric d'un país. Com que cada font d'energia és diferent, l'electricitat que circula per la xarxa és el conjunt de l'electricitat generada per cadascuna d'aquestes centrals. Per tant, un cop circulant per la xarxa, és molt difícil determinar l'origen de l'electricitat que s'està subministrant a una càrrega. Tot i això, Red Eléctrica ofereix en la seva web, la base de dades del mix energètic que ha generat l'energia que s'ha consumit per cada hora a Espanya; aquestes dades són molt precises, ja que es poden veure tant en unitats d'energia (GWh) com en percentatge. Amb aquest mix energètic horari, es poden fer una sèrie d'anàlisis sobre quin és l'origen de l'electricitat segons els diferents moments del dia, quines centrals son capaces de subministrar l'energia quan la demanda augmenta, quanta electricitat poden injectar a xarxa les centrals en relació amb la seva potència instal·lada...

Aquest conjunt d'anàlisis sobre el subministrament energètic serà, de forma resumida, l'objectiu d'estudi d'aquest apartat. S'estudiarà quin és el mix energètic actual a Espanya i quin és el seu comportament segons les diferents situacions de demanda possibles. Les conclusions extretes es relacionaran amb les demandes generades anteriorment a partir de les simulacions del sistema de recàrrega de l'escenari futur 3, que ha sigut escollit com l'escenari òptim per la xarxa. Es discutiran els efectes que tindria el mix actual en un futur amb la demanda simulada, des del punt de vista mediambiental i econòmic, i es buscaran possibles alternatives en cas que els efectes fossin negatius.

Per començar, es farà una breu explicació sobre quines tecnologies formen el mix energètic actual a Espanya i quines son les seves principals característiques.

5.1. Mix de generació elèctrica actual a Espanya

Les tecnologies del mix de generació elèctrica a Espanya es poden classificar segons diferents criteris, però el més habitual és el de renovables i no renovables. Com que és una classificació que es tindrà en compte en aquest estudi, s'ha utilitzat en aquest apartat.

5.1.1. Generació renovable

La generació renovable és la que obté energia a partir de recursos naturals i inesgotables. Entre els més habituals es troben el vent, el sol, l'aigua i la biomassa animal o vegetal; per tant, no utilitza combustibles fòssils. Es considera una font d'energia inesgotable perquè utilitza recursos naturals que es poden renovar sense límits. El seu ús suposa una gran sèrie d'avantatges; els més importants son els seus beneficis cap al medi ambient, ja que no generen residus contaminants i ajuden a combatre el canvi climàtic reduint les emissions de CO_2 cap a l'atmosfera. Un altre aspecte positiu és que són un recurs natural gratuït, ja que tothom pot accedir a les fonts d'energia com el vent, el sol... A més a més, ajuden a potenciar l'autoconsum, ja que faciliten la instal·lació de dispositius de generació d'energia en els domicilis particulars com poden ser plaques fotovoltaiques o petits aerogeneradors.

Encara que la generació a partir de fonts renovables suposa molts avantatges, de cara a la xarxa és un sistema de generació més inestable, ja que no es pot provocar l'activació de les fonts d'energia renovable. Per posar un exemple, si en algun moment del dia no bufa el vent, els aerogeneradors no produiran electricitat i la demanda l'hauran de suplir les altres centrals que estiguin disponibles.

Tot seguit, s'explicaran els tipus de tecnologia renovable que hi ha a Espanya i la seva potència instal·lada [7].

- **Generació eòlica**

Consisteix en aprofitar la velocitat del vent per produir energia elèctrica; això es fa a través dels aerogeneradors, que son molins que poden transformar l'energia mecànica de les aspes al girar en electricitat. A Espanya actualment hi han 25799 MW de potència instal·lada.

- **Generació hidràulica**

Aquesta tecnologia és capaç de transformar la força de l'aigua en moviment en electricitat. Normalment es produeix en preses i el funcionament consisteix en guiar l'aigua perquè faci girar les rodes d'un molí o una turbina i aquesta generi electricitat a partir del moviment rotatori. Actualment hi ha 17085 MW de potència instal·lada a Espanya.

- **Generació solar fotovoltaica**

L'energia solar fotovoltaica és la que s'obté a partir de transformar la llum solar en electricitat a partir dels panells solar. Aquests es basen en l'efecte fotoelèctric per poder fer la conversió, que consisteix

en utilitzar materials que poden absorbir fotons i alliberar electrons, generant d'aquesta manera una corrent elèctrica. A Espanya hi ha, a dia d'avui, 8913 MW instal·lats.

- **Generació solar tèrmica**

De forma similar a la generació fotovoltaica, la generació solar tèrmica també utilitza la radiació solar per produir electricitat. Per fer la conversió, aquesta tecnologia calenta un fluid a partir de la llum solar; a mesura que augmenta la temperatura del fluid, es va generant vapor que serveix per accionar una turbina. Finalment es converteix el moviment rotatori de la turbina en electricitat. Actualment hi ha 2304 MW instal·lats a nivell nacional.

- **Tèrmica renovable**

Aquesta categoria inclou totes les centrals que poden produir electricitat a partir de la calor. Entre les més destacades es troba l'energia geotèrmica, que aprofita la calor del terra com a font d'energia. El total de potència instal·lada és de 1076 MW.

5.1.2. Generació no renovable

Les energies no renovables, o energies convencionals, son les fonts d'energia que tenen una quantitat limitada, la qual quan es consumeixi, no es podrà substituir. Resumidament, es poden dividir en dues categories, que son els combustibles nuclears i els combustibles fòssils. Els nucel·lars estan formats bàsicament per l'urani i el plutoni, i en general els elements químics que poden funcionar en reactors nuclears. Per tal de produir electricitat, es genera calor a partir de la fissió dels materials.

Per altra banda, els combustibles fòssils provenen de la biomassa generada fa milions d'anys. Aquesta, sota unes condicions de temperatura i pressió adequades, es va convertir en substancies que tenen propietats energètiques. Entre les més habituals destaquen el carbó, el petroli i el gas natural. Per produir electricitat, en les centrals es cremen aquests combustibles i amb la calor s'obté vapor d'aigua, que es dirigeix fins a activar una turbina elèctrica.

Entre els avantatges que suposa la generació no renovable es pot destacar la facilitat d'extracció dels seus combustibles, el gran coneixement sobre les tecnologies i el seu funcionament, ja que es porten utilitzant durant moltes dècades. També és un sistema de generació que pot assegurar la producció d'electricitat en qualsevol moment del dia, al contrari que la generació renovable. Tot i això, s'han de

tenir en compte els problemes que implica l'ús d'aquestes tecnologies. El fet de basar-se en recursos naturals finits implica que en algun moment s'hauran de deixar d'utilitzar, fent que sigui indispensable aconseguir una transició cap a la generació renovable. La generació basada en combustibles fòssils comporta la emissió de gasos contaminants a l'atmosfera, accentuant així el canvi climàtic.

A continuació, s'explicaran els tipus de tecnologia no renovable que hi ha a Espanya i la seva potència instal·lada [7].

- **Nuclear**

Com s'ha explicat anteriorment, l'energia nuclear es basa en aprofitar l'energia que es troba dins el nucli d'un àtom. Les centrals nuclears utilitzen la gran quantitat d'energia calorífica que es genera en la reacció de fissió nuclear per produir electricitat. Per fer-ho, s'utilitza la calor per evaporar aigua i accionar una turbina. A espanya hi ha instal·lats 7117 MW de potència.

- **Fuel/ gas**

Aquestes centrals tèrmiques utilitzen com a combustible el fuel o el gas. El seu funcionament és similar al de les centrals nuclears, ja que al cremar el combustible, l'aigua s'evapora i acciona una turbina. Actualment hi ha 2447 MW de potència instal·lada.

- **Carbó**

Les centrals elèctriques de carbó funcionen de la mateixa manera que les de fuel/gas, però en aquest cas utilitzant com a combustible el carbó. A dia d'avui hi ha a Espanya 9683 MW de potència instal·lada.

- **Cicle combinat**

Les centrals de cicle combinat utilitzen dos cicles termodinàmics en un mateix sistema per produir electricitat; un dels dos cicles utilitza com a fluid de treball un gas produït a partir d'una combustió i l'altre el vapor d'aigua. Per tant, el sistema consta d'una turbina de vapor i una turbina de gas. El combustible que fan servir aquestes centrals pot ser de diferents tipus, entre els més habituals es troben el gas natural, el carbó i el gasoil. Aquestes centrals aconsegueixen un rendiment molt elevat a

base d'aprofitar la calor generada en la combustió de la turbina de gas, que es transporta a un element recuperador de calor i s'utilitza per accionar una turbina de vapor. Aquestes dues turbines estan connectades a un alternador comú que transforma l'energia mecànica en energia elèctrica. Actualment, la potència instal·lada de cicle combinat a Espanya és de 26284 MW.

- **Cogeneració**

Les centrals de cogeneració produeixen al mateix temps calor i electricitat a partir d'una única font primària; això fa que sigui un procés altament eficient. De manera resumida, la cogeneració aprofita la calor que normalment s'allibera en el procés de generació d'electricitat a partir de la crema de combustibles fòssils. D'aquesta manera, s'aconsegueix augmentar l'eficiència d'una central elèctrica convencional del 40% fins al 90%. A Espanya hi ha instal·lats 5677 MW de potència.

Per tenir una idea més clara sobre com està repartida la potència instal·lada entre les diferents tecnologies de generació, s'han creat dues gràfiques on es pot veure la potència instal·lada per cada tecnologia i segons si son renovables o no renovables.

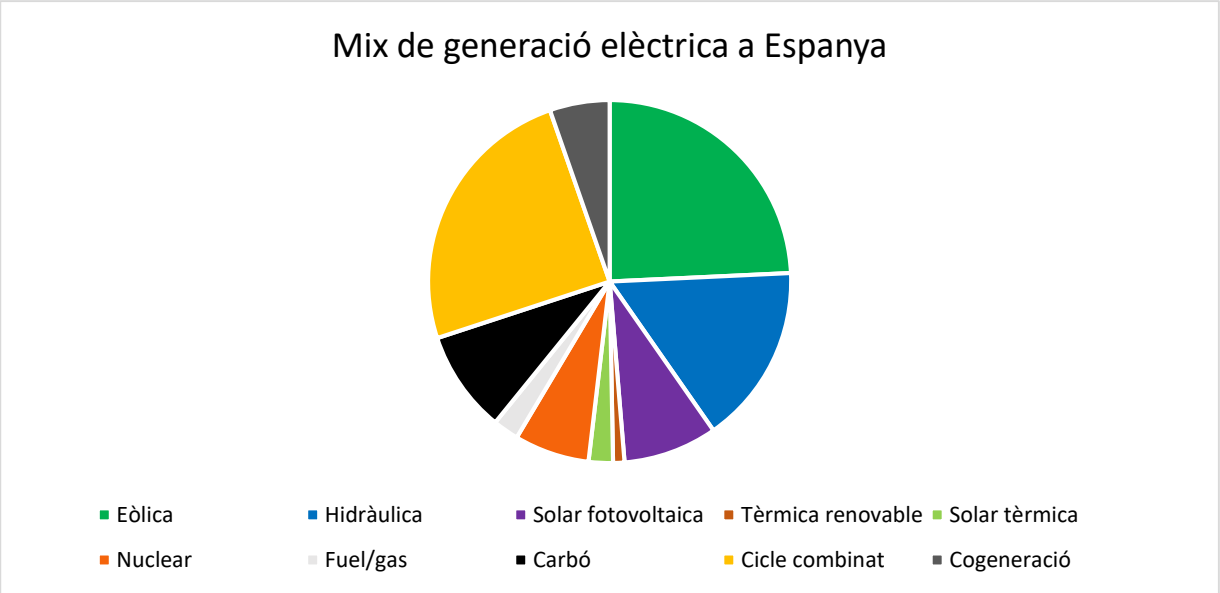

Figura 5.1. Mix de generació elèctrica al 2019 a Espanya segons tecnologies. (Font: Elaboració pròpia)

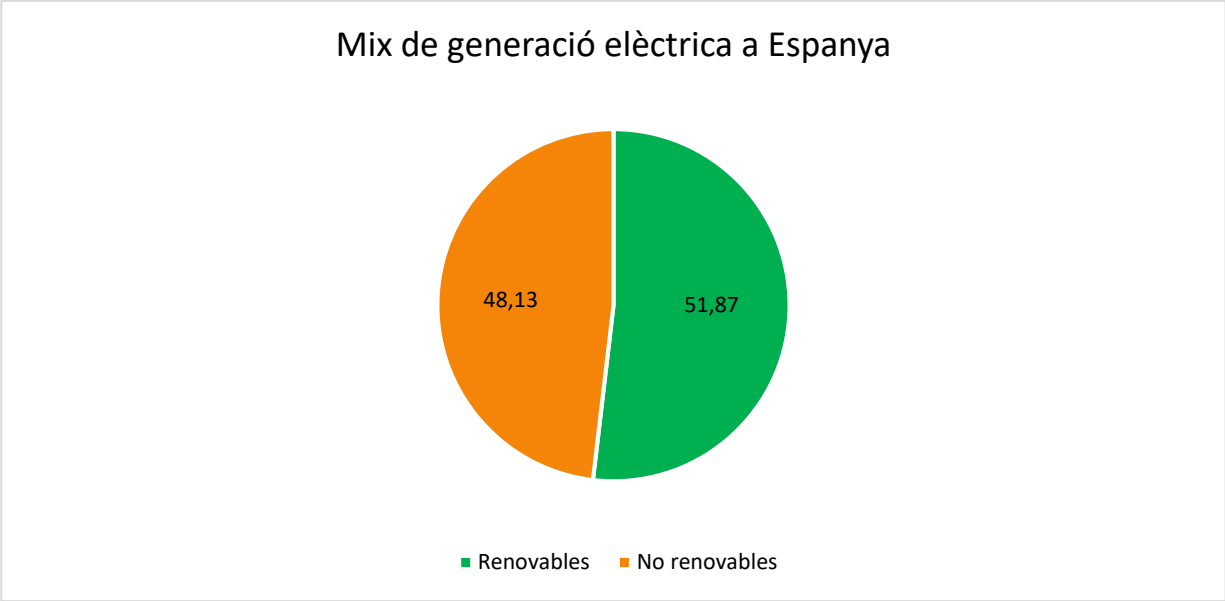

Figura 5.2. Mix de generació elèctrica al 2019 a Espanya segons renovables o no renovables. (Font: Elaboració pròpia)

El 2019 va ser el primer any en que la potència instal·lada de les energies renovables va superar la de les no renovables [7].

5.2. Comportament del mix energètic actual segons la demanda

Un cop explicat el conjunt de tecnologies que formen el mix energètic a Espanya, en aquest apartat s'analitzarà com és el comportament d'aquestes tecnologies depenent de la demanda que hi hagi en un moment determinat. Com és lògic, les centrals de generació no aporten el mateix percentatge al mix durant tot el dia; aquest percentatge va variant depenent de factors molt diferents, com poden ser el valor de la demanda, les hores del dia, els factors meteorològics, els errors en la previsió...

L'estudi servirà per extreure un patró de comportament i poder-lo aplicar a la demanda elèctrica obtinguda en les simulacions de l'escenari futur 3, veient quines conseqüències tindria la combinació del mix actual amb el consum futur i quines possibles variants es podrien plantejar.

Per començar, s'ha obtingut el mix de generació amb intervals de temps horaris per un dia amb una demanda mitjana. S'ha utilitzat el mateix dia que ha servit per crear la demanda base dels dies amb un consum mitjà en els escenaris futurs, que és el 26/01/2019. Totes les dades han estat extretes de la base de dades de la web de Red Eléctrica. El mix en qüestió serveix per veure quanta energia aporta habitualment cada tipus de central i com varia aquesta aportació durant el dia.

Per tal d'assegurar que les dades obtingudes s'adeqüen a la realitat, s'han comparat amb altres dies amb una demanda similar i s'ha comprovat que els percentatges d'aportació de cada tecnologia són similars. Un cop comprovat, s'ha establert el dia 26 de gener del 2019 com a exemple per representar el mix d'un dia amb una demanda mitjana.

Tot seguit, es mostren les gràfiques realitzades sobre el mix energètic del dia en qüestió, tant en aportació energètica (MWh) com en percentatge.

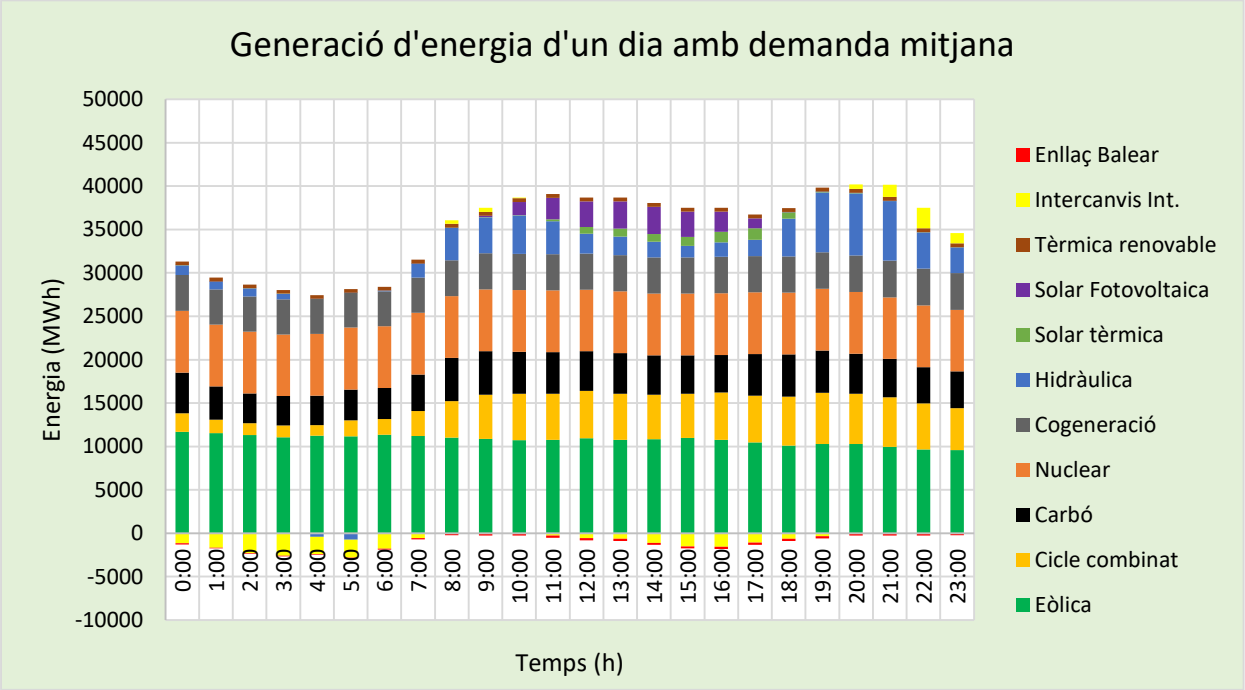

Figura 5.3. Mix energètic d'un dia amb demanda mitjana per unitats energètiques (26/01/2019) . (Font: Elaboració pròpia)

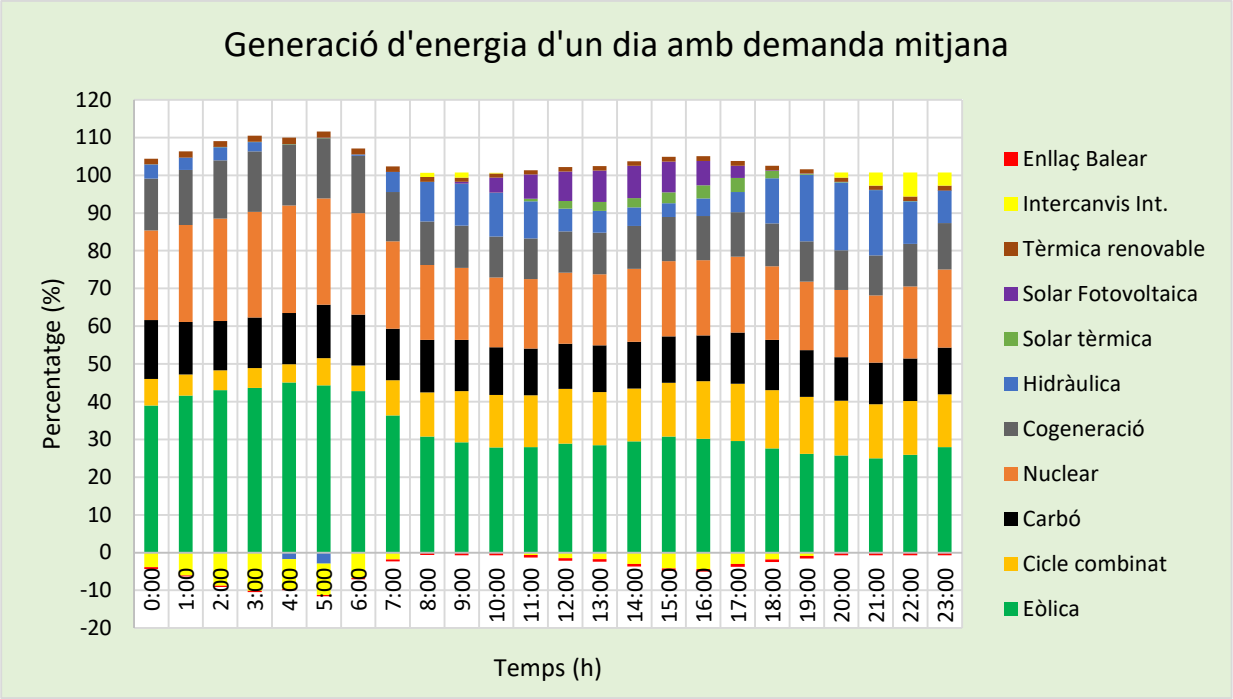

Figura 5.4. Mix energètic d'un dia amb demanda mitjana per percentatges (26/01/2019) . (Font: Elaboració pròpia)

Analitzant les gràfiques es poden extreure vaires conclusions; per començar, l'energia eòlica és habitualment la que més aporta al mix espanyol en els dies amb una demanda mitjana, arribant a valors del 30% durant el dia i augmentant fins al 40% durant la nit. Això té sentit, ja que és la segona tecnologia amb una potència instal·lada més elevada, just per sota del cicle combinat. Encara que el percentatge d'aportació de l'eòlica s'elevi per la nit, a nivells energètics es manté amb uns valors molt similars als del dia, del voltant de 10 GWh per hora, però com que per la nit la demanda disminueix, el percentatge de l'eòlica creix.

Un efecte similar passa amb l'energia nuclear; es pot observar com és la segona font d'energia que més aporta al mix, i de manera molt constant a nivells energètics durant tot el dia, aportant uns 7 GWh de mitjana per hora. Per tant, com que la demanda es disminueix per la nit, el percentatge d'aportació de la nuclear augmenta.

Les dues altres fonts de generació que aporten un valor energètic gairebé constant durant tot el dia son les centrals de carbó i les de cogeneració. Les dues entreguen un valor energètic quasi idèntic a la xarxa, d'uns 4 GWh per hora.

Pel que fa al cicle combinat, es pot observar com en els dies amb una demanda mitjana, la seva aportació es redueix considerablement per la nit, passant d'aportar 5 GWh per hora a aportar-ne 1,5. Que el cicle combinat sigui una tecnologia que habitualment aporti tant poc al mix espanyol (del voltant del 10% per cada hora) quan és el tipus de central amb una potència instal·lada més elevada, és un fet que crida l'atenció. A causà d'això, s'analitzarà més endavant quin és el seu comportament en els dies en que la demanda és més elevada.

La resta de tecnologies renovables té molt poca participació en el mix espanyol, sobretot durant la nit, on gairebé no injecten energia. Durant el dia, la hidràulica destaca en algunes hores, arribant a aportar fins al 18% de l'energia total, però la seva generació és força irregular. El mateix passa amb la resta de renovables; la solar fotovoltaica arriba a aportar fins al 8% en algunes hores, però durant la major part del dia gairebé no injecta energia. La solar tèrmica es comporta de la mateixa manera però a nivells inferiors, arribant a aportar com a màxim el 4% del total de la demanda. Per acabar, la tèrmica renovable manté una generació molt constant durant tot el dia, d'entre 0,4 i 0,45 GWh per cada hora.

És important destacar dos aspectes més sobre les gràfiques obtingudes. El primer és que apareixen dos categories que no s'han explicat anteriorment, que son els intercanvis internacionals i l'enllaç balear. Aquestes fan referència als balanços energètics entre Espanya i els altres països, i entre la península i les illes balears. Per tant, els valors del balanç poden ser tant positius com negatius. Si a Espanya, en una hora en concret, s'exporta més energia de la que s'importa, el balanç tindrà un valor negatiu i a la gràfica es mostrarà d'aquesta manera, fent així que no augmenti el valor del pic de la demanda. Si per altra banda l'energia importada és superior a la exportada, significa que Espanya està rebent una energia que no ha generat en el seu territori, per tant el balanç és positiu i s'afegeix al mix de la demanda. El balanç entre la península i les illes balears funciona de la mateixa manera.

L'altre aspecte a comentar és que, com s'observa en la gràfica de percentatges, hi ha hores en que la barra del percentatge s'eleva per sobre del 100. Això passa quan el balanç d'intercanvi internacional és negatiu, per tant s'està exportant més energia de la que s'importa. Com que s'està generant més energia de la que requereix la demanda, el percentatge total arriba a valors més elevats de 100. No obstant, en les hores que passa això, es veu com hi ha un percentatge negatiu referent als intercanvis internacionals, per tant per cada hora es pot afirmar que el sumatori dels percentatges de totes les tecnologies és 100.

Un cop analitzat el mix energètic per un dia amb una demanda mitjana, s'estudiarà quin és el comportament del mix quan el consum augmenta. Per fer-ho, s'han analitzat els dies del 2019 que van tenir una demanda més elevada i s'ha comparat el seu mix de generació. El dia del 2019 amb una demanda més alta durant la nit va ser el 24 de juliol, arribant a un valor mínim de 26002 MW. El fet de comprovar com varia el mix quan la demanda elèctrica augmenta per la nit, és molt interessant per aquest estudi perquè, segons l'escenari futur 3, la demanda dels VE suposarà un creixement

considerable de la demanda nocturna. Per tal d'assegurar que el mix del dia 24 de juliol correspon amb el comportament habitual de les centrals de generació quan la demanda és elevada, s'ha comprovat que el mix d'altres dies amb un consum similar sigui semblant.

Tot seguit es mostren les gràfiques corresponents al mix de generació del dia 24 de juliol del 2019, és a dir, d'un dia amb una demanda elèctrica elevada.

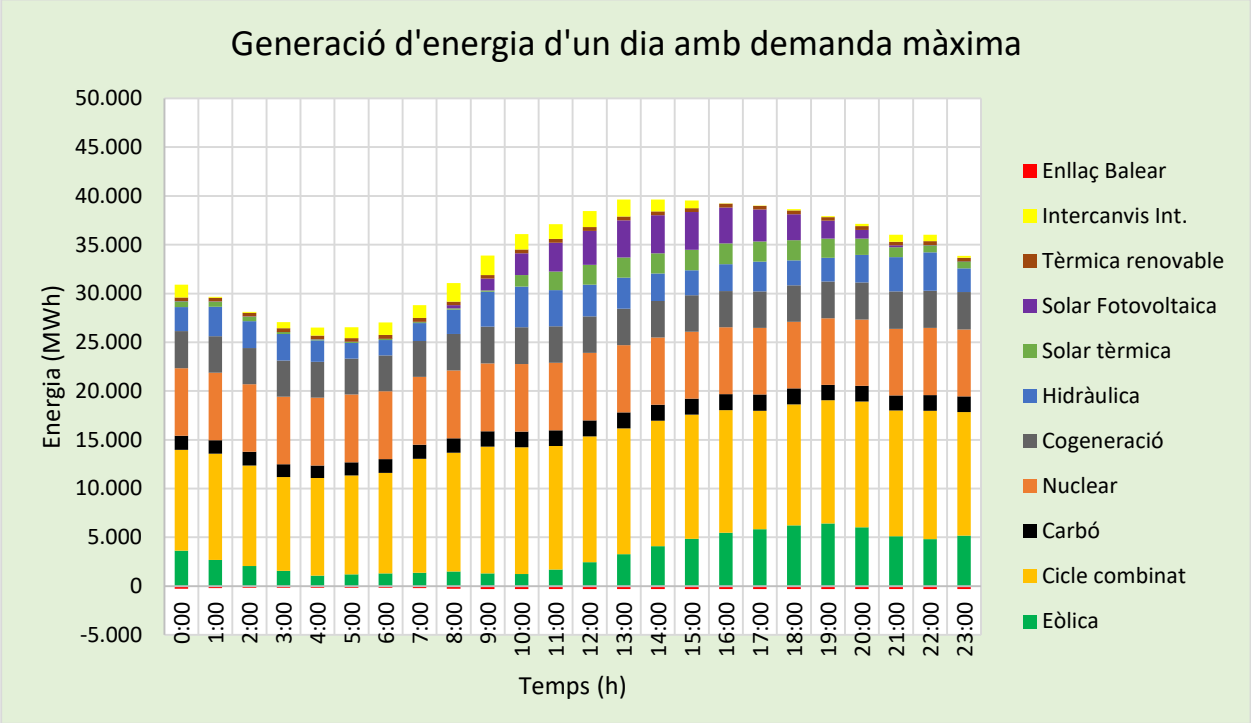

Figura 5.5. Mix energètic d'un dia amb demanda màxima per unitats energètiques (24/07/2019) . (Font: Elaboració pròpia)

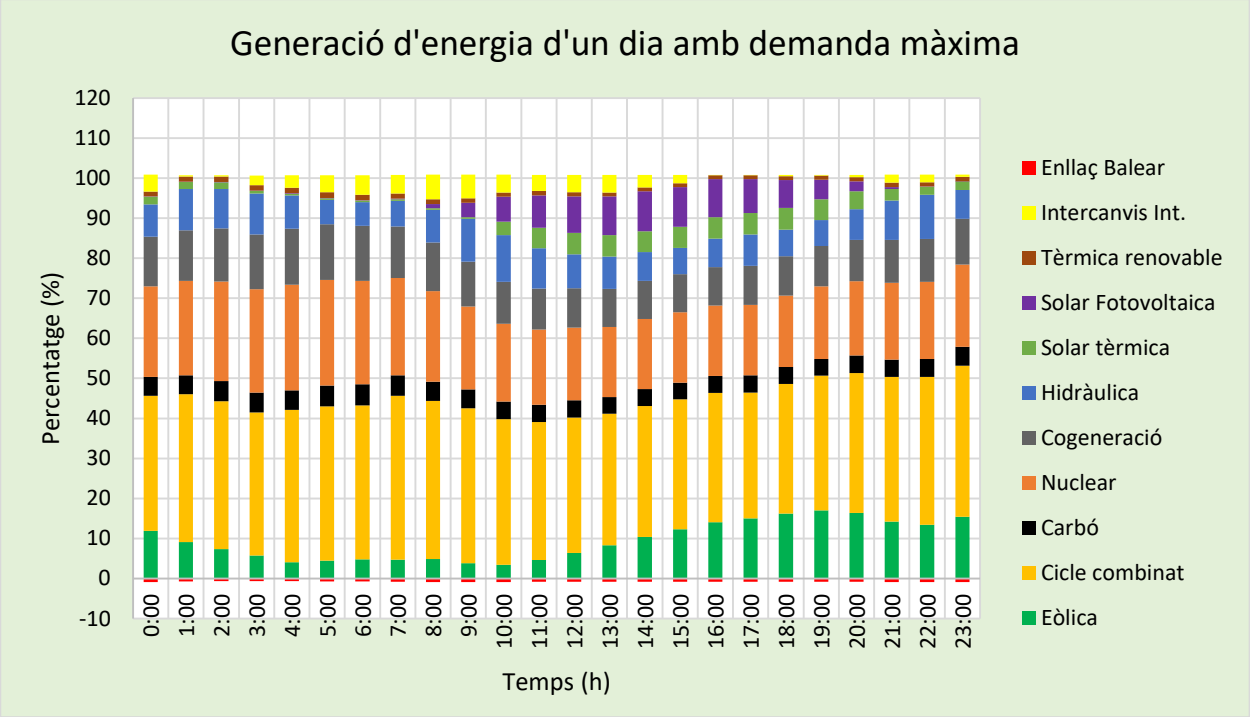

Figura 5.6. Mix energètic d'un dia amb demanda màxima per percentatges (24/07/2019) . (Font: Elaboració pròpia)

Les gràfiques mostren una variació important respecte el mix energètic dels dies amb una demanda mitjana. Per començar, el canvi principal és la disminució de la generació eòlica, que en aquest cas com a màxim arriba a aportar el 15% del mix nacional, però per la nit es redueix considerablement fins arribar a valors més baixos del 5%. A nivells energètics, l'eòlica injecta per la nit poc més d'1 GWh per hora, mentre que en els dies amb una demanda mitjana aportava uns 10 GWh. Per tant, si les instal·lacions eòliques estan deixant d'aportar una gran part de l'energia, la pregunta està en quina central està entregant aquesta energia que abans subministrava l'eòlica.

Observant les gràfiques es pot concloure fàcilment que el sistema de generació que ha tingut un creixement més elevat son els cicles combinats. Aquests han passat a oferir un percentatge del 12% a oferir el 37% del mix en els dies en que la demanda és elevada. Com que l'energia que injecten a xarxa és gairebé constant durant tot el dia (d'uns 11 GWh per hora) i la demanda nacional es redueix a la nit, el percentatge d'aportació al mix d'aquesta tecnologia augmenta en les hores nocturnes fins a valors del 40%.

Pel que fa a la resta de fonts d'energia, el seu comportament no varia massa respecte el dels dies amb una demanda mitjana. Les que canvien més són les centrals nuclears, que segueixen aportant energia

de manera constant durant totes les hores del dia però amb uns valors lleugerament superiors, i les centrals de carbó, que també es mantenen constants però en aquest cas l'energia es redueix.

Els resultats obtinguts en aquestes gràfiques permeten extreure diverses conclusions. El fet d'estudiar un dia en que la demanda durant la nit és elevada, i en que la principal font d'energia renovable com és l'eòlica genera menys electricitat que de costum, serveix per comprovar quines tecnologies augmenten la seva generació en moments de necessitat. Com s'ha vist, el cicle combinat és qui realitza aquest creixement en la producció; era d'esperar que s'incrementés la generació d'una tecnologia no renovable, ja que aquestes poden garantir uns nivells de generació a qualsevol hora del dia. D'entre les centrals que cremen combustibles fòssils, té sentit que l'increment el facin les centrals de cicle combinat, ja que és la tecnologia amb una potència instal·lada més elevada a Espanya i la segona amb una eficiència més elevada, només superada per la cogeneració. A més, al ser més àgils que les centrals tèrmiques de carbó/fuel o que les nuclears, poden activar-se molt ràpidament i desconnectar-se quan sigui necessari; aquesta velocitat permet als cicles combinats cobrir els pics de potència i sortir del sistema quan la demanda disminueixi.

El fet que quan el consum elèctric és elevat i la generació eòlica disminueix la central que augmenti la seva generació sigui el cicle combinat té unes conseqüències negatives, sobretot de cara al medi ambient. D'entre totes les formes d'obtenció d'energia elèctrica a base de combustibles fòssils, el cicle combinat és la que menys contamina degut a la menor emissió de NO_x i SO_2 (que provoquen la pluja àcida) i CO_2 (que provoca l'efecte hivernacle). No obstant, la substitució d'una energia amb zero emissions com l'eòlica per una que emet partícules contaminants és un escenari preocupant. En l'apartat de l'estudi mediambiental que s'exposarà més endavant s'oferiran els valors d'emissions que implica aquest augment de la generació de cicle combinat.

A part de suposar problemes pel medi ambient, el creixement del cicle combinat també perjudica a la economia de la xarxa elèctrica. El preu del GWh generat a partir del cicle combinat és molt més elevat que el del GWh generat per una central eòlica, com passa en general amb totes les tecnologies no renovables i renovables. Per tant, això implica que com a conseqüència de la major participació del cicle combinat en hores en que el consum elèctric augmenta, el preu de l'energia també creixerà. En l'apartat de l'estudi econòmic es donaran més detalls sobre aquests valors.

Ara que ja s'ha establert quin és el comportament del mix energètic espanyol en situacions amb un consum mitjà i màxim, es combinaran els resultats obtinguts amb les corbes de demanda generades en l'escenari futur 3, que s'ha definit anteriorment com l'escenari amb el sistema de recarrega més beneficiós per la xarxa.

5.3. Mix energètic aplicat a la demanda futura

L'augment de vehicles elèctrics en la societat provocarà la modificació de la corba de demanda elèctrica. Com s'ha comprovat anteriorment, combinant un sistema de recàrrega intel·ligent basat en el preu de l'energia i unes tarifes que bonifiquin la recàrrega del VE en les hores nocturnes es pot aconseguir mitigar els pics de potència i aplanar la corba. En aquest apartat, es planteja la qüestió de quines tecnologies de generació podran garantir el creixement de consum d'aquests VE i quines conseqüències tindrà aquest increment.

Per començar, cal obtenir els valors de la demanda elèctrica futura en unitats d'energia (MWh). Com que les corbes que s'han extret de l'escenari futur 3 estan en unitats de potència (MW), s'ha de fer la conversió. Tenint la corba de la demanda i la seva funció (D(t)), es pot obtenir l'energia fàcilment, ja que l'àrea que es troba sota la funció de la corba entre dos instants de temps és igual a l'energia consumida entre aquests instants. Per tant, per obtenir l'àrea d'una funció en un interval determinat s'ha de calcular la integral en aquest interval. L'equació per realitzar el càlcul és la següent:

$$Ec_n = \int_{t_n}^{t_{n+1}} D(t)\, dt \qquad \textbf{\textit{(Eq. 5.1)}}$$

on Ec_n és l'energia consumida en una hora, t_n és l'hora en qüestió i D(t) és la funció de la corba de la demanda de potència.

Els resultats de les operacions es poden veure representats en les gràfiques següents, on es mostra la demanda energètica pels dies amb un consum màxim i mitjà del 2025 i del 2030, comparada amb la demanda de l'any 2019.

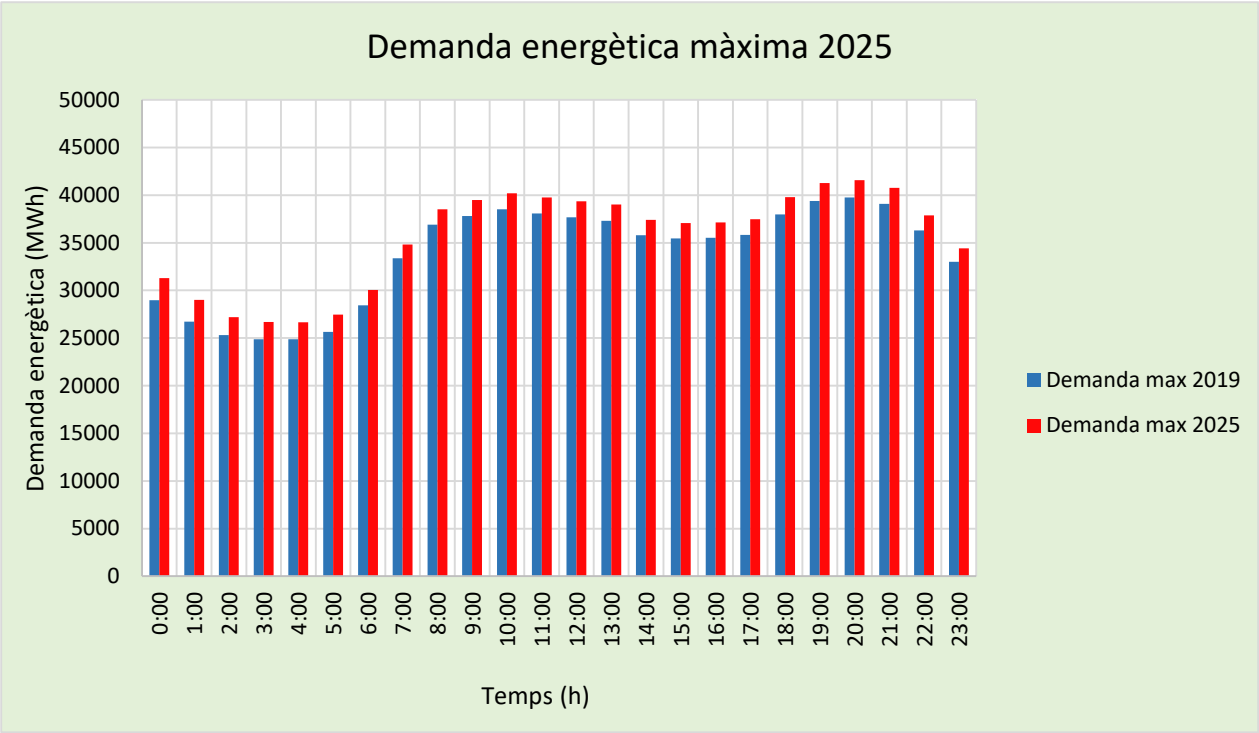

Figura 5.7. Comparació demanda elèctrica màxima entre el 2019 i 2025 per unitats energètiques. (Font: Elaboració pròpia)

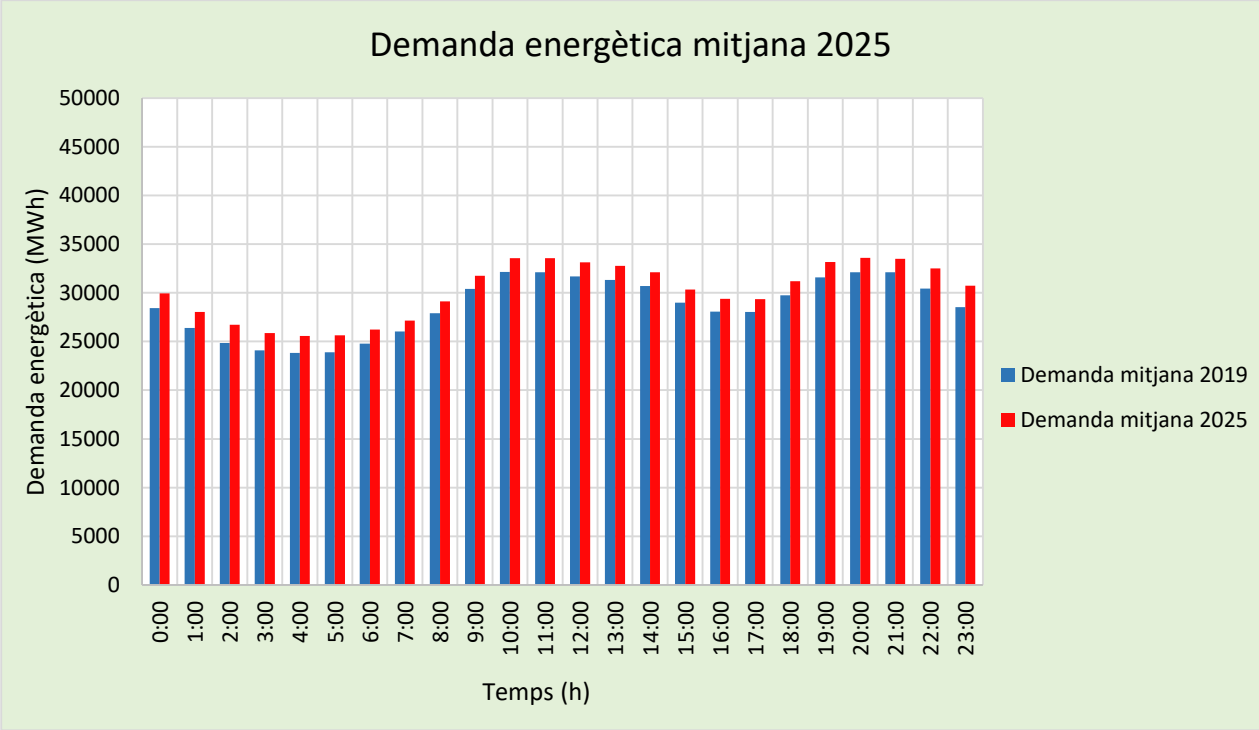

Figura 5.8. Comparació demanda elèctrica mitjana entre el 2019 i 2025 per unitats energètiques. (Font: Elaboració pròpia)

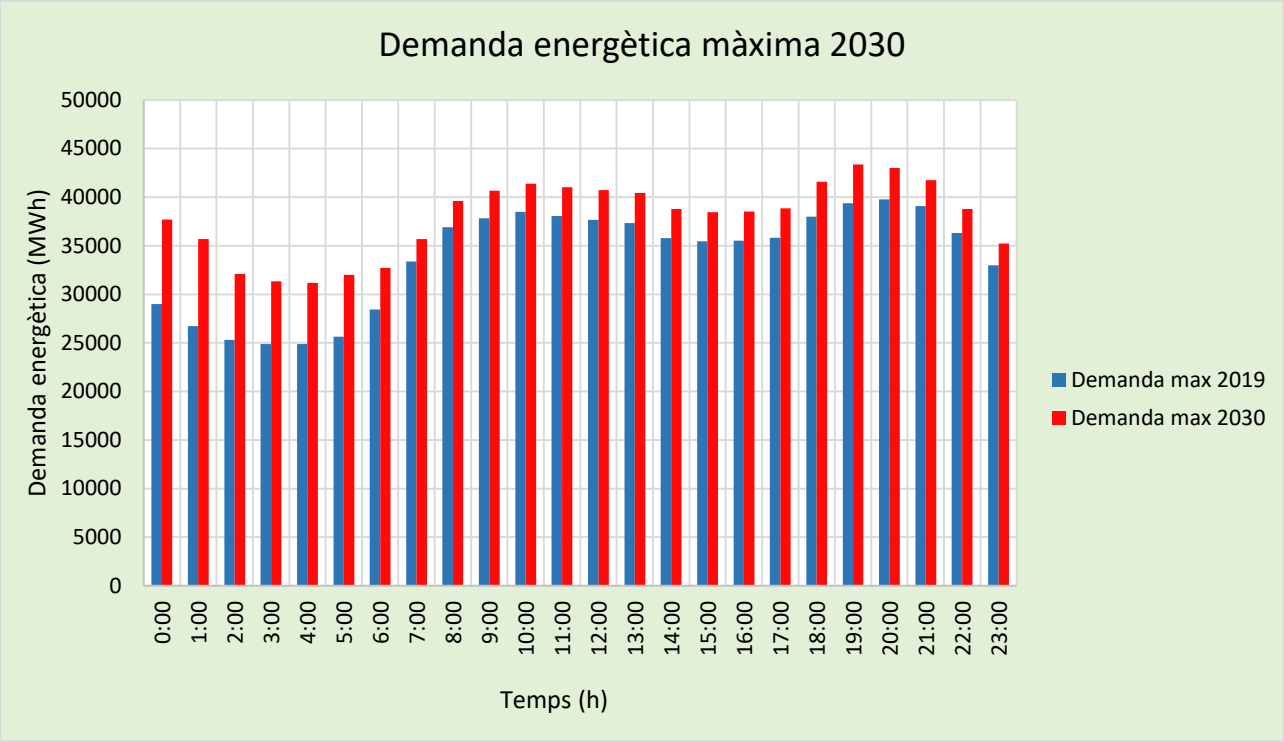

Figura 5.9. Comparació demanda elèctrica màxima entre el 2019 i 2030 per unitats energètiques. (Font: Elaboració pròpia)

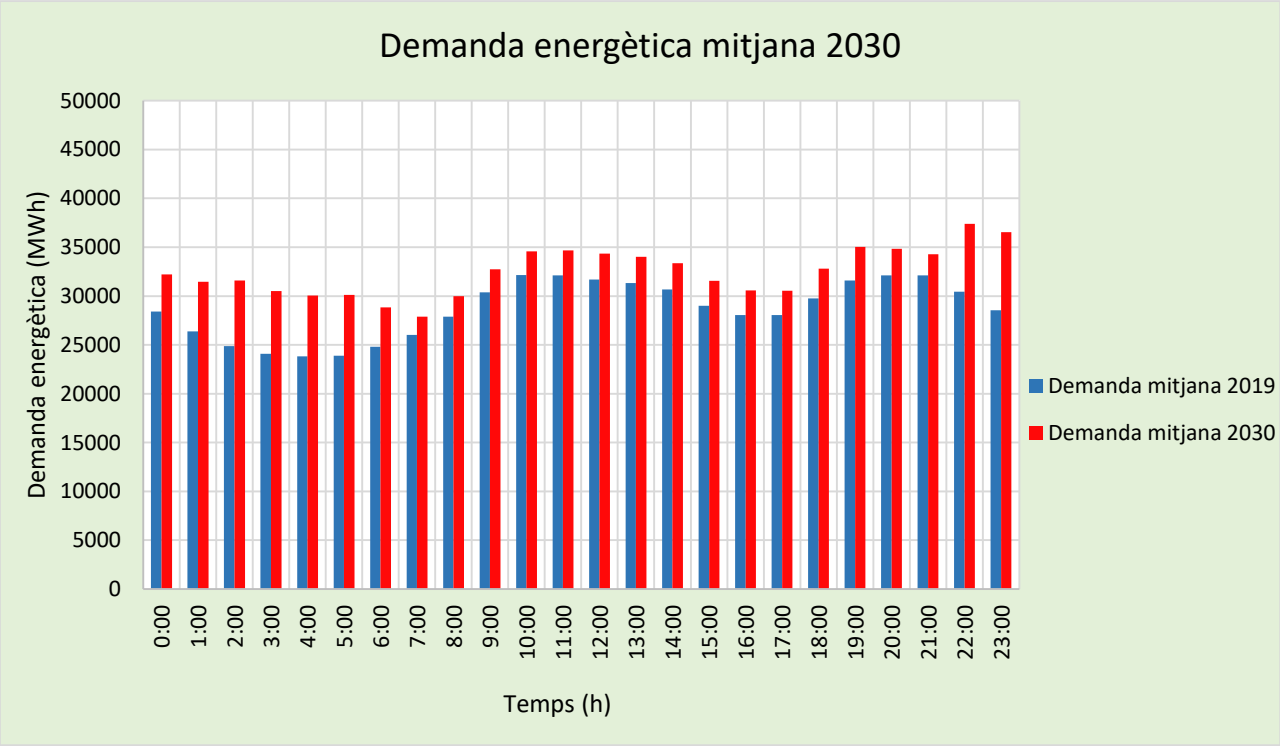

Figura 5.10. Comparació demanda elèctrica mitjana entre el 2019 i 2030 per unitats energètiques. (Font: Elaboració pròpia)

El comportament de la demanda en unitats energètiques és el mateix que en unitats de potència, ja que el que fa la integral per obtenir el valor de l'energia és calcular la mitjana dels valors de la potència per un interval d'una hora. Degut a aquesta similitud, no es comentaran de forma detallada les gràfiques resultants.

Amb els valors energètics es pot comprovar clarament com la demanda augmentarà sobretot per la nit; com s'ha demostrat anteriorment, amb el mix energètic actual, la tecnologia que seria capaç d'aportar aquesta energia extra en les hores nocturnes seria el cicle combinat. Les centrals eòliques, amb la potència instal·lada actual, no poden garantir augmentar la seva producció durant la nit per cobrir una part de l'augment de potència que suposaran els VE, ja que la seva producció depèn de les condicions meteorològiques del moment. Que les centrals que puguin assegurar un creixement en la generació siguin els cicles combinats, suposa una sèrie de problemàtiques tant a nivell mediambiental com a nivell econòmic.

A partir d'aquestes premisses, s'han dissenyat una sèrie d'escenaris futurs que tenen l'objectiu de marcar el full de ruta que han de seguir les diferents centrals energètiques a Espanya per tal d'evitar que el subministrament del consum que suposen els VE l'aportin les centrals de cicle combinat.

5.4. Creació dels escenaris futurs de generació

Els escenaris futurs que s'han creat ofereixen diferents alternatives per aconseguir que les centrals de cicle combinat no siguin les úniques que poden assegurar l'energia que requereixen els vehicles elèctrics. En els escenaris es partirà d'un plantejament inicial i s'estudiarà de quina manera es podria dur a terme, com es modificaria el mix energètic, quina potència instal·lada hi hauria d'haver de cada tecnologia i es farà un estudi mediambiental i econòmic.

5.4.1. Escenari de generació 1

L'objectiu del primer escenari és que la potència instal·lada de la generació eòlica sigui prou gran com per assegurar que tot l'increment de producció que fa actualment el cicle combinat en el dies en que la demanda nocturna augmenta el pugui fer l'eòlica, inclús en els dies en que les condicions meteorològiques siguin adverses per les centrals eòliques. És a dir, en aquest escenari, l'energia eòlica ha de garantir poder augmentar la seva producció per la nit en tots els dies de l'any sense excepció. D'entre totes les renovables, s'ha escollit l'eòlica degut a que és la més desenvolupada a nivell nacional,

sent la segona font de generació amb una potència instal·lada més elevada i la única renovable que pot assegurar una gran producció en totes les hores del dia.

D'entrada pot semblar un escenari poc realista, ja que al basar els càlculs en els dies amb una generació eòlica baixa s'està sobredimensionant tot el sistema. Ara bé, aquest escenari servirà per veure fins a quin punt són compatibles les tecnologies renovables amb el creixement del consum que portaran els vehicles elèctrics, i si es podrà confiar només en les renovables o serà necessària una ajuda de les centrals que cremen combustibles fòssils.

Com que l'escenari està basat en que inclús en els dies en que la força del vent sigui fluixa, les centrals eòliques puguin evitar amb la seva producció que els cicles combinats generin més energia, s'ha buscat en la base de dades de la web de Red Eléctrica quin va ser el dia del 2019 en que l'energia eòlica va tenir una producció més baixa. Aquest dia va ser el 28 d'agost, arribant a aportar en algunes hores tan sols 300 MWh. Per poder observar com afecta aquesta baixa generació en les altres tecnologies, s'han representat gràficament els valors energètics i en percentatge del mix de generació durant el dia.

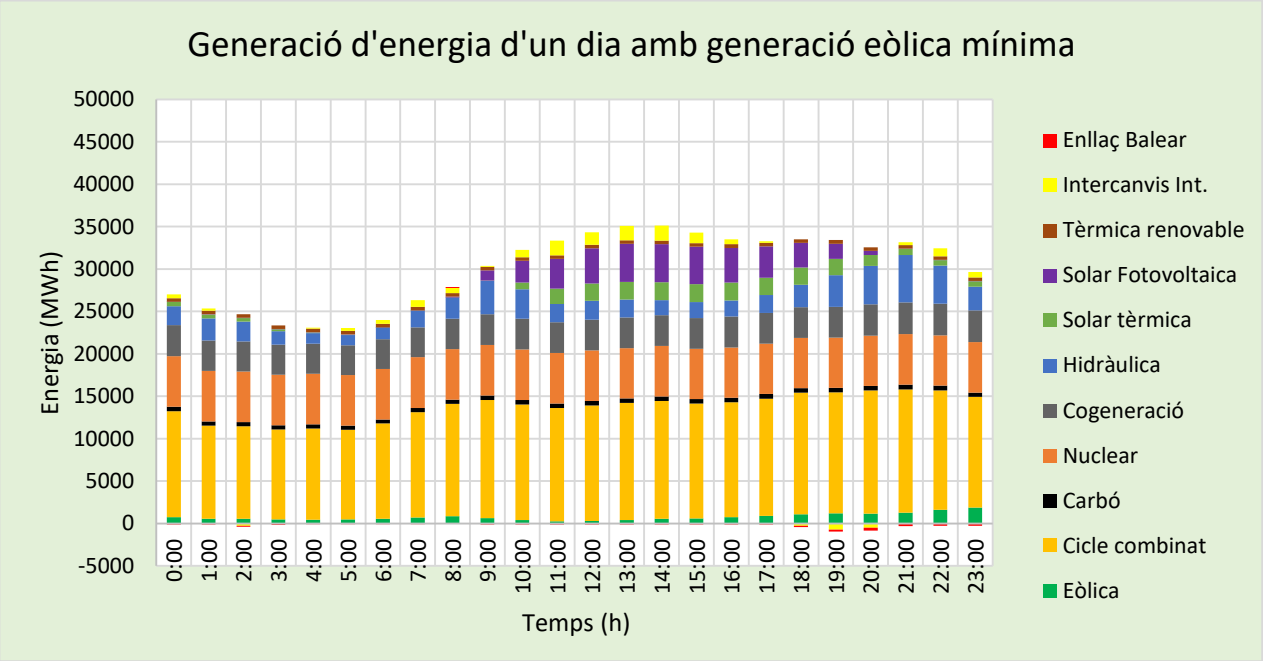

Figura 5.11. Mix energètic d'un dia amb generació eòlica mínima per unitats energètiques (28/08/2019) . (Font: Elaboració pròpia)

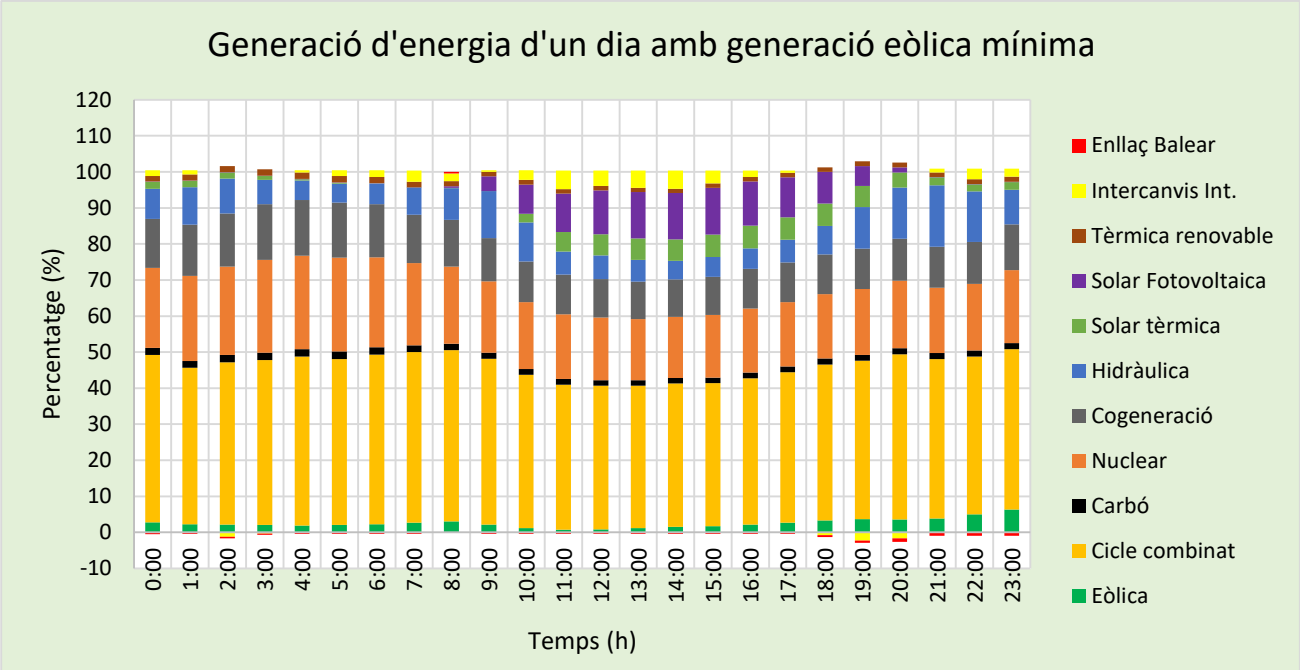

Figura 5.12. Mix energètic d'un dia amb generació eòlica mínima per percentatges (28/08/2019) . (Font: Elaboració pròpia)

Per començar, es pot comprovar com es compleixen les afirmacions que s'han fet anteriorment i el cicle combinat és la tecnologia que augmenta la seva generació per substituir la manca d'eòlica. La generació eòlica és molt baixa en tot moment, arribant algunes hores a aportar menys de l'1% de l'energia de la xarxa.

Els valors de la generació eòlica d'aquest dia serveixen per establir l'anomenada constant de relació de potència eòlica (k_e), que és un valor que relaciona la potència instal·lada d'energia eòlica amb la generació mínima a la que es pot arribar amb aquesta potència. És a dir, serveix per poder calcular quina potència instal·lada es necessitarà per poder garantir un nivell de generació energètica mínim. La formula de la constant és la següent.

$$k_e = \frac{Pe_{min,i}}{Pe_{inst,i}} \qquad \textbf{\textit{(Eq. 5.2)}}$$

on k_e és la constant de relació, Pe_{inst} és la potència eòlica instal·lada en un any "i" i Pe_{min} és la potència eòlica mínima a la que es pot arribar amb la determinada potència instal·lada en un any "i".

Com que es volen garantir uns valors de producció durant la nit, la potència mínima serà la mitjana entre els valors de la potència entre les 0:00 i les 8:00 del dia 28 d'agost. Substituint els valors, s'obté.

$$k_e = \frac{534{,}5\ MW}{25799\ MW} = 0{,}021$$

El següent pas és determinar l'augment del percentatge del mix que fa actualment el cicle combinat en els dies en que l'eòlica falla; aquests valors s'obtenen comparant l'aportació que fa normalment el cicle combinat, és a dir la del dia 26 de gener, amb la del mix de generació del dia 28 d'agost. El creixement s'ha d'obtenir en unitats de percentatge i no en energia per poder-ho aplicar a la demanda de qualsevol dia i conèixer així quin percentatge del consum ha de cobrir el cicle combinat. Per obtenir l'augment s'ha de restar el percentatge del dia en que l'eòlica falla menys el del dia mitjà. A continuació, es mostra una gràfica amb els augments d'aquest percentatge per cada hora d'interès, és a dir entre les 0:00 i les 8:00 de la nit.

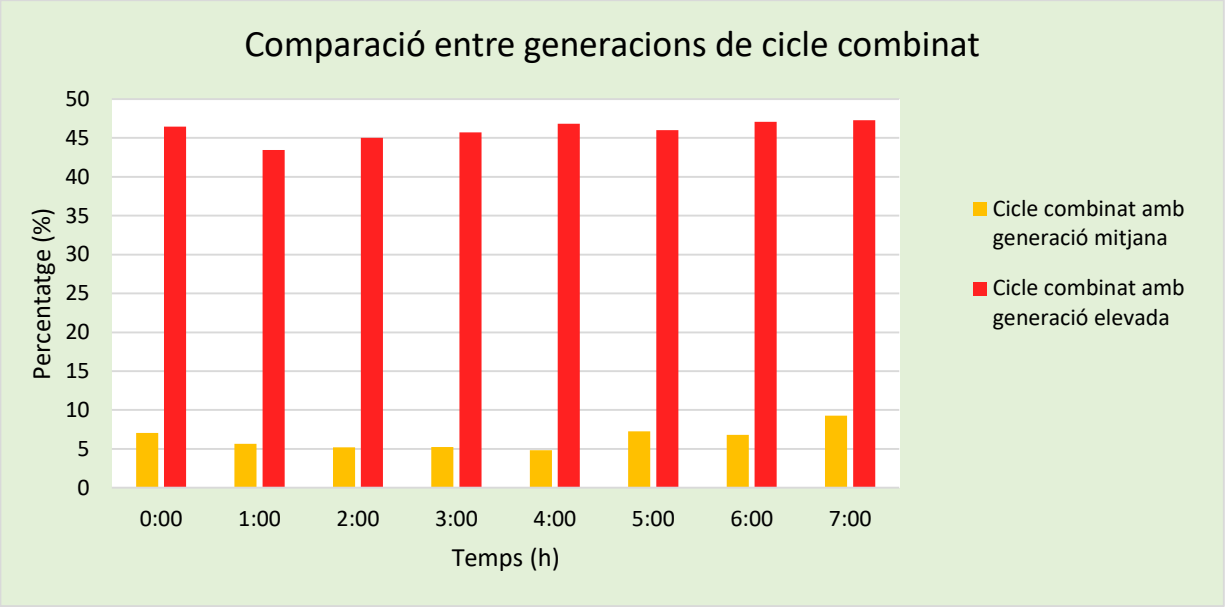

Figura 5.13. Augment de la generació de cicle combinat quan la generació eòlica és mínima. (Font: Elaboració pròpia)

Tal com s'aprecia, la diferència entre els dos casos és molt elevada. Com que l'estudi està centrat en 8 hores nocturnes, s'han de realitzar 8 restes i calcular la mitjana dels 8 resultats. Fent aquest procediment s'obté un resultat del 40% d'augment mitjà. Això significa que, els dies en que les centrals eòliques tenen una generació mínima, els cicles combinats han d'aportar un 40% extra de la demanda elèctrica.

Un cop obtingut el percentatge, ja es pot fer la simulació de com quedaria distribuït el mix energètic en aquest escenari pels dies amb una demanda elèctrica elevada en el 2025 i el 2030. Com que s'està representant un dia en que el vent bufi poc, s'han d'utilitzar els percentatges d'aportació de cada tecnologia del dia 28 d'agost, però aquest cop augmentant el percentatge d'eòlica 40 unitats que es resten del cicle combinat. Aquests nous percentatges resultants s'apliquen a la demanda futura

simulada anteriorment per generar el mix futur. En les gràfiques següents es representen dos mix energètics per cada any; el primer és el mix que es tindrà si tot segueix com està actualment i el segon és el nou mix generat en aquest escenari.

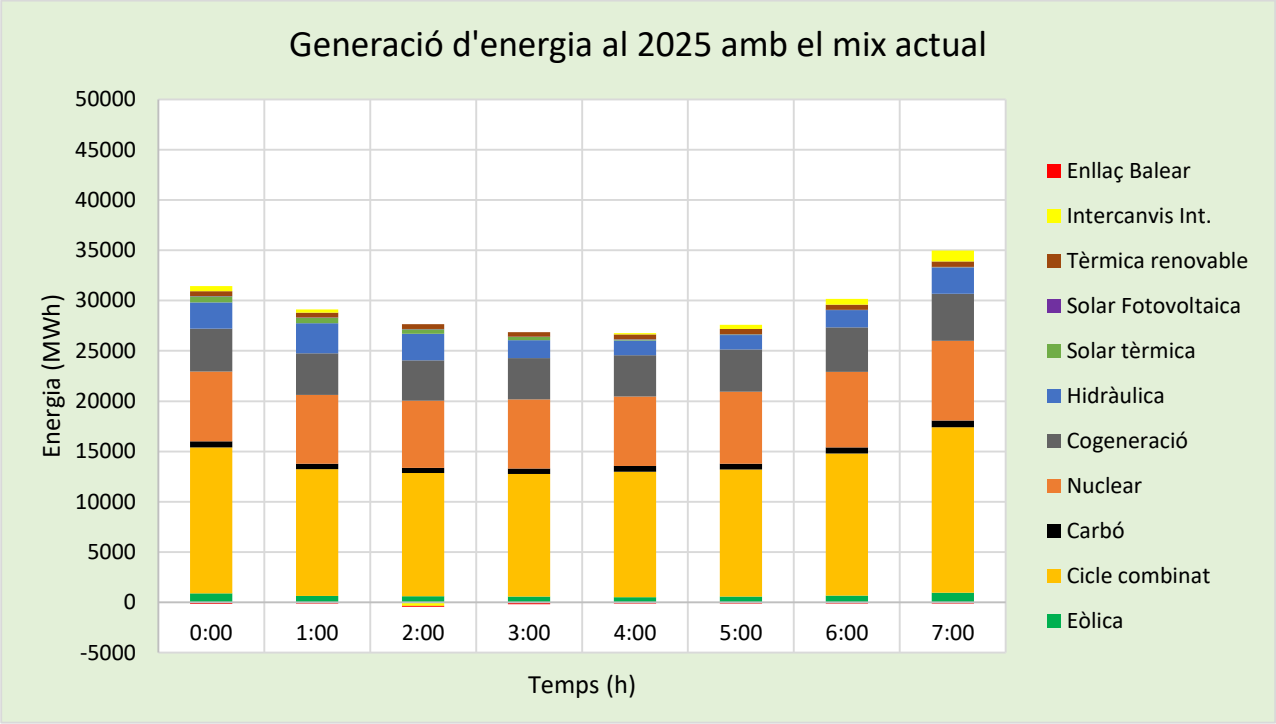

Figura 5.14. Mix energètic al 2025 segons el mix actual en l'escenari de generació 1. (Font: Elaboració pròpia)

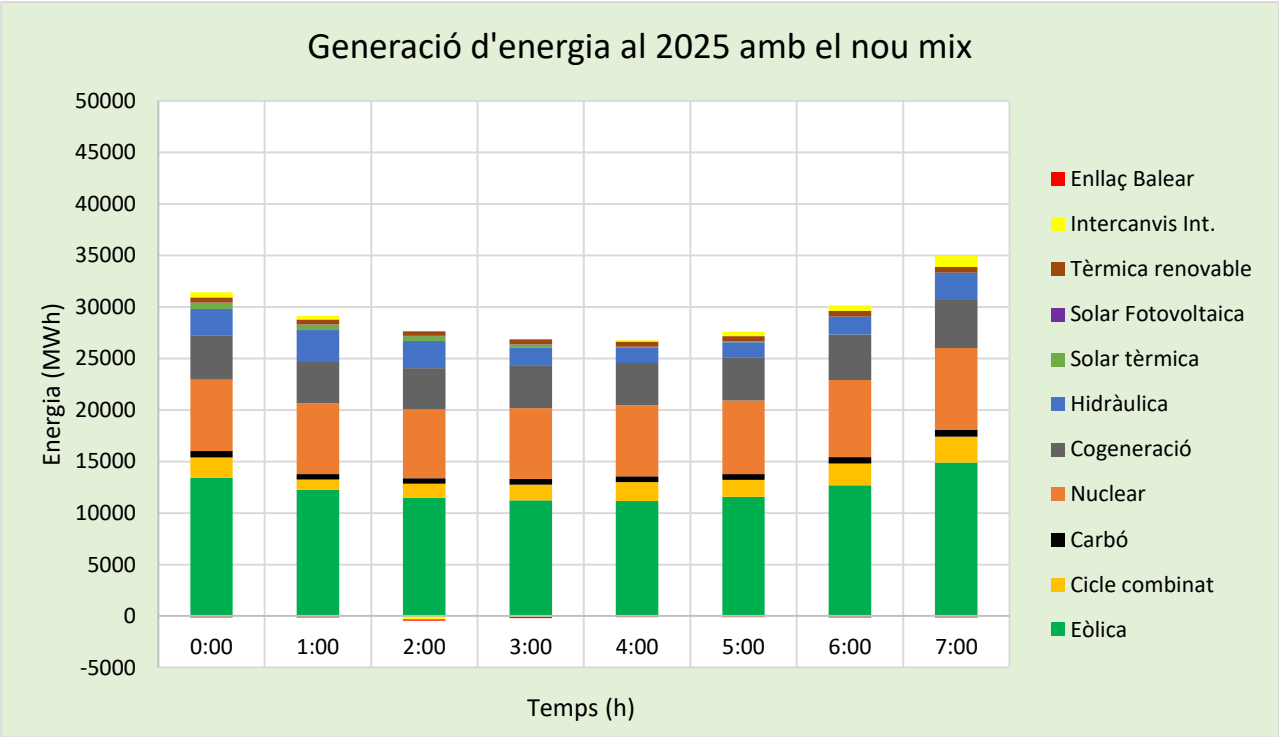

Figura 5.15. Mix energètic al 2025 segons el nou mix en l'escenari de generació 1. (Font: Elaboració pròpia)

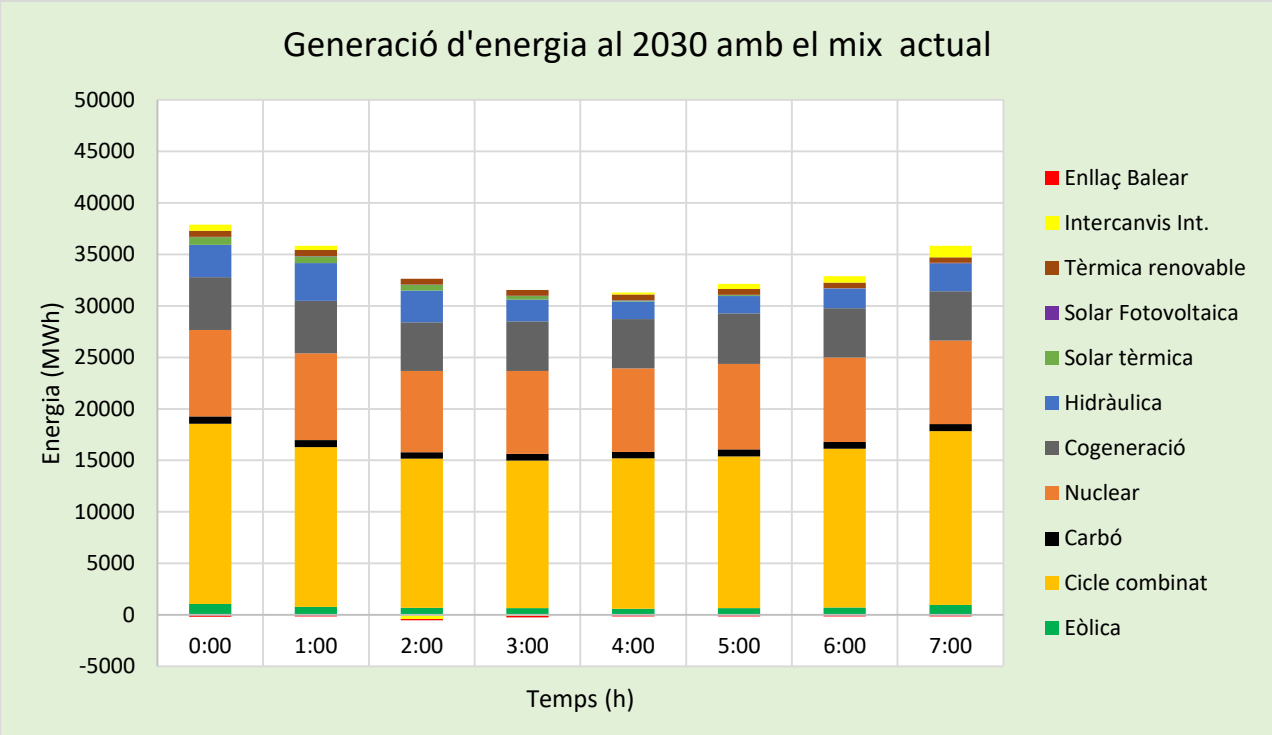

Figura 5.16. Mix energètic al 2030 segons el mix actual en l'escenari de generació 1. (Font: Elaboració pròpia)

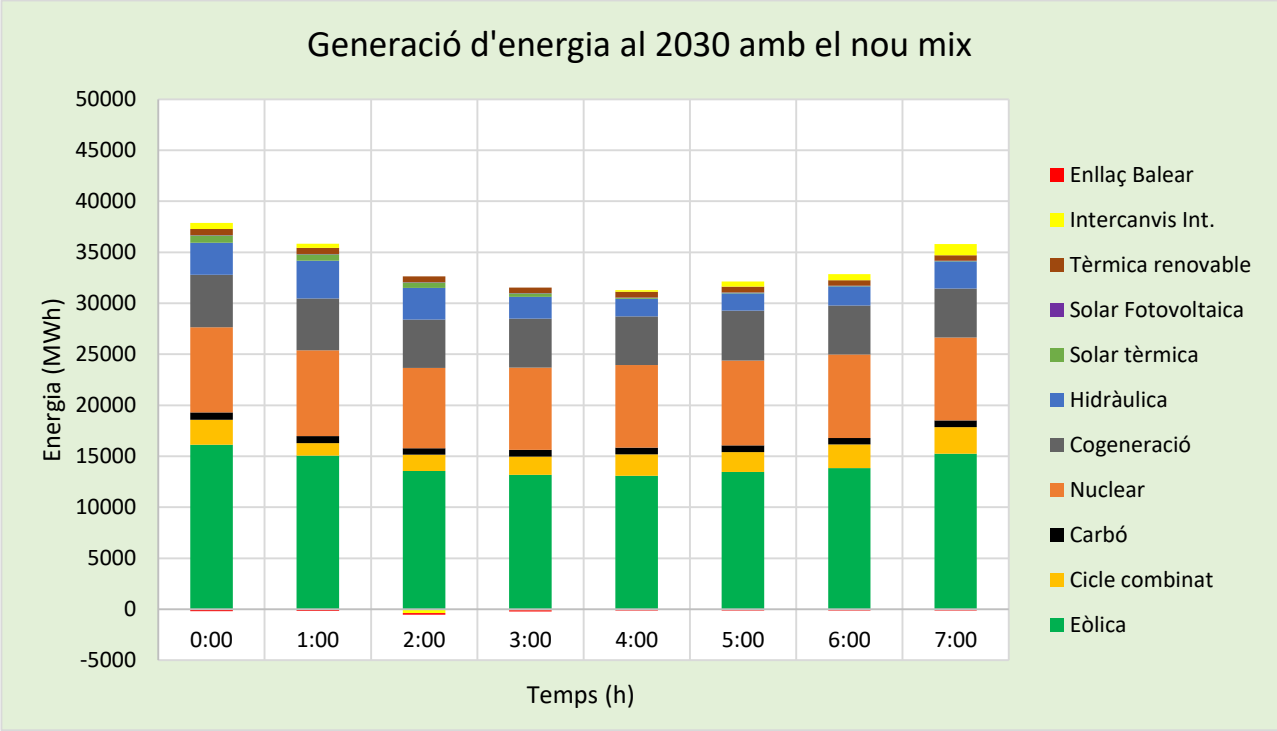

Figura 5.17. Mix energètic al 2030 segons el nou mix en l'escenari de generació 1. (Font: Elaboració pròpia)

Les gràfiques demostren com la simulació compleix amb els requisits de l'escenari, ja que amb el nou mix energètic el cicle combinat no augmenta en els dies amb un alt consum, sinó que s'està garantint que l'eòlica té una potència instal·lada suficientment elevada com per poder créixer. Per tant, el següent pas en aquest estudi és calcular quina serà aquesta potència instal·lada.

El càlcul de la potència, com s'ha explicat anteriorment, passa pel valor de la constant de relació de potència eòlica que s'ha calculat. La formula del càlcul és la següent.

$$Pe_{inst,i} = \frac{Pe_{min,i}}{k_e} \qquad \textbf{\textit{(Eq. 5.2)}}$$

El valor de la Pe_{min} s'obté de la simulació realitzada. En aquest escenari s'ha de garantir que el mix obtingut es pot obtenir fins i tot en els dies en que la producció eòlica sigui mínima. Per tant, els resultats de la simulació representen aquesta potència mínima, que calculant el valor mitjà de les 8 hores s'obté un valor d'11905 MW pel 2025 i de 13685 MW pel 2030. Afegint aquests valors a l'equació, s'obté.

$$Pe_{inst,2025} = \frac{11905\ MW}{0{,}021} = 574616\ MW$$

$$Pe_{inst,2030} = \frac{13685\ MW}{0{,}021} = 660564\ MW$$

Aquests valors són molt elevats; per tenir una idea del que suposaria tenir aquestes potències instal·lades pels anys indicats, del 2019 al 2025 s'hauria d'augmentar la potència instal·lada en 549 GW i del 2025 al 2030 en 86 GW. Els resultats són tan elevats a causa del sobre dimensionament del sistema, i les conseqüències i la seva viabilitat s'analitzaran detalladament en els apartats d'estudi mediambiental, estudi econòmic i comparació entre els escenaris.

5.4.2. Escenari de generació 2

El segon escenari parteix d'unes premisses més moderades que el primer, ja que el seu objectiu és assegurar que en els dies futurs en que hi hagi una generació eòlica mitjana, aquesta sigui capaç d'aportar al mix el percentatge que aporta actualment més la meitat del percentatge que aporten els cicles combinats. Per aconseguir-ho, s'estudiarà quin és el comportament del mix actual en els dies en que la generació eòlica és mitjana i es marcarà com a objectiu substituir la meitat de la generació de cicle combinat en aquests casos per generació eòlica. Cal destacar que, en aquest escenari, generació eòlica mitjana fa referència a aquella generació que es troba entre una generació màxima i mínima, i no a la generació eòlica habitual. Aquesta generació mitjana es pot calcular amb la següent equació.

$$Pe_{mit,i} = \frac{Pe_{max,i} + Pe_{min,i}}{2} \qquad \textbf{(Eq. 5.3)}$$

On $Pe_{mit,\,i}$ és la potència mitjana per una hora "i", $Pe_{max,\,i}$ la potència màxima i $Pe_{min,\,i}$ la mínima.

De la mateixa forma que en l'escenari anterior, l'estudi es concentrarà en les hores nocturnes (perquè és quan més augmentarà la demanda degut als VE) i es farà segons la demanda màxima futura generada anteriorment, ja que s'ha demostrat que amb el mix actual els dies en que la demanda és elevada són els cicles combinats els que creixen en producció.

Per començar, s'ha buscat el mix de generació d'un dia en que la producció eòlica sigui moderada. Anteriorment s'ha vist com, en els dies amb un vent favorable, la generació eòlica pot arribar fàcilment a produir 10 GWh per hora, però si les condicions meteorològiques són adverses aquesta generació es pot reduir fins als 0,5 GWh per hora. Aleshores, substituint els valors a l'equació, s'obté:

$$Pe_{mit,i} = \frac{11698\ MW\ +\ 0{,}537\ MW}{2} = 5849\ MW$$

Per tant, per aquest escenari es necessita el mix d'un dia en que les centrals eòliques injectin a la xarxa uns 6 GW de mitjana cada hora, és a dir, en valors d'energia, 6 GWh per hora. El dia 4 d'abril de 2019 compleix amb aquests requisits, ja que la generació d'eòlica varia dins un marge entre els 5 GWh i els 8,5 GWh durant tot el dia. Per assegurar que el mix es comporta de la mateixa manera en altres dies en que la generació eòlica es mou entre aquests valors, s'ha comparat amb els mix de dies amb una producció eòlica similar. Tot seguit es mostren les gràfiques del mix energètic del dia 4 d'abril, tant en unitats d'energia com en percentatges.

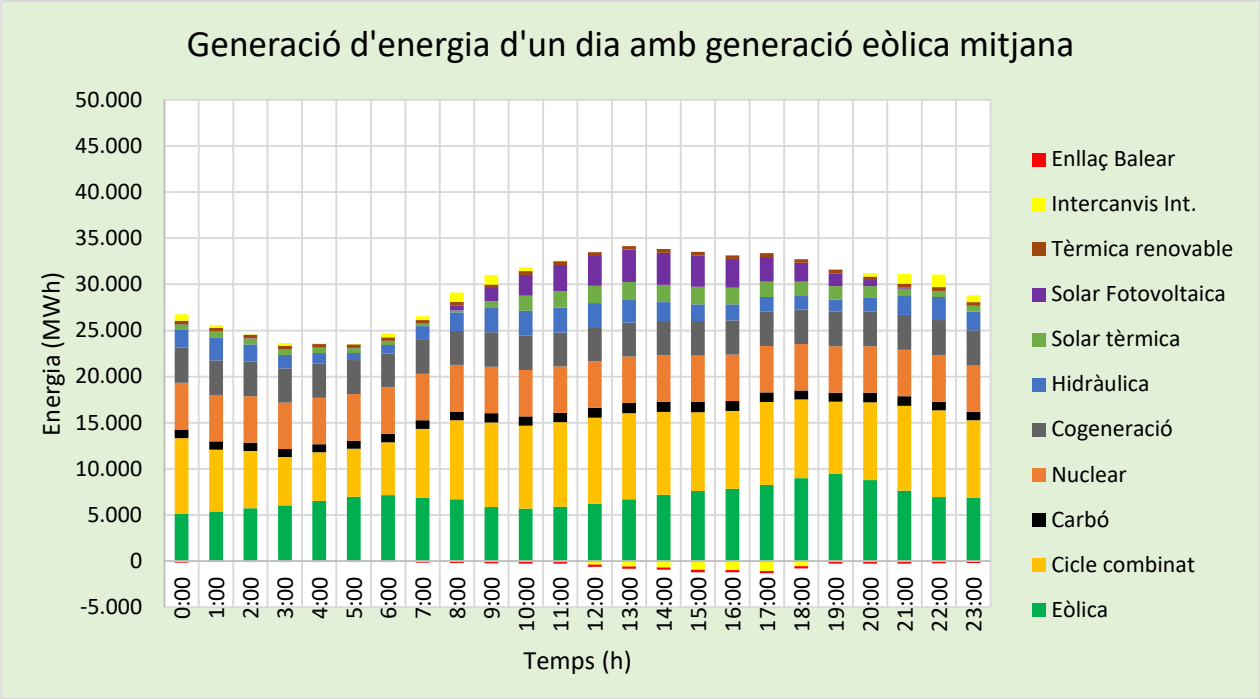

Figura 5.18. Mix energètic d'un dia amb generació eòlica mitjana per unitats energètiques (04/04/2019) . (Font: Elaboració pròpia)

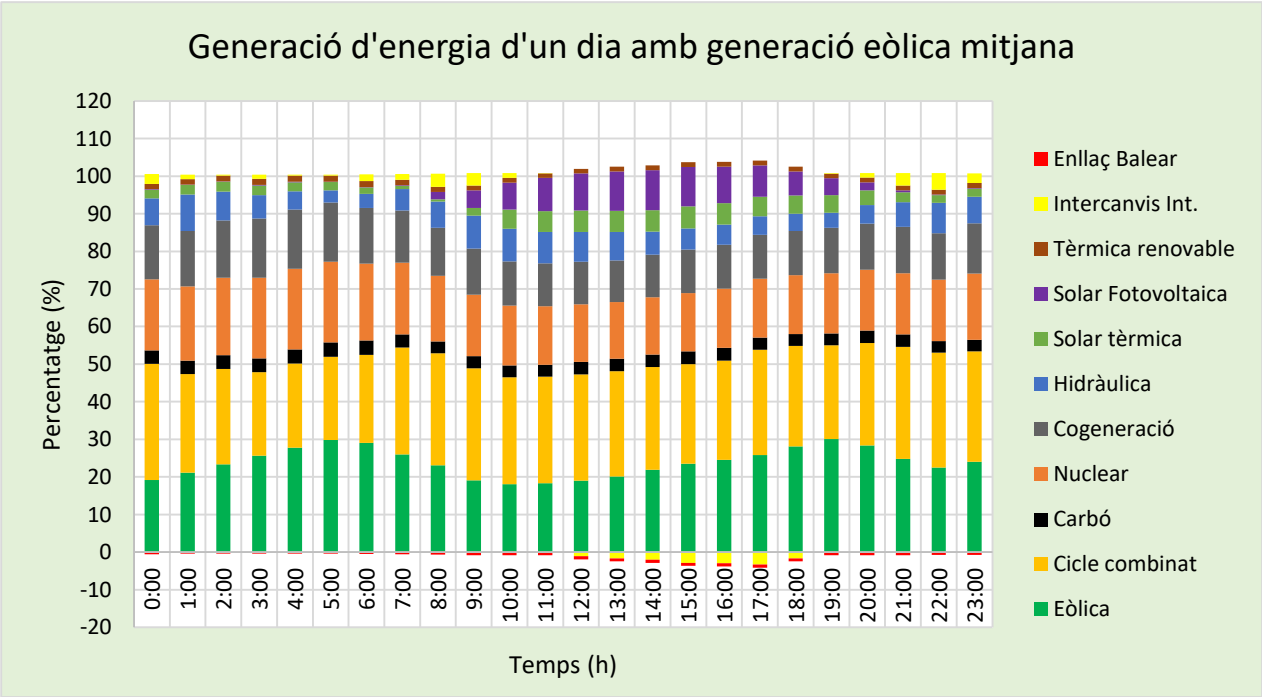

Figura 5.19. Mix energètic d'un dia amb generació eòlica mitjana per percentatges (04/04/2019) . (Font: Elaboració pròpia)

Es pot observar com l'aportació de l'eòlica és menor de l'habitual, però sense arribar als mínims de l'escenari anterior. Durant tot el dia la seva producció es manté força constant, augmentant lleugerament per la nit i en el pic de la tarda. Un altre cop, es comprova com la tecnologia capaç de cobrir la falta de generació eòlica és el cicle combinat, que té una producció més elevada respecte al mix habitual. La resta de centrals es manté en els seus nivells usuals, excepte el carbó que redueix lleugerament la seva aportació.

Com que en aquest escenari s'està treballant per assegurar uns nivells d'injecció d'electricitat a la xarxa en els dies en que la generació eòlica és mitjana, la formula per calcular la constant de relació de potència eòlica s'ha de modificar. En aquest cas, la constant ha de representar la relació entre la potència eòlica instal·lada i la potència mitjana generada. Per tant, l'equació és la següent.

$$k_e = \frac{Pe_{mit,i}}{Pe_{inst,i}} \qquad \textbf{\textit{(Eq. 5.4)}}$$

on k_e és la constant de relació, Pe_{inst} és la potència eòlica instal·lada en un any "i" i Pe_{mit} és la potència eòlica mitjana a la que es pot arribar amb la determinada potència instal·lada en un any "i". Substituint el valors, s'obté:

$$k_e = \frac{5849\ MW}{25799\ MW} = 0{,}2435$$

El següent pas és calcular l'augment del percentatge del mix que fa actualment el cicle combinat els dies en que la producció eòlica és mitjana. Per fer-ho, s'ha de comparar l'aportació que fa normalment el cicle combinat (dades del 26 de gener) amb la del mix de generació del dia 4 d'abril. De la mateixa manera que en l'escenari anterior, les unitats del creixement han de ser en percentatge per poder-les aplicar a diferents corbes de demanda. A continuació es mostra una gràfica amb aquesta comparació.

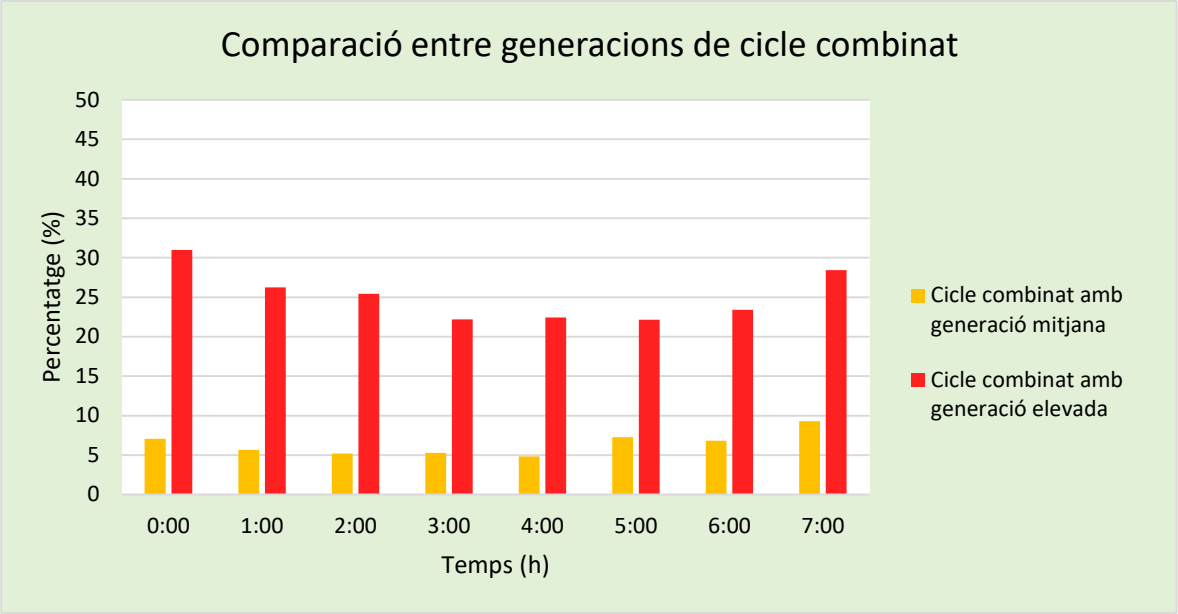

Figura 5.20. Augment de la generació de cicle combinat quan la generació eòlica és mitjana. (Font: Elaboració pròpia)

La diferència entre els dos casos és elevada, però no arriba als nivells de l'escenari anterior. Amb el mateix procediment que en l'escenari 1, s'obté un augment mitjà per les 8 hores d'estudi del 18%. Per tant, en l'actualitat els cicles combinats estan aportant un 18% extra del total de la demanda elèctrica quan les centrals eòliques tenen una producció mitjana. Això significa que, en aquest escenari, les centrals eòliques en els dies en que tenen una producció mitjana han de ser capaces de subministrar la meitat d'aquest 18% que ara mateix pertany a cicle combinat.

Amb el percentatge calculat, ja es tenen totes les dades per iniciar la simulació, de la qual s'obtindrà de forma gràfica el mix energètic resultant pels dies amb una demanda elèctrica elevada en el 2025 i el 2030 segons les premisses establertes. A continuació es mostren les gràfiques obtingudes i les gràfiques del mix actual aplicat a la demanda futura.

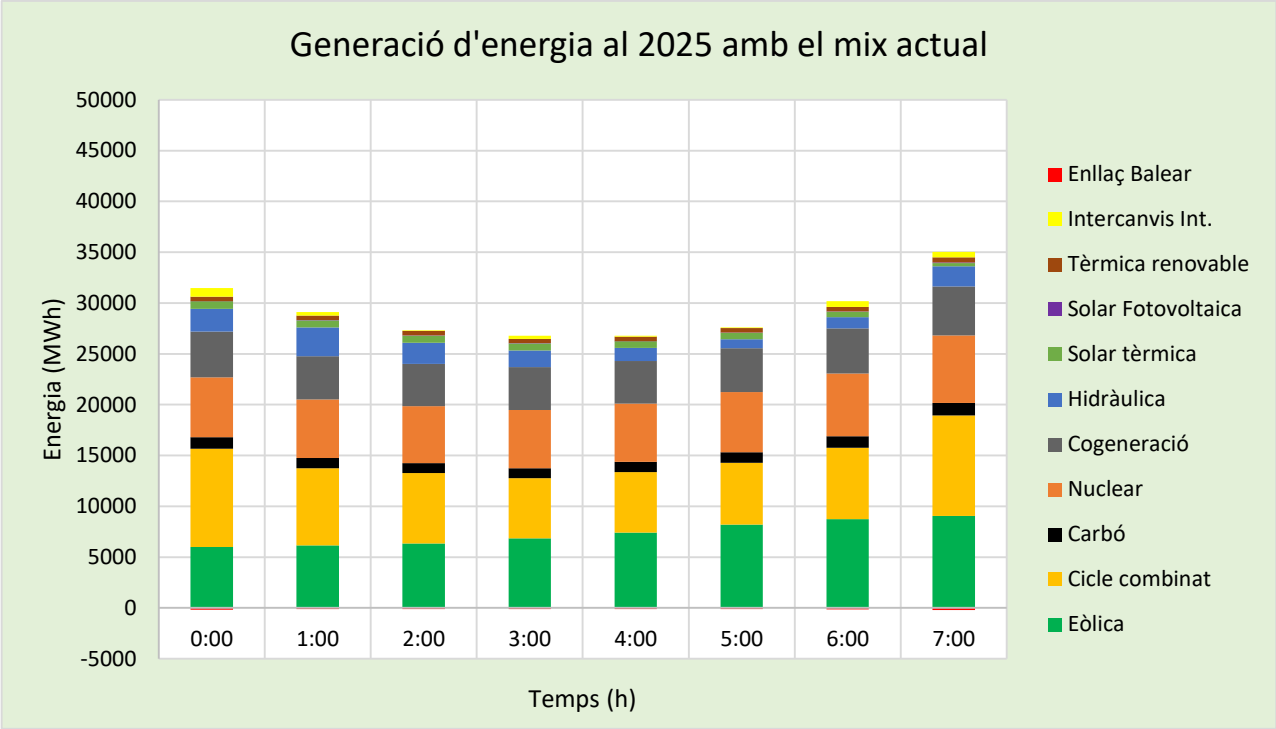

Figura 5.21. Mix energètic al 2025 segons el mix actual en l'escenari de generació 2. (Font: Elaboració pròpia)

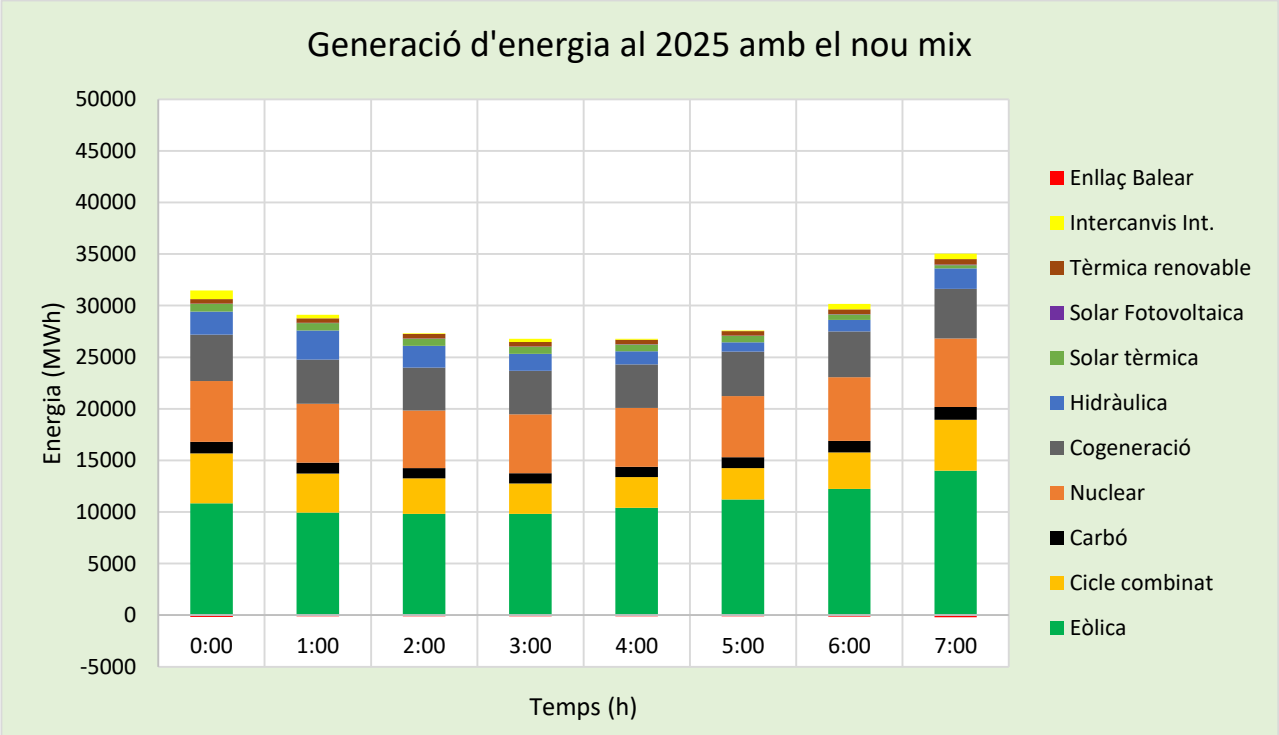

Figura 5.22. Mix energètic al 2025 segons el nou mix en l'escenari de generació 2. (Font: Elaboració pròpia)

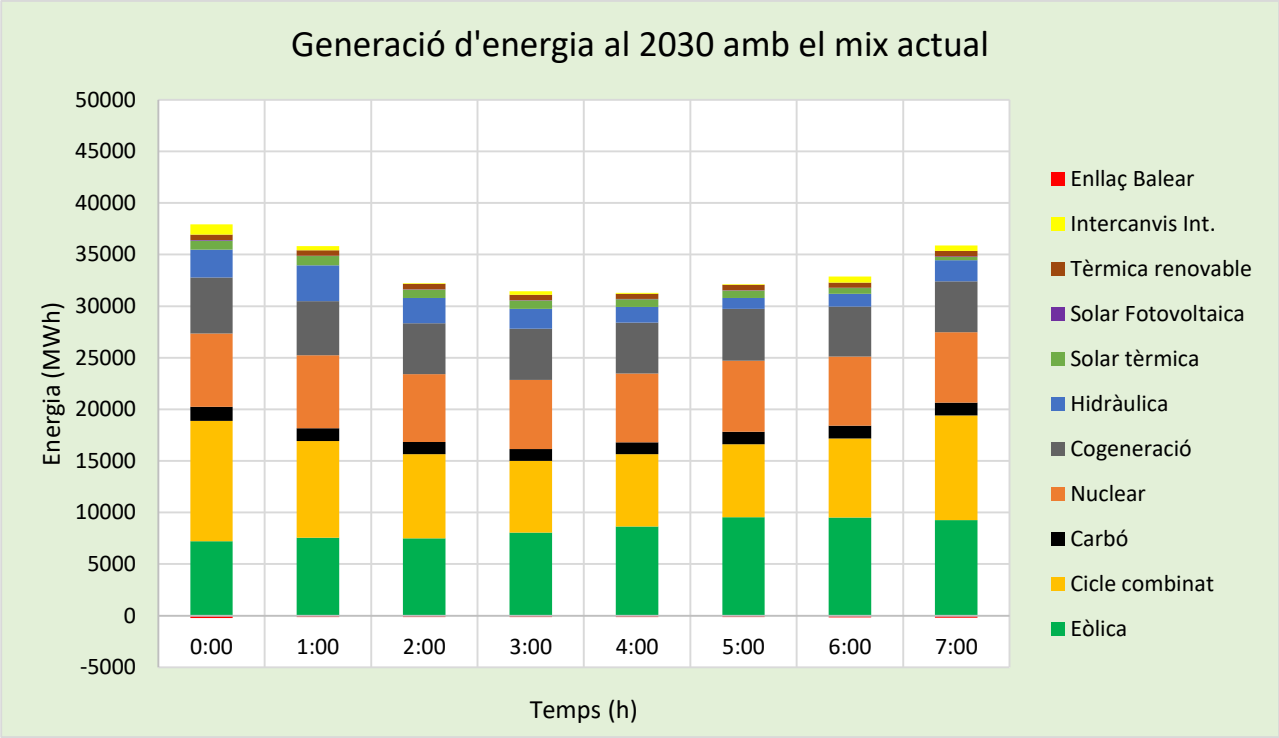

Figura 5.23. Mix energètic al 2030 segons el mix actual en l'escenari de generació 2. (Font: Elaboració pròpia)

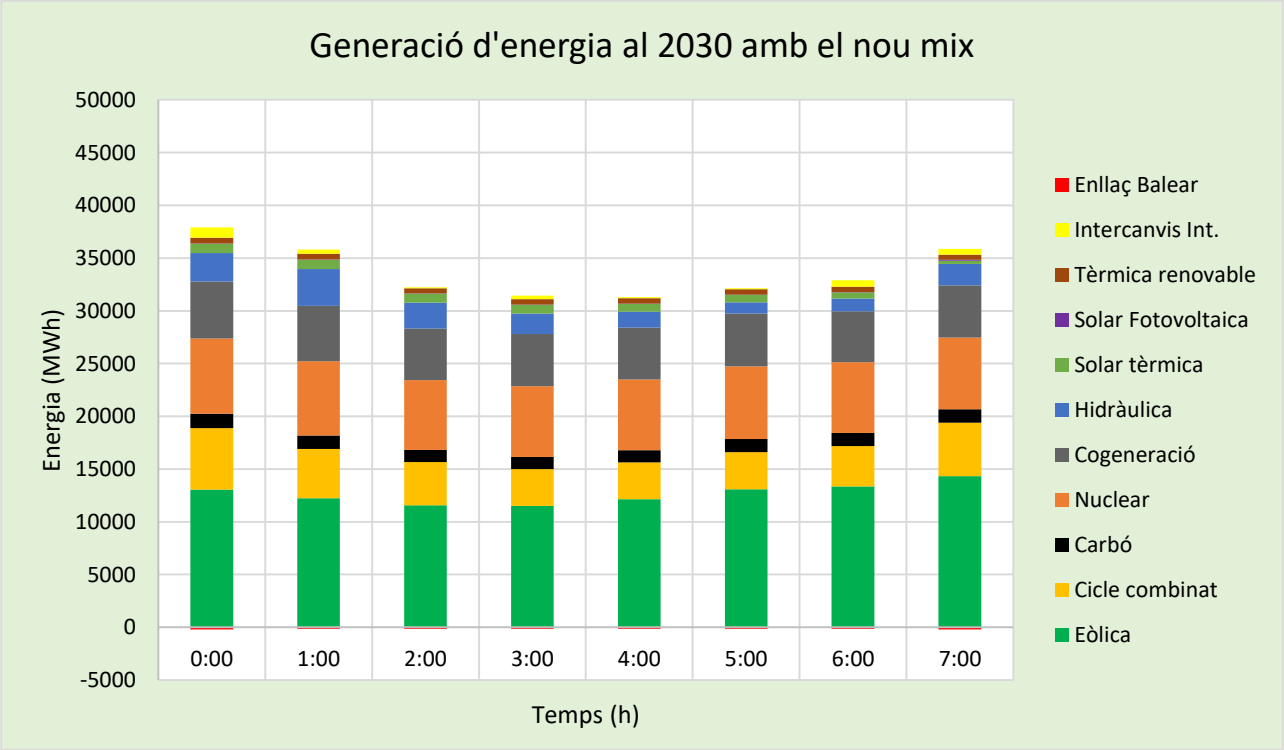

Figura 5.24. Mix energètic al 2030 segons el nou mix en l'escenari de generació 2. (Font: Elaboració pròpia)

Un cop més, la simulació compleix positivament amb els requisits, ja que l'energia eòlica en el nou escenari està augmentant la seva producció i, com a conseqüència, el cicle combinat l'està reduint. No obstant, falta calcular quina potència eòlica instal·lada farà falta per garantir que es compleixi aquest escenari. La formula per calcular aquesta potència és la següent.

$$Pe_{inst,i} = \frac{Pe_{mit,i}}{k_e} \qquad \textbf{\textit{(Eq. 5.4)}}$$

Igual que abans, el valor de Pe_{mit} s'obté dels resultats de la simulació, ja que la generació obtinguda amb el nou mix ha de ser la que es pugui injectar inclús en els dies amb una generació mitjana. Calculant el valor mitjà de les 8 hores resultants de la simulació s'obtenen uns valors de 10611 MW pel 2025 i de 12643 MW pel 2030. Substituint els valors en l'equació, s'obté:

$$Pe_{inst,2025} = \frac{10611\ MW}{0{,}2435} = 43569\ MW$$

$$Pe_{inst,2030} = \frac{12643\ MW}{0{,}2435} = 51914\ MW$$

Aquests valors son molt més realistes que els de l'escenari anterior, ja que suposen un augment del 2019 al 2025 de 18 GW instal·lats i del 2025 al 2030 de 8 GW. Les conseqüències que implicarien aquests augments s'examinaran un cop definits tots els escenaris.

5.4.3. Escenari de generació 3

Aquest escenari planteja la incorporació de l'emmagatzematge elèctric per tal de reduir encara més l'augment que fan actualment els cicles combinats quan l'eòlica redueix la seva aportació. Les bases son gairebé idèntiques a les de l'escenari 2; es treballarà per aconseguir que en un dia en que la generació eòlica sigui mitjana, aquesta pugui aportar la que aporta actualment més la meitat de la que aporta el cicle combinat. Fins aquí el funcionament és igual a l'escenari anterior, però ara es buscarà que, de la meitat restant del cicle combinat, una meitat l'aportin els sistemes d'emmagatzematge. Per entendre millor com quedaria repartida l'aportació de cada central que substitueix el cicle combinat, s'ha realitzat una gràfica de comparació.

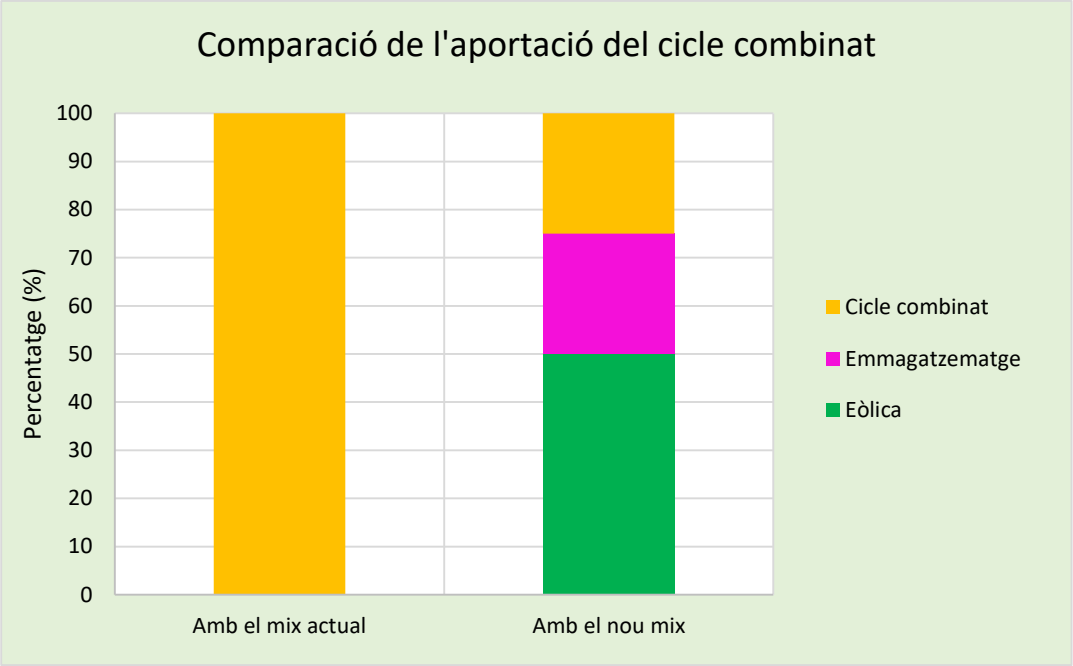

Figura 5.25. Distribució de l'aportació del cicle combinat en l'escenari de generació 3. (Font: Elaboració pròpia)

Com es pot observar, amb la implementació d'aquest escenari, els cicles combinats reduirien la seva aportació en un 75% en els dies en que la generació eòlica és mitjana i la demanda elevada.

Per començar l'estudi, s'ha de definir el funcionament que tindran els sistemes d'emmagatzematge.

- **Sistemes d'emmagatzematge**

Els sistemes d'emmagatzematge son una tecnologia que permet emmagatzemar energia elèctrica. Són un pilar fonamental per poder realitzar la transició energètica, ja que donen més possibilitats a la producció renovable i ajuden a la seva integració a la xarxa. L'emmagatzematge d'electricitat és tot un repte, ja que l'electricitat es pot generar i transportar fàcilment, però encara no s'ha trobat la manera d'emmagatzemar-la de forma eficient, fàcil i barata. Això significa que la generació elèctrica ha de concordar en tot moment amb la demanda, cosa que afecta a les energies renovables degut a la seva naturalesa variable. Per aquest motiu, un bon sistema d'emmagatzematge és imprescindible per poder injectar una energia extra en els moments en que la generació d'una central és baixa.

En aquest estudi, l'emmagatzematge s'aplicarà a les centrals solars, tant les fotovoltaiques com les tèrmiques. S'ha optat per les solars i no per les altres renovables degut a la compatibilitat i el bon funcionament que s'ha demostrat que ofereixen. Això significa que tota l'energia que

l'emmagatzematge entrega durant la nit s'ha d'haver acumulat de les centrals solars durant el dia. Per tant, s'haurà de comprovar si amb la potència solar instal·lada actualment hi ha suficient o si s'haurà de fer un increment de cara al futur.

El tipus de tecnologia escollit per aquests sistema són les bateries de liti; aquestes bateries s'han utilitzat en els últims anys en el sector de les renovables per solucionar el problema de l'emmagatzematge [9]. El liti, pel seu alt potencial electroquímic, pot acumular grans quantitats d'energia. Entre les seves principals característiques destaquen una alta eficiència, una alta durabilitat, el seu baix pes i que requereixen poc manteniment. L'únic inconvenient que ha evitat que aquestes bateries es converteixin en la principal tecnologia d'emmagatzematge renovable és el seu elevat preu. Tot i això, és cert que en els últims anys el seu preu ha baixat lleugerament. Totes les dades sobre l'evolució del preu de les bateries de liti s'analitzarà en l'apartat de l'estudi econòmic.

- **Creació de l'escenari**

Un cop definida la tecnologia d'emmagatzematge que tindrà aquest escenari, es pot passar a fer la simulació. Per començar, els percentatges d'aportació del mix energètic són els mateixos que en l'escenari anterior, però ara en les hores nocturnes es redueix el cicle combinat a la meitat i es substitueix per l'emmagatzematge. Si aquests nous percentatges s'apliquen a la demanda màxima futura, s'obtenen els resultats següents. Cal recordar que per cada any es representa com quedaria distribuïda la demanda segons el mix actual i segons el mix creat en aquest escenari.

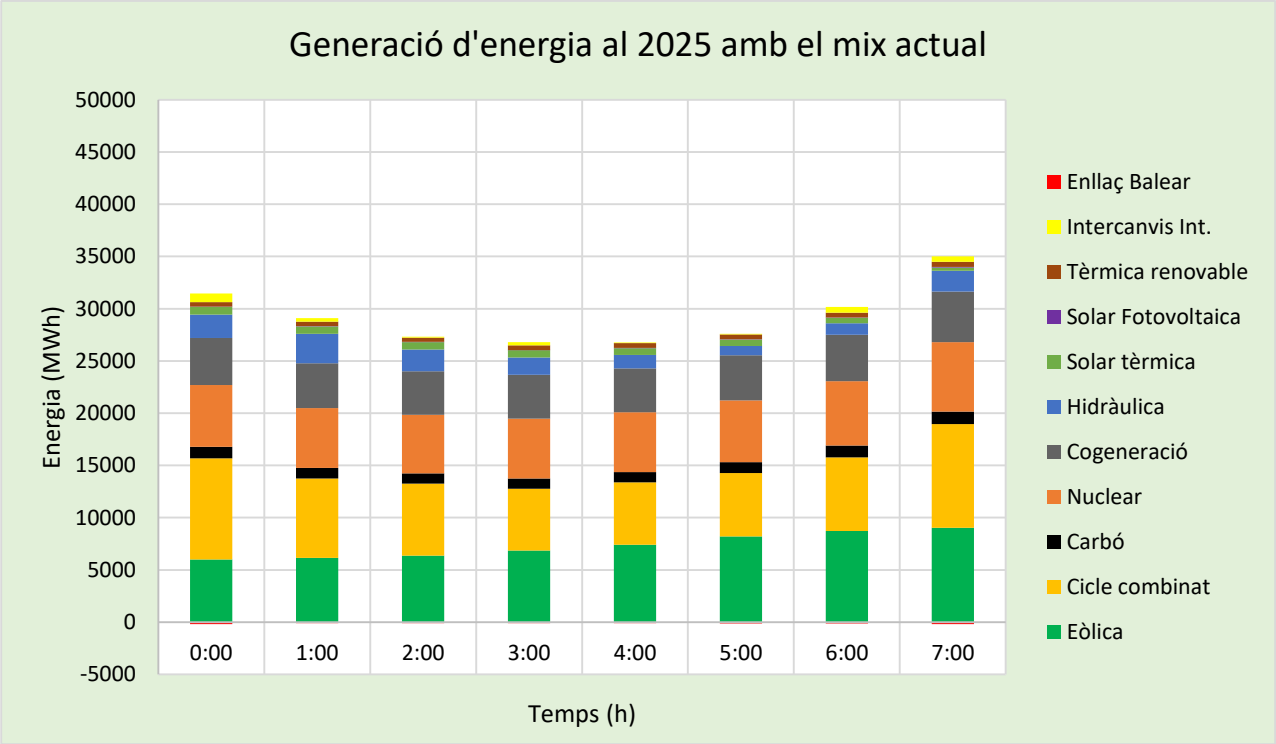

Figura 5.26. Mix energètic al 2025 segons el mix actual en l'escenari de generació 3. (Font: Elaboració pròpia)

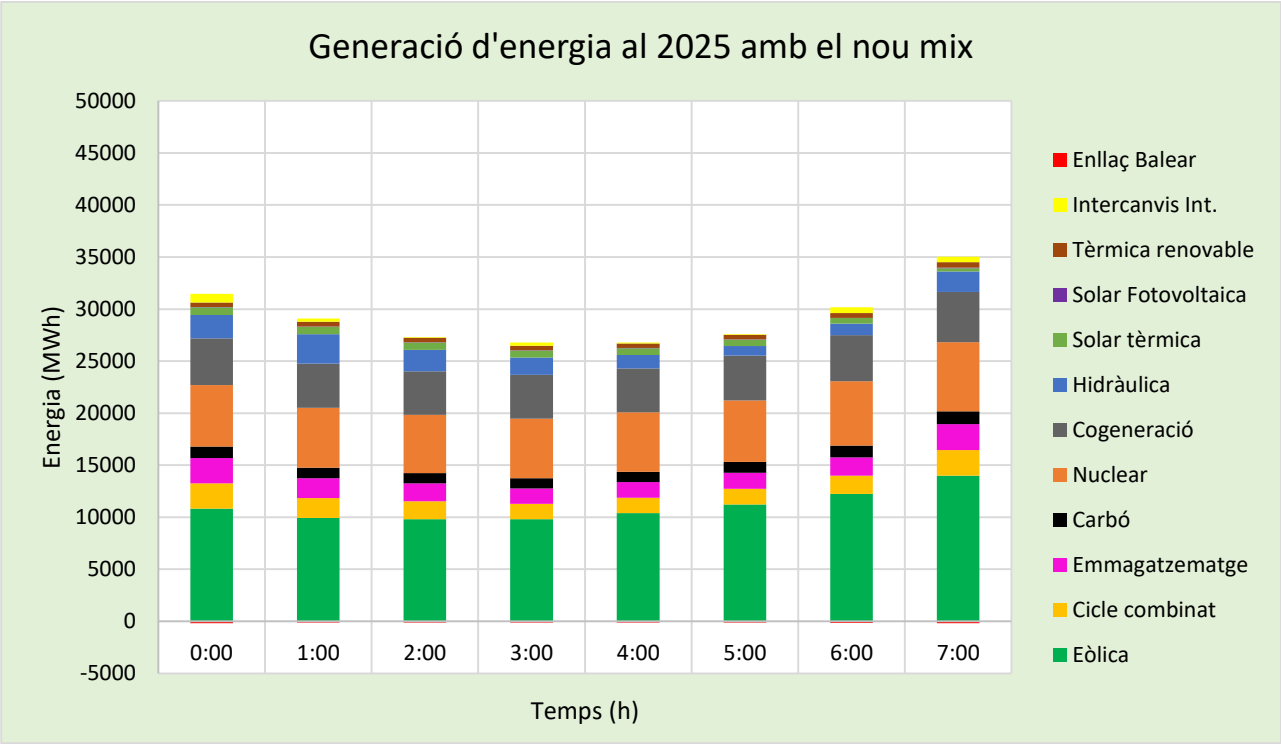

Figura 5.27. Mix energètic al 2025 segons el nou mix en l'escenari de generació 3. (Font: Elaboració pròpia)

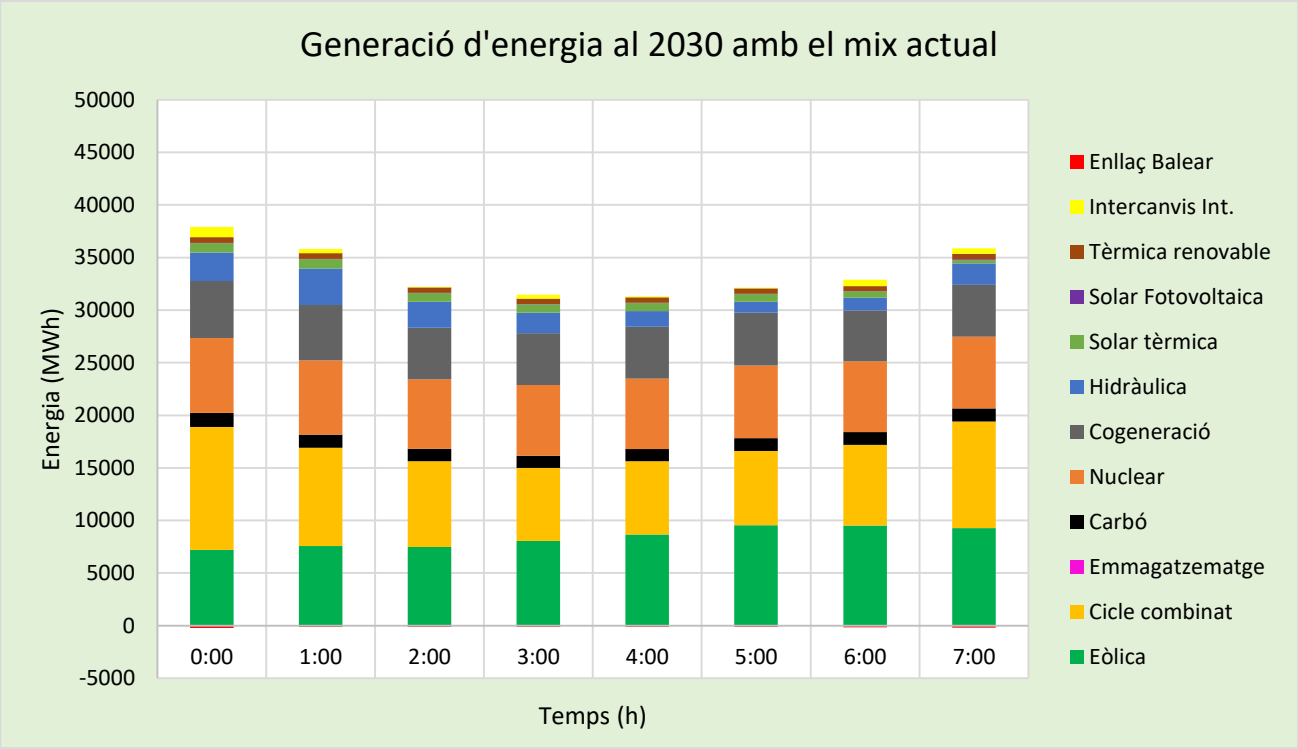

Figura 5.28. Mix energètic al 2030 segons el mix actual en l'escenari de generació 3. (Font: Elaboració pròpia)

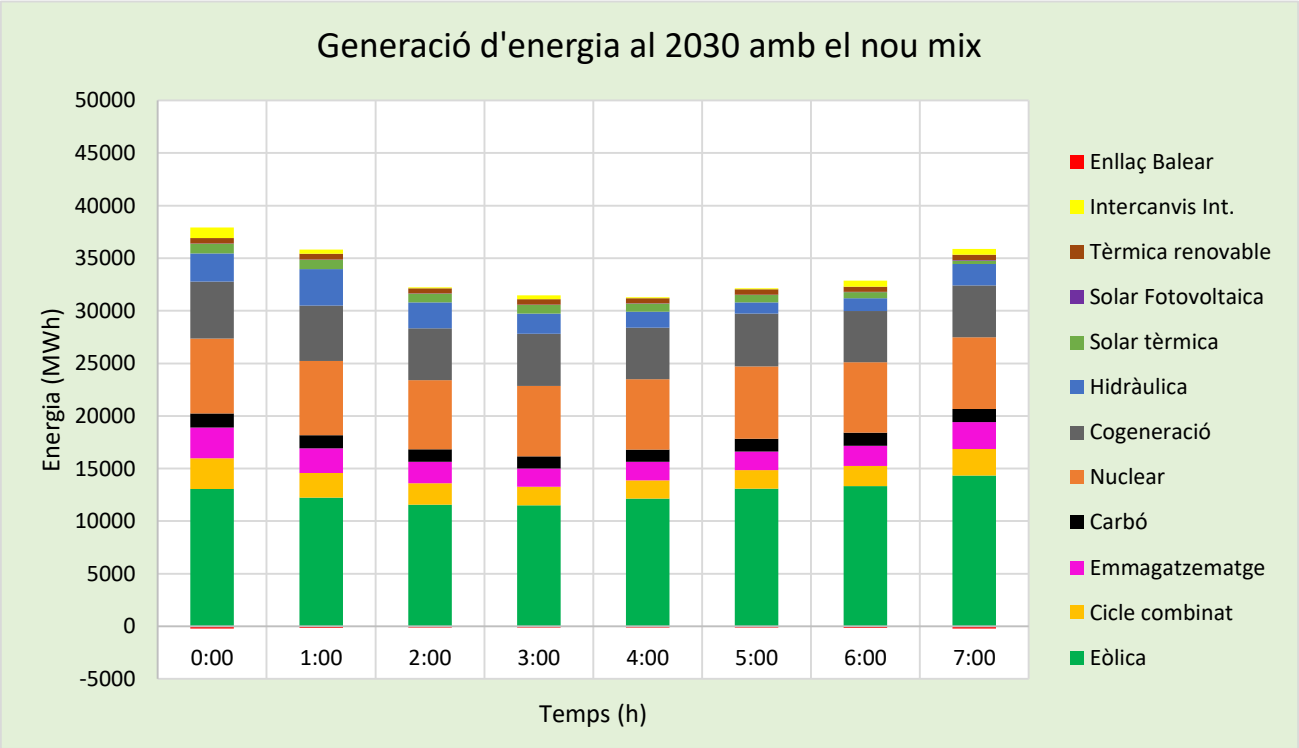

Figura 5.29. Mix energètic al 2030 segons el nou mix en l'escenari de generació 3. (Font: Elaboració pròpia)

Es pot comprovar com la simulació compleix amb els requisits de l'escenari, ja que l'aportació s'ha reduït encara més que en l'escenari 2 i ha entrat al mix l'emmagatzematge amb una energia injectada igual a la del cicle combinat. Amb aquest escenari s'està assegurant que, inclús en els dies en que la generació eòlica és mitjana, els cicles combinats gairebé no augmentin la seva producció i aportin al voltant del 6% de l'energia total injectada.

Un cop demostrada la funcionalitat de la simulació, el següent pas és calcular la capacitat d'emmagatzematge que es necessitarà per poder garantir aquests nivells d'energia. Com s'ha dit anteriorment, l'energia emmagatzemada que s'entregarà durant la nit prové de l'energia solar captada durant el dia. Per tant, la capacitat del sistema de bateries ha de ser prou gran com per assegurar que cada dia es pugui emmagatzemar el total d'energia que surt representat en les gràfiques.

En la simulació, a part de generar les gràfiques, també s'obtenen els valors exactes de l'energia que aporta cada tecnologia en cada hora. En les taules següents es mostren aquests valors per l'emmagatzematge i el seu sumatori.

Aportació energètica de l'emmagatzematge al 2025									
Hora	0:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	**TOTAL**
Energia (GWh)	2,42	1,9	1,73	1,48	1,49	1,52	1,76	2,48	**14,78**

Taula 5.1. Aportació energètica de l'emmagatzematge al 2025 en l'escenari de generació 3.

Aportació energètica de l'emmagatzematge al 2030									
Hora	0:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	**TOTAL**
Energia (GWh)	2,92	2,34	2,04	1,74	1,75	1,77	1,92	2,54	**17**

Taula 5.2. Aportació energètica de l'emmagatzematge al 2030 en l'escenari de generació 3.

Aquests valors signifiquen que el sistema d'emmagatzematge ha de poder aportar cada dia 14,78 GWh al 2025 i 17 GWh al 2030. Com que pel bon funcionament i manteniment de les bateries no es recomana descarregar-les per sota el 20% de la seva capacitat, s'han de sobredimensionar un 20% els valors obtinguts per saber la capacitat d'emmagatzematge real que s'haurà d'instal·lar. La formula de càlcul és la següent:

$$C_{inst,i} = C_{n,i} \cdot 1{,}2 \qquad \textit{(Eq. 5.5)}$$

On $C_{inst,\,i}$ és la capacitat d'emmagatzematge a instal·lar en l'any "i" i $C_{n,\,i}$ la capacitat d'emmagatzematge necessària. Substituint els valors, s'obté:

$$C_{inst,2025} = 14{,}78\ GWh \cdot 1{,}2 = 17{,}73\ GWh$$

$$C_{inst,2030} = 17\ GWh \cdot 1{,}2 = 20{,}4\ GWh$$

Per poder assegurar el funcionament d'aquest escenari, aquests son els valors que hauran d'estar instal·lats en els seus anys corresponents. Cal tenir present que aquesta capacitat instal·lada anirà destinada únicament a entregar energia durant la nit, reduint així l'aportació dels cicles combinats.

Ara que ja s'ha definit la capacitat d'emmagatzematge necessària, es pot calcular l'increment en la potència solar instal·lada que s'ha de dur a terme. Com s'ha explicat, tota l'energia emmagatzemada provindrà de l'energia solar captada durant el dia. Per tant, a la generació actual que fan les centrals solars els dies en que la generació solar és mitjana, se li ha de sumar els valors de capacitat d'emmagatzematge calculats i calcular l'augment necessari en la potencia instal·lada.

El dia tipus per una generació eòlica mitjana és el 4 d'abril del 2019, del qual s'han obtingut anteriorment les dades de generació de totes les tecnologies durant el dia. En aquest dia, les centrals solars van generar 56,82 GWh, que és un nivell de generació energètica solar habitual. La suma d'aquest valor amb la capacitat d'emmagatzematge calculada donarà el total d'energia solar que en un futur les centrals solars han de poder generar per assegurar el funcionament d'aquest escenari. En la taula següent es mostren els resultats de la suma per cada any i el percentatge d'augment que suposa aquest valor respecte l'energia solar generada actualment.

Generació solar		
Any	**Energia solar necessària durant el dia (GWh)**	**Percentatge d'augment (%)**
2025	74,55	31,21
2030	77,22	35,91

Taula 5.3. Energia solar diària necessària al 2025 i 2030 en l'escenari de generació 3.

El percentatge d'augment indica quant s'ha d'incrementar la potència solar instal·lada per l'any corresponent respecte la potència instal·lada a dia d'avui. Per tant, coneixent els valors de la potència instal·lada actual (8913 MW de fotovoltaica i 2304 MW de tèrmica) [7], s'obtenen els valors de les potències instal·lades necessàries pels anys 2025 i 2030 i el seu respectiu augment respecte l'any 2019. En aquest cas s'ha desglossat l'energia solar en fotovoltaica i tèrmica per saber aproximadament quina hauria de ser la seva potència instal·lada.

Potència solar instal·lada per l'any 2025			
	Solar Fotovoltaica	**Solar Tèrmica**	**Solar Total**
Pot instal·lada (GW)	11,69	3,02	14,72
Augment de la Pot instal·lada (GW)	2,78	0,72	3,5

Taula 5.4. Potència solar instal·lada al 2025 en l'escenari de generació 3.

Potència solar instal·lada per l'any 2030			
	Solar Fotovoltaica	**Solar Tèrmica**	**Solar Total**
Pot instal·lada (GW)	15,89	4,11	20
Augment de la Pot instal·lada (GW)	6,98	1,8	8,79

Taula 5.5. Potència solar instal·lada al 2030 en l'escenari de generació 3.

Analitzant els valors de l'augment de potència solar instal·lada, sembla assequible assumir aquests nivells en un futur proper, però fa falta realitzar un estudi econòmic i mediambiental, i comparar-los amb els resultats dels altres escenaris per poder treure unes conclusions adequades.

6. Anàlisi econòmica

En aquest apartat es calcularà quin impacte econòmic tindria implementar cadascun dels tres escenaris, s'estudiarà la viabilitat i es compararan els resultats entre ells. Cal destacar que, com que l'objectiu d'aquest treball no està centrat en l'estudi econòmic, no es detallaran els costos de la instal·lació de les centrals i dels seus materials, mà d'obra... Sinó que s'utilitzaran els preus per GW de potència instal·lada que s'han obtingut d'altres estudis. Cada escenari consta de dos apartats principals en l'àmbit econòmic, que són els costos que tindria la instal·lació de les centrals i l'estalvi que suposaria la substitució d'energia de cicle combinat a energia eòlica.

6.1. Pressupostos de l'Estat Espanyol

Abans de començar a analitzar els costos que tindrà cada escenari, és interessant conèixer els pressupostos que té l'Estat Espanyol per destinar a instal·lacions d'energia renovable. Aquests pressupostos tenen l'objectiu d'oferir ajudes econòmiques a les empreses que volen construir centrals de generació renovable, incentivant d'aquesta manera la transició cap a un mix més renovable. Aquestes dades són públiques i estan representades en el document "Presupuesto por programes y memoria de objetivos. Tomo XIII" [10].

El 27 d'octubre del 2020 es van presentar els Pressupostos Generals de l'Estat per l'any 2021. En aquests, el pressupost del Ministeri per la Transició Ecològica i el Repte Demogràfic serà de 12307 milions d'euros, dels quals 6805 milions provenen del Fons de Recuperació de la Unió Europea. Això suposa un augment del 132% respecte als pressupostos actuals.

Desglossant aquests pressupostos, 9774 milions d'euros estan destinats a la transició energètica justa i inclusiva, dels quals 5390 milions provenen de fons europeus. La quantitat destinada al desenvolupament d'energies renovables, que és la categoria en que entrarien les ajudes pels costos de les centrals eòliques i d'emmagatzematge necessaris pels escenaris, és de 1900 milions d'euros. Agafant aquests 1900 milions d'euros com a pressupost anual de referència per la instal·lació d'energies renovables, es pot calcular que del 2019 al 2025 el pressupost total aproximat serà de 11400 milions d'euros, i del 2025 al 2030 de 9500 milions. Aquests valors serviran per posar en context la magnitud dels resultats que s'obtindran en els costos econòmics de cada escenari.

6.2. Estudi econòmic de l'escenari de generació 1

6.2.1. Costos de l'escenari de generació 1

En l'escenari de generació 1 s'ha calculat que la potència instal·lada d'eòlica necessària per poder-lo dur a terme és de 574,6 GW al 2025 i de 660,6 GW al 2030. Això significa que entre el període de 2019 al 2025, s'hauran d'instal·lar 548,8 GW de potència, i entre el 2025 i el 2030, 85,9 GW. El preu del GW instal·lat en centrals eòliques s'ha obtingut del treball "Disseny d'una central mixta eòlica-fotovoltaica i posterior estudi del reemplaçament d'una central tèrmica per la dissenyada" [11], en el que es parla, entre altres coses, del preu que tindrà la instal·lació de les centrals d'aerogeneradors en un futur. En l'estudi s'explica que aquest preu, fins l'any 2025, serà de 1105 M€/GW instal·lat, i s'anirà reduint fins arribar al 2030 als 1066 M€/GW. Aquests preus són una aproximació dels costos de tot el procés que implica la construcció d'una central eòlica, incloent la mà d'obra, els materials, els permisos...

Un cop obtinguts els preus d'instal·lació, s'apliquen als valors de potència instal·lada de l'escenari i s'obtenen els resultats següents.

Costos per aplicar l'escenari de generació 1			
	Augment de Pot instal·lada (GW)	**Preu del MW instal·lat (M€/GW)**	**Inversió (M€)**
2019 - 2025	548,8	1105	$606 \cdot 10^3$
2025 - 2030	85,9	1066	$91{,}6 \cdot 10^3$
TOTAL			$\mathbf{698 \cdot 10^3}$

Taula 6.1. Costos d'aplicació de l'escenari de generació 1.

Això significa que, per poder aplicar aquest escenari, s'haurien d'invertir $606 \cdot 10^3$ milions d'euros en els pròxims 5 anys en instal·lacions eòliques, més uns $91{,}6 \cdot 10^3$ milions d'euros en els següents 5 anys. Aquests valors són molt elevats, tenint en compte que l'escala de magnitud dels pressupostos destinats a ajudar en la inversió de centrals renovables serà aproximadament de $11{,}4 \cdot 10^3$ milions d'euros entre el 2019 i el 2025, i de $9{,}5 \cdot 10^3$ milions del 2025 al 2030.

6.2.2. Estalvi de l'escenari de generació 1

L'energia generada a través de cicle combinat és més cara que l'energia eòlica; això es deu sobretot a que les centrals de cicle combinat necessiten comprar combustible per poder-lo cremar i així generar l'electricitat. Aquestes centrals utilitzen gas natural com a combustible, i el fet de necessitar comprar-lo implica una diferència de preu respecte l'energia "gratis" de les centrals eòliques. Per tant, el fet de

substituir energia generada per cicle combinat per energia eòlica, crea un estalvi econòmic que s'ha de tenir en compte.

El primer pas per obtenir aquest estalvi és el càlcul de l'energia de cicle combinat que es deixarà de generar. Aquesta dada s'obté amb el programa creat per fer les simulacions dels escenaris, però aquesta vegada en comptes d'introduir inicialment les dades de la demanda elèctrica màxima, introduint les dades de la demanda mitjana. Aquest canvi permetrà obtenir els valors de l'energia que generaria de mitjana cada tipus de tecnologia diàriament amb el nou mix i amb el mix actual. Restant el valor d'energia generada per cicle combinat amb el mix actual menys el del nou mix s'obtindrà la quantitat d'energia estalviada en els anys 2025 i 2030.

Com que la implementació dels escenaris no serà immediata en el temps, s'ha establert un creixement lineal entre els anys 2019 i 2025, i 2025 i 2030. És a dir, partint de l'inici en que al 2019 l'estalvi d'energia generada per cicle combinat és zero, aquest estalvi anirà augmentant linealment fins a arribar al valor d'estalvi exacte obtingut en la simulació, i el mateix passarà en el període del 2025 al 2030. En la següent gràfica es pot veure l'evolució que tindrà l'estalvi d'energia generada per cicle combinat diari en els tres escenaris.

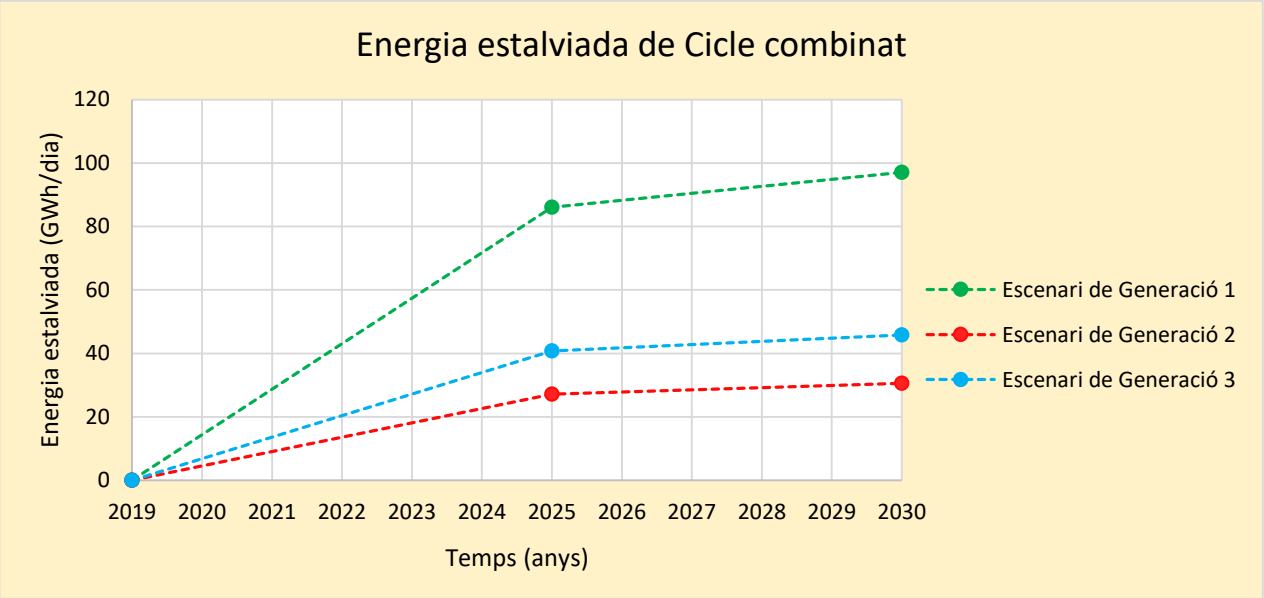

Figura 6.1. Energia de cicle combinat estalviada segons els diferents escenaris de generació. (Font: Elaboració pròpia)

Un cop obtinguts els valors de l'estalvi energètic, el següent pas és determinar el preu que tindrà cada any el gas natural i la relació que tindrà aquest amb cada unitat energètica generada. Els valors dels preus s'han obtingut de l'informe estadístic anual de 2019 la corporació CORES [12], en el qual es mostren les dades més importants relacionades amb el petroli i el gas natural a nivell mundial i nacional en el 2019. L'informe exposa l'evolució del preu del gas natural en relació amb l'energia generada en els últims quatre anys. Com que l'objectiu és fer una projecció del preu que tindrà el gas natural fins al 2030, s'ha calculat la tendència lineal que ha tingut el preu del gas natural en els últims quatre anys i s'ha extrapolat fins l'any 2030, obtenint d'aquesta manera el preu per cada any d'estudi. Aquesta projecció del preu es veu representada en la gràfica següent.

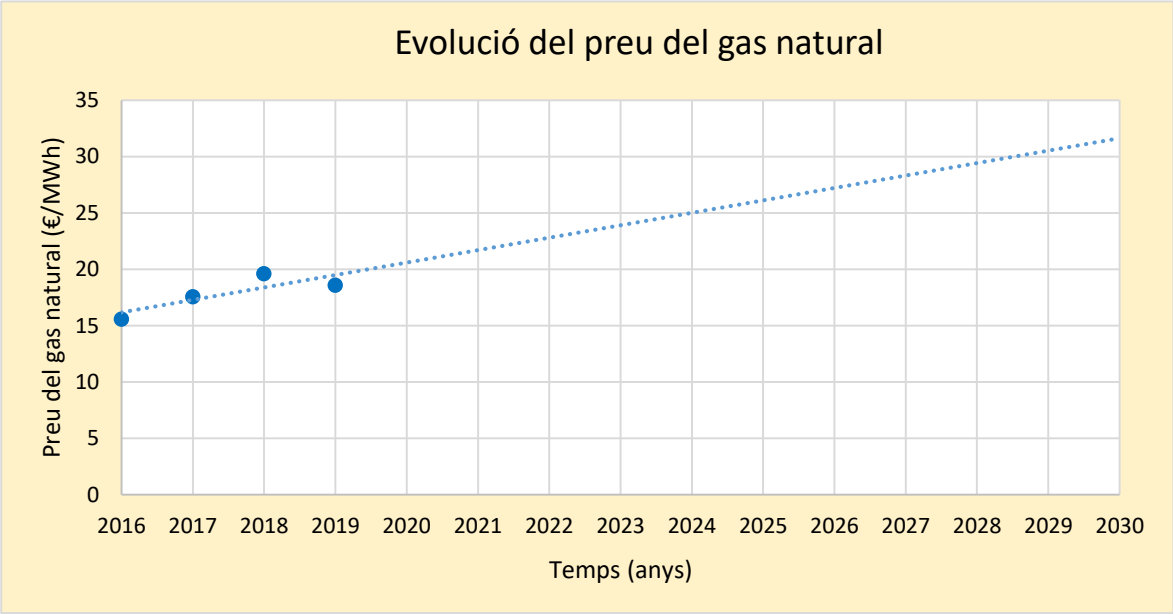

Figura 6.2. Projecció del preu del gas natural. (Font: Elaboració pròpia)

Tenint el preu anual del gas natural i l'energia de cicle combinat que s'estalviarà en aquest escenari, es pot calcular l'estalvi econòmic anual. Tot seguit es mostren els resultats.

	Preu gas natural (M€/GWh)	Energia estalviada (GWh/any)	Estalvi (M€)
2019	0,019	0	0
2020	0,02	$5 \cdot 10^3$	103
2021	0,022	$10,3 \cdot 10^3$	222
2022	0,023	$15,5 \cdot 10^3$	352
2023	0,024	$20,7 \cdot 10^3$	494
2024	0,025	$26 \cdot 10^3$	647
2025	0,026	$31,2 \cdot 10^3$	812
2026	0,027	$32,2 \cdot 10^3$	873

2027	0,028	$33 \cdot 10^3$	931
2028	0,029	$33{,}8 \cdot 10^3$	991
2029	0,03	$34{,}6 \cdot 10^3$	1052
2030	0,032	$35{,}4 \cdot 10^3$	1116
2019 - 2025			2631
2025-2030			4962
TOTAL			**7594**

Taula 6.2. Estalvi econòmic anual de l'escenari de generació 1.

Com es pot apreciar, en aquest escenari l'estalvi per deixar de consumir gas natural serà aproximadament de 2631 milions d'euros del 2019 al 2025 i de 4962 milions en els següents cinc anys. Com que tant el preu del gas natural com l'energia estalviada augmenten progressivament en el temps, cada any l'estalvi econòmic serà més elevat. En total, des de l'actualitat fins al 2030 s'estalviaran uns 7594 milions d'euros.

6.2.3. Balanç econòmic de l'escenari de generació 1

El balanç econòmic consisteix en el sumatori dels estalvis menys els costos que tindria un escenari en concret. Serveix per veure realment com afectaria realment a l'economia la implementació d'un escenari. La formula per calcular el balanç econòmic és la següent.

$$B_e = \sum E_e - \sum C_i \qquad \textit{(Eq. 6.1)}$$

On B_e és el balanç econòmic, E_e l'estalvi econòmic i C_i els costos d'inversió. Per tant, si el balanç té un valor negatiu, significa que els costos són més grans que l'estalvi i que es perdran diners per poder posar en marxa l'escenari. Substituint els valors, s'obté:

$$B_e = \sum 7594\ M€ - \sum 698 \cdot 10^3\ M€ = -690470\ M€$$

La implementació de l'escenari de generació 1 representarà unes pèrdues de 690470 milions d'euros fins l'any 2030.

6.3. Estudi econòmic de l'escenari de generació 2

6.3.1. Costos de l'escenari de generació 2

En l'escenari 2, la potència eòlica instal·lada necessària és molt menor que la de l'escenari anterior, amb uns valors de 43,6 GW per l'any 2025 i de 51,9 GW pel 2030. Per arribar a aquests valors, del 2019 al 2025 s'hauran d'instal·lar 17,8 GW i del 2025 al 2030, 8,3 GW. Els preus d'instal·lació per una central eòlica són els mateixos que en l'apartat anterior, i es poden veure representats en la taula següent juntament amb els costos totals que suposaria la instal·lació de les centrals.

Costos per aplicar l'escenari de generació 2			
	Augment de Pot instal·lada (GW)	**Preu del MW instal·lat (M€/GW)**	**Inversió (M€)**
2019 - 2025	17,8	1105	19637
2025 - 2030	8,4	1066	8895
TOTAL			**28532**

Taula 6.3. Costos d'aplicació de l'escenari de generació 2.

Per tant, la inversió que s'hauria de fer entre el 2019 i el 2025 seria de 19637 milions d'euros, i del 2025 al 2030 de 8895 milions, suposant una inversió total de 28532 milions d'euros. Aquests valors son molt inferiors als de l'escenari anterior, i són més viables tenint en compte l'escala de magnitud dels pressupostos.

6.3.2. Estalvi de l'escenari de generació 2

En l'escenari anterior s'ha obtingut, a partir d'una simulació, l'energia generada per cicle combinat que s'estalviarà anualment en cada escenari. Com que el preu mitjà anual que tindrà el gas natural és el mateix pels tres escenaris, ja es tenen totes les dades per calcular l'estalvi econòmic de l'escenari 2. Els resultats es mostren en la taula següent.

	Preu gas natural (M€/GWh)	Energia estalviada (GWh/any)	Estalvi (M€)
2019	0,019	0	0
2020	0,02	$1,7 \cdot 10^3$	34
2021	0,022	$3,3 \cdot 10^3$	72
2022	0,023	$5 \cdot 10^3$	113
2023	0,024	$6,6 \cdot 10^3$	158
2024	0,025	$8,3 \cdot 10^3$	207
2025	0,026	$9,9 \cdot 10^3$	259
2026	0,027	$10,2 \cdot 10^3$	277
2027	0,028	$10,4 \cdot 10^3$	295
2028	0,029	$10,7 \cdot 10^3$	316
2029	0,03	$10,9 \cdot 10^3$	333
2030	0,032	$11,2 \cdot 10^3$	353
2019 - 2025			843
2025-2030			1571
TOTAL			**2414**

Taula 6.4. Estalvi econòmic anual de l'escenari de generació 2.

En aquest escenari, l'estalvi per deixar de consumir gas natural com a combustible energètic serà de 843 milions d'euros des de l'actualitat fins al 2025 i de 1571 milions del 2025 al 2030. En total suposarà un estalvi de 2414 milions d'euros fins l'any 2030.

6.3.3. Balanç econòmic de l'escenari de generació 2

Aplicant a la formula del balanç econòmic els valors dels costos d'inversió i de l'estalvi econòmic obtinguts en aquest escenari, s'obté:

$$B_e = \sum E_e - \sum C_i \qquad \textit{(Eq. 6.1)}$$

$$B_e = \sum 2414\ M€ - \sum 28532\ M€ = -26118\ M€$$

Això significa que la implementació de l'escenari de generació 2 tindrà unes pèrdues de 26118 milions d'euros fins l'any 2030.

6.4. Estudi econòmic de l'escenari de generació 3

6.4.1. Costos de l'escenari de generació 3

En l'escenari de generació 3, a part d'augmentar la potència eòlica instal·lada, també és necessari l'augment en potència solar i capacitat d'emmagatzematge. La potència eòlica instal·lada al 2025 ha de ser de 43,6 GW, suposant un augment del 2019 al 2025 de 17,8 GW, i al 2030 ha de ser de 51,9 GW, requerint un augment del 2025 al 2030 de 8,3 GW.

Pel que fa a la potència solar instal·lada, ha d'arribar a uns valors de 14,7 GW al 2025 i de 20 GW al 2030. Això significa augmentar en 3,5 GW la potència instal·lada entre el 2019 i el 2025, i en 5,3 GW del 2025 al 2030. El preu que té el GW instal·lat de potència eòlica s'ha obtingut de l'article "Trends in Photovoltaic Aplications", realitzat per l'Agencia Internacional de l'Energia (IEA), on es realitza un estudi del camí que seguirà el mercat de les tecnologies de captació solar en els diferents països [13]. En el document s'explica que a Espanya, en un futur proper, el preu del GW instal·lat per centrals solar estarà entre 620 i 750 milions d'euros. Per tant, s'ha escollit el valor mitjà de 680 M€/GW per aplicar en l'estudi.

En quant als sistemes d'emmagatzematge, la seva capacitat instal·lada ha d'augmentar 17,7 GWh del 2019 al 2025 i 2,7 GWh del 2025 al 2030. Com s'ha explicat anteriorment, la tecnologia d'emmagatzematge escollida per l'estudi són les bateries de liti. El preu que tindrà la instal·lació d'aquest tipus de bateries s'ha extret de l'article "The future cost of electrical energy storage based on experience rates", en el que s'analitza la projecció dels costos de les tecnologies d'emmagatzematge en els propers anys [9]. En el document s'especifica que el cost d'instal·lació de les bateries de liti serà de 700 milions d'euros per GWh al 2025 i que fins al 2030 es reduirà fins als 450 milions d'euros per GWh. En la següent taula es mostren els detalls de la inversió que requereix l'escenari de generació 3 per poder-se aplicar.

Costos per aplicar l'escenari de generació 3				
	Tecnologia	**Augment de Pot inst (GW)**	**Preu del MW inst (M€/GW)**	**Inversió (M€)**
2019 - 2025	Eòlica	17,8	1105	19637
	Solar	14,7	680	10008
	Emmagatzematge	17,7	700	12414
	TOTAL 2019 - 2025			**42059**
2025 - 2030	Eòlica	8,3	1066	8895
	Solar	5,3	680	3594
	Emmagatzematge	2,7	450	1202
	TOTAL 2025 - 2030			**13691**
TOTAL 2019 - 2030				**55750**

Taula 6.5. Costos d'aplicació de l'escenari de generació 3.

Com es pot apreciar, el cost total que tindria la implementació de l'escenari de generació 3 seria de 55750 milions d'euros, dividint-se entre una inversió de 42059 milions d'euros entre el 2019 i el 2025 i de 13691 milions en els següents 5 anys.

6.4.2. Estalvi de l'escenari de generació 3

El fet d'augmentar la potència solar instal·lada i la capacitat d'emmagatzematge no afecta al procediment del càlcul de l'estalvi econòmic utilitzat en els escenaris anteriors, ja que els únics valors que s'han de tenir en compte són el preu del gas natural i l'estalvi energètic de cicle combinat. Els resultats de l'estalvi es mostren en la taula següent.

	Preu gas natural (M€/GWh)	Energia estalviada (GWh/any)	Estalvi (M€)
2019	0,019	0	0
2020	0,02	$2,6 \cdot 10^3$	54
2021	0,022	$5,1 \cdot 10^3$	111
2022	0,023	$7,6 \cdot 10^3$	173
2023	0,024	$10,1 \cdot 10^3$	240
2024	0,025	$12,6 \cdot 10^3$	313
2025	0,026	$15,1 \cdot 10^3$	392
2026	0,027	$15,2 \cdot 10^3$	413
2027	0,028	$15,6 \cdot 10^3$	440
2028	0,029	$16 \cdot 10^3$	468
2029	0,03	$16,3 \cdot 10^3$	497
2030	0,032	$16,7 \cdot 10^3$	527
2019 - 2025			1282
2025-2030			2345
TOTAL			**3627**

Taula 6.6. Estalvi econòmic anual de l'escenari de generació 3.

En aquest escenari, l'estalvi per la reducció d'energia generada per cicle combinat seria de 1282 milions d'euros entre el 2019 i el 2025, i de 2345 milions d'euros entre el 2025 i el 2030; això suposa un estalvi econòmic de 3627 milions d'euros en els pròxims 10 anys.

6.4.3. Balanç econòmic de l'escenari de generació 3

Substituint els valors dels costos d'inversió i de l'estalvi econòmic en la formula del balanç econòmic, s'obté:

$$B_e = \sum E_e - \sum C_i \qquad \textbf{\textit{(Eq. 6.1)}}$$

$$B_e = \sum 3627\ M€ - \sum 55750\ M€ = -52122\ M€$$

La implementació de l'escenari de generació 3 suposaria unes pèrdues de 52122 milions d'euros fins l'any 2030.

7. Anàlisi de l'impacte ambiental

Un dels aspectes més interessants sobre la implantació del vehicle elèctric en la societat és el seu impacte sobre el medi ambient. Abans d'analitzar quins efectes tindrà la implementació de cada escenari de generació en el planeta, s'estudiarà la manera en que es reduiran les emissions de CO_2 degut a la substitució dels vehicles de combustió per vehicles elèctrics, que és un factor comú en els tres escenaris i que els afectarà de la mateixa forma.

7.1. Conseqüències mediambientals de la substitució de vehicles de combustió per vehicles elèctrics

A diferència dels VC, els VE no emeten partícules contaminant en la seva conducció, ja que el motor utilitza l'energia elèctrica que es troba en la bateria i la transforma en energia mecànica. Tot i això, que no emeti partícules contaminants en el moment del desplaçament no significa que el vehicle elèctric no tingui efectes perjudicials pel el medi ambient; això es deu a que l'electricitat que consumeix el VE s'ha generat en centrals que poden tenir emissions de CO_2 o no. Aquestes emissions associades a l'energia consumida depenen del mix energètic que tingui la xarxa del lloc que subministra electricitat al vehicle; a major participació en el mix de les centrals que emeten gasos d'efecte hivernacle, major emissió tindrà associat l'ús del vehicle elèctric.

En el mix de generació que hi ha actualment aproximadament un 40% és renovable, fet que provoca que els VE redueixin un 65% les emissions d'efecte hivernacle en comparació amb els VC [2]. Si es comparen les emissions de CO_2 per quilòmetre recorregut, els vehicles elèctrics emetrien 36,1 gCO_2/km, respecte als 114,4 gCO_2/km dels vehicles convencionals; aquestes emissions del VE entren dins les restriccions que es van marcar en l'àmbit europeu per l'any 2030, que eren de 47,5 gCO_2/km [14]. S'ha de tenir en compte que les emissions que genera el VE s'alliberen en la ubicació en que es trobin les centrals, cosa que implica que el vehicle en si no emet partícules contaminants en el seu recorregut; per tant, la transició dels vehicles de combustió cap als elèctrics millorarà la qualitat de l'aire de les ciutats, fet molt important ja que segons l'OMS, cada any es produeixen en països europeus al voltant de 400 mil morts prematures per la mala qualitat de l'aire [15].

A les ciutats no només milloraria la qualitat de l'aire, sinó que també es reduiria la contaminació acústica, ja que el vehicle elèctric no emet sorolls i actualment un 80% de la contaminació acústica és generada pel tràfic [2].

Amb les dades de les emissions per quilòmetre que emeten tant els VE com els VC, es poden calcular les emissions anuals de CO_2 que hi haurà fins l'any 2030. Per fer-ho, s'utilitzen les dades resultants de

l'evolució que tindrà el nombre de vehicles a Espanya calculades anteriorment. La formula per obtenir les emissions de CO_2 reals és la següent:

$$E_{TOT,i} = n_{VE,i} \cdot E_{VE} + n_{VC,i} \cdot E_{VC} \qquad \textbf{(Eq. 7.1)}$$

On $E_{TOT,i}$ són les emissions totals per un any "i", $n_{VE,i}$ $n_{VC,i}$ són el nombre de VE i VC que hi haurà en un any "i", i E_{VE} i E_{VC} són les emissions per quilòmetre associades als VE i VC, que són constants al llarg dels anys.

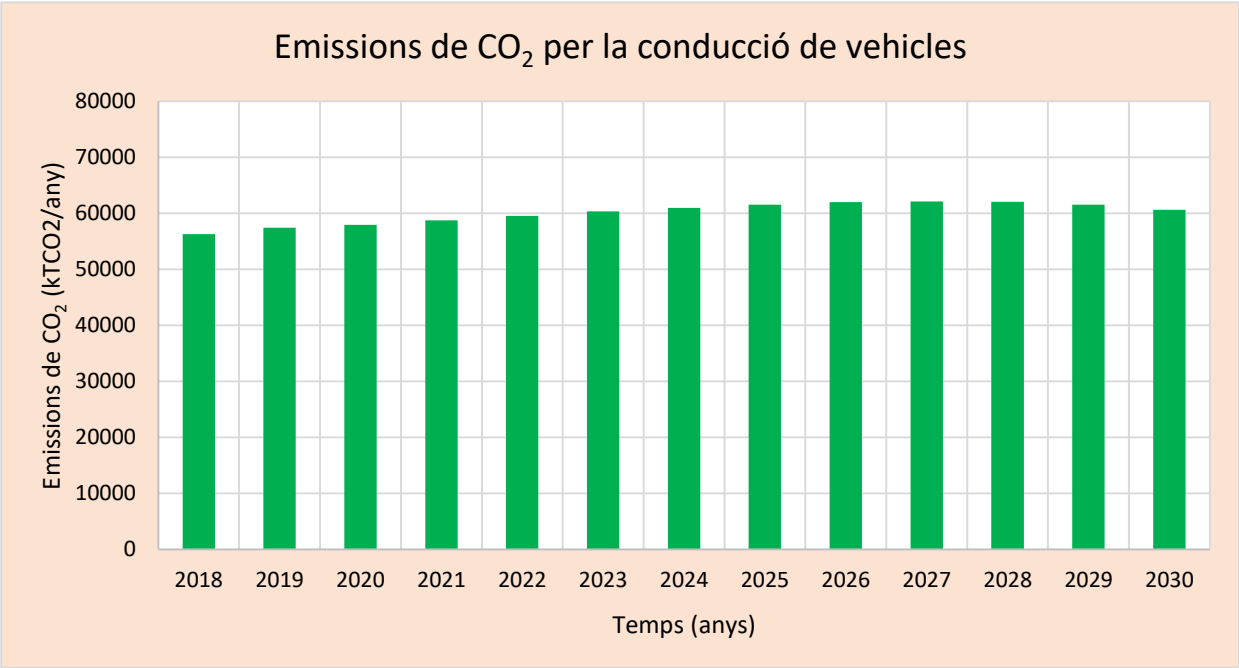

Figura 7.1. Projecció de les emissions de CO_2 degudes a la conducció . (Font: Elaboració pròpia)

Es pot apreciar com les emissions de CO_2 causades per la conducció de vehicles a Espanya anirà augmentant en els pròxims 10 anys fins arribar a un valor pic l'any 2027, a partir del qual començaran a disminuir. Això es deu a la substitució de VC per VE, que entre l'any 2027 i 2030 serà prou gran com per suposar una reducció de les emissions. S'observa com creixement exponencial del nombre de vehicles elèctrics provocarà que el ritme d'augment de les emissions anuals es redueixi, ja que als primers anys la tendència de creixement de les emissions és més vertical que en els últims anys.

Un cop calculades les emissions reals que hi haurà, un altre estudi important és el de l'estalvi anual d'emissions que suposarà l'augment del nombre de VE. Un dels principals beneficis mediambientals de la substitució dels vehicles de combustió per vehicles elèctrics és que es deixarà d'emetre anualment una quantitat de CO_2 a l'atmosfera. Aquest estalvi anual es calcula amb la formula següent:

$$Es_i = E_{C,i} - E_{TOT,i} \qquad \textbf{(Eq. 7.2)}$$

On Es_i és l'estalvi d'emissions de CO_2 en un any "i" i $E_{C,i}$ són les emissions que hi hauria en un hipotètic escenari en que no hi haguessin vehicles elèctrics i tots fossin de combustió. Aquestes emissions es calculen de la següent manera:

$$E_{C,i} = (n_{VC,i} + n_{VE,i}) \cdot E_{VC} \qquad \textbf{(Eq. 7.3)}$$

Els resultats de les operacions es mostren en la gràfica següent.

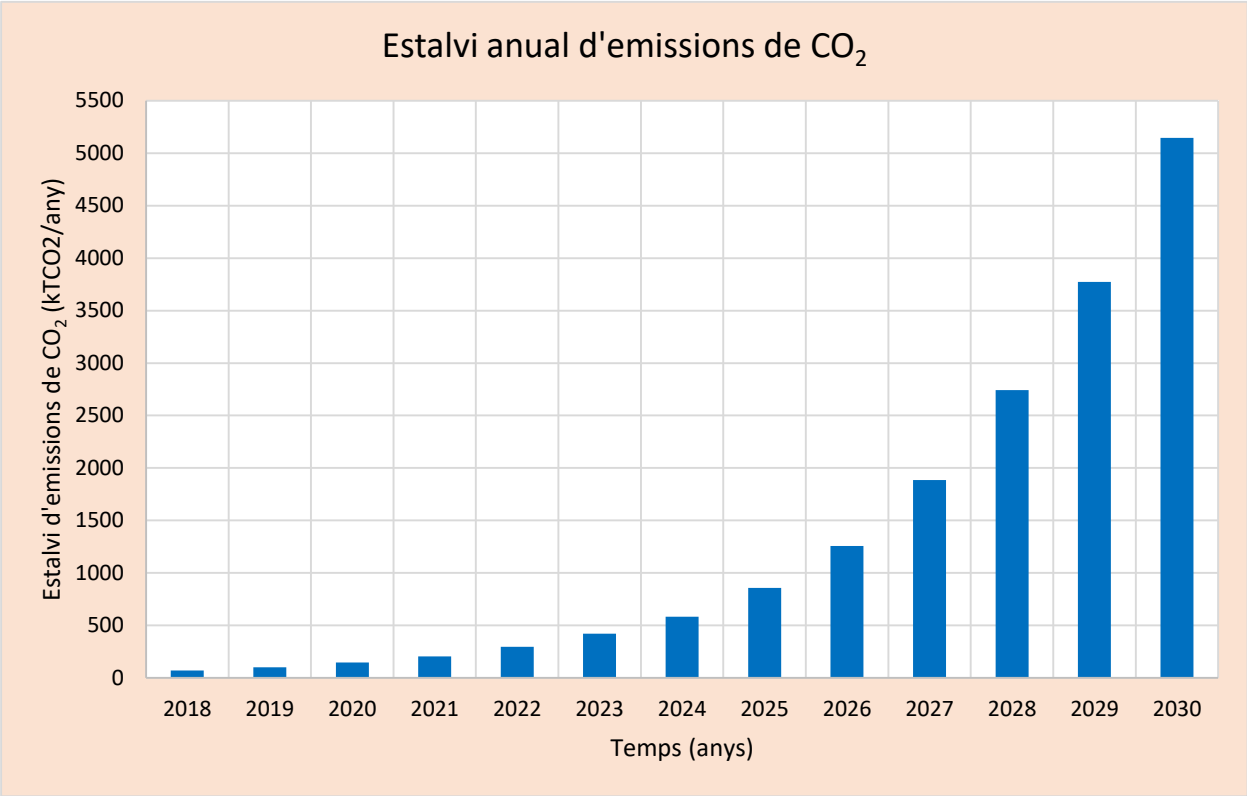

Figura 7.2. Projecció de l'estalvi d'emissions de CO_2 degut a l'augment de VE. (Font: Elaboració pròpia)

L'estalvi d'emissions de CO_2 tindrà un creixement exponencial, provocat pel creixement també exponencial que tindran els VE. Durant els primers anys l'estalvi de les emissions no serà massa notori, del voltant de les 200 kT de CO_2 a l'any, però el creixement farà que arribi a uns nivells de més de 5000 kT de CO_2 estalviades per l'any 2030.

Per tenir una idea més clara sobre la reducció en les emissions que provocaran els VE i com serien aquestes emissions si tots els vehicles fossin de combustió, s'ha realitzat una gràfica on es comparen les emissions dels dos casos.

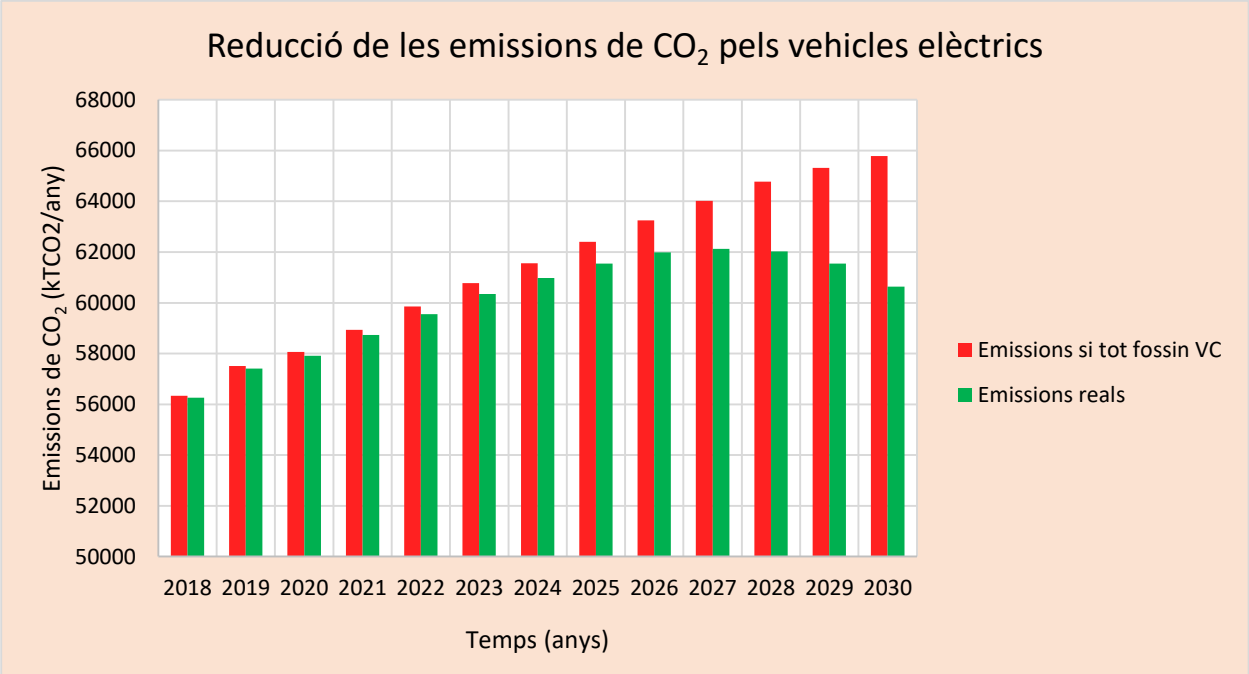

Figura 7.3. Reducció de les emissions de CO_2 degudes a l'augment de VE. (Font: Elaboració pròpia)

En la gràfica es pot apreciar com, gràcies als VE, el ritme de creixement de les emissions s'anirà reduint fins arribar a un valor màxim l'any 2027, a partir del qual es començaran a disminuir anualment; es pot apreciar la diferència amb les emissions que hi haurien si tots els vehicles fossin de combustió, que tindrien un creixement lineal i sense fi.

En la següent taula es resumeixen les dades més importants sobre les emissions de CO_2 causades per la conducció dels vehicles, agrupades en els períodes de 2019 a 2025 i de 2025 a 2030.

	Emissions de CO_2 ($kTCO_2$)	**Estalvi d'emissions de CO_2 ($kTCO_2$)**
2019 – 2025	$416 \cdot 10^3$	$2{,}6 \cdot 10^3$
2025 – 2030	$308 \cdot 10^3$	$14{,}8 \cdot 10^3$

Taula 7.1. Emissions i estalvi de CO_2 degut a l'augment de VE.

7.2. Estudi mediambiental dels escenaris de generació

En els escenaris de generació es modifica el mix de generació elèctrica a Espanya, per tant, els resultats de les conseqüències mediambientals de l'apartat anterior afectaran als escenaris de la mateixa forma.

Un altre factor comú entre els tres escenaris i molt determinant mediambientalment parlant és la substitució d'energia generada mitjançant cicle combinat per energia generada amb fonts renovables. Com s'ha comentat en l'explicació de les tecnologies, el cicle combinat utilitza combustibles fòssils per generar energia elèctrica; d'entre els combustibles més habituals es troba el gas natural, el qual emet diòxid de carboni quan es crema. Per tant, la implementació de cada escenari portarà associat un estalvi d'emissions de CO_2 a l'atmosfera diferent segons el paper que juguin les centrals de cicle combinat.

Per calcular aquest estalvi són necessàries dues dades; la primera és la quantitat d'energia que el cicle combinat deixarà de generar diàriament en cada escenari. Aquesta dada s'ha obtingut en l'apartat de l'estudi econòmic.

La segona dada que es necessita son les emissions de CO_2 equivalent per cada kWh d'energia produïda per cicle combinat. Aquesta dada l'ofereix la base de dades de la web de Red Eléctrica, que estableix un valor de 0,39 TCO_2/GWh generat. Encara que en els escenaris la generació eòlica i solar augmenta, com que no emeten CO_2 en el seu procés de generació d'energia, no s'ha d'obtenir cap altre valor. Un cop obtinguda aquesta dada, ja es pot començar l'estudi mediambiental de cada escenari.

7.2.1. Estudi mediambiental de l'escenari de generació 1

L'escenari de generació 1 és el més ambiciós a l'hora de substituir la generació de cicle combinat per generació eòlica; per tant, l'estalvi de diòxid de carboni que es fa en aquest escenari hauria de ser el més gran dels tres.

Com s'ha explicat, multiplicant l'energia estalviada anualment de cicle combinat per les emissions de CO_2 associades a cada unitat d'energia generada, s'obtenen les emissions de diòxid de carboni anuals, que es poden veure representades en la gràfica següent.

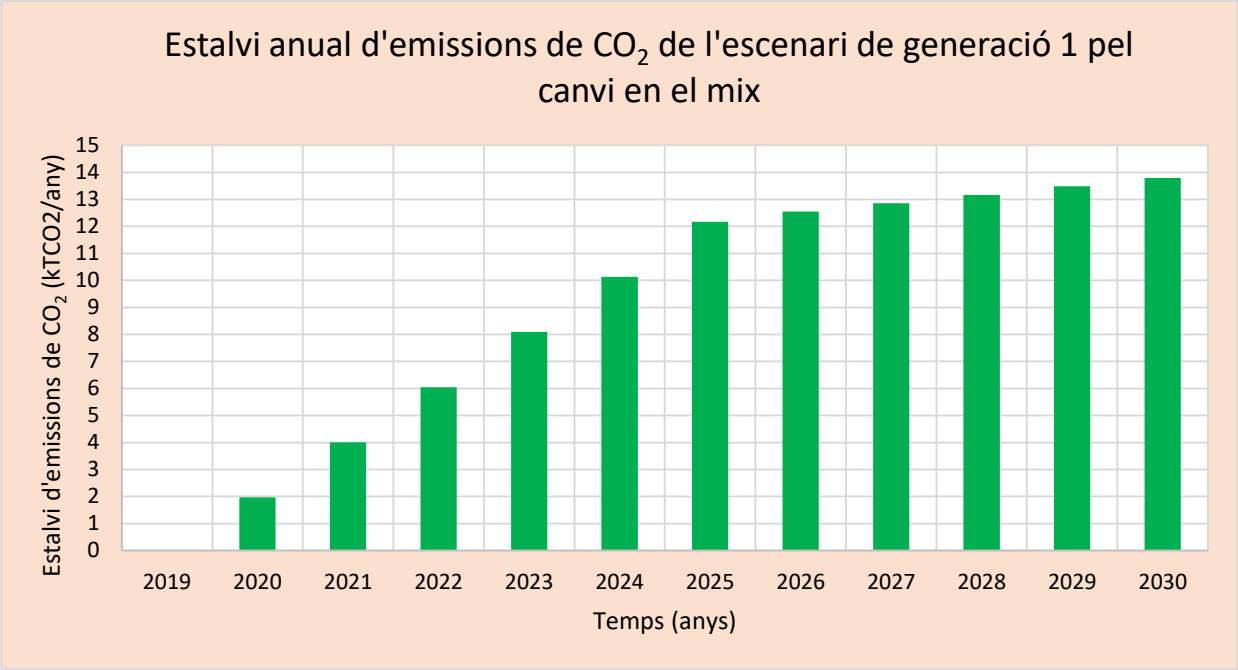

Figura 7.4. Estalvi d'emissions de CO_2 degut al canvi del mix en l'escenari de generació 1. (Font: Elaboració pròpia)

Com es pot observar, el creixement de l'estalvi és molt més accentuat entre el 2019 i el 2025, i redueix la pendent en els següents 5 anys. Això es deu a que l'increment de potència eòlica instal·lada que s'haurà de fer entre el 2019 i el 2025 és molt més gran que el del 2025 al 2030; per tant, la diferència anual de potència eòlica instal·lada en els primers cinc anys serà major, fet que incideix directament amb l'estalvi d'emissions de CO_2. Es pot apreciar com al 2030, s'arribaran a estalviar gairebé 14 kT de CO_2 anuals.

A continuació es mostren els valors de l'estalvi en els períodes del 2019 al 2025 i del 2025 al 2030 a causa del canvi en el mix de generació.

	Emissions estalviades ($kTCO_2$ eq)
2019 - 2025	30
2025 - 2030	78
TOTAL	**108**

Taula 7.2. Estalvi d'emissions de CO_2 degut al canvi del mix en l'escenari de generació 1.

Si a aquests valors se'ls hi afegeix l'estalvi d'emissions produït per l'increment de vehicles elèctrics, s'obté el valor de l'estalvi d'emissions real de l'escenari.

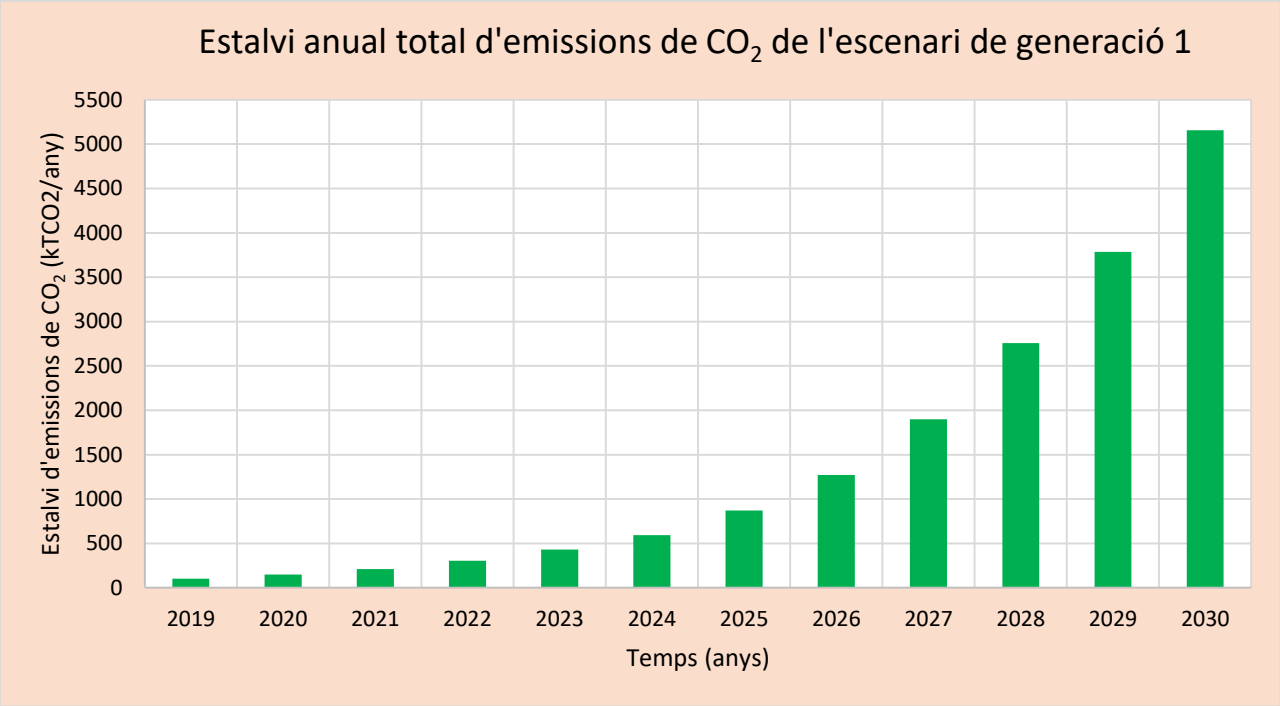

Figura 7.5. Estalvi total d'emissions de CO_2 en l'escenari de generació 1. (Font: Elaboració pròpia)

	Emissions estalviades ($kTCO_2$ eq)
2019 - 2025	$2{,}6 \cdot 10^3$
2025 - 2030	$14{,}9 \cdot 10^3$
TOTAL	$\mathbf{17{,}5 \cdot 10^3}$

Taula 7.3. Estalvi total d'emissions de CO_2 en l'escenari de generació 1.

7.2.2. Estudi mediambiental de l'escenari de generació 2

En el segon escenari, al reduir l'aportació de l'energia eòlica, l'estalvi d'energia generada per cicle combinat és menor que en l'escenari anterior; multiplicant aquest estalvi energètic per les emissions de CO_2 associades, s'obtenen els resultats següents.

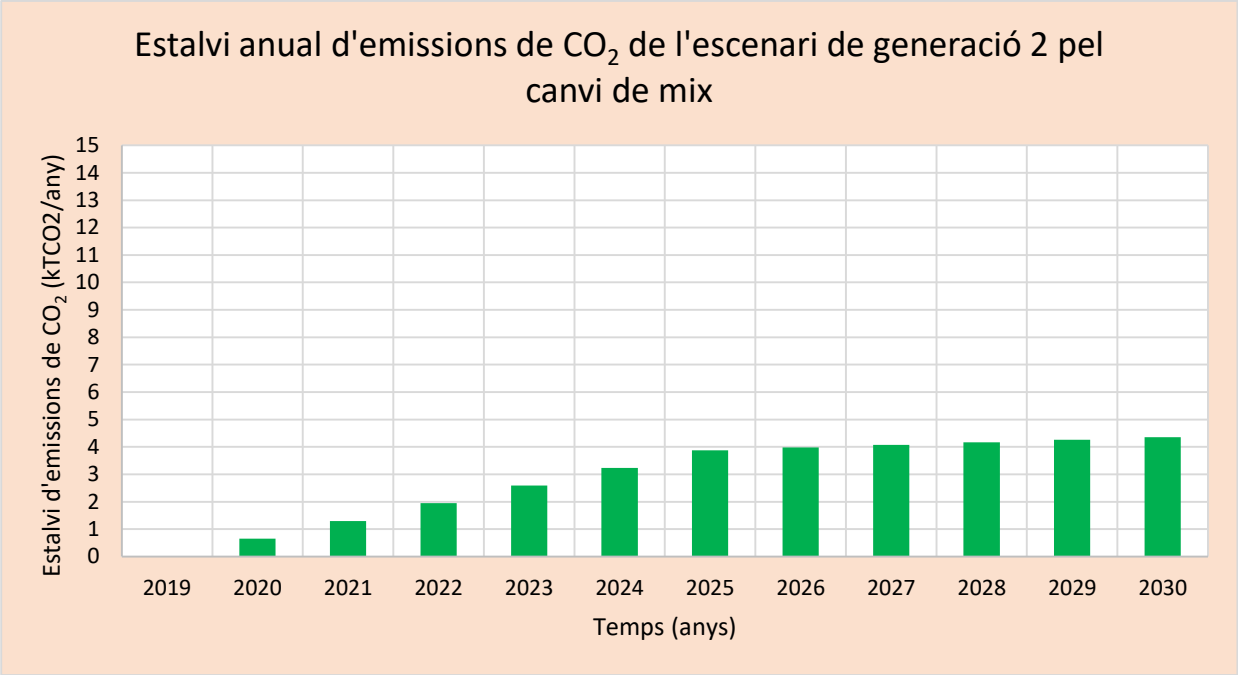

Figura 7.6. Estalvi d'emissions de CO_2 degut al canvi del mix en l'escenari de generació 2. (Font: Elaboració pròpia)

Els valors de l'estalvi són molt més baixos que els de l'escenari anterior, arribant a l'any 2030 a estalviar 4 kT de CO_2.

En la taula següent es mostren els valors de l'estalvi en els períodes del 2019 al 2025 i del 2025 al 2030 a causa del canvi en el mix de generació.

	Emissions estalviades ($kTCO_2$ eq)
2019 - 2025	10
2025 - 2030	25
TOTAL	**34**

Taula 7.4. Estalvi d'emissions de CO_2 degut al canvi del mix en l'escenari de generació 2.

Afegint aquests valors a l'estalvi d'emissions per conducció de VE, s'obtenen les emissions de CO_2 totals.

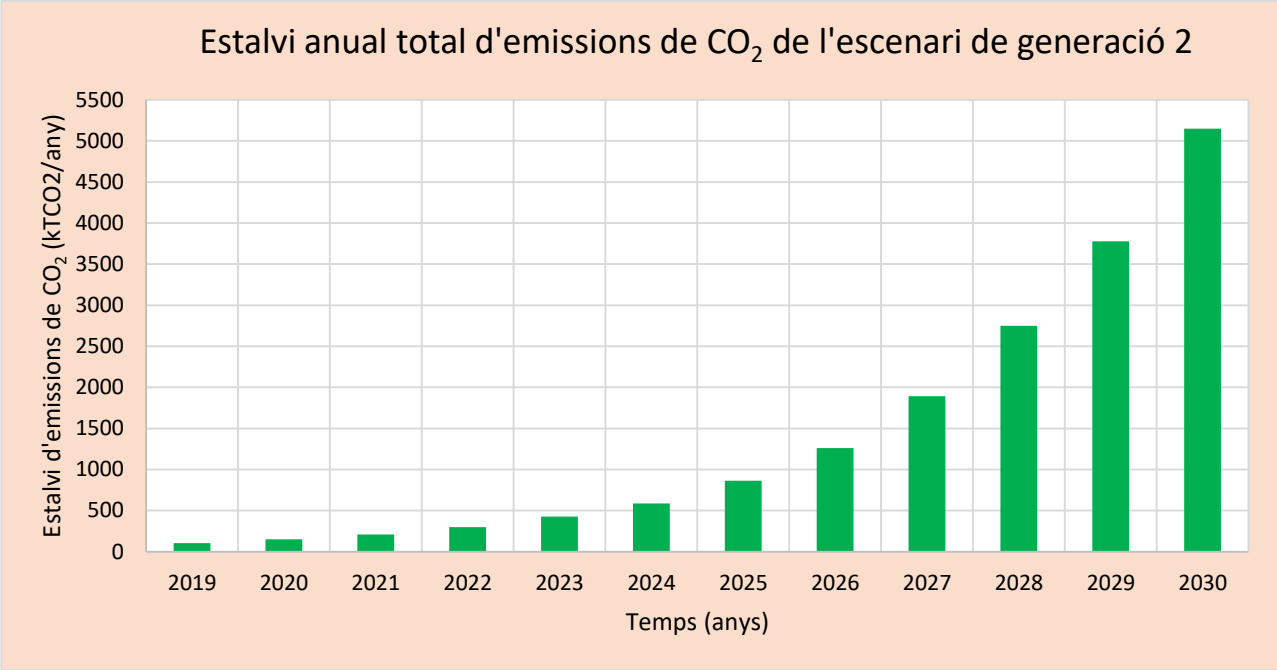

Figura 7.7. Estalvi total d'emissions de CO_2 en l'escenari de generació 2. (Font: Elaboració pròpia)

	Emissions estalviades ($kTCO_2$ eq)
2019 - 2025	$2{,}6 \cdot 10^3$
2025 - 2030	$14{,}8 \cdot 10^3$
TOTAL	$\mathbf{17{,}5 \cdot 10^3}$

Taula 7.5. Estalvi total d'emissions de CO_2 en l'escenari de generació 2.

7.2.3. Estudi mediambiental de l'escenari de generació 3

Per acabar, el tercer escenari, amb la implementació dels sistemes d'emmagatzematge d'energia solar redueix l'aportació que fa el cicle combinat en l'escenari 2, que es tradueix en un estalvi més gran d'emissions de CO_2.

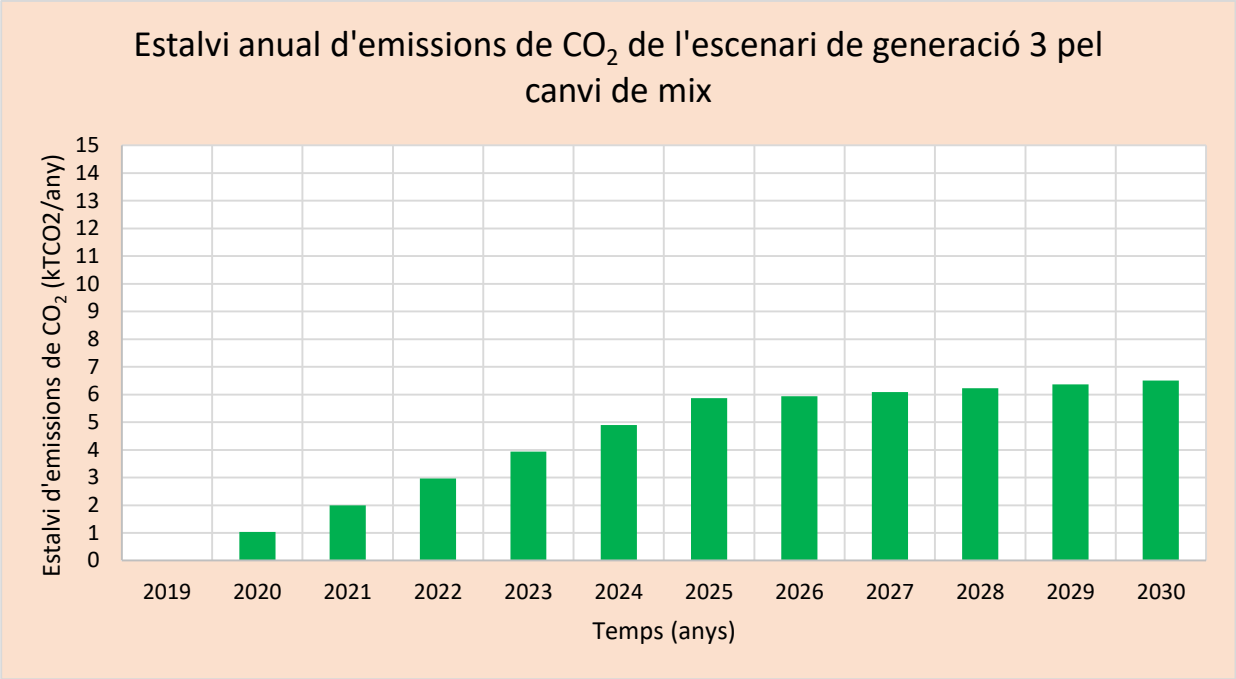

Figura 7.8. Estalvi d'emissions de CO_2 degut al canvi del mix en l'escenari de generació 3. (Font: Elaboració pròpia)

Es pot observar en la gràfica com amb la implementació de l'escenari 3 s'arribarien a estalviar 6,5 kT de CO_2 per l'any 2030.

Tot seguit es mostren detallats els valors de l'estalvi entre el 2019 i el 2025, i entre el 2025 i el 2030 a causa del canvi en el mix de generació.

	Emissions estalviades ($kTCO_2$ eq)
2019 - 2025	15
2025 - 2030	37
TOTAL	**52**

Taula 7.6. Estalvi d'emissions de CO_2 degut al canvi del mix en l'escenari de generació 3.

Per tant, l'estalvi d'emissions total de l'escenari és el següent.

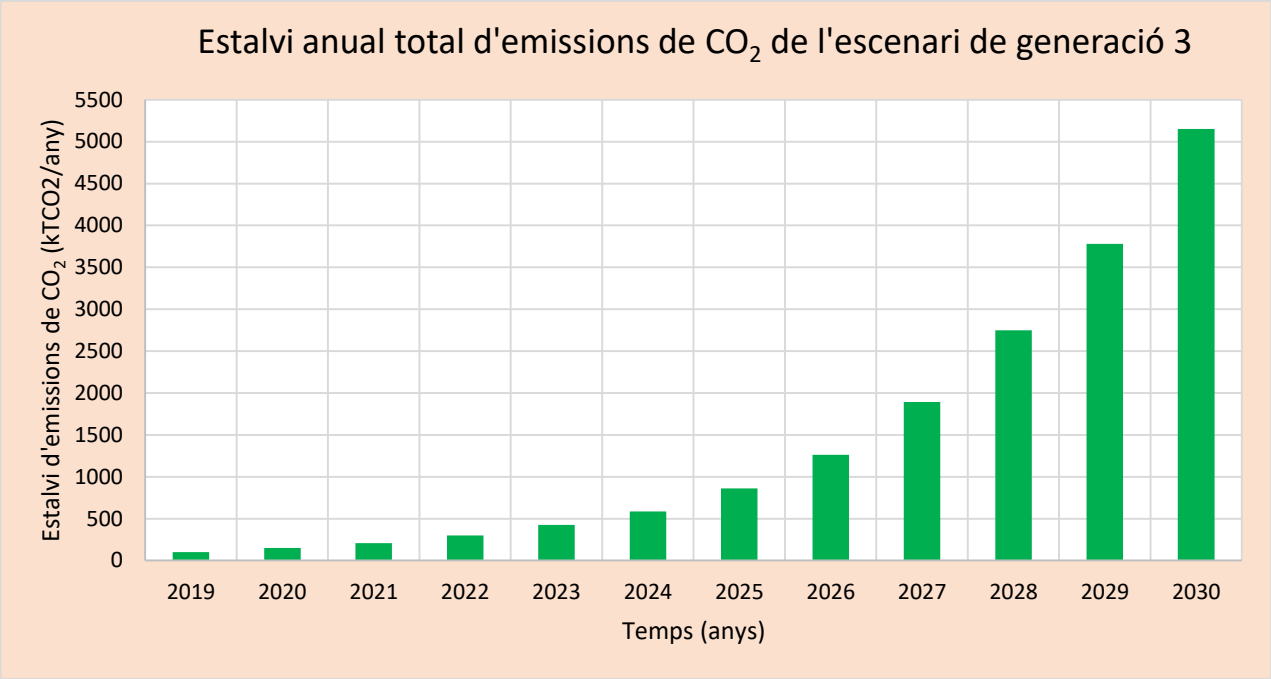

Figura 7.9. Estalvi total d'emissions de CO_2 en l'escenari de generació 3. (Font: Elaboració pròpia)

	Emissions estalviades ($kTCO_2$ eq)
2019 - 2025	$2{,}6 \cdot 10^3$
2025 - 2030	$14{,}8 \cdot 10^3$
TOTAL	$\mathbf{17{,}5 \cdot 10^3}$

Taula 7.7. Estalvi total d'emissions de CO_2 en l'escenari de generació 2.

8. Comparació dels escenaris de generació

Amb l'objectiu d'escollir l'escenari de generació òptim tenint en compte tots els apartats analitzats, a continuació es farà una comparació dels resultats obtinguts en els tres escenaris, analitzant el seu estudi econòmic, mediambiental i la seva viabilitat.

8.1. Comparació de l'anàlisi econòmica

Per poder comparar els estudis econòmics que s'han realitzat de cada escenari, s'ha representat en la següent taula el balanç econòmic que tindria la seva implementació entre el període de 2019 a 2030.

Escenari de generació 1	Escenari de generació 2	Escenari de generació 3
Balanç econòmic (M€)	**Balanç econòmic (M€)**	**Balanç econòmic (M€)**
-690470	-26118	-52122

Taula 8.1. Comparació de l'anàlisi econòmica entre els escenaris de generació.

Per començar, es pot veure com el balanç econòmic de l'escenari de generació 1 suposa unes despeses massa elevades en els pròxims 10 anys; per posar en context el que suposa la magnitud d'aquest valor, es pot comparar amb els pressupostos destinats a l'ajuda en la construcció de centrals renovables, que seran aproximadament de $21 \cdot 10^3$ milions d'euros en la pròxima dècada. Per tant, es pot concloure que l'escenari 1 no és econòmicament viable, i queda descartat de cara a escollir l'escenari òptim.

Pel que fa als escenaris 2 i 3, la implementació dels sistemes d'emmagatzematge a partir d'energia solar i l'augment de la potència solar instal·lada, provoca que les pèrdues de l'escenari 3 siguin el doble de les de l'escenari 2. Tot i que els preus dels sistemes d'emmagatzematge s'aniran reduint en un futur proper, seguiran sent una tecnologia cara [9]. No obstant, el balanç econòmic dels escenaris 2 i 3 suposa una despesa realista tenint en compte les magnituds de diners que es destinen a la construcció de centrals i els pressupostos que ajudaran a invertir per la construcció de les centrals renovables.

8.2. Comparació de l'anàlisi de l'impacte ambiental

En l'estudi mediambiental, cada escenari ha demostrat que amb la seva implementació s'estalviarien unes quantitats anuals d'emissions de CO_2. Els resultats d'aquest estalvi es mostren en la taula següent.

Comparació estalvi d'emissions de CO_2				
		2019 - 2025	**2025 - 2030**	**TOTAL**
Escenari generació 1	**Emissions estalviades per augment de VE ($kTCO_2$ eq)**	$2,6 \cdot 10^3$	$14,8 \cdot 10^3$	$17,4 \cdot 10^3$
	Emissions estalviades per canvi del mix ($kTCO_2$ eq)	30	78	108
	Emissions estalviades totals ($kTCO_2$ eq)	$2,6 \cdot 10^3$	$14,9 \cdot 10^3$	$\mathbf{17,5 \cdot 10^3}$
Escenari generació 2	**Emissions estalviades per augment de VE ($kTCO_2$ eq)**	$2,6 \cdot 10^3$	$14,8 \cdot 10^3$	$17,4 \cdot 10^3$
	Emissions estalviades per canvi del mix ($kTCO_2$ eq)	10	25	34
	Emissions estalviades totals ($kTCO_2$ eq)	$2,6 \cdot 10^3$	$14,9 \cdot 10^3$	$\mathbf{17,5 \cdot 10^3}$
Escenari generació 3	**Emissions estalviades per augment de VE ($kTCO_2$ eq)**	$2,6 \cdot 10^3$	$14,8 \cdot 10^3$	$17,4 \cdot 10^3$
	Emissions estalviades per canvi del mix ($kTCO_2$ eq)	15	37	52
	Emissions estalviades totals ($kTCO_2$ eq)	$2,6 \cdot 10^3$	$14,9 \cdot 10^3$	$\mathbf{17,5 \cdot 10^3}$

Taula 8.2. Comparació de l'anàlisi d'impacte ambiental entre els escenaris de generació.

Com es pot apreciar, l'estalvi total d'emissions és molt similar en els tres escenaris, amb un valor al voltant de $17,5 \cdot 10^3$ kT de CO_2 anuals. Això es deu a que en cada escenari, la part més important de l'estalvi és la que s'aconsegueix amb la substitució del VC pel VE, i no amb l'estalvi que suposa el canvi del mix de generació. Com que l'estalvi de l'augment dels VE és comú en els tres escenaris, per poder-los comparar de forma apropiada s'ha realitzat una gràfica on no s'inclou aquest estalvi.

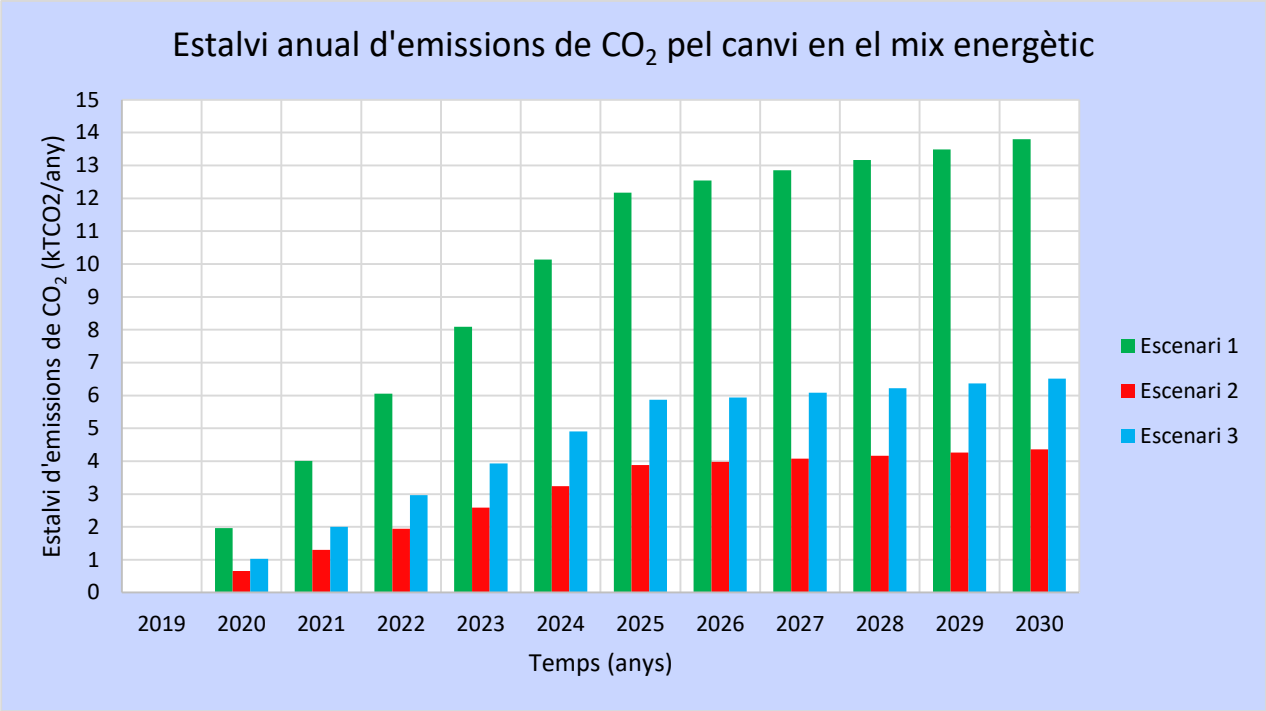

Figura 8.1. Comparació de l'estalvi d'emissions de CO_2 degut al canvi en el mix entre els escenaris de generació. (Font: Elaboració pròpia)

Amb aquesta comparació es veu com l'escenari de generació 1 és el que s'estalvia una quantitat més elevada de CO_2 anualment, arribant a suposar una diferència amb els altres escenaris de 7 kT de CO_2 l'any 2030. Aquesta gran diferència és el resultat del sobre dimensionament que s'ha fet en la potència eòlica instal·lada, provocant d'aquesta manera que el cicle combinat tingui una aportació al mix energètic molt baixa inclús en els dies en que les condicions eòliques no són favorables. Tot i que sigui l'escenari que ofereix millors resultats mediambientals, la seva inviabilitat econòmica fa que no es pugui prendre com una possibilitat real.

La diferència d'estalvi d'emissions entre els escenaris 2 i 3 és més baixa. Com era d'esperar, l'escenari 3 ofereix un estalvi major, ja que els sistemes d'emmagatzematge a partir d'energia solar fan que l'aportació dels cicles combinats disminueixi. Aquesta diferència arriba a uns valors de 2 kT de CO_2 per l'any 2030; com que la diferència és ínfima respecte a l'estalvi d'emissions total dels escenaris, el factor mediambiental no marca una distinció prou important com per considerar-se un criteri diferencial entre els dos escenaris.

Conclusions

Un cop exposats tots els apartats del treball, es poden extreure varies conclusions; per tal d'organitzar-les millor, s'han fet dos apartats, un per les conclusions sobre els escenaris de demanda elèctrica i l'altre per les conclusions dels escenaris de generació.

- **Conclusions dels escenaris de demanda elèctrica**

Els tres escenaris de demanda creats han obtingut resultats molt diversos que permeten veure com es modificarà la corba de demanda depenent del sistema de recàrrega utilitzat. En la comparació entre els tres escenaris, s'ha demostrat com el sistema de recàrrega que oferirà millors resultats de cara a la xarxa elèctrica és un sistema de recàrrega intel·ligent basat en el preu instantani de l'energia combinat amb unes tarifes que incentivin als usuaris de VE a recarregar-lo durant la nit. Aquestes tarifes son essencials, ja que en l'escenari 2 s'ha demostrat com sense elles, aplicant només la recàrrega intel·ligent, molts vehicles no es recarregaran durant el dia degut a que només estaran connectats en hores en que el preu d'energia és alt. Per tant, es pot afirmar que la recarrega intel·ligent basada en la limitació del preu de l'energia pot agrupar la recàrrega dels VE en hores en que la demanda sigui menor, però com a conseqüència, molts vehicles (al voltant de 700 mil diaris i podent arribar a més de 2 milions en els dies amb una demanda elevada) no podran rebre la seva energia diària.

Un altre aspecte negatiu de la recàrrega intel·ligent és que, al agrupar els vehicles elèctrics en hores en que el preu de l'energia és baix, s'ha demostrat com es poden crear pics de potència molt elevats deguts a la concentració de VE. Aquest problema es mitigarà amb les tarifes que incentiven la recàrrega nocturna, però no s'anul·larà. Sense les tarifes, els pics produïts podrien ser àmpliament majors amb el sistema de recàrrega intel·ligent que sense ell, fet que demostrà que la recàrrega intel·ligent necessitarà algun tipus de regulació i control.

S'ha comprovat que, si es segueix amb el sistema de recàrrega actual i no s'aplica cap control ni recàrrega intel·ligent, l'augment de VE provocarà un augment en la demanda de més de 2 GW en alguns moments del dia, superant de forma constant en els dies amb una demanda elevada el pic de potència més elevat que s'ha registrat mai. Això implica problemes per la xarxa i indica que si no s'introdueix la recàrrega intel·ligent en els pròxims 10 anys, la xarxa patirà per garantir el consum energètic.

L'escenari de demanda 3, en canvi, ha demostrat que combinant la recàrrega intel·ligent amb les tarifes es pot aplanar la corba de demanda, mitigant així els pics de potència que es generaran si no s'apliquen mesures de control. Tot i els seus grans avantatges per la xarxa, la seva implementació és la més complicada, ja que depèn de que en un futur proper la tecnologia de la recàrrega intel·ligent s'hagi

desenvolupat suficient com per oferir-se en el mercat i establir-se. Actualment, els estudis sobre el funcionament d'aquesta recàrrega s'han fet a petita escala, i tot i que els resultats són optimistes, fa falta veure el seu rendiment aplicat a gran escala. A part, les tarifes que incentivin la recàrrega nocturna no es crearan fins que la recàrrega intel·ligent s'hagi establert en la societat; per tant, hi haurà un període entre la implementació de la recàrrega intel·ligent i la creació de les tarifes en que es tindrà una demanda com la simulada en l'escenari 2.

Resumint, veien les conseqüències que tindrà en la corba de demanda l'augment del nombre de vehicles elèctrics, s'ha d'apostar per la implementació de la recàrrega intel·ligent com més aviat millor.

- **Conclusions dels escenaris de generació d'energia**

Els diferents escenaris de generació creats han demostrat que un canvi en el mix energètic és possible i necessari. Partint de la demanda elèctrica obtinguda en l'escenari de demanda 3, s'han establert tres possibles escenaris futurs que tenen com a objectiu la reducció de l'aportació de les centrals de cicle combinat. Aquesta reducció s'ha de produir sobretot durant la nit, ja que, segons la demanda generada en l'escenari de demanda 3 (que és l'òptim per la xarxa), l'augment de VE provocarà que el consum en les hores nocturnes augmenti.

S'ha demostrat que, amb el mix energètic actual, les centrals que augmenten la seva producció quan la demanda nocturna s'eleva, són les de cicle combinat. Això es deu a dos factors principals; el primer és que tenen una eficiència força elevada comparada amb la resta de centrals de crema de combustibles fòssils, per tant és preferible el seu ús a les centrals per exemple de crema de carbó. El segon factor és que, actualment, són el tipus de tecnologia amb una potència instal·lada més elevada, fet que provoca que puguin assegurar la injecció de grans quantitats d'energia en pràcticament qualsevol moment. El fet de necessitar les centrals de cicle combinat quan la demanda és elevada té varies conseqüències negatives, com poden ser les emissions de diòxid de carboni o l'augment del preu de l'energia. Per tal de revertir aquests efectes negatius del mix energètic actual, els escenaris de generació ofereixen alternatives que redueixen l'aportació del cicle combinat.

Per començar, l'escenari 1 és molt ambiciós, ja que planteja les necessitats i conseqüències de tenir un mix energètic on, inclús en els dies en que les condicions meteorològiques siguin desfavorables, el cicle combinat no hagi de fer l'augment de producció que fa actualment i el pugui fer l'eòlica. Això provoca un sobre dimensionament de la potència eòlica instal·lada necessària, i fa que l'escenari sigui econòmicament inviable.

L'escenari 2 és més realista i ha demostrat que és possible reduir la producció del cicle combinat. Partint de la premissa de que les centrals eòliques aportin la meitat del que aporten actualment del

centrals de cicle combinat en els dies amb una demanda elevada, s'ha calculat que es requeriria una potència eòlica instal·lada de 51,9 GW per l'any 2030. Aquest augment suposa un balanç econòmic en els pròxims 10 anys de $-26 \cdot 10^3$ milions d'euros, deguts als costos de construcció de les centrals i a l'estalvi per deixar de comprar gas natural. Es considera un balanç realista i que es podria assumir si es prioritzés la transició cap a les energies renovables. Amb aquest augment de l'energia eòlica, s'aconseguiria un estalvi de 4,4 kT de CO_2 anuals per l'any 2030, que si es suma a l'estalvi d'emissions pel canvi de VC a VE s'obté un estalvi total de $5{,}1 \cdot 10^3$ kT de CO_2 anuals al 2030. En total, implementant aquest escenari, entre el període del 2019 al 2030 s'estalviarien les emissions de $17{,}5 \cdot 10^3$ kT de CO_2.

Finalment, l'escenari 3 introdueix els sistemes d'emmagatzematge a partir d'energia solar, que s'encarreguen d'aportar la meitat de l'energia del cicle combinat en l'escenari 2. S'ha calculat que, per aconseguir-ho, entre el 2019 i el 2030 la capacitat d'emmagatzematge ha d'augmentar fins a 20,4 GWh (utilitzant bateries de liti) i la potència solar instal·lada fins a 20 GW. Per aconseguir aquest creixement, més el de la potència eòlica, el balanç econòmic fins al 2030 seria de $-52 \cdot 10^3$ milions d'euros, el doble del de l'escenari 2. El cost econòmic dels sistemes d'emmagatzematge és elevat, però aporten a les energies renovables la capacitat d'injectar energia a la xarxa en els moments en que la generació és baixa degut a les condicions meteorològiques desfavorables. Implementant l'escenari 3, s'estalviarien les emissions de 6,5 kT de CO_2 anuals per l'any 2030 degut al canvi en el mix, que, sumat a l'estalvi per l'augment de vehicles elèctrics, resultaria en un estalvi de $5{,}2 \cdot 10^3$ kT de CO_2 al 2030. Analitzant l'estalvi total d'emissions entre el 2019 i el 2030, s'obté un resultat de $17{,}5 \cdot 10^3$ kT de CO_2 estalviades.

Com que la major part de l'estalvi d'emissions es deu a la transició cap als vehicles elèctrics que hi haurà en els propers anys, en valors totals la diferència d'estalvi d'emissions entre l'escenari 2 i 3 no és molt rellevant (del voltant de 2 kT de CO_2 per l'any 2030). Degut a això, l'estudi mediambiental no es considera un factor diferencial entre els dos escenaris. El que si que varia és l'estudi econòmic; en els pròxims 10 anys, la implementació de l'escenari 2 suposa la meitat de pèrdues que l'escenari 3, i veient els resultats en el mix de generació de l'escenari 2, es considera que la seva implementació és necessària i urgent. Els resultats obtinguts poden servir com a full de ruta per establir els objectius de potència eòlica instal·lada a assolir pels anys 2025 i 2030, i la repercussió que tindrà en el mix de generació, la economia i el medi ambient.

Com a conclusió final, l'augment dels vehicles elèctrics en la societat provocarà una modificació en la corba de demanda elèctrica. Si s'aplica un control sobre el sistema de recàrrega (amb la recàrrega intel·ligent i les tarifes adequades), es pot aconseguir aplanar la corba i reduir els pics de potència que provocarà el sistema de recàrrega actual. Per evitar que aquesta demanda extra la subministrin els cicles combinats i reduir d'aquesta manera el preu de l'energia i les emissions de CO_2 a l'atmosfera, s'ha d'apostar per les energies renovables. S'ha demostrat com un augment en la potència eòlica

instal·lada pot garantir la disminució de l'aportació energètica dels cicles combinats; de la mateixa manera, ho pot fer l'emmagatzematge a partir d'energia solar, tot i que implica una inversió econòmica més elevada.

En mig de la transició del vehicle de combustió cap al vehicle elèctric, s'ha demostrat com és necessari un canvi tant en la recàrrega dels vehicles com en la generació d'energia. Els vehicles elèctrics canviaran completament el sistema energètic, i les decisions que es prenguin en els pròxims anys marcaran una gran diferència de cara al futur.

Bibliografia

1. Serrano, Jaime García Oliveros. 2018. “El Vehículo Eléctrico : Análisis , Evolución y Perspectivas de Futuro.”

2. Caballero, Abel. 2019. “Guía de Movilidad Eléctrica Para Las Entidades Locales.” *Red Eléctrica de España*, 32. https://www.ree.es/sites/default/files/downloadable/Guia_movilidad_electrica_para_entidades_locales.pdf.

3. Gonz, Alejandro. 2021. “Los Coches Eléctricos Más Vendidos Del Mundo : El Primer Modelo Cuadruplica Al Segundo,” 2020–22

4. Gobierno de España. Ministerio de Industria Energía y Turismo. 2014. “Real Decreto 1053/2014, de 12 de Diciembre, Por El Que Se Aprueba Una Nueva Instrucción Técnica Complementaria (ITC) BT 52 «Instalaciones Con Fines Especiales. Infraestructura Para La Recarga de Vehículos Eléctricos», Del REBT.” *Boletín Oficial Del Estado* 316 (Sec. I): 107446–81. http://www.boe.es.

5. Gonzalez, Alejandro. 2020. “Record de Ventas Para Los Coches Eléctricos En 2020, ¿pero Cuáles Son Los Más Vendidos?” *Hibridos y Electricos*, 1–6. https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/actualidad/coches-electricos-mas-vendidos-primera-mitad-2020/20200731152528037036.html.

6. Estad, Anuario. 2019. “Anuario Estadístico General.”

7. Sistema, E L. 2019. “Informe 2019 Red Electrica Española.”

8. Corchero, C. 2015. “European Electric Vehicle Fleet: Driving and Charging Behaviors,” no. Figure 1. https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/86393/Corchero_AEEE.pdf.

9. Schmidt, O., A. Hawkes, A. Gambhir, and I. Staffell. 2017. “The Future Cost of Electrical Energy Storage Based on Experience Rates.” *Nature Energy* 2 (8): 1–8. https://doi.org/10.1038/nenergy.2017.110.

10. Estado. 2015. “Presupuesto Por Programas y Memoria de Objetivos. Tomo X (Sección 20),” no. Sección 20.

11. Rubio, Roger. 2020. “DISSENY D’UNA CENTRA L MIXTA EÒLICA-FOTOVOLTAICA I POSTERIOR ESTUDI DEL REEMPLAÇAMENT D’UNA CENTRAL TÈRMICA PER LA DISSENYADA Memòria i Annexos.”
12. Corporación de Reservas Estratégicas de Productos Petrolíferos. 2018. “2018 Cores Informe Estadístico Anual.” *Cores2018*, 73. https://www.cores.es/sites/default/files/archivos/descargables/informe-estadistico-anual-2018.pdf.

13. G. Masson and I. Kaizuka. 2019. *IEA PVPS Report - Trends in Photovoltaic Applications 2019*.

14. Guti, Diego. 2021. “La Unión Europea Podría Acabar Con Los Coches de Combustión Antes de Lo Esperado,” 2020–21

15. Happach, Blanka, and Joachim Otto. 2018. “Contaminación Atmosférica: Nuestra Salud No Tiene Todavía La Suficiente Protección.”