

Treball de Fi de Màster

Màster en Enginyeria Industrial

ESTUDI DE RENDIBILITAT D'INSTAL·LACIONS DE GENERACIÓ D'ENERGIA ELÈCTRICA RENOVABLES DESTINADES A AUTOCONSUM

MEMÒRIA

Autor: Jordi Vilarnau Arjó
Director: Daniel Suárez Cambra
Convocatòria: Gener 2019



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



A Daniel Suárez per haver tutorat aquest estudi i pel suport rebut per part seua en els moments culminants de l'entrega.

A la família per ser-hi sempre i a tots els amics i amigues i companys de feina, que d'alguna manera o altra m'han estat motivant, animant i ajudant al llarg del transcurs d'aquest treball.

A tots vosaltres, moltes gràcies!

Resum

Aquest treball tracta sobre l'anàlisi de rendibilitat d'instal·lacions de generació d'energia elèctrica eòliques i fotovoltaïques per habitatges connectats a xarxa que realitzen autoconsum, d'acord amb el Real Decret 244/2019, del 5 d'abril de 2019.

Primerament s'analitza el sistema elèctric actual de l'estat espanyol, en el que s'obtenen les corbes de preus de compra i venda d'electricitat entre d'altres i, a continuació, es fa recerca per intentar preveure quina pot ser l'evolució dels preus de l'electricitat en un futur pròxim. En base a aquestes dades obtingudes, es calculen les corbes de rendibilitat que tindrien les instal·lacions de generació fotovoltaïques i eòliques en un habitatge connectat a xarxa. Els resultats obtinguts per un i altre tipus d'instal·lació es comparen entre ells per determinar en quins casos pot ser més rendible una instal·lació solar o una d'eòlica.

També, s'estudia de manera conceptual, diferents sistemes d'acumulació per ser instal·lats juntament amb les centrals de generació d'autoconsum, i a més, s'avaluen els límits de potència instal·lada de les centrals de generació que poden fer viable un sistema d'acumulació.

ÍNDIX

1. INTRODUCCIÓ	3
2. RESUM REAL DECRET 244/2019	4
3. MERCAT ELÈCTRIC ACTUAL. DADES I ANÀLISI.....	7
3.1. INTRODUCCIÓ AL MERCAT ELÈCTRIC ESPANYOL	7
3.2. MECANISME PER LA DETERMINACIÓ DEL PREU DE VENDA D'ELECTRICITAT. CASSACIÓ. 8	
3.2.1. COMPOSICIÓ DE LA CORBA D'OFERTA PER LA VENDA D'ELECTRICITAT	9
3.2.2. COMPOSICIÓ DE LA CORBA DE DEMANDA PER LA VENDA D'ELECTRICITAT.....	11
3.3. GENERACIÓ D'ENERGIA ELÈCTRICA AMB FONTS RENOVABLES.....	12
3.3.1. CORBA DE GENERACIÓ FOTOVOLTAICA.....	12
3.3.2. CORBA DE GENERACIÓ EÒLICA	13
3.4. CORBA DE DEMANDA.....	14
3.5. CORBA DE PREUS DE COMPRA D'ELECTRICITAT	15
3.6. CORBA DE PREUS DE VENDA I COMPENSACIÓ D'ELECTRICITAT	16
3.7. ANÀLISI DEL MERCAT ELÈCTRIC ACTUAL.....	17
3.7.1. RELACIÓ DEMANDA ELÈCTRICA AMB ELS PREUS DE COMPRA I VENDA D'ELECTRICITAT.....	17
3.7.2. RELACIÓ PARTICIPACIÓ DE FONTS DE GENERACIÓ RENOVABLES AMB ELS PREUS DE COMPRA I VENDA D'ELECTRICITAT.....	19
3.8. ESTIMACIÓ DE LA GENERACIÓ D'EXCEDENTS	20
3.9. SISTEMA ELÈCTRIC ACTUAL. CONCLUSIONS	22
4. PREVISIÓ MERCAT ELÈCTRIC FUTUR.....	23
4.1. ESTAT ACTUAL I PREVISIÓ DEL SISTEMA ELÈCTRIC.....	23
4.2. ESTUDI DELS PREUS DE L'ELECTRICITAT EN SISTEMES ELÈCTRICS AMB ALTA PARTICIPACIÓ DE RENOVABLES	26
4.2.1. SISTEMA ELÈCTRIC ALEMANY	26
4.2.2. SISTEMA ELÈCTRIC DELS PAÏSOS NÒRDICS.....	28
4.3. ALTRES CONSIDERACIONS	30
4.4. PREVISIÓ MERCAT ELÈCTRIC FUTUR. CONCLUSIONS	31
5. ANÀLISI DE RENDIBILITAT PER LES INSTAL·LACIONS DE GENERACIÓ EN AUTOCONSUM	32
5.1. NOMENCLATURA I EQUACIONS UTILITZADES	32
5.2. HIPÒTESIS DE CàLCUL	33
5.3. RENDIBILITAT EN INSTAL·LACIONS DE GENERACIÓ ACOLLIDES A COMPENSACIÓ D'EXCEDENTS.....	35

5.4.	RENDIBILITAT EN INSTAL·LACIONS DE GENERACIÓ ACOLLIDES A VENDA D'EXCEDENTS	36
5.5.	ANÀLISI DELS RESULTATS	38
5.5.1.	COMPARACIÓ RENDIBILITAT PER TIPUS D'INSTAL·LACIÓ DE GENERACIÓ	38
5.5.2.	COMPARACIÓ RENDIBILITAT PER MODALITAT: COMPENSACIÓ I VENDA.....	40
5.6.	CONCLUSIONS	41
6.	DETERMINACIÓ DE L'INTERVAL D'ESTUDI PER LA VIABILITAT DE LES INSTAL·LACIONS D'ACUMULACIÓ.....	42
6.1.	NOMENCLATURA I EQUACIONS UTILITZADES	42
6.2.	INTERVAL DE VIABILITAT PER SISTEMES D'ACUMULACIÓ EN INSTAL·LACIONS DE GENERACIÓ SOLARS	43
6.3.	INTERVAL DE VIABILITAT SISTEMA D'ACUMULACIÓ D'ENERGIA EN INSTAL·LACIONS DE GENERACIÓ EÒLICS	44
6.4.	DETERMINACIÓ DE L'INTERVAL D'ESTUDI PER LA VIABILITAT DE LES INSTAL·LACIONS D'ACUMULACIÓ. CONCLUSIONS.	45
7.	ANÀLISI DELS SISTEMES D'ACUMULACIÓ D'ENERGIA AMB FINALITAT ELÈCTRICA	46
7.1.	ACUMULACIÓ PER BATERIES.....	47
7.2.	ACUMULACIÓ PER EMMAGATZEMATGE TÈRMIC (ETES).....	49
7.2.1.	TECNOLOGIA AIRE-AIGUA.....	50
7.2.2.	TECNOLOGIA CO ₂	51
7.3.	ACUMULACIÓ PER AIRE COMPRIMIT (CAES)	53
7.3.1.	PRINCIPI DE FUNCIONAMENT I CARACTERÍSTIQUES	54
7.3.2.	CLASSIFICACIÓ DELS SISTEMES CAES	55
8.	CONCLUSIONS	60
	BIBLIOGRAFIA	61
	A.1.CORRECCIÓ CORBA DE DEMANDA ELÈCTRICA	64
	A.2.ANÀLISI CORBES DE RENDIBILITAT PER LES INSTAL·LACIONS DE GENERACIÓ	66
A.2.1.	CORBES DE RENDIBILITAT PER INSTAL·LACIONS ACOLLIDES A COMPENSACIÓ D'EXCEDENTS.....	66
A.2.2.	CORBES DE RENDIBILITAT PER INSTAL·LACIONS ACOLLIDES A VENDA D'EXCEDENTS	69
	A.3.PROCEDIMENT PEL CÀLCUL DE L'INTERVAL PER LA VIABILITAT DE LES INSTAL·LACIONS D'ACUMULACIÓ.....	71
	A.4.TAULES DE VALORS.....	72
A.4.1.	VALORS HORARIS PERCENTUALS MITJOS DE LA DEMANDA ENERGÈTICA DIÀRIA... 72	
A.4.2.	VALORS HORARIS PERCENTUALS MITJOS DE LA GENERACIÓ ELÈCTRICA DIÀRIA... 73	
A.4.3.	VALORS HORARIS MITJOS DEL PREU DE COMPRA	74
A.4.4.	VALORS HORARIS MITJOS DEL PREU DE VENDA I COMPENSACIÓ	75

1. INTRODUCCIÓ

A dia d'avui, vivim en un món amb cada cop més problemes ambientals que ja afecten el dia a dia de tots nosaltres. Des de llargs períodes de sequeres, passant per fortes inundacions o calors anormals arreu, etc. Fenòmens que en els últims anys s'han anat intensificant fins al punt de suposar un problema per tots nosaltres i la resta d'éssers vius que hi habiten. El curiós de tot plegat és que els mateixos que ara estem començant a patir les conseqüències som l'origen de la causa, i el pitjor de tot és que, en general, com a humanitat, ben poc estem fent per revertir la situació.

Dit això, la realització d'aquest estudi pretén ser una eina útil que pugui ajudar a impulsar l'ús de les energies renovables com a fonts de generació elèctrica, concretament les instal·lacions de generació eòliques i sobretot les fotovoltaïques, aprofitant que, el dia 5 d'abril de 2019 es va publicar el nou Real Decret d'Autoconsum d'energia elèctrica (RD 244/2019) en el que es defineixen noves condicions per la instal·lació de centrals de generació per autoconsum. Cal recordar que, l'anterior Real Decret sobre l'autoconsum (RD 900/2015) va arribar a ser força conegut pel famós "Impost al Sol". Afortunadament, amb aquest nou real decret, la situació de les instal·lacions renovables per autoconsum milloren, incrementant així la viabilitat per instal·lar-se'n a casa.

D'aquesta manera, el principal objectiu del treball és que pugui ser d'ajuda alhora de determinar de manera aproximada la rendibilitat que es pot obtenir pel fet d'instal·lar una central de generació per autoconsum en un habitatge connectat a xarxa, en funció de la demanda diària que tingui i en funció de la potència instal·lada de la central de generació que es desitgi.

Per dur-ho a terme, primerament s'analitzarà el sistema elèctric actual de l'estat espanyol, en el que s'obtidran les corbes de preus de compra i venda d'electricitat entre d'altres. També, es farà recerca per intentar preveure quina pot ser l'evolució dels preus de l'electricitat en un futur pròxim.

Aleshores, en base a aquestes dades, es calcularan les corbes de rendibilitat que tindrien les instal·lacions de generació fotovoltaïques i eòliques en un habitatge connectat a xarxa i es compararan entre elles, per així poder determinar en quins casos és més adient instal·lar una central de generació solar o eòlica.

Addicionalment, també, s'estudiarà de manera conceptual diferents sistemes d'acumulació que serveixin com a suport de les centrals de generació d'autoconsum, en que s'avaluaran els límits de potència instal·lada de les centrals de generació que podrien fer viable un sistema d'acumulació.

2. RESUM REAL DECRET 244/2019

Com ja s'ha comentat a la introducció, el dia 5 d'abril de 2019 es va publicar el nou Real Decret d'Autoconsum d'energia elèctrica (RD 244/2019) [1]. Amb aquest, es modifica l'anterior Real Decret del 9 d'octubre de 2015 (RD 900/2015) que, pel que s'ha comentat àmpliament, dificultava la implantació d'instal·lacions d'autoconsum a partir de fonts renovables, amb el conegut "impost al Sol" per exemple. Amb aquest nou Real Decret, es milloren les condicions per facilitar l'autoconsum i impulsar les fonts renovables d'energia. A continuació es resumeixen els trets considerats més rellevants del RD 244/2019.

Els objectius d'aquest real decret són:

- a) Establir les condicions administratives, tècniques i econòmiques per l'autoconsum.
- b) Definir el concepte d'instal·lacions pròximes a efectes d'autoconsum.
- c) Desenvolupar l'autoconsum individual i col·lectiu.
- d) Establir els mecanismes de compensació entre els dèficits d'autoconsum i excedents d'energia elèctrica.
- e) Organitzar el procediment d'inscripció i comunicació de dades al registre administratiu d'autoconsum d'energia elèctrica.

Segons l'RD 244/2019, l'autoconsum es podrà dur a terme tant de manera individual (un únic habitatge per exemple), com col·lectiva (múltiples habitatges per exemple).

A més a més, en funció de si la instal·lació de generació es troba directament connectada a la xarxa interior o no, es diferencia entre:

- a) Instal·lacions pròximes de xarxa interior:
Quan la instal·lació de generació estigui connectada directament a la xarxa interior.
- b) Instal·lacions pròximes a través de la xarxa:
 - Quan la instal·lació de generació estigui connectada a qualsevol de les xarxes de baixa tensió derivada del mateix centre de transformació, o:
 - Quan la instal·lació de generació i consums sigui en BT i a una distància entre ells inferior a 500 m.

També, es dona l'opció de realitzar autoconsum amb excedents d'energia elèctrica o sense. Aquests excedents generats podran ser intercanviats amb consum d'electricitat convencional o podran ser venuts al sistema elèctric:

- a) Excedents amb compensació:
Els consumidors s'hi podran acollir sempre que ho desitgin i a més a més:
 - La font primària sigui d'origen renovable.
 - La potència total de les instal·lacions de producció no sigui superior a 100 kW.
 - La instal·lació de producció no disposi d'altra retribució addicional.
- b) Excedents sense compensació:
Tots els casos d'autoconsum que no satisfacin algun dels requisits anteriors, o bé, aquells qui voluntàriament no vulguin optar per la modalitat amb excedents amb compensació. En aquest cas, l'energia excedentària podrà ser venuda a la xarxa.

Altres consideracions importants són:

- Els consumidors poden associar-se a més d'una instal·lació de generació per autoconsum, sempre i quan totes elles siguin de la mateixa modalitat.
- Poden instal·lar-se elements d'emmagatzematge d'energia en les instal·lacions de generació.

Respecte els preus i costos derivats de la pràctica de l'autoconsum, s'estableixen els següents criteris.

- Energia autoconsumida:

Per l'energia autoconsumida no es pagarà cap tipus de peatge.

- Excedents amb compensació:

Si es disposa d'un contracte de subministre amb una comercialitzadora lliure:

- a) L'energia horària consumida de la xarxa es valorarà al preu horari acordat amb la comercialitzadora.
- b) L'energia horària excedentària es valorarà al preu acordat entre les parts.

Si es té el contracte amb una comercialitzadora de referència (PVPC):

- a) L'energia horària consumida de la xarxa es valorarà pel Preu Voluntari del Petit Consumidor (PVPC) horari.
- b) L'energia horària excedentària es valorarà al preu mig de venda horari, obtingut a partir del preu del mercat diari i intradiari en cada hora, restant el cost dels desviaments CDSVh¹.

En cap cas el valor econòmic de l'energia horària excedentària podrà ser superior al valor econòmic de l'energia horària consumida en el període de facturació, el qual no podrà ser superior a un mes.

A més a més, no s'hauran de pagar els peatges d'accés a la xarxa de transport i distribució per l'energia horària excedentària.

- Excedents sense compensació:

Els propietaris de la instal·lació generadora cobraran per l'energia excedentària, al preu que marqui una normativa específica. No obstant això, s'hauran de pagar els peatges d'accés a la xarxa de transport i distribució segons RD 1544/2011 per l'energia excedentària.

Amb la informació proporcionada per aquest Real Decret i els Real Decrets addicionals RD 413/2014 i RD 1544/2011, en la Taula 1 es resumeixen els diferents tipus de modalitats d'autoconsum amb els corresponents costos associats.

¹ Cost dels desviaments horaris per MWh consumit dels comercialitzadors de referència. Aquests desviaments es realitzen per equilibrar l'oferta d'electricitat amb la demanda amb molt poc temps d'antel·lació [2]. L'ideal pel sistema elèctric és que siguin zero.

Taula 1. Modalitats d'autoconsum i taxes corresponents

				Peatges d'accés	Peatge solidari [kWh]
AUTOCONSUM INDIVIDUAL	Xarxa interior	Amb excedents	Amb compensació	No	0
			Venda	0,5 €/MWh ² + 7% impost ³	0
		Sense excedents		No	0
	A través de la xarxa	Amb excedents	Amb compensació	Sí ⁴	0
			Venda	0,5 €/MWh + 7% impostos	0
	AUTOCONSUM COL·LECTIU	Xarxa interior	Amb excedents	Amb compensació	No
Venda				0,5 €/MWh + 7% impostos	0
Sense excedents			Sí ⁵	? ⁶	
A través de la xarxa		Amb excedents	Amb compensació	Sí ⁴	0
			Venda	0,5 €/MWh + 7% impostos	0

² Peatge d'accés a xarxa especificat en la Llei 14/2010 del 23 de desembre.

³ Impost sobre el valor de producció d'energia elèctrica IVPEE especificat en la Llei 15/2012 del 27 de desembre.

⁴ S'haurà d'aportar una certa quantitat d'energia elèctrica al sistema elèctric, segons el que imposi la Comissió Nacional dels Mercats i la Competència (actualment sense valor concret).

⁵ En el cas de l'autoconsum sense excedents col·lectiu, els consumidors associats a la instal·lació de generació hauran de respondre solidàriament amb el sistema elèctric per tenir-la instal·lada (actualment sense valor concret).

⁶ En el Real Decret no s'especifica la naturalesa d'aquest peatge, tan sols comenta que els consumidors hauran de respondre solidàriament amb el sistema elèctric.

3. MERCAT ELÈCTRIC ACTUAL. DADES I ANÀLISI.

A continuació s'analitza el sistema elèctric actual de l'estat espanyol. Es parteix inicialment definint quins són els agents que participen en la compra-venda d'electricitat i com ho fan. També s'analitzen les dades de demanda d'energia elèctrica, amb els preus de compra-venda corresponents. I les dades de generació d'energia elèctrica amb fonts renovables també són analitzades.

Les dades obtingudes en aquest apartat doncs, seran la base a partir de la qual es confeccionarà tot l'estudi. Aquestes s'han obtingut en el període juliol 2018 - juny 2019, temps considerat suficient per tenir una representació adequada dels valors durant tot un any i per ser de les dades més actuals que es tenen.

Aquestes dades han estat extretes de la base de dades de REE (Red Eléctrica de España), que és l'empresa dedicada a l'operació del sistema elèctric espanyol i transport d'electricitat. També s'han extret dades de OMIE (Operador del Mercado Ibérico Español), empresa encarregada de la gestió del mercat elèctric d'Espanya.

3.1. INTRODUCCIÓ AL MERCAT ELÈCTRIC ESPANYOL

A Espanya les comercialitzadores d'energia elèctrica es classifiquen en dos tipus, comercialitzadores de referència i comercialitzadores lliures [3].

Les comercialitzadores de referència (o del mercat regulat), venen l'energia elèctrica als clients finals segons les tarifes regulades que marca el govern espanyol (Preu Voluntari pel Petit Consumidor o PVPC). El preu d'aquesta tarifa varia horàriament, en funció del mercat majorista d'electricitat, en el que dos són les empreses encarregades de gestionar-lo:

- OMIE (Operador del Mercado Ibérico Español)
Fixa els preus de venda horaris a curt termini (mercat diari i intradiari).
- OMIP (Operador del Mercado Ibérico de Energía-Polo Portugués)
Fixa els preus de venda a llarg termini (dies).

Les comercialitzadores lliures (de mercat lliure), defineixen diferents tipus de tarifes en els que ofereixen diferents preus als consumidors finals.

Així doncs, en el cas d'aquest estudi, es decideix considerar es consideraran els preus horaris de les comercialitzadores de referència (PVPC) ja que els preus, a l'estar supervisats pel govern espanyol, estan més adequats a la realitat de la generació elèctrica.

Tant el mercat regulat com el mercat lliure, disposen de diferents tarifes per la compra d'electricitat. En el cas del mercat regulat, aquestes tarifes es classifiquen com:

- Tarifa estàndar (A)
El preu de compra de l'electricitat va en acord amb el preu al que les centrals de generació la venen.
- Tarifa amb discriminació horària amb 2 períodes (DHA) o 3 períodes (DHS)
En les hores vall (hores en que el consum elèctric és més baix) es paga un preu inferior al de la tarifa estàndard i en les hores punta (hores en que el consum elèctric és més elevat) es paga un preu superior. Aquests períodes horaris estan definits en les pròpies tarifes, són els que s'indiquen en la Taula 2.

Taula 2. Períodes horaris per les tarifes PVPC amb discriminació horària [4]

		Hores Vall		Hores Punta
Discriminació horària 2 períodes (DHA)	Hivern	de 22h a 12h		De 12 a 22h
	Estiu	23h a 13h		13h a 23h
Discriminació horària 3 períodes (DHS)	Estiu/ hivern	Supervall	Pla	De 13h a 22h
		De 01h a 06h	De 07h a 12h i de 23h a 01h	

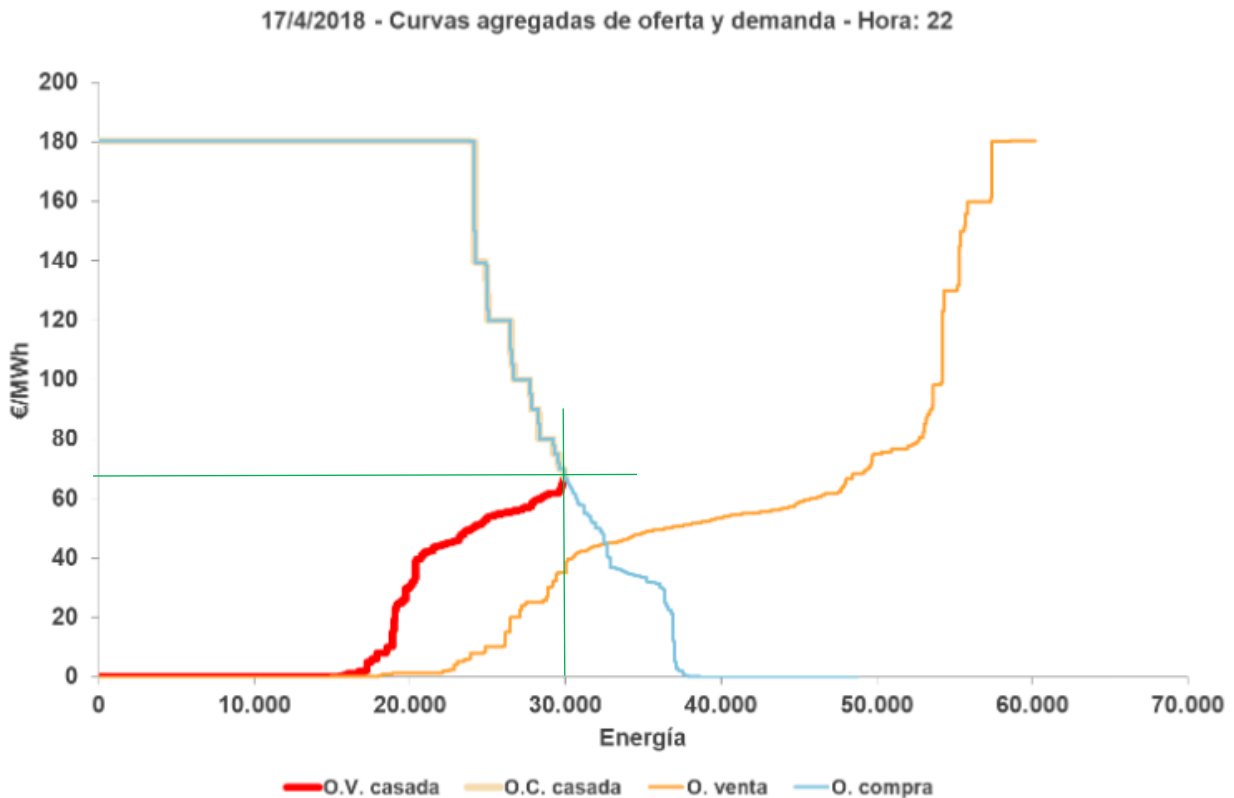
Aquestes 3 tarifes són aplicables a qualsevol consumidor amb una potència contractada no superior a 10 kW. Val a dir que hi ha altres tarifes del mateix tipus però per potències contractades superiors [5]. En el cas d'aquest estudi, tan sols s'analitzaran les tarifes per potències no superiors a aquest valor, ja que la majoria d'habitatges no requereixen més de 10 kW de potència.

3.2. MECANISME PER LA DETERMINACIÓ DEL PREU DE VENDA D'ELECTRICITAT. CASSACIÓ.

A l'estat espanyol, el preu de venda d'electricitat és fixat per l'OMIE. Aquesta empresa gestiona el mercat majorista d'electricitat a la península ibèrica: fixa els preus horaris de l'electricitat en funció de l'oferta i demanda, per lo que intervenen tant productors d'electricitat com compradors.

Els productors d'energia elèctrica (venedors), oferten la seua energia a un preu determinat, en funció del seu cost d'oportunitat (quan els hi resulta més rendible vendre-la). Els consumidors (comercialitzadores, consumidors industrials, centrals hidràuliques de bombeig, etc.) fixen el preu màxim que estan disposats a pagar per l'electricitat. Això es realitza per cada hora del dia.

Amb aquestes dos entrades es realitza el que s'anomena la cassació de l'oferta i la demanda; els valors del preu i quantitat d'energia que productors i compradors han fixat, es representen en una gràfica, obtenint d'aquesta manera dos corbes: la corba d'oferta i la corba de demanda. Aquestes dos corbes, poden canviar en les pròximes hores (ja que la cassació inicial es realitza a les 12h del dia anterior). Finalment la intersecció d'ambdues corbes corregides determina el preu de venda de l'electricitat per aquella hora determinada (vegeu la Gràfica 1 a mode d'exemple).



Gràfica 1. Gràfica d'exemple per la cassació de l'oferta i la demanda d'energia elèctrica [6]

Com es pot observar, el punt de cassació entre oferta i demanda està al voltant dels 30.000 MWh a un preu de venda 70 €/MWh aproximadament. Aquest preu de venda serà el que cobraran tots els productors que participen, independentment del tipus de central de generació que sigui.

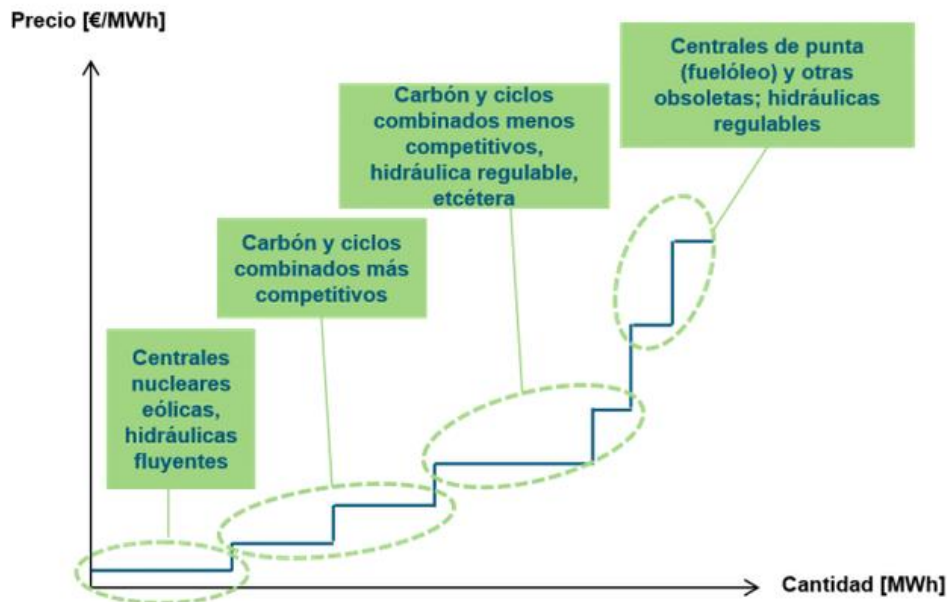
D'aquesta manera, tots aquells productors que hagin ofertat l'energia per sobre el punt de casació o tots aquells compradors que hagin ofertat la compra pe sota, no participaran al mercat per aquella hora.

3.2.1. COMPOSICIÓ DE LA CORBA D'OFERTA PER LA VENDA D'ELECTRICITAT

La corba d'oferta es divideix en zones, en funció de la tecnologia de les centrals de generació. Observant la Gràfica 2 es pot dir que:

- Les centrals nuclears, eòliques, fotovoltaïques i hidràuliques d'aigua fluent, oferten la seua energia a un preu molt baix. Això es degut a que prefereixen vendre tota l'energia que generen en lloc de vendre'n menys a un preu una mica més elevat. Aquesta decisió és deguda a:
 - o Difícil regulació de producció d'electricitat en el cas de la nuclear.

- En el cas de les renovables, al ser la font d'energia primària gratuïta per la producció d'energia, tota l'energia que venen és pràcticament el benefici net que n'extreuen.
- Les centrals de carbó, cycle combinat i hidràuliques d'aigua estancada, venen l'electricitat a un preu més elevat, ja que poden tenir un cost d'oportunitat més elevat (poden posar-se en marxa o aturar-se durat el dia) i a part, han de pagar el combustible per generar energia.
- Les centrals hidràuliques de bombeig són les que oferten a un preu més elevat, ja que el seu cost d'oportunitat és molt elevat.

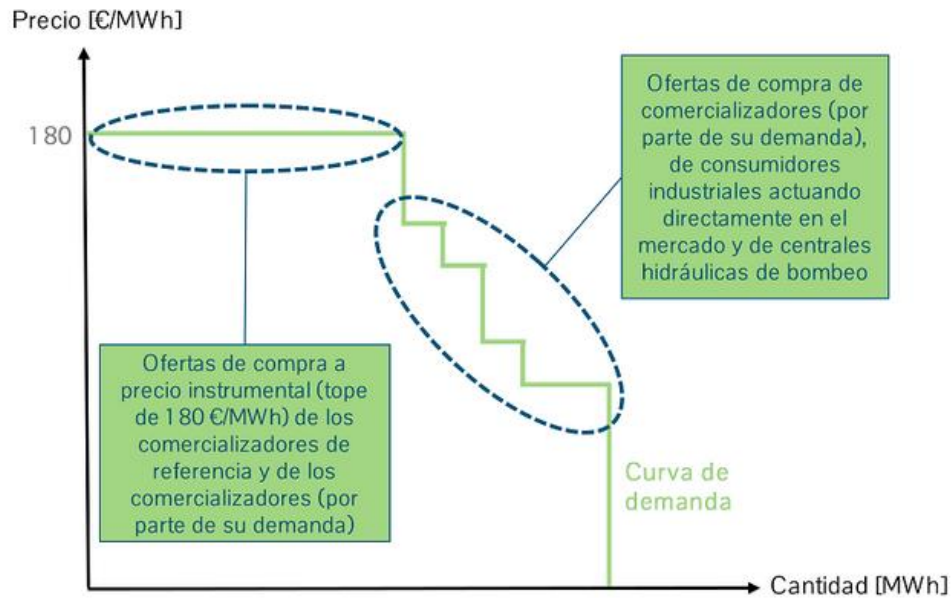


Gràfica 2. Corba d'oferta per la cassació en el mercat elèctric [7]

També comentar que les ofertes dels productors han de complir amb els principis de la Llei de Defensa de la Competència. D'aquesta manera, tant la disponibilitat de les unitats de generació com els preus ofertats per elles estan controlats per les institucions de supervisió del mercat [7].

3.2.2. COMPOSICIÓ DE LA CORBA DE DEMANDA PER LA VENDA D'ELECTRICITAT

De la mateixa manera que en el cas de la corba d'oferta, la corba de demanda també té trams, en els que s'agrupen diferents tipus de compradors, tal i com indica la Gràfica 3.



Gràfica 3. Corba de demanda per la cassació en el mercat elèctric [7]

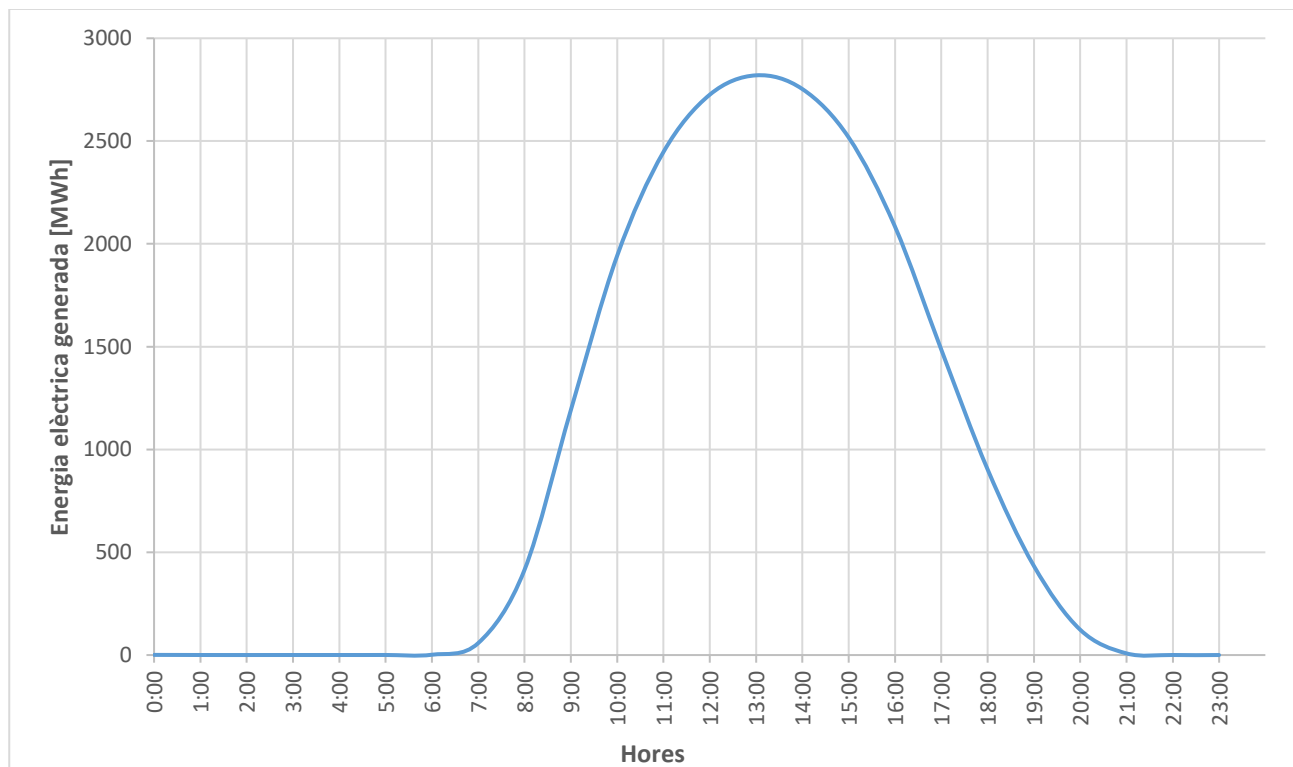
Com pot observar-se en la Gràfica 3, les comercialitzadores acostumen a ofertar al preu màxim permès (180 €/MWh). D'aquesta manera s'asseguren que els consumidors finals tindran l'energia que demanen. Altres compradors com algunes comercialitzadores, consumidors industrials i centrals hidràuliques de bombeig oferten a preus inferiors. En aquest cas, si han ofertat per sota del preu de cassació, aquests compradors no rebran electricitat.

3.3. GENERACIÓ D'ENERGIA ELÈCTRICA AMB FONTS RENOVABLES

Les instal·lacions de generació d'electricitat més adients, en funció del desenvolupament tecnològic, la senzillesa d'implantació i d'acord amb el Real Decret 244/2019, es determina que les centrals de generació fotovoltaïques i eòliques són les que podrien tenir més cabuda per realitzar autoconsum d'energia elèctrica. D'aquesta manera, són les que s'utilitzaran pel present estudi.

3.3.1. CORBA DE GENERACIÓ FOTOVOLTAICA

En la Gràfica 4 es pot observar el promig anual de generació d'energia elèctrica a nivell espanyol amb la tecnologia fotovoltaica, entre juliol de 2018 i juny de 2019.

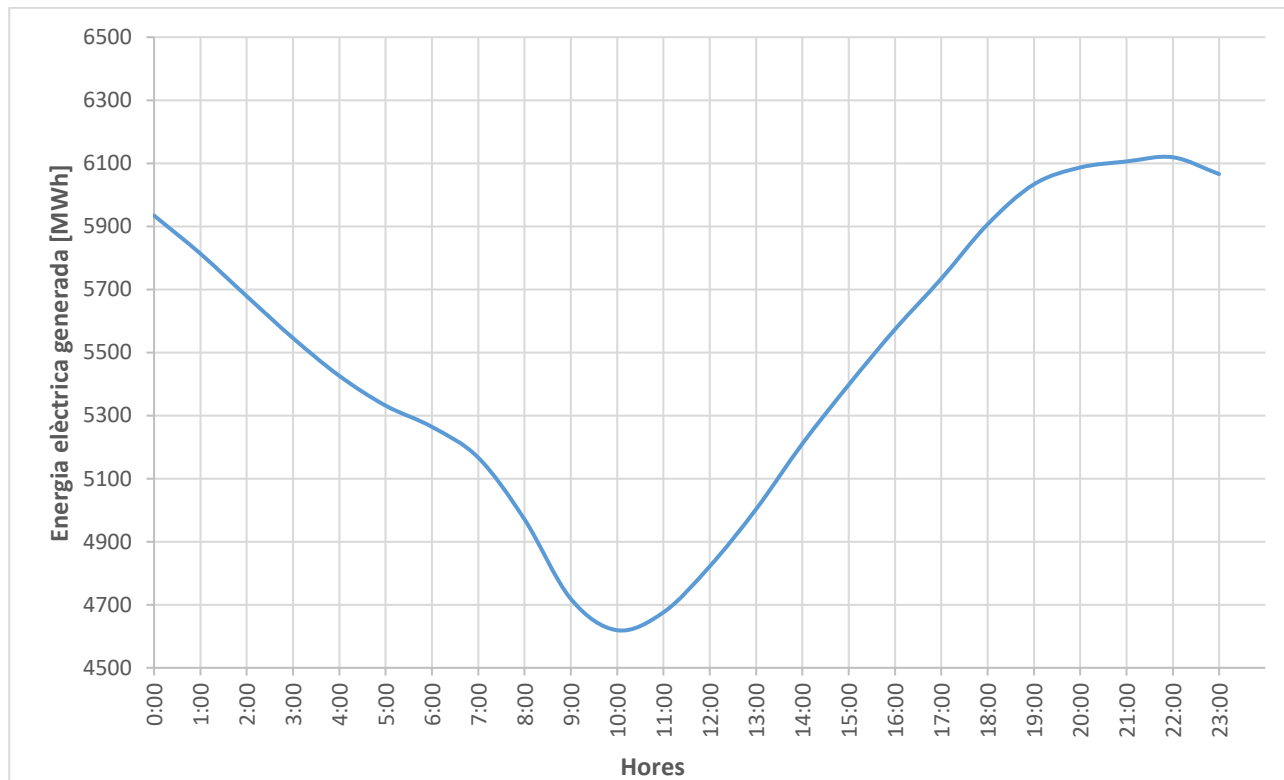


Gràfica 4. Corba de generació horària mitjana anual per instal·lacions de generació fotovoltaïques [8]

Com es pot observar en la Gràfica 4, les hores de màxim rendiment de les instal·lacions solars fotovoltaïques, és entre les 11h i les 15h.

3.3.2. CORBA DE GENERACIÓ EÒLICA

En la Gràfica 5 es pot observar el promig anual de generació d'energia elèctrica a nivell espanyol amb la tecnologia eòlica, entre juliol de 2018 i juny de 2019.

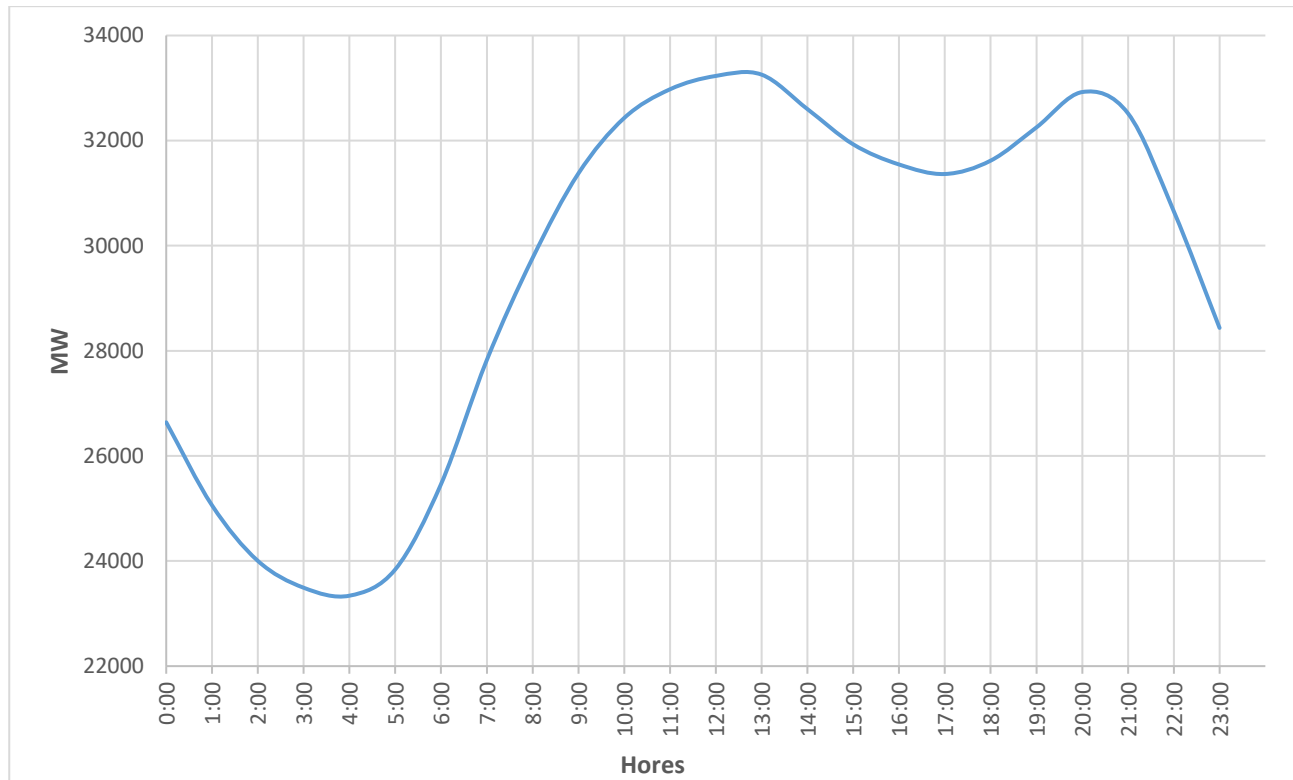


Gràfica 5. Corba de generació horària mitja anual per instal·lacions de generació eòliques [8]

Com es pot observa en la Gràfica 5, les hores de màxim rendiment de les instal·lacions eòliques, és entre les 18h i les 23h. All llarg de la matinada el vent tendeix a afluixar progressivament fins les 10h aproximadament que és quan s'assoleix el mínim. A partir de llavors, el vent va en augment fins les 23h, que es quan torna a disminuir.

3.4. CORBA DE DEMANDA

En la Gràfica 6, es pot observar el promig anual de potència mitja elèctrica demandada horària a nivell espanyol, entre juny de 2018 i juliol de 2019.

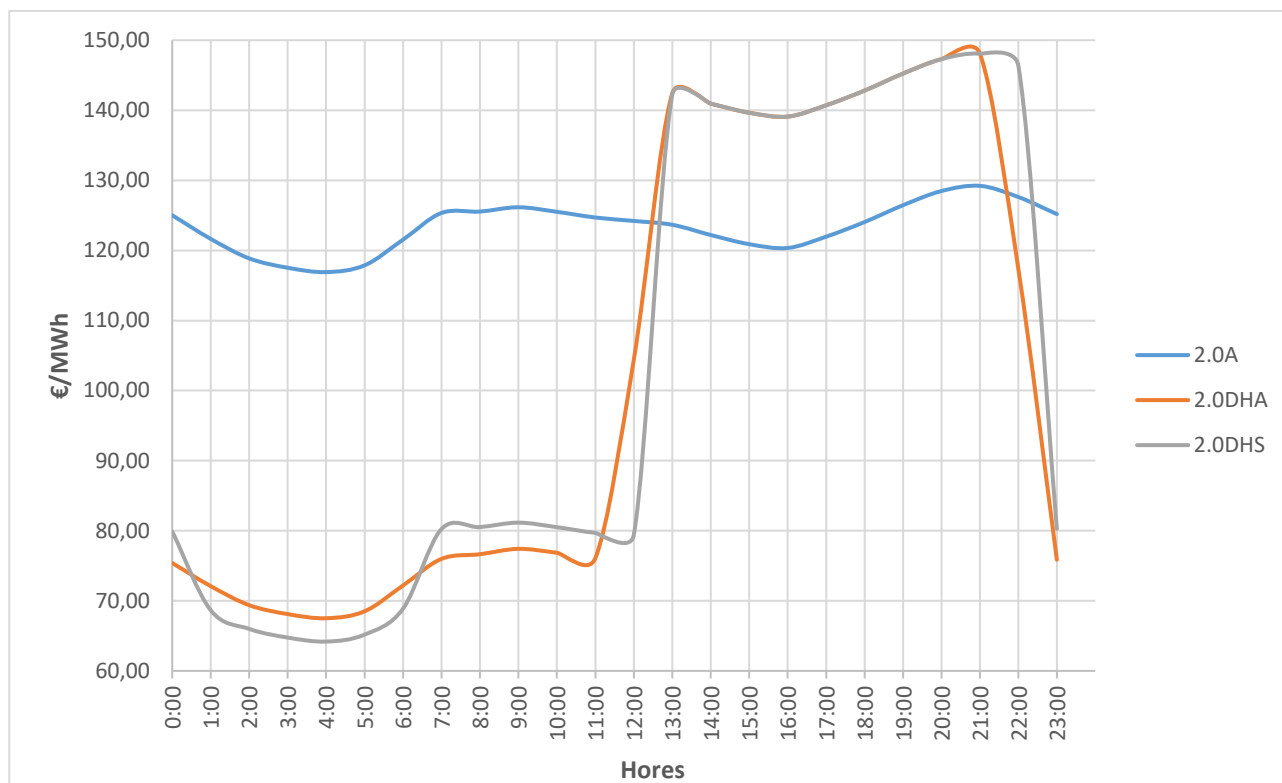


Gràfica 6. Corba de demanda horària mitja anual [8]

Com pot observar-se en la Gràfica 6, la corba presenta 2 màxims i un mínim significatiu. El mínim es correspon en hores nocturnes comprès entre les 2h i les 5h aproximadament. Respecte als màxims, un es correspon entre les 10h i les 15h, lleugerament més elevat que el segon pic, que es correspon al període comprès entre les 19h i les 21h.

3.5. CORBA DE PREUS DE COMPRA D'ELECTRICITAT

En la Gràfica 7 es pot observar el promig anual dels preus de compra d'energia elèctrica a nivell espanyol, entre el juliol del 2018 i juny del 2019, per les diferents tarifes PVPC estudiades, sense incloure'n l'impost d'electricitat del 5,113% de l'import del terme de consum i potència contractada i sense incloure'n l'IVA del 21% [9].



Gràfica 7. Corbes de preus de compra mitjos horaris anuals en base a les tarifes PVPC [9]

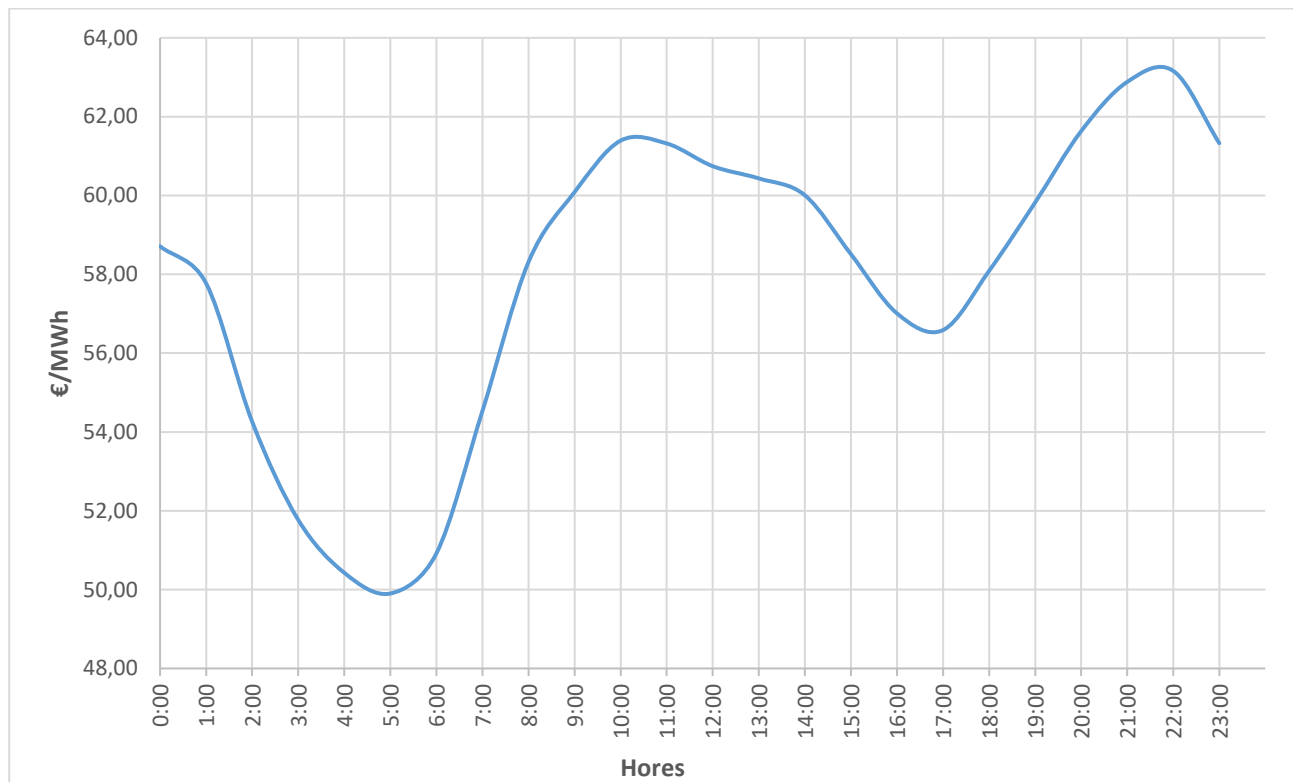
Com pot observar-se en la Gràfica 7, la tarifa PVPC més constant al llarg del dia és la 2.0A, corresponent a la tarifa estàndard, amb valors que oscil·len entre aproximadament 117 €/MWh i 130 €/MWh.

Les tarifes 2.0DHA i 2.0DHS, al tractar-se de tarifes amb discriminació horària, tenen una oscil·lació dels preus molt més elevada al llarg del dia, i segueixen una geometria escalonada en base a les hores pic i hores vall definides per les mateixes tarifes. Els preus en la tarifa 2.0DHA oscil·len entre aproximadament 68 €/MWh i 148 €/MWh. En la tarifa 2.0DHS, els preus oscil·len entre aproximadament 64 €/MWh i 148 €/MWh.

A mode de consumidor final, l'elecció entre la tarifa estàndard o amb discriminació horària, dependrà en cada cas de la distribució dels consums diaris que es tinguin, de manera que l'elecció de la tarifa PVPC més adient pot suposar un estalvi econòmic en la factura de la llum respecte la resta de tarifes.

3.6. CORBA DE PREUS DE VENDA I COMPENSACIÓ D'ELECTRICITAT

En la Gràfica 8, es pot observar el promig anual dels preus de venda d'energia elèctrica a nivell espanyol, entre juliol del 2018 i juny del 2019, sense considerar els peatges d'accés a la xarxa ni impostos de generació d'electricitat definits en la Taula 1 de l'Apartat 2.

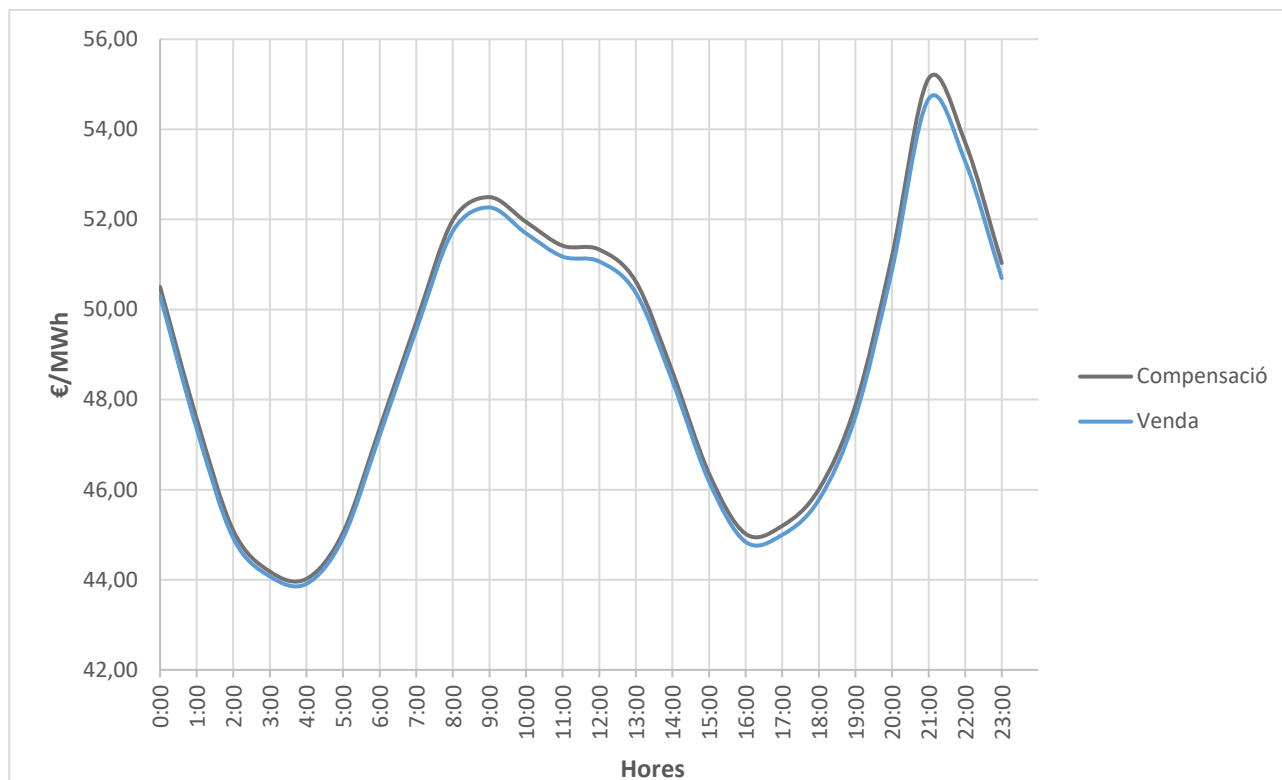


Gràfica 8. Corba de preus de venda mitjos horaris anuals [10]

Com pot observar-se en la Gràfica 8, la corba presenta 2 màxims i un mínim significatiu. El mínim es correspon en hores nocturnes comprès entre les 2h i les 7h aproximadament. Respecte als màxims, un es correspon entre les 10h i les 12h, lleugerament inferior al segon pic, que es correspon al període comprès entre les 19h i les 23h.

Respecte als preus de compensació, d'acord amb el RD 244/2019, tal i com s'ha comentat en l'apartat 2, els preus per la compensació d'energia excendentària es calculen a partir de la diferència entre el preu de venda horari i els desviaments que es produeixen en aquest període.

Degut a que la modalitat de compensació d'energia va començar quan es va publicar el RD 244/2019 del 5 d'abril, no es tenen les dades suficients com per determinar els preus mitjos anuals de compensació d'energia. D'aquesta manera, a continuació es realitza una comparació horària entre els preus de venda i els de compensació mitjos entre els mesos d'abril i juny de 2019, tal i com es pot veure en la Gràfica 9, per tal d'analitzar-ne les diferències.



Gràfica 9. Comparació de preus horaris entre les modalitats de venda i compensació d'electricitat [8] [10]

Tal i com es pot observar en la Gràfica 9, la diferència de preus entre venda i compensació és pràcticament la mateixa, sent inclús més elevat el preu per compensació que el de venda.

Així doncs, es decideix utilitzar els preus horaris obtinguts per la venda d'electricitat com a preus horaris per la compensació d'excedents.

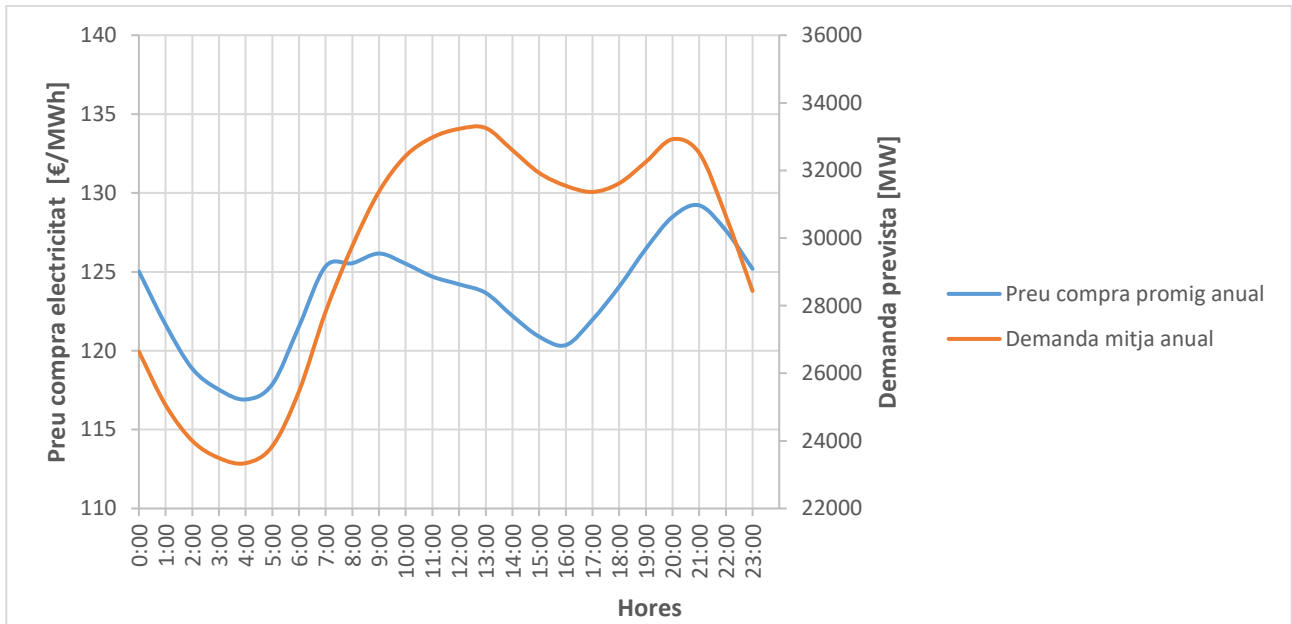
3.7. ANÀLISI DEL MERCAT ELÈCTRIC ACTUAL

A continuació s'analitzen alguns aspectes relacionants amb les dades obtingudes en els apartats anteriors, per tal d'adquirir un millor coneixement sobre el sistema elèctric actual, les instal·lacions de generació i la demanda elèctrica.

3.7.1. RELACIÓ DEMANDA ELÈCTRICA AMB ELS PREUS DE COMPRA I VENDA D'ELECTRICITAT

Per analitzar el comportament dels preus horaris de compra d'electricitat, en la Gràfica 10 es mostren les corbes corresponents al preu de compra considerant la tarifa PVPC estàndard (2.0A)⁷ i la demanda d'electricitat.

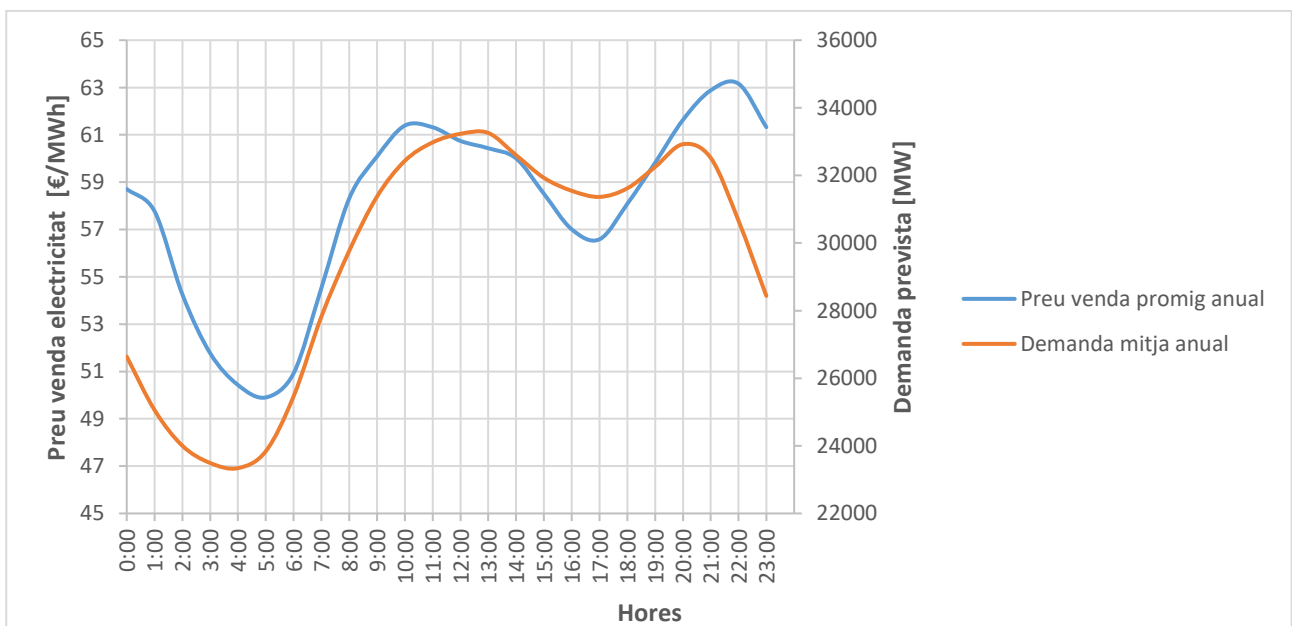
⁷ S'utilitza la corba de preus horaris de la tarifa 2.0A perquè és la que està directament relacionada amb la demanda. Les tarifes amb discriminació horària, al tenir l'objectiu d'anivellar la corba de demanda (pretenen modificar-la), no es consideren.



Gràfica 10. Comparació corba de demanda - corba de preu de compra d'electricitat tarifa PVPC 2.0A

Com es pot observar en la Gràfica 10, respecte ambdós corbes, s'observa una relació de proporcionalitat entre l'oferta i la demanda: com més demanda més elevat és el preu de compra, en que els màxims i mínims de les corbes aproximadament coincideixen en les mateixes hores.

El preu de venda d'electricitat també té relació directa amb la demanda. Tal i com es pot observar en la Gràfica 11, la corba del preu de venda horari mig anual i la corba de demanda mitja anual tenen una tendència d'acord entre elles: preus de venda elevats quan la demanda és a alta i preus de venda baixos quan la demanda és baixa.



Gràfica 11. Comparació corba de demanda - corba de preu de venda d'electricitat

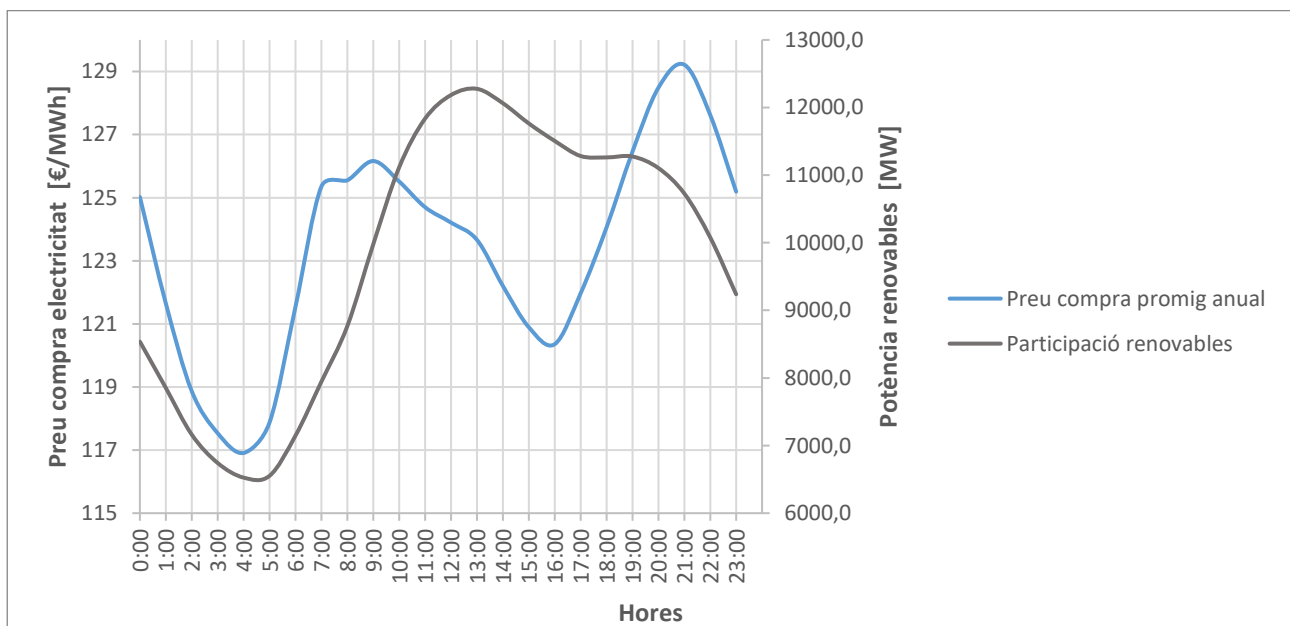
3.7.2. RELACIÓ PARTICIPACIÓ DE FONTS DE GENERACIÓ RENOVABLES AMB ELS PREUS DE COMPRA I VENDA D'ELECTRICITAT

A continuació s'analitza visualment si hi ha algun tipus de relació entre el preu de compra i venda d'electricitat amb el percentatge de participació de les centrals de generació renovables de l'estat espanyol.

Els tipus de centrals considerades són les que tenen més participació en el mix elèctric de l'estat, tal i com s'indica en la Gràfica 15, pàgina 24: les hidroelèctriques, solars fotovoltaïques, solars tèrmiques i eòliques.

Com que la corba de preus de compra i la corba de preus de venda tenen una tendència similar (vegeu Gràfica 10 i Gràfica 11, pàgina 18), tan sols es compararà la participació de renovables amb el preu de compra, entenent que la comparació respecte el preu de venda porta als mateixos resultats.

En la Gràfica 12, es mostren la corba de preus de compra d'electricitat i la de potència de generació amb centrals renovables.



Gràfica 12. Comparació corba de potència horària mitjana de les centrals renovables - corba de preu de compra d'electricitat tarifa PVPC 2.0A

Com es pot observar en la Gràfica 12, no hi ha una relació directa del preu de compra amb la participació de les renovables, ja que no es dona una tendència globalment similar entre les corbes.

Ara bé, analitzant aquesta gràfica, considerant els resultats de l'Apartat 3.3.1, es pot dir que la baixada dels preus de compra entre les 13h i les 18h és deguda per una banda al màxim de generació elèctrica amb fonts renovables que es dona en aquest període, i a més a més, també pel fet que la demanda energètica en aquestes hores va de baixa.⁸

⁸ Aquesta deducció queda plenament justificada amb el contingut de explicat en l'Apartat 3.2.1 .

3.8. ESTIMACIÓ DE LA GENERACIÓ D'EXCEDENTS

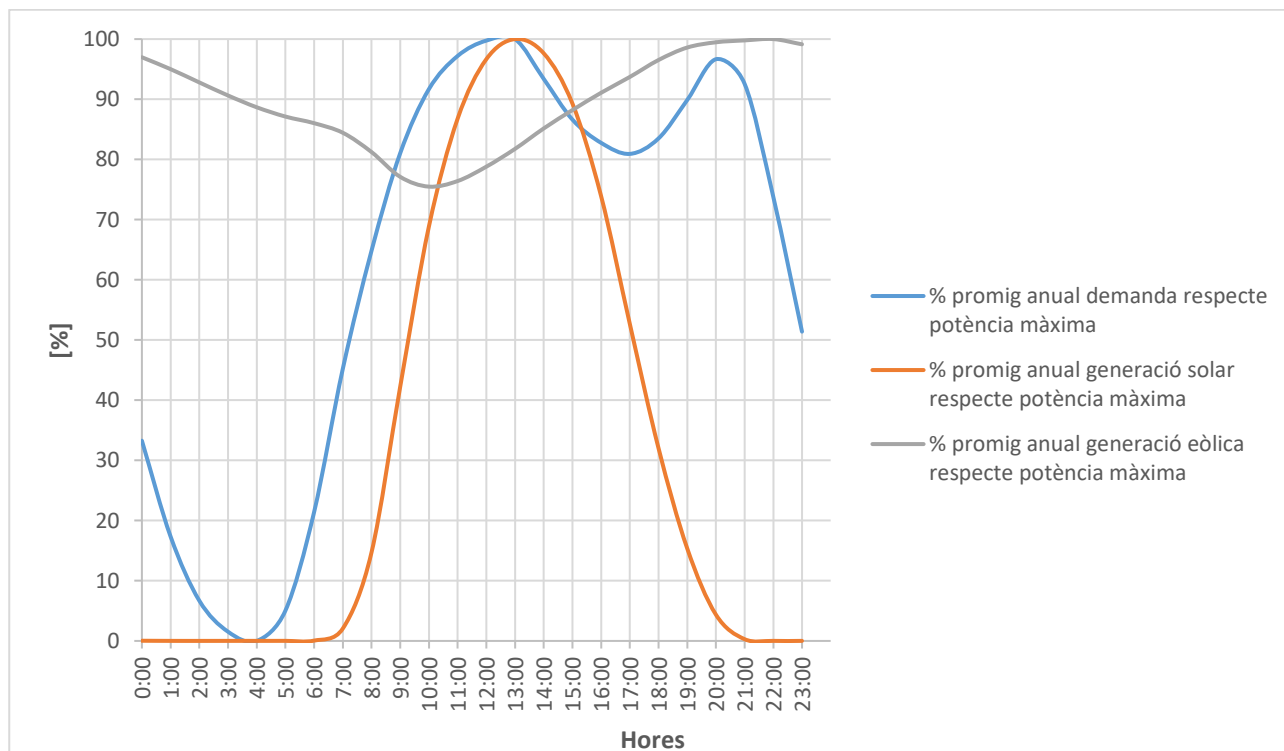
A continuació es determina de manera general la tendència per la generació d'energia excedentària en una instal·lació de generació per autoconsum, a partir de les dades obtingudes i hipòtesis realitzades al llarg de l'Apartat 3.

La quantitat d'excedents que es genera en una instal·lació d'autoconsum fotovoltaica o eòlica, depèn de la demanda elèctrica que es tingui en cada instant, de la potència instal·lada de la central de generació i de la meteorologia de la zona on estigui ubicada la instal·lació de generació. Com que totes tres variables són altament arbitràries, es realitza una estimació de l'energia excedentària en base a les hipòtesis indicades a continuació.

Per una banda, per determinar la quantitat d'excedents generats horàriament, primerament cal definir la corba de demanda d'energia elèctrica d'un habitatge en el cas d'aquest estudi. Com que aquesta corba pot ser molt variable en funció del tipus d'habitatge que es tracti (pis o casa) i dels hàbits dels inquilins (consumeixen més electricitat en una o altra hora), es decideix partir de la corba de demanda elèctrica de l'estat espanyol (Gràfica 6 pàgina 14), i corregir-la per tal d'adequar-la a la corba de demanda tipus d'un habitatge (Vegeu l'Apartat A.1).

D'altra banda, també és necessari conèixer la potència instal·lada de la central de generació per autoconsum. Com que aquesta és una dada totalment variable, es parteix de la hipòtesi que la potència instal·lada es correspongui amb la potència del pic de consum màxim de la corba de demanda (potència màxima que es requereix a l'habitatge).

Amb aquestes consideracions, i tenint en compte les corbes de generació d'energia amb la tecnologia fotovoltaica i eòlica (apartats 3.3.1 i 3.3.2), s'obté la Gràfica 13. (vegeu apartat A.4.1 i A.4.2 pels valors numèrics).



Gràfica 13. Corba de demanda corregida i corbes de generació fotovoltaica i eòlica

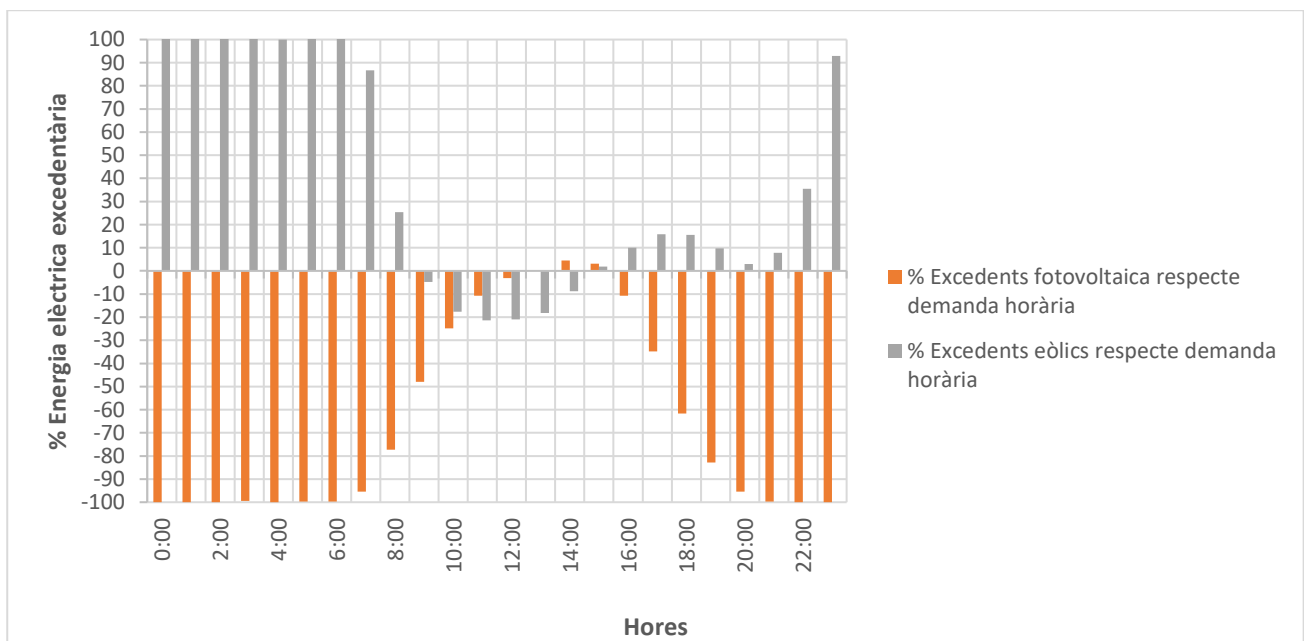
Com es pot observar, la potència màxima de generació coincideix amb la demanda màxima per ambdós tecnologies de generació. Pel cas de les instal·lacions solars fotovoltaiques, a les 13h és

quan es proporciona la potència màxima de generació. En el cas de les instal·lacions eòliques, la potència màxima de generació es troba entre les 20h i les 00h.

Respecte la demanda mínima d'electricitat, es produeix a les 04h de la matinada, amb valor considerat zero. Pel cas d'una instal·lació fotovoltaica és correspon en hora de generació nul·la. En el cas d'una instal·lació eòlica, sempre hi haurà excedents d'energia en aquesta hora.

Cal observar també que, en el cas de la generació amb tecnologia eòlica, l'aprofitament de la potència instal·lada és major que en el cas de la solar, és a dir, les fluctuacions de generació d'electricitat són menors utilitzant tecnologia eòlica.⁹

Amb aquestes corbes normalitzades es poden relacionar els percentatges d'energia elèctrica horària excedentària respecte el percentatge de demanda horària, en funció de la tecnologia utilitzada, tal i com s'indica en la Gràfica 14.



Gràfica 14. Excedents generats per les instal·lacions d'autoconsum en funció de la demanda horària i la tecnologia de generació d'electricitat

Com es pot observar en la gràfica anterior, les hores amb més i menys facilitat per generar excedents són les definides en la Taula 3.

Taula 3. Hores de més i menys probabilitats per la generació d'excedents segons tipus d'instal·lació

SOLAR		EÒLICA	
+ Probabilitat	- Probabilitat	+ Probabilitat	- Probabilitat
De 10h a 17h	De 17h a 10h	De 21h a 7h	De 7h a 21h

⁹ Encara que el resultat per l'aprofitament de la potència instal·lada sigui superior en una instal·lació eòlica, l'emplaçament d'aquesta és crucial per garantir un bon rendiment de funcionament de la instal·lació.

D'aquesta manera, els valors obtinguts en la Gràfica 14 permeten fer-se una idea general de les hores en que es podria generar més excedents i també de les hores en que hi hauria dèficit d'energia d'autoconsum i caldria comprar l'energia a la xarxa convencional.

En el cas de les instal·lacions solars fotovoltaïques, 17 hores teòriques són les que s'hauria d'alimentar l'habitatge amb electricitat convencional de xarxa (tècnicament, si es considera que durant la matinada el consum elèctric a l'habitatge és nul, són aproximadament 11h). A més a més, aproximadament entre les 21h i les 7h la generació d'electricitat amb aquesta font és nul·la (no hi ha radiació solar).

En el cas de la generació eòlica, 14 hores són les teòriques en que probablement es necessiti energia de la xarxa convencional, tenint en compte però que durant aquestes hores part de l'electricitat consumida a l'habitatge quedarà coberta (el vent pot bufar nit i dia).

3.9. SISTEMA ELÈCTRIC ACTUAL. CONCLUSIONS

De tots els apartats descrits respecte la situació del mercat elèctric actual, les conclusions que se n'extreuen són les següents:

- Pels anàlisis d'aquest estudi s'utilitzaran les dades de compra d'energia elèctrica d'acord amb les tarifes PVPC de les comercialitzadores de referència.
- Les hores de màxima generació d'energia elèctrica en instal·lacions de generació fotovoltaïques és entre les 11h i les 15h, i pel cas de les instal·lacions eòliques, entre les 18h i les 23h.
- Els preus de compensació es consideren idèntics als de venda, amb la única diferència que, pel cas de venda s'ha de considerar l'impost de generació i els peatges d'accés a xarxa.
- La tendència de les corbes dels preus de compra i venda d'electricitat estan d'acord amb la tendència de la corba de demanda.
- Alta participació d'energia renovable al sistema elèctric proporciona preus més barats de compra i venda d'electricitat.
- D'acord amb els preus de compra, interessa realitzar autoconsum entre les 8h i les 10h, i sobretot entre les 19h i 23h.
- D'acord amb els preus de venda/compensació, interessa vendre o compensar l'electricitat excedentària en els períodes de 9h a 14h i de 19h a 00h.
- Les hores amb més tendència per generar-se excedents són entre les 10h i les 17h pel cas de les instal·lacions fotovoltaïques i entre les 21h i 07h pel cas de les instal·lacions eòliques.
- Les hores amb més tendència per tenir dèficit d'excedents són entre les 17h i les 10h pel cas de les instal·lacions solars i entre les 7h i les 21h pel cas de les instal·lacions eòliques.
- Les instal·lacions de generació eòliques poden tenir un major aprofitament de la potència instal·lada que no pas les fotovoltaïques.

Les conclusions en el conjunt d'aquest apartat 3, seran d'utilitat a l'hora de comprendre i verificar els resultats obtinguts en els apartats 5.

4. PREVISIÓ MERCAT ELÈCTRIC FUTUR

Els preus de compra-venda d'electricitat estan en continua evolució. Molts són els factors que hi influeixen com les instal·lacions que participen en la generació, la demanda, la meteorologia, etc. Però no només aquests, també la política i l'especulació hi poden tenir a veure.

Ja d'entrada, comentar que en el mateix real decret 244/2019 s'especifiquen unes conseqüències derivades del foment de l'autoconsum, que tindran repercussió en els consumidors i també en el sistema elèctric actual. Són les següents:

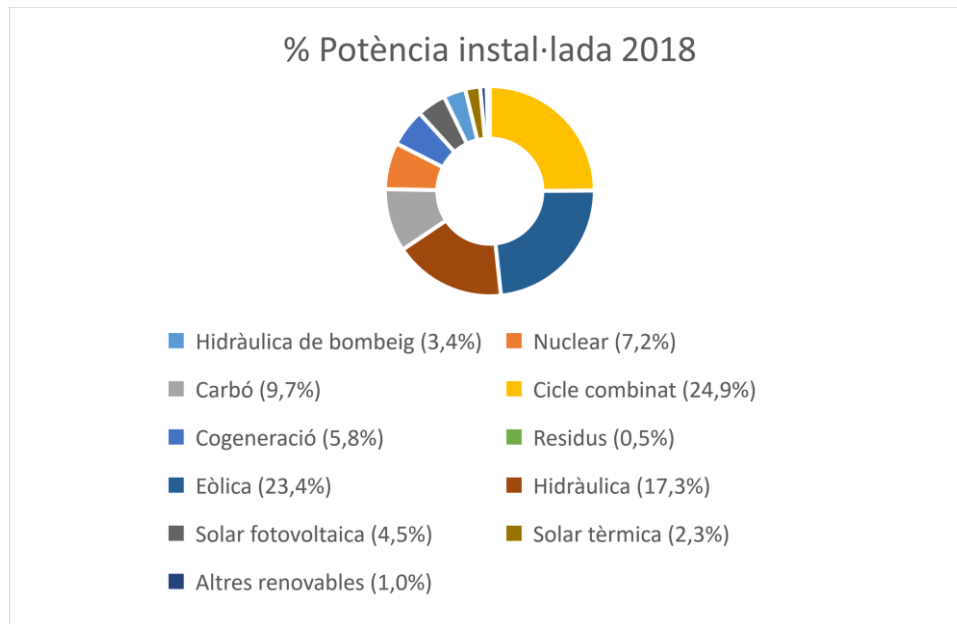
- Respecte els consumidors, el fet d'autoconsumir energia elèctrica suposarà una disminució del preu de l'energia, degut a que es produirà un augment de l'energia ofertada procedent dels excedents venuts i a una disminució de la demanda que es proveïda per la pròpia energia autoconsumida.
- Respecte el sistema elèctric en general, el fet d'autoconsumir suposarà disminució d'ingressos per peatges i altres recàrrecs. Aquesta disminució d'ingressos es veurà compensada per l'augment de l'electrificació de l'economia.
- Respecte el transport, el fet d'abastir-se amb autoconsum també suposa una reducció de pèrdues energètiques a la línia de transport, ja que instal·lació generadora i consumidor estan més propers.

En aquest apartat es pretén conèixer i entendre quins són els factors que més influeixen en els preus de compra i venda d'electricitat, per així poder fer una predicció de com podrien arribar a ser els preus en un futur pròxim. D'aquesta manera, es podran corregir les corbes de preus que s'han presentat en l'apartat 3 i realitzar els càlculs de rendibilitat que es presenten en els apartats 5 amb aquests preus corregits.

Així doncs, a continuació s'estudiarà quina és la previsió del sistema elèctric de l'estat espanyol de cara als propers anys pròxims, i d'acord amb això es buscaran i s'estudiaran altres sistemes elèctrics d'arreu que tinguin similituds amb aquesta previsió.

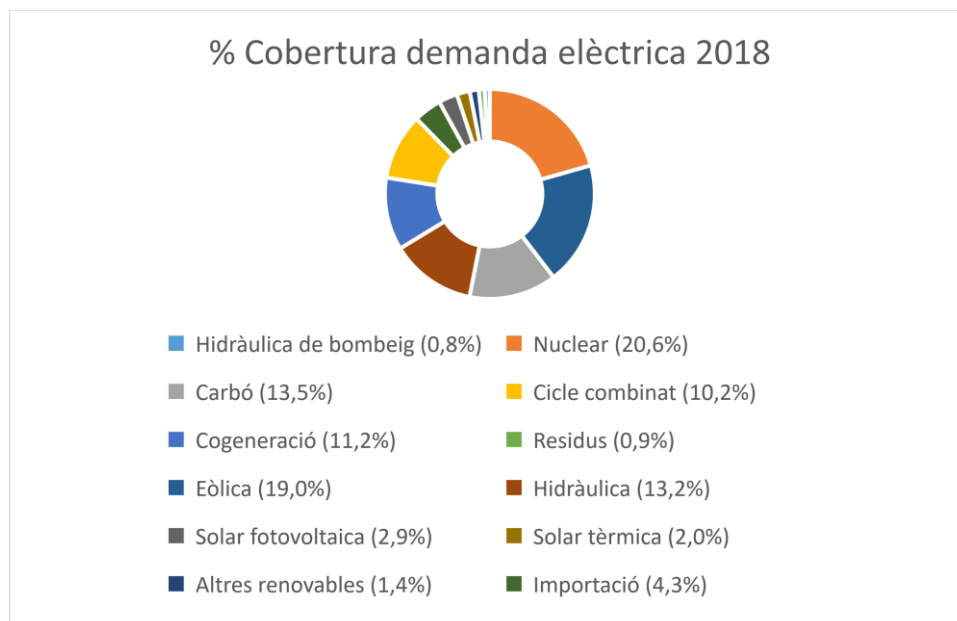
4.1. ESTAT ACTUAL I PREVISIÓ DEL SISTEMA ELÈCTRIC

A data de 31 de desembre de 2018, la potència instal·lada de totes les centrals de generació renovables (residus renovables, eòlica, hidràulica, solar fotovoltaica i solar tèrmica i altres) suposen un 48,5% de la potència instal·lada total a l'estat espanyol de 98.643 MW, tal i com s'observa en la Gràfica 15.



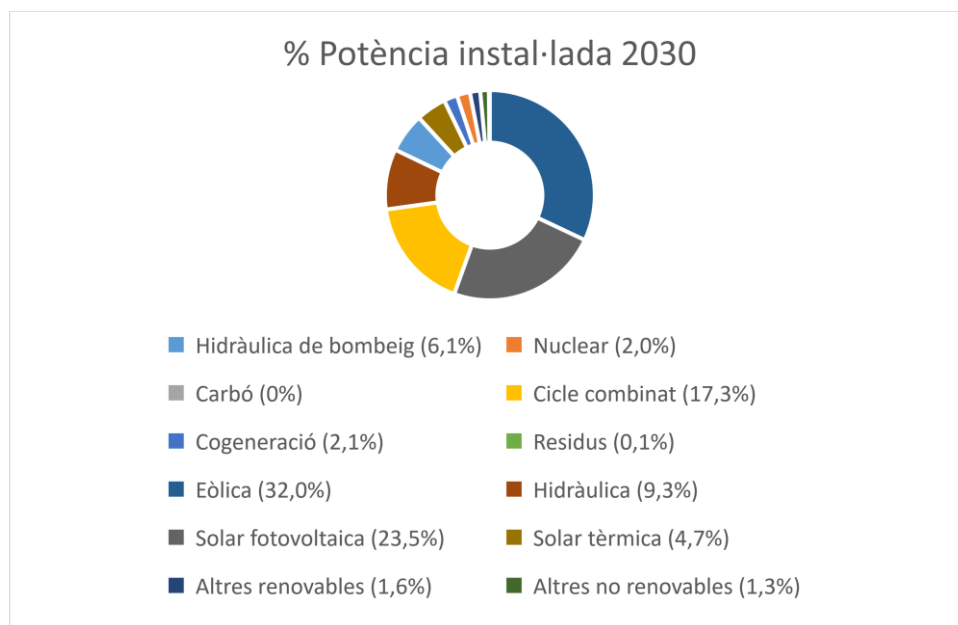
Gràfica 15. Percentatge de potència instal·lada de les centrals de generació de l'estat espanyol l'any 2018 [11]

D'aquesta potència instal·lada de renovables, tal i com es pot veure en la Gràfica 16, la seua participació en el mix elèctric és del 38,5%, respecte el total de 257.995 GWh.



Gràfica 16. Percentatge de l'energia generada per les centrals de generació de l'estat espanyol l'any 2018 [11]

D'acord amb el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) del 22 de febrer de 2019, es pretén que entre el període 2021 - 2030, la potència instal·lada a l'estat espanyol augmenti fins als 156.965 MW (59,1% més que la potència instal·lada a finals del 2018) on la participació de les centrals renovables en la producció d'energia elèctrica sigui del 74% (un 35,5% més que l'energia generada al 2018). D'aquesta manera, el repartiment de la potència instal·lada prevista pel 2030 segons el PNIEC és la indicada en la Gràfica 17:



Gràfica 17. Previsió percentatge potència instal·lada de les centrals de generació de l'estat espanyol l'any 2030 [12]

Així doncs, al 2030, la potència instal·lada de les centrals de generació renovables es preveu que sigui del 77,1%, això suposarà un increment del 28,6% respecte la potència instal·lada de finals del 2018.

Partint de les dades del sistema elèctric del 2018 i les dades previstes de cara al 2030, en la Taula 4 es mostra la variació de potència instal·lada de cada tipus de central de generació en aquest període.

Taula 4. Variació de la potència instal·lada de les centrals de generació de l'estat espanyol entre el 2018 i 2030

	Variació [MW]	%
Hidràulica de bombeig	6170	184,0
Nuclear	-3921	-55,2
Carbó	-9568	-100,0
Cicle combinat	2584	10,5
Cogeneració	-2467	-43,1
Residus	-259	-52,6
Eòlica	27176	117,7
Hidràulica	-2456	-14,4
Solar fotovoltaica	32443	730,9
Solar tèrmica	5034	221,9
Altres renovables	1497	151,7

Com es pot observar, la tecnologia que més s'incrementarà serà la solar fotovoltaica (730,9%), seguida de lluny per la solar tèrmica (221,9%) i la hidràulica de bombeig (184%). Els tipus de centrals que més es reduiran són les de carbó (totes les que estan actives actualment, tancaran), les nuclears (-55%), residus (-52,6) i cogeneració (-43,1%).

Així doncs, d'acord amb resultats obtinguts de comparar el sistema elèctric actual amb la previsió del PNIEC, es pot concloure que l'estat espanyol, d'aquí fins al 2030 apostarà fortament per les instal·lacions de generació renovables, reduint així la participació de les centrals nuclears i les que utilitzen combustibles fòssils.

Aquesta tendència cap a un sistema elèctric més net de residus i mediambientalment més sostenible gràcies a l'increment de les centrals de generació renovables, ja s'està aplicant en altres països. Així doncs, en l'apartat 4.2 s'analitza el sistema elèctric d'aquests països per ajudar en la previsió dels preus de compra i venda d'electricitat a l'estat espanyol de cara al 2030.

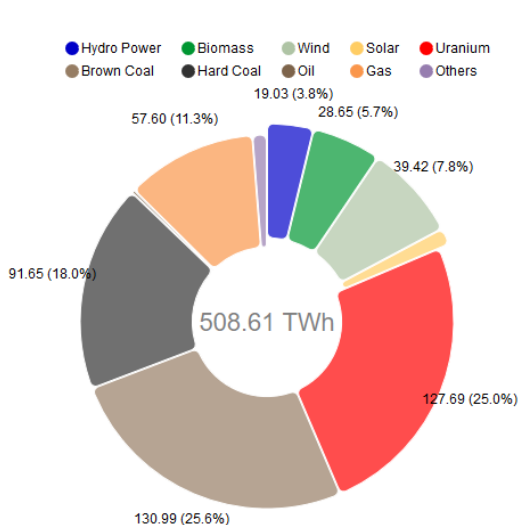
4.2. ESTUDI DELS PREUS DE L'ELECTRICITAT EN SISTEMES ELÈCTRICS AMB ALTA PARTICIPACIÓ DE RENOVABLES

A continuació s'analitzen dos mercats elèctrics actuals que tenen relació directa amb les directrius marcades pel PNIEC en que ja s'han començat a instaurar les mesures de transició cap a un sistema elèctric més sostenible:

- El mercat elèctric alemany, actualment en procés de desnuclearització i descarbonització, en el qual s'estan potenciant molt les energies renovables.
- El mercat elèctric dels països del nord d'Europa, que a dia d'avui ja tenen una participació de renovables molt elevada.

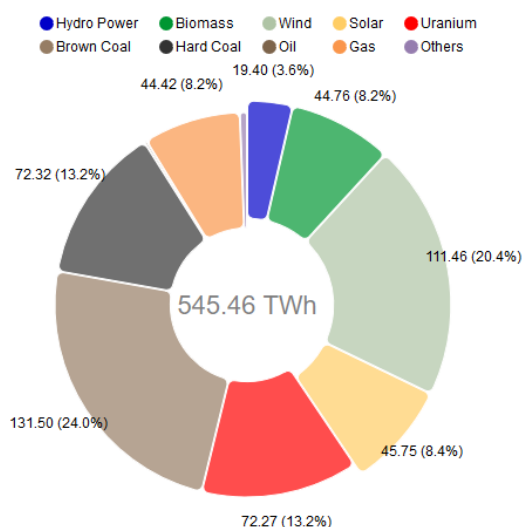
4.2.1. SISTEMA ELÈCTRIC ALEMANY

El sistema elèctric alemany fins al 2010 estava sostingut principalment per centrals tèrmiques de carbó i centrals nuclears: a finals del 2009 un 44% de la generació elèctrica es va obtenir en centrals tèrmiques de carbó i un 25% en centrals nuclears (vegeu la Gràfica 18). A partir de llavors, s'ha apostat per les energies renovables, deixant d'aquesta manera la participació de les centrals tèrmiques de carbó en 37,2% i les centrals nuclears en 13,2% (vegeu la Gràfica 19).



Net electricity generation of power plants for public power supply.
 Datasource: 50 Hertz, Amprion, Tennet, TransnetBW, Destatis, EEX
 Last update: 15 Dec 2018 18:32

Gràfica 18. Participació en l'electricitat generada a Alemanya l'any 2009 [14]

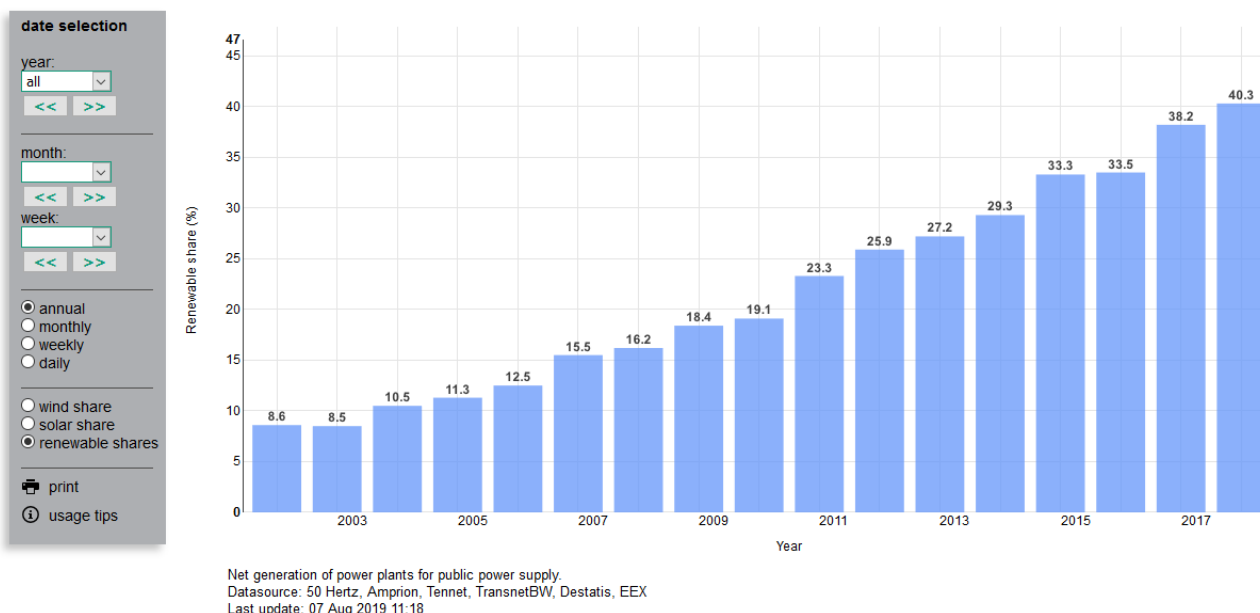


Net electricity generation of power plants for public power supply.
 Datasource: 50 Hertz, Amprion, Tennet, TransnetBW, Destatis, EEX
 Last update: 13 Mar 2019 11:44

Gràfica 19. Participació en l'electricitat generada a Alemanya el 2018 [14]

Pel que fa a la participació de les renovables en el mix elèctric, entre el 2010 i el 2018 hi ha hagut un increment del 21,2%, passant del 19,1% al 2010 fins el 40,3% al 2018, tal i com s'indica en la Gràfica 20.

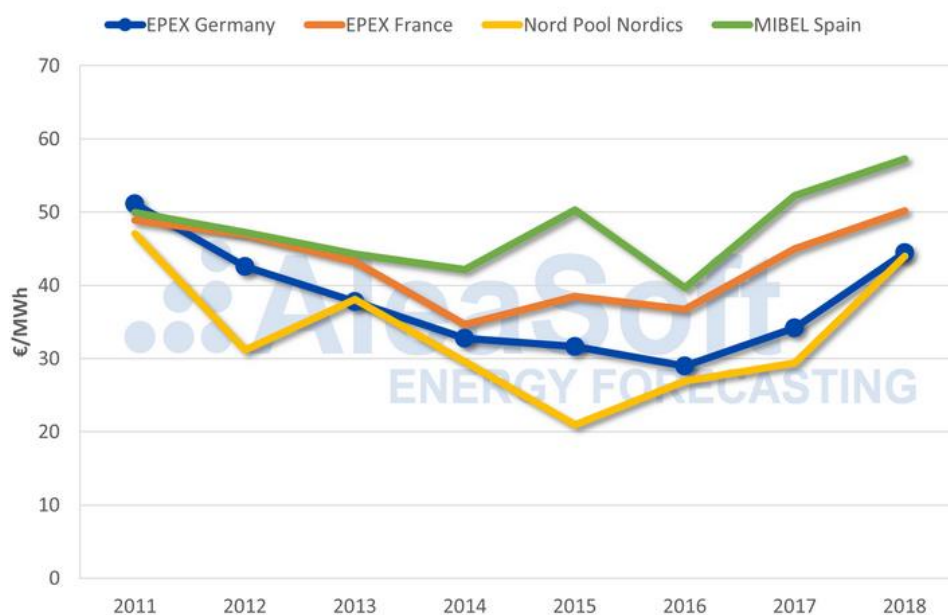
Annual renewable shares of electricity production in Germany



Gràfica 20. Evolució de la participació de fonts de generació renovables en el mix elèctric alemany entre 2002 i 2018 [14]

Analitzant ara el mercat elèctric alemany (EPEX SPOT), entre el 2016 i 2018, el preu de l'electricitat ha pujat un 53% en promig, com es pot observar en la Gràfica 21.

Wholesale electricity market price



Sources: Prepared by AleaSoft using data from EPEX SPOT, OMIE and Nord Pool.

Gràfica 21. Evolució dels preus de venda d'electricitat per diferents mercats elèctrics europeus des del 2011 fins 2018 [15]

Per una banda, segons AleaSoft, la producció de carbó que és la que marca la major part dels preus marginals del mercat alemany, està produint aquest increment en el preu de venda de l'electricitat i també els drets d'emissions de CO₂¹⁰. En aquests darrers anys el preu del carbó i dels drets d'emissions de CO₂ s'han incrementat, de la mateixa manera que passa amb el preu del petroli i gas natural [15].

D'altra banda, Alemanya té un preu baix en el mercat elèctric comparat amb altres països d'europa (Espanya i França per exemple), i no obstant això, és el segon país amb la factura elèctrica més cara de la unió Europea de cara al consumidor final [16].

Això és degut a la política de transició energètica, la "Energiewende", que té com a objectiu final la producció de tota l'energia del país a partir de fonts renovables. Per portar-ho a terme, el govern alemany ha planificat les següents accions entre d'altres:

1. Haver tancat totes les centrals nuclears al 2022.
2. Haver tancat totes les centrals de carbó al 2038.
3. Subvencions per la construcció d'instal·lacions d'autoconsum.

Aquests punts, són els principals causants de l'alt preu de compra de l'electricitat pel consumidor final; les factures inclouen les ajudes a les energies renovables, als plans de desmantellament de les centrals nuclears i a les ajudes a les regions afectades pel tancament de les centrals tèrmiques i mines de carbó [15].

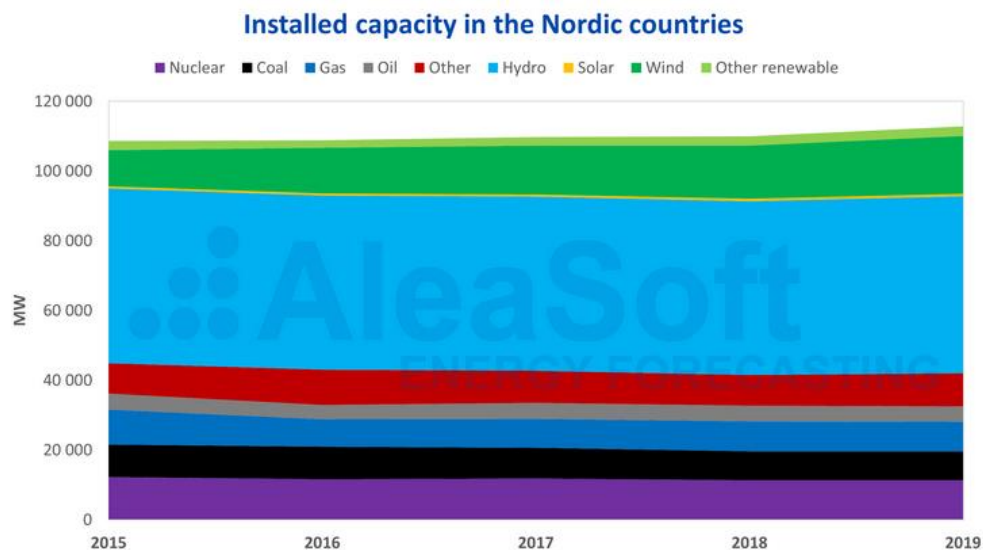
4.2.2. SISTEMA ELÈCTRIC DELS PAÏSOS NÒRDICS

A continuació s'analitza el mercat elèctric dels països nòrdics (Nord Pool Nordics) format per Suècia, Noruega, Finlàndia, Estònia, Letònia, Lituània i Dinamarca. Com es comenta a continuació, és un dels mercats europeus que actualment té més participació de renovables en el mix elèctric (prop del 63% de la generació al 2018 va ser amb fonts renovables).

En la gràfica Gràfica 21 de la pàgina 27 es pot observar que és el mercat amb preus més baixos en comparació amb altres mercats europeus.

Respecte les centrals de generació, tal i com s'observa en la Gràfica 22, les hidroelèctriques són les dominants en aquests països en global, amb un 45% de la potència total instal·lada a principis del 2019. La segona tecnologia amb més participació és la eòlica, amb una potència instal·lada del 13% aproximadament. Les centrals nuclears es situen en tercer lloc pel que fa a potència instal·lada.

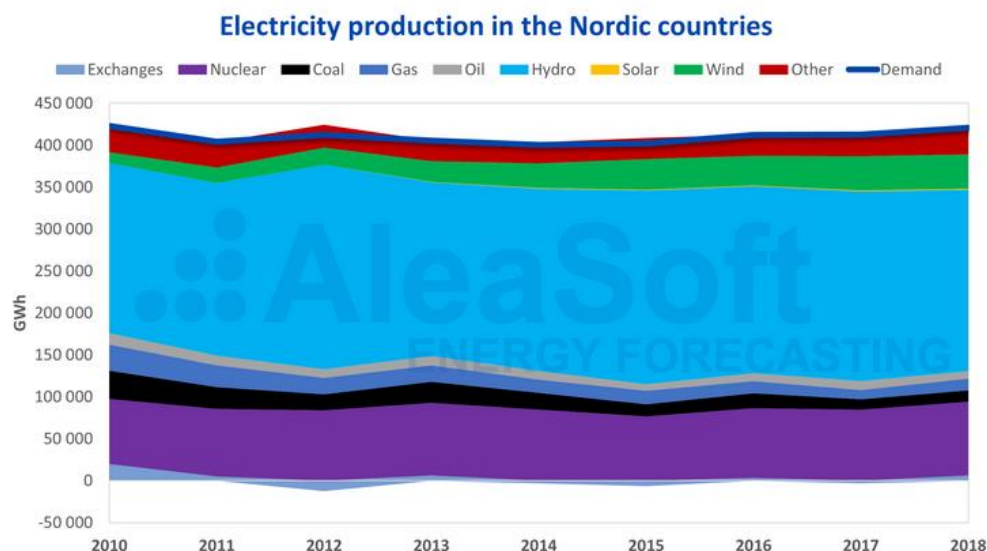
¹⁰ Els drets d'emissions de CO₂ són les quantitats màximes que una instal·lació generadora de CO₂ pot alliberar a l'atmosfera. En cas que la instal·lació n'hagi de generar més del compte o no arribi a la quantitat màxima, en el cas de la unió europea hi ha un mercat europeu per realitzar la compra/venda de determinades quantitats d'aquest gas. Les instal·lacions regulades són centrals tèrmiques, de cogeneració, siderúrgia, cementeres, etc. [17]



Source: Prepared by AleaSoft using data from ENTSO-E.

Gràfica 22. Potència instal·lada de les centrals de generació dels Països del nord d'Europa entre el 2015 i 2019 [18]

Respecte la generació elèctrica, tal i com es pot veure en la Gràfica 23, al 2018, el 53% de l'electricitat es va obtenir de les centrals hidroelèctriques, el 21% amb centrals nuclears i el 9,8% amb parcs eòlics. Així doncs un 62% de l'energia es va obtenir amb energies renovables, que sumat al 21% de la nuclear, el resultat és un 83% d'energia elèctrica amb baixes emissions de CO2. Les centrals tèrmiques de gas, carbó i fuel-oil van tenir una participació del 8,8% en el mix elèctric al 2018.



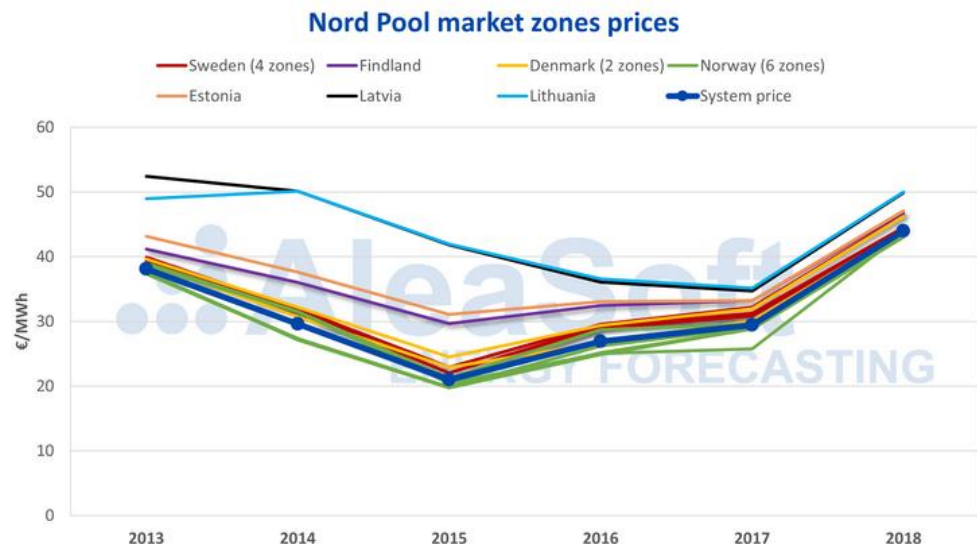
Source: Prepared by AleaSoft using data from ENTSOE-E, IEA, Svenska Kraftnät, Statnett, Fingrid, Energinet, Litgrid, Elering and AST.

Gràfica 23. Producció elèctrica als països del nord d'Europa per tipus de central de generació entre el 2010 i 2018 [18]

Discretitzant entre països que formen part del mercat elèctric nòrdic, destacar que, a Noruega al 2017 es va cobrir el 98% de la generació elèctrica amb energies renovables (el 96% provinent de centrals hidroelèctriques i el 2% de parcs eòlics) [19]. Dinamarca en canvi, al 2018 aproximadament va produir un 30% de l'electricitat amb renovables mentre que un 68% amb combustibles fòssils

[20]. Letònia, al 2018 aproximadament va produir un 44% amb fonts renovables (on la hidràulica va tenir una participació del 37% respecte el total), mentre que un 49% va ser amb combustibles fòssils [21].

Comparant els preus del mercat elèctric d'aquests països, en la Gràfica 24 s'observa que el mercat noruec és el que presenta un preu de venda de l'electricitat més baix, molt proper al danès. En canvi, Letònia és el país amb el preu del mercat elèctric més elevat juntament amb Lituània.



Sources: Prepared by AleaSoft using data from Nord Pool.

Gràfica 24. Preus de venda d'electricitat dels diferents mercats elèctrics dels països del nord d'Europa entre el 2013 i 2018 [18]

Analitzant les dades del mix elèctric i preu de venda en el mercat, es suposar que, en el cas de Noruega, preus tant baixos són deguts a l'alta participació de les renovables [22]. En el cas de Dinamarca i Letònia, a pesar que la participació de renovables sigui més elevada a Letònia, el preu de venda d'electricitat és més elevat que no pas a Dinamarca. S'ha pogut comprovar que, aquest fet pot ser degut a que Dinamarca és productora de gas i petroli i per tant, pugui aconseguir-los a un menor preu [23]. Letònia, en canvi té producció molt baixa de combustibles fòssils (inferior a Espanya) [24].

4.3. ALTRES CONSIDERACIONS

D'acord amb la notícia vista en el diari digital El Economista "España tiene solicitudes de renovables que cuadruplican el consumo eléctrico" del 8 d'abril de 2019 [25], s'assegura que actualment les peticions per obtenir punts de connexió per la construcció de centrals de generació renovable són de l'ordre de 150.000 MW, una xifra molt elevada si es compara amb la potència prevista de renovables a ser instal·lada al 2030 (120.000 MW aproximadament).

El director general d'operació de REE, Miguel Duvison, va venir a dir que part d'aquestes peticions no eren per la construcció de noves centrals de generació, sinó per finalitats especulatives. A més, altres fonts del sector, asseguren que s'està produint un increment de les peticions de punts de connexió per part dels promotors per ocupar els punts d'accés a la xarxa i revendre'ls així a major preu.

Per exemple, entre el desembre de 2018 i l'abril de 2019, les peticions per instal·lacions d'energia fotovoltaica han crescut des dels 68.805 MW fins 75.156 MW (6.351 MW en tres mesos).

El diari afirma que aquesta especulació al final acabarà repercutint indirectament als consumidors ja que s'incrementaran els costos d'inversió de les centrals, i per tant el preu que els consumidors finals acabaran pagant.

4.4. PREVISIÓ MERCAT ELÈCTRIC FUTUR. CONCLUSIONS

Havent analitzat el mercat elèctric alemany i el dels països del nord, tenint en compte que estan un pas per endavant en quant a la transició energètica respecte l'estat espanyol, es pot concloure que:

- El preu de venda de l'electricitat pot augmentar degut a un encariment dels drets d'emissions de CO2 o bé a l'encariment del preu dels combustibles fòssils.
- Un increment en la participació de renovables suposa una disminució en el preu de venda de l'electricitat.
- Polítiques estatals poden incrementar el preu de compra de l'electricitat a base d'afegir impostos, per exemple per subvencionar les centrals de generació renovables, ajudes pel desmantellament de les centrals nuclears i de carbó, etc.

Així doncs, vistos els factors influents en el preu de l'electricitat, i afegint-hi l'especulació que hi ha actualment en els punts d'accés a l'estat espanyol, al tractar-se de factors tan variables i que responen a qüestions polítiques i interessos econòmics a gran escala, no es veu viable la predicció dels preus de venda d'electricitat en un futur pròxim, tot i que sí s'ha pogut comprovar que el fet de tenir una alta participació de centrals renovables en el mercat elèctric suposa preus de venda d'electricitat més baixos.

En resum, de cara als pròxims apartats, es decideix utilitzar els valors del mercat elèctric actual obtinguts en l'apartat 3, i no realitzar cap tipus de predicció en els preus de compra i venda d'electricitat, que és el que es preveia a l'iniciar aquest apartat.

5. ANÀLISI DE RENDIBILITAT PER LES INSTAL·LACIONS DE GENERAció EN AUTOCONSUM

A continuació s'analitza la rendibilitat obtinguda pel fet d'instal·lar una central de generació fotovoltaica o eòlica en un habitatge/habitatges per realitzar autoconsum, d'acord amb l'especificat en el Real Decret 244/2019, que permet realitzar autoconsum amb compensació d'excedents o amb venda.

Les dades de partida utilitzades són les utilitzades en l'apartat 3, els valors numèrics de les quals es troben en l'apartat A.4.

Amb els resultats obtinguts, es podrà estudiar quina és la potència instal·lada més adient per una demanda elèctrica diària concreta.

5.1. NOMENCLATURA I EQUACIONS UTILITZADES

$E_{demanda}$ = demanda diària d'energia elèctrica a l'habitatge

P_{max} = potència instal·lada de la instal·lació de generació

E_{compra} = energia comprada diàriament a la xarxa convencional

E_{exc} = energia excedentària diària subministrada per la instal·lació de generació

i = hora d'estudi. Pren valors entre 0 i 23

t_i = interval de temps = 1h

$p_{compra,i}$ = preu de compra horari d'electricitat

$p_{venda,i}$ = preu de venda/compensació horari d'electricitat

$f_{d,i}$ = demanda horària respecte $E_{demanda}$

$f_{g,i}$ = potència horària mitja de la instal·lació de generació respecte P_{max}

$e_{demanda,i}$ = demanda horària d'energia elèctrica

$e_{generada,i}$ = quantitat d'energia generada horàriament

$e_{exc,i}$ = quantitat d'energia horària excedentària

$e_{compra,i}$ = quantitat d'energia comprada horàriament a xarxa convencional

$e_{exc,i}^p$ = energia horària excedentària respecte la demanda diària d'energia

B = benefici obtingut

R = rendibilitat obtinguda

$$E_{demanda} = \sum (e_{demanda,i})$$

$$E_{generada} = \sum (e_{generada,i})$$

$$E_{exc} = \sum (e_{exc,i})$$

$$e_{demanda,i} = f_{d,i} \cdot E_{demanda}$$

$$e_{generada,i} = f_{g,i} \cdot P_{max} \cdot t_i$$

$$e_{exc,i} = e_{generada,i} - e_{demanda,i} = f_{g,i} \cdot P_{max} \cdot t_i - f_{d,i} \cdot E_{demanda} \quad \forall e_{generada,i} - e_{demanda,i} > 0$$

$$e_{compra,i} = e_{demanda,i} - e_{generada,i} = f_{d,i} \cdot E_{demanda} - f_{g,i} \cdot P_{max} \cdot t_i \quad \forall e_{demanda,i} - e_{generada,i} > 0$$

5.2. HIPÒTESIS DE CàLCUL

Les dades utilitzades pel càlcul de rendibilitat dels sistemes d'acumulació són:

1. Corba de demanda horària
2. Corba de generació horària
3. Preus horaris de compra d'electricitat
4. Preus horaris de compensació/compra d'electricitat

Partint d'un valor de demanda elèctrica diària, a continuació es calcula la corba de rendibilitat de cada instal·lació de generació respecte l'energia generada diària per diversos valors de potència instal·lada de la central de generació.

Considerant la modalitat de compensació¹¹ d'energia excedentària, el benefici obtingut per la instal·lació d'una central de generació es calcula com:

$$B = \sum [(e_{generada,i} - e_{exc,i}) \cdot p_{compra,i}] + K \cdot \sum [e_{exc,i} \cdot p_{venda,i}] + (1 - K) \cdot \sum [e_{compra,i} \cdot p_{compra,i}]$$

En que:

$$K = 1 \text{ si } \frac{\sum [e_{exc,i} \cdot p_{venda,i}]}{\sum [e_{compra,i} \cdot p_{compra,i}]} < 1$$

$$K = 0 \text{ si } \frac{\sum [e_{exc,i} \cdot p_{venda,i}]}{\sum [e_{compra,i} \cdot p_{compra,i}]} \geq 1$$

¹¹ L'equació s'ha realitzat considerant les limitacions de la modalitat de compensació d'excedents definides en el Real Decret 244/2019: s'imposa que la diferència mensual entre el benefici que es percep per la compensació d'excedents i el preu pagat pel consum d'electricitat de la xarxa convencional no pot ser positiu. D'aquesta manera, en cas que es generin molts excedents i el consum d'electricitat de xarxa convencional no sigui elevat, part de l'electricitat excedentària s'estarà regalant al sistema.

Considerant la modalitat de venda d'energia excedentària, el benefici obtingut per la instal·lació d'una central de generació es calcula com:

$$B = \sum [(e_{generada,i} - e_{exc,i}) \cdot p_{compra,i}] + \left(\sum [e_{exc,i} \cdot p_{venda,i}] - \sum [e_{exc,i} \cdot p_{venda,i} \cdot 0,07] - 0,5 \cdot E_{exc} \right)$$

En que 0,07 correspon al 7% d'impost de producció i 0,5 són els €/MWh de peatge d'accés a xarxa, tal i com es comenta en la Taula 1, pàgina 6.

La rendibilitat respecte l'energia generada es calcula com:

$$R = \frac{B}{E_{generada}}$$

Finalment, havent calculat beneficis i rendibilitats per diversos valors de potència instal·lada, es grafiquen els resultats, de manera que puguin ser de referència per la determinació de rendibilitat de qualsevol sistema d'autoconsum a partir de la potència instal·lada i la demanda elèctrica diària.

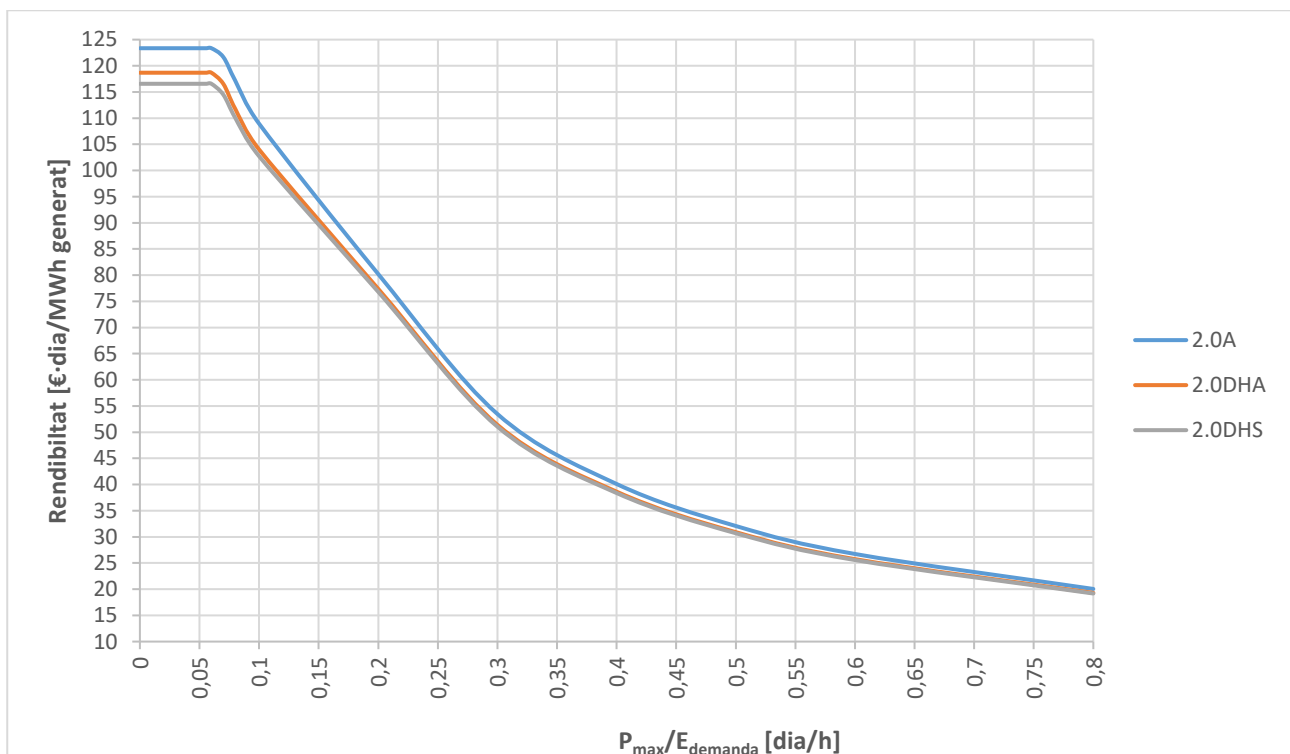
Per una millor comprensió de les corbes de rendibilitat obtingudes vegeu l'apartat A.2.

5.3. RENDIBILITAT EN INSTAL·LACIONS DE GENERACIÓ ACOLLIDES A COMPENSACIÓ D'EXCEDENTS

Pel cas de les instal·lacions de generació solars, tal i com es pot veure en la Gràfica 25, la tarifa PVPC que aporta més rendibilitat a la instal·lació és la estàndard 2.0A.

La màxima rendibilitat es manté aproximadament constant fins $\frac{P_{max}}{E_{demanda}} \approx 0,06 \frac{dia}{h}$ amb un valor de més de $120 \text{ €} \cdot \frac{dia}{MWh \text{ generats}}$.

Pel valor $\frac{P_{max}}{E_{demanda}} \approx 0,8 \frac{dia}{h}$ la rendibilitat baixa a aproximadament a $20 \text{ €} \cdot \frac{dia}{MWh \text{ generats}}$.

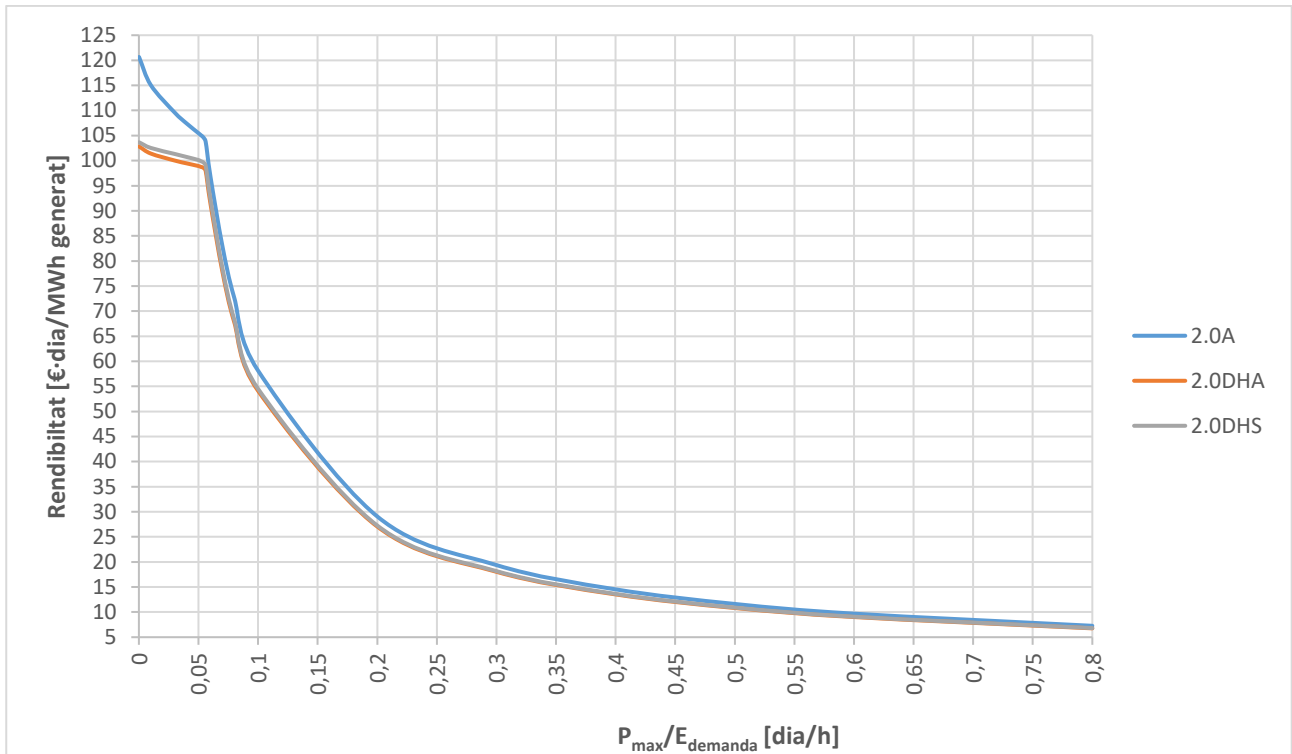


Gràfica 25. Rendibilitats de les instal·lacions de generació fotovoltaïques acollides a compensació d'excedents en funció de la tarifa PVPC

Pel cas de les instal·lacions de generació eòliques, tal i com es pot veure en la Gràfica 26, la tarifa PVPC que aporta més rendibilitat a la instal·lació és la estàndard 2.0A.

El punt on la rendibilitat comença a baixar amb més pendent correspon a $\frac{P_{max}}{E_{demanda}} \approx 0,057 \frac{dia}{h}$ amb un valor màxim de $105 \text{ €} \cdot \frac{dia}{MWh \text{ generats}}$.

Pel valor $\frac{P_{max}}{E_{demanda}} \approx 0,8 \frac{dia}{h}$ la rendibilitat baixa a aproximadament a $7 \text{ €} \cdot \frac{dia}{MWh \text{ generats}}$.



Gràfica 26. Rendibilitats de les instal·lacions de generació eòliques acollides a compensació d'excedents en funció de la tarifa PVPC

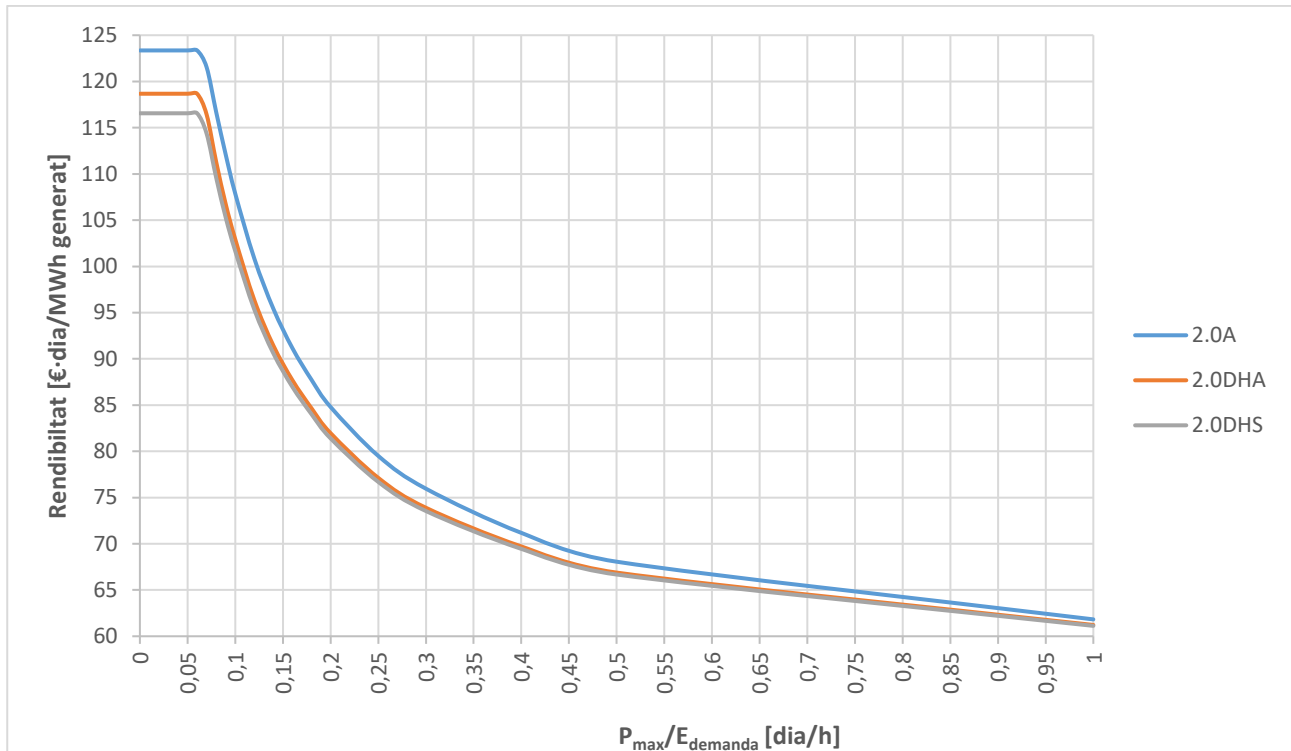
5.4. RENDIBILITAT EN INSTAL·LACIONS DE GENERACIÓ ACOLLIDES A VENDA D'EXCEDENTS

Pel cas de les instal·lacions de generació solars, tal i com es pot veure en la Gràfica 27, la tarifa PVPC que aporta més rendibilitat a la instal·lació és la estàndard 2.0A.

La màxima rendibilitat es manté aproximadament constant fins $\frac{P_{max}}{E_{demanda}} \approx 0,06 \frac{dia}{h}$ amb un valor de més de $120 \text{ €} \cdot \frac{dia}{MWh \text{ generats}}$.

Pel valor $\frac{P_{max}}{E_{demanda}} \approx 0,1 \frac{dia}{h}$ la rendibilitat baixa a aproximadament $61 \text{ €} \cdot \frac{dia}{MWh \text{ generats}}$.

També, s'ha pogut obtenir el valor de rendibilitat límit considerant una potència instal·lada de la central de generació molt elevada. El valor obtingut és $54,95 \text{ €} \cdot \frac{dia}{MWh \text{ generats}}$.



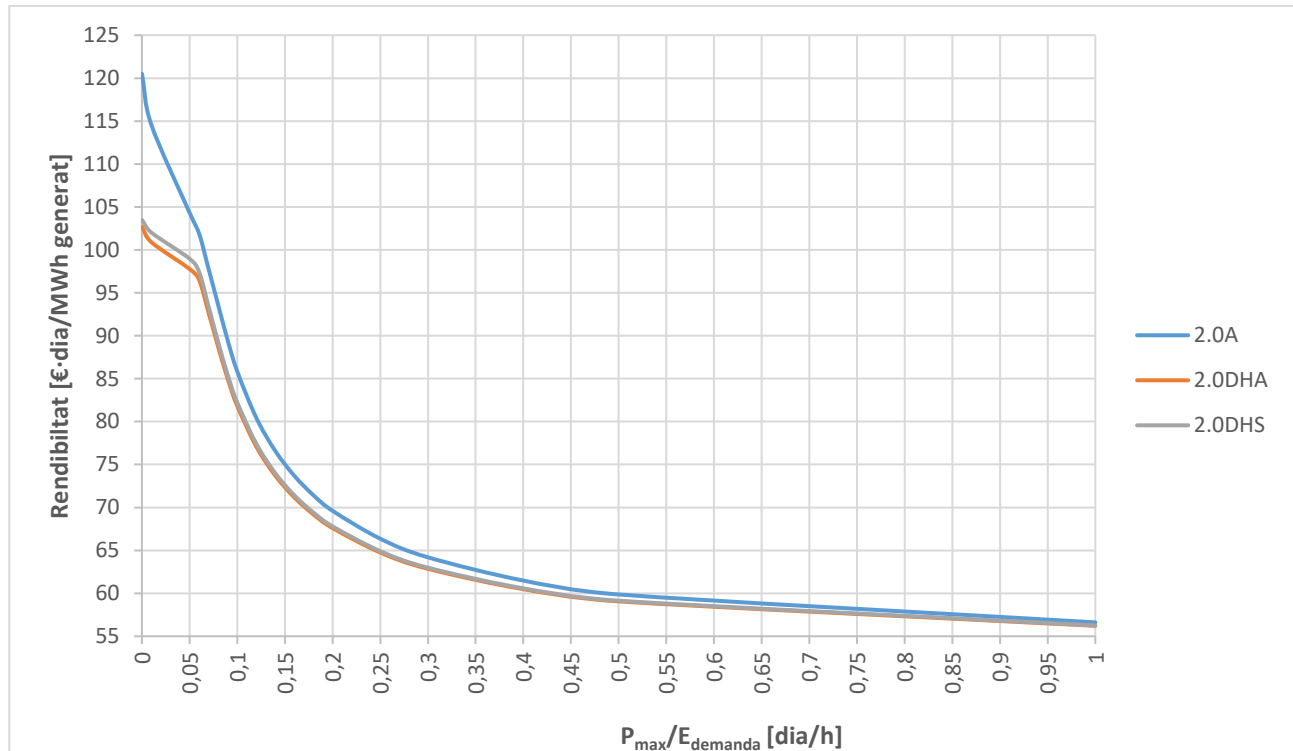
Gràfica 27. Rendibilitats de les instal·lacions de generació fotovoltaïques acollides a venda d'excedents en funció de la tarifa PVPC

Pel cas de les instal·lacions de generació eòliques, tal i com es pot veure en la Gràfica 28, la tarifa PVPC que aporta més rendibilitat a la instal·lació és la estàndard 2.0A.

El punt on la rendibilitat comença a baixar amb més pendent correspon a $\frac{P_{max}}{E_{demanda}} \approx 0,057 \frac{dia}{h}$ amb un valor màxim de $100 \text{ €} \cdot \frac{dia}{MWh \text{ generats}}$.

Pel valor $\frac{P_{max}}{E_{demanda}} \approx 1 \frac{dia}{h}$ la rendibilitat baixa a aproximadament a $56 \text{ €} \cdot \frac{dia}{MWh \text{ generats}}$.

També, s'ha pogut obtenir el valor de rendibilitat límit considerant una potència instal·lada de la central de generació molt elevada. El valor obtingut és $53,37 \text{ €} \cdot \frac{dia}{MWh \text{ generats}}$.



Gràfica 28. Rendibilitats de les instal·lacions de generació eòliques acollides a venda d'excedents en funció de la tarifa PVPC

5.5. ANÀLISI DELS RESULTATS

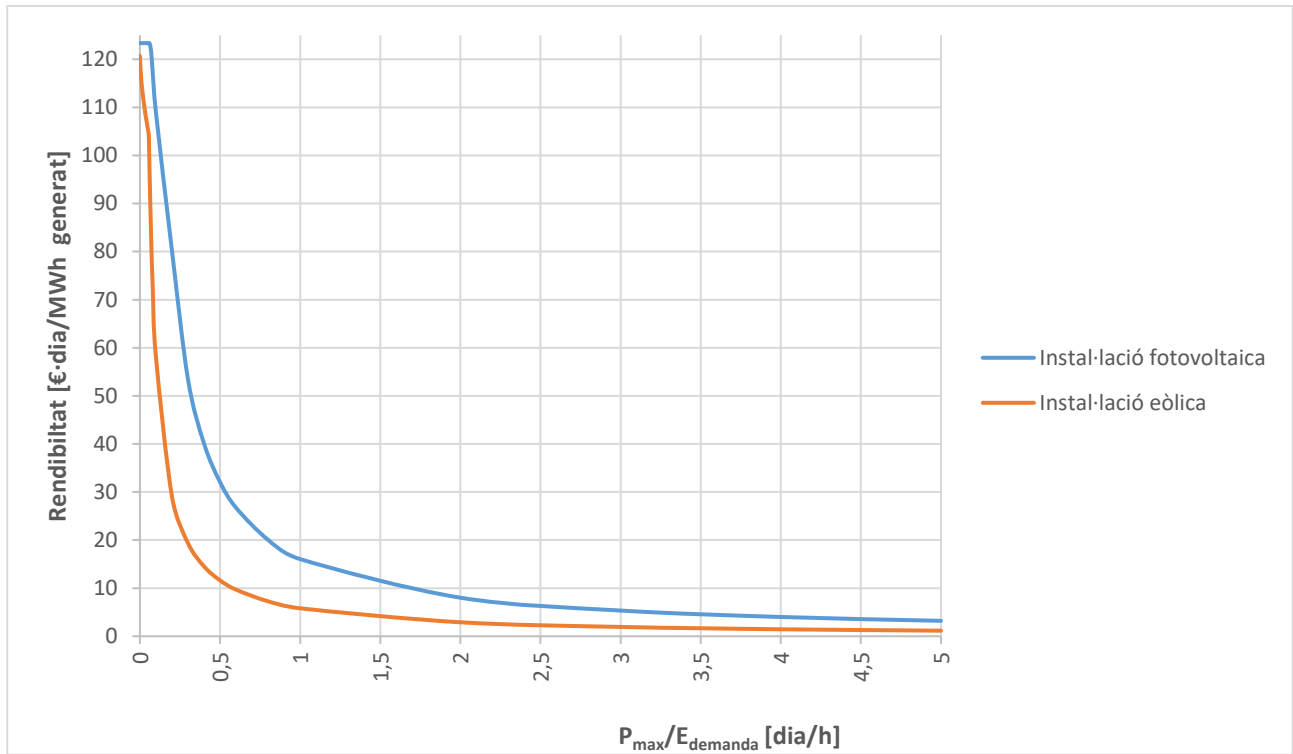
A continuació s'analitzen els dos tipus d'instal·lacions (fotovoltaica i eòlica) per determinar quina presenta major rendibilitat en quant a:

- Tipus d'instal·lació
- Modalitat de gestió de l'energia excedentària

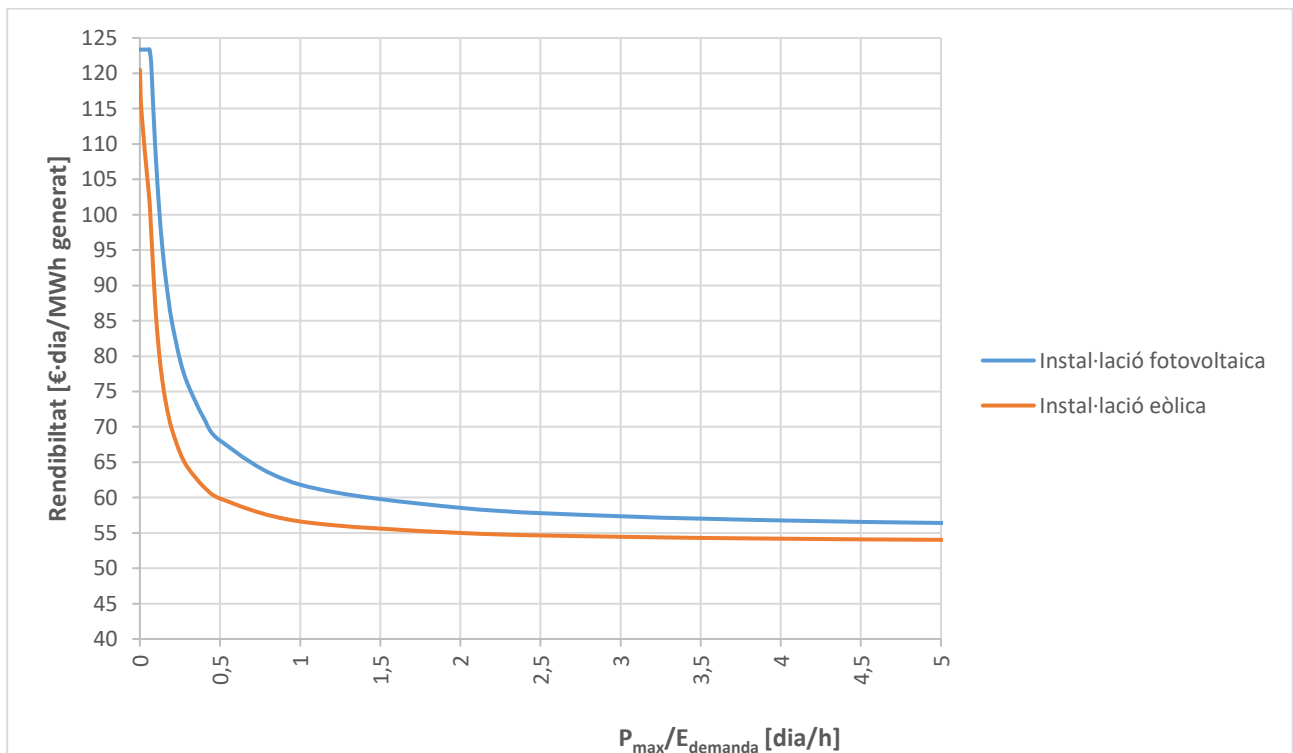
Les corbes de rendibilitat que s'utilitzen per realitzar la comparació són les corresponents a la tarifa PVPC 2.0A.

5.5.1. COMPARACIÓ RENDIBILITAT PER TIPUS D'INSTAL·LACIÓ DE GENERACIÓ

A continuació es comparen les corbes de rendibilitat de cada tipus d'instal·lació per determinar-ne quina presenta una major rendibilitat envers l'altra.



Gràfica 29. Comparació rendibilitats en instal·lacions de generació fotovoltaïques i eòliques en modalitat de compensació



Gràfica 30. Comparació rendibilitats en instal·lacions de generació fotovoltaïques i eòliques en modalitat de venda

Com pot observar-se en la Gràfica 29 i la Gràfica 30, les instal·lacions de generació solars tenen més rendibilitat per qualsevol relació $\frac{P_{max}}{E_{demanda}}$, amb diferències màximes de rendibilitat segons la Taula

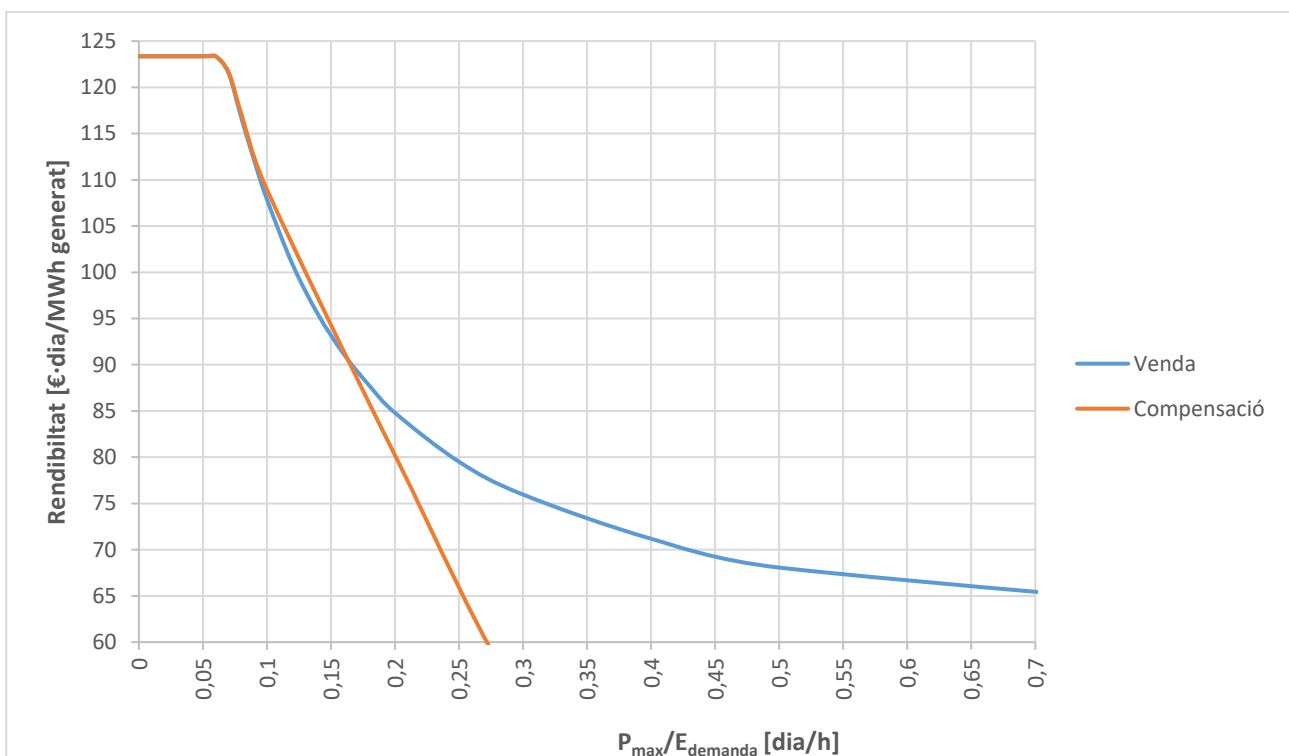
5.

Taula 5. Diferències de rendibilitat màximes entre instal·lacions de generació fotovoltaïques i eòliques

Modalitat	Interval $P_{max}/E_{demanda}$ [dia/h]	Diferència de rendibilitats [€·dia/MWh generats]
Compensació	[0,08;0,2]	50
	>2	<5
Venda	[0,05;0,12]	20
	>2	<4

5.5.2. COMPARACIÓ RENDIBILITAT PER MODALITAT: COMPENSACIÓ I VENDA

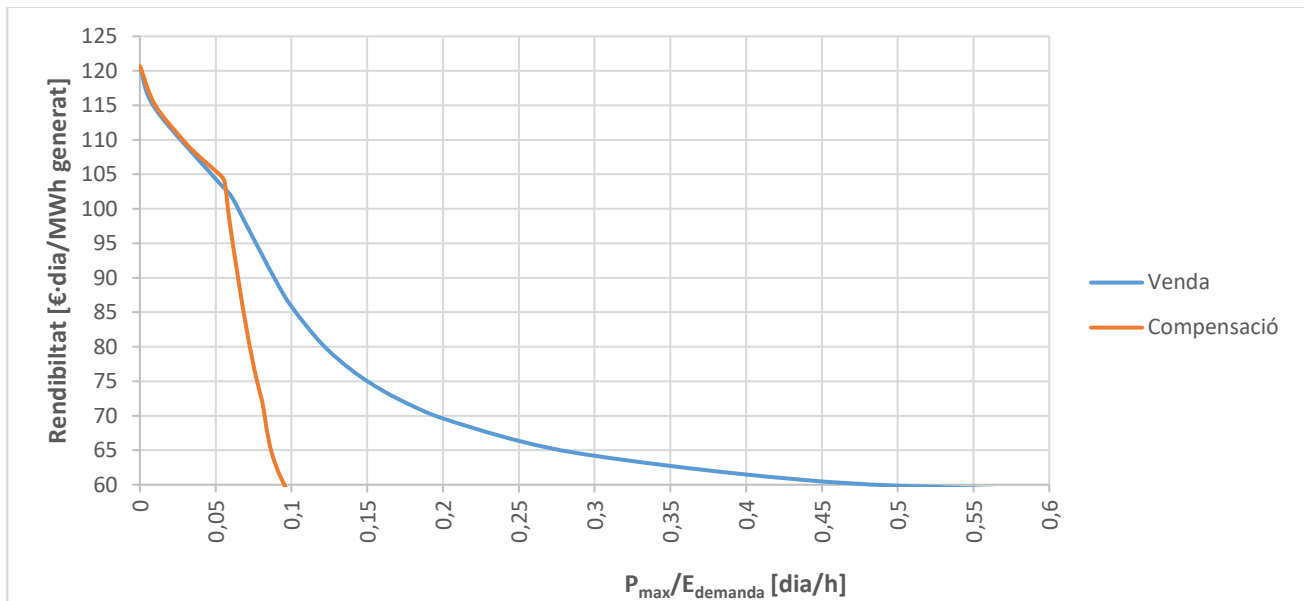
La Gràfica 31 mostra les corbes de rendibilitat fotovoltaïques per les modalitats de venda i compensació.



Gràfica 31. Comparació rendibilitats en instal·lacions de generació fotovoltaïques en funció de la venda o compensació de l'energia excedentària

Com pot observar-se, fins $\frac{P_{max}}{E_{demanda}} \approx 0,16 \frac{dia}{h}$ presenta més rendibilitat compensar l'energia excedentària. Per valors superiors, és més rendible vendre-la.

La Gràfica 32 mostra les corbes de rendibilitat èoliques per les modalitats de venda i compensació.



Gràfica 32. Comparació rendibilitats en instal·lacions de generació èoliques en funció de la venda o compensació de l'energia excedentària

Com pot observar-se, fins $\frac{P_{max}}{E_{demanda}} \approx 0,06 \frac{dia}{h}$ presenta més rendibilitat compensar l'energia excedentària. Per valors superiors, és més rendible vendre-la.

5.6. CONCLUSIONS

Un cop analitzades les corbes de rendibilitat per les instal·lacions de generació, les conclusions generals que se'n poden extreure són:

- La millor tarifa PVPC per realitzar autoconsum és la estàndard 2.0A, independentment del tipus de central de generació (fotovoltaica o èolica).
- Respecte la modalitat de compensació d'excedents: valors nuls o baixos d'energia excedentària són els que proporcionen una rendibilitat més elevada de la instal·lació de generació. Alts valors d'energia excedentària suposarà un decrement considerable de rendibilitat, podent arribar a ser pràcticament nul per valors molt alts. Per tant, interessa acollir-se a la modalitat de compensació en aquells sistemes en que no es generin gaires excedents.
- Respecte la modalitat de venda d'excedents: valors nuls o baixos d'energia excedentària són els que proporcionen una rendibilitat més elevada de la instal·lació de generació, tot i que amb valors lleugerament inferiors als obtinguts per la modalitat de compensació. Per valors molt alts d'energia excedentària, segueix havent-hi rendibilitat. Per tant, interessa acollir-se a la modalitat de venda en aquells sistemes en que es generin força excedents.
- Respecte a la comparació entre tipus d'instal·lacions de generació, les fotovoltaïques sempre presenten millor rendibilitat que les èoliques.

Val a dir que, aquests resultats són merament orientatius. En cas de voler-se fer una estimació per un cas concret, els resultats aquí obtinguts poden ser vàlids però per realitzar un estudi detallat caldria considerar les corbes de generació i demanda reals, a part de les corbes de preus de compra i venda amb els seus respectius impostos.

6. DETERMINACIÓ DE L'INTERVAL D'ESTUDI PER LA VIABILITAT DE LES INSTAL·LACIONS D'ACUMULACIÓ

Per augmentar la rendibilitat econòmica de l'energia excedentària, pot ser útil l'ús de sistemes d'acumulació d'energia, per:

- Autoconsumir l'electricitat emmagatzemada en totes les hores de dèficit energètic.
- Autoconsumir l'electricitat emmagatzemada en hores clau¹² de dèficit energètic.
- Vendre l'electricitat emmagatzemada

En aquest apartat es determinen els límits de potència instal·lada de la central de generació que fan que un sistema d'acumulació pugui tenir viabilitat.

Com s'ha pogut veure en l'apartat 3.8, els punts de la corba de generació d'una instal·lació eòlica mai són zero, per lo que en funció de la potència instal·lada podria ser que sempre hi hagués excedents respecte la corba de demanda, el que significaria que no té sentit instal·lar-hi un sistema d'acumulació. Altrament, en el cas d'una instal·lació de generació solar, podria passar que la corba de generació estigués sempre per sota la corba de demanda, és a dir, no generar excedents en cap moment del dia, el que també suposaria no tenir sentit un sistema d'acumulació.

Així doncs, per una banda es determina el valor de potència instal·lada a partir del qual la central de generació és capaç de subministrar energia excedentària. D'altra banda s'avalua a partir de quin valor de potència instal·lada de la central de generació es tenen sempre excedents d'energia.

Analitzant aquests dos casos es podrà obtenir un interval pel qual té sentit estudiar la viabilitat d'un sistema d'acumulació. Els factors que condicionen l'interval són:

1. El tipus de central de generació
2. Potència instal·lada de la central de generació
3. Corba de generació
4. Corba de demanda

Els valors numèrics de les dades utilitzades es troben en l'apartat A.4.

6.1. NOMENCLATURA I EQUACIONS UTILITZADES

La nomenclatura utilitzada en aquest apartat, és la següent:

$E_{demanda}$ = demanda diària d'energia elèctrica a l'habitatge

P_{max} = potència instal·lada de la instal·lació de generació

i = hora d'estudi. Pren valors entre 0 i 23

t_i = interval de temps = 1h

$f_{d,i}$ = demanda horària respecte $E_{demanda}$

¹² Per hores clau s'entenen totes aquelles hores en que el fet de consumir energia del sistema d'acumulació, genera una rendibilitat més elevada.

$f_{g,i}$ = potència horària mitja de la instal·lació de generació respecte P_{max}

$e_{demanda,i}$ = demanda horària d'energia elèctrica

$P_{lim,i}$ = potència mitja horària que fa que $e_{demanda}$ sigui igual a $e_{generada}$

$P_{max,lim}$ = Potència de la instal·lació de generació que fa que E_{compra} sigui zero

$P_{min,lim}$ = Potència de la instal·lació de generació que fa que E_{exc} sigui zero

$E_{generada,lim}^{max}$ = energia diària generada que fa que E_{compra} sigui zero

$E_{generada,lim}^{min}$ = energia diària generada que fa que E_{exc} sigui zero

r_{lim}^{min} = rati pel qual la potència instal·lada de la central de generació fa que $E_{exc} = 0$

Les equacions referents a les nomenclatures anteriors són:

$$P_{lim,i} = \frac{f_{d,i}}{f_{g,i}} \cdot \frac{E_{demanda}}{t_i}$$

$$P_{max,lim} = MAX(P_{lim,i}) = \frac{r_{lim}^{max}}{\sum(f_{g,i} \cdot t_i)} \cdot E_{demanda}$$

$$P_{min,lim} = MIN(P_{lim,i}) = \frac{r_{lim}^{min}}{\sum(f_{g,i} \cdot t_i)} \cdot E_{demanda}$$

$$E_{generada,lim}^{max} = P_{max,lim} \cdot t_i$$

$$E_{generada,lim}^{min} = P_{min,lim} \cdot t_i$$

$$r_{lim}^{max} = \frac{E_{generada,lim}^{max}}{E_{demanda}}$$

$$r_{lim}^{min} = \frac{E_{generada,lim}^{min}}{E_{demanda}}$$

$$E_{demanda} = \sum(e_{demanda,i})$$

$$e_{demanda,i} = f_{d,i} \cdot E_{demanda}$$

6.2. INTERVAL DE VIABILITAT PER SISTEMES D'ACUMULACIÓ EN INSTAL·LACIONS DE GENERACIÓ SOLARS

Per una banda, les instal·lacions de generació solars, al estar directament relacionades amb la insolació, és impossible que per si soles puguin generar energia elèctrica durant la nit. Així doncs, en aquest sentit, independentment de la potència instal·lada de la central de generació, sempre serà viable instal·lar un sistema d'acumulació per poder subministrar aquesta energia en les hores de dèficit.

D'altra banda, podria ser que la instal·lació de generació no pogués proporcionar excedents degut a la baixa potència instal·lada en comparació amb la demanda energètica.

Utilitzant les dades de l'apartat A.4 i les equacions de l'apartat 6.1, s'obté que, per a que pugui ser viable un sistema d'acumulació, tota central de generació fotovoltaica ha de tenir una potència instal·lada superior a la calculada amb l'expressió següent:

$$P_{min,lim} = \frac{r_{lim}^{min}}{\sum(f_{g,i} \cdot t_i)} \cdot E_{demanda} = 6,396 \cdot 10^{-2} \cdot E_{demanda}$$

Per veure el procediment seguit per l'obtenció del resultat vegeu l'apartat A.3.

6.3. INTERVAL DE VIABILITAT SISTEMA D'ACUMULACIÓ D'ENERGIA EN INSTAL·LACIONS DE GENERACIÓ EÒLICS

Les instal·lacions de generació eòliques, a diferència de les solars, poden generar electricitat durant les 24h del dia. D'aquesta manera, depenent de la demanda energètica de l'habitatge/habitatge i de la potència instal·lada de la central de generació, pot donar-se el cas que en tot moment del dia s'estiguin generant excedents, fent així no viable un sistema d'acumulació per autoconsum.

També faria inviable un sistema d'acumulació en cas que la potència instal·lada de la central de generació sigui tant baixa que no pogués proporcionar excedents d'energia. No obstant, observant la corba de generació solar i la corba de demanda obtingudes en l'apartat 3.8, la corba de demanda presenta valor zero a les 4h de la matinada mentre que la corba de generació sempre tindrà valor superior a zero. D'aquesta manera, una mínima potència instal·lada ja fa que es generin excedents.

Utilitzant les dades de l'apartat A.4 i les equacions de l'apartat 6.1, s'obté que, per a que pugui ser viable un sistema d'acumulació per autoconsum, tota central de generació eòlica ha de tenir una potència instal·lada inferior a la calculada amb l'expressió següent:

$$P_{max,lim} = \frac{r_{lim}^{max}}{\sum(f_{g,i} \cdot t_i)} \cdot E_{demanda} = \frac{1,822}{21,44} \cdot E_{demanda} = 8,498 \cdot 10^{-2} \cdot E_{demanda}$$

Per veure el procediment seguit per l'obtenció del resultat vegeu l'apartat A.3.

Afegir que, aquesta potència instal·lada màxima per les centrals de generació eòliques és d'aplicació pel cas que es realitzi autoconsum amb la modalitat de compensació d'excedents, en el cas de la modalitat de venda no hi hauria límit.

6.4. DETERMINACIÓ DE L'INTERVAL D'ESTUDI PER LA VIABILITAT DE LES INSTAL·LACIONS D'ACUMULACIÓ. CONCLUSIONS.

Les conclusions que es poden extreure dels sistemes d'emmagatzematge d'energia segons els càlculs realitzats són les següents:

- La relació $\frac{P_{max}}{E_{generada}}$ a partir de la qual té sentit instal·lar un sistema d'acumulació per una instal·lació solar és $0,06396 \frac{dia}{h}$.
- La relació $\frac{P_{max}}{E_{generada}}$ a partir de la qual no té sentit instal·lar un sistema d'acumulació per una instal·lació eòlica és $0,08498 \frac{dia}{h}$.

Val a dir que aquests resultats són merament orientatius, però que reflecteixen de manera general els límits teòrics per la viabilitat dels sistemes d'acumulació. No obstant, en cas de voler conèixer els valors límit reals, caldria utilitzar les corbes reals de generació i demanda d'energia elèctrica.

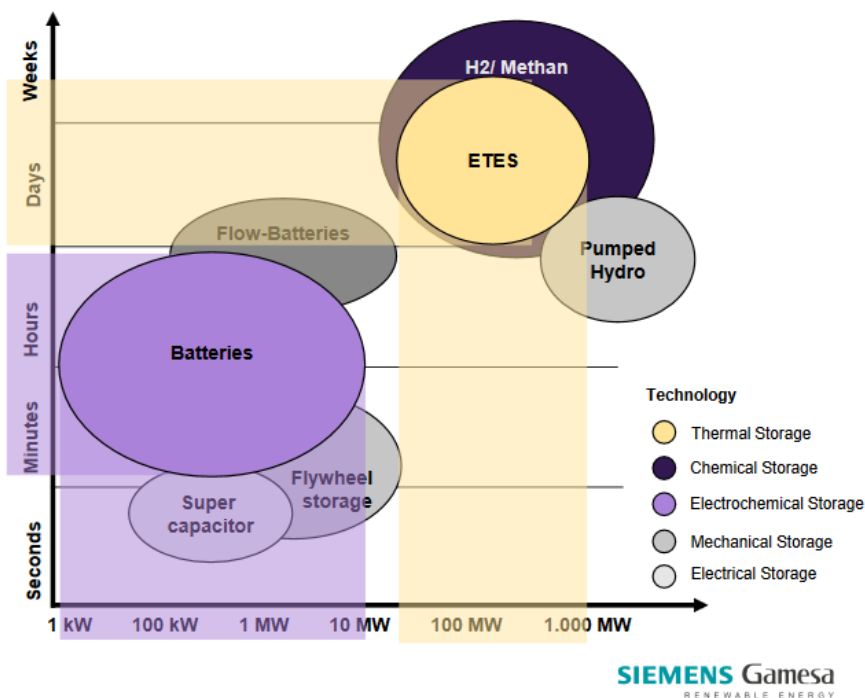
7. ANÀLISI DELS SISTEMES D'ACUMULACIÓ D'ENERGIA AMB FINALITAT ELÈCTRICA

En aquest apartat s'estudien diferents tecnologies d'acumulació d'energia, més o menys desenvolupades, però totes elles amb viabilitat tècnica real, en que es pretén aportar informació rellevant referent a costos, rendiment, funcionament, etc.

Els sistemes d'acumulació que s'estudien són els següents:

- Acumulació per bateries
- Acumulació per emmagatzematge tèrmic
- Acumulació per emmagatzematge d'aire comprimit

També mencionar que, cadascun d'aquests sistemes d'acumulació presentarà una millor o pitjor rendibilitat econòmica en funció de la potència nominal d'aquests.



Gràfica 33. Classificació orientativa dels sistemes d'acumulació en funció del temps de subministrament continu i potència nominal [26]

Tal i com es pot veure en la Gràfica 33, a mode orientatiu es pot veure que les bateries per exemple, podrien ser viables per instal·lacions de fins a 10 MW de potència i per subministrar energia des de minuts fins a hores. Els sistemes d'acumulació tèrmics (ETES), en canvi, són més viables per instal·lacions de més potència i subministrant energia durant varis dies.

Val a dir però que aquesta gràfica està més orientada a instal·lacions d'acumulació a escala industrial o inclús com a instal·lacions de suport a les centrals de generació elèctrica de gran potència.

7.1. ACUMULACIÓ PER BATERIES

Les bateries són sistemes d'acumulació d'energia per mitjà d'un procediment electroquímic que permet transformar l'energia química en elèctrica i viceversa en cas que siguin recarregables.

Actualment existeixen en el mercat diversos tipus de bateries. Algunes d'elles són les que es comenten a continuació [27].

- Bateries d'àcid-plom

Les bateries d'àcid-plom d'una banda tenen baixa densitat energètica i ciclabilitat, en que el seu rendiment depèn de la temperatura i intensitat de descàrrega. D'altra banda, és una tecnologia madura, té un cos baix i requereixen de poc manteniment.

- Bateries alcalines (Niquel-Cadmi)

Són bateries cares en general, amb una ciclabilitat baixa i autodescàrrega elevada. A més, mediambientalment són de les més contaminants.

D'altra banda, és una tecnologia actualment madura i fiable, amb elevats ratis de càrrega i descàrrega, rang ampli de temperatures d'operació i baix manteniment.

- Bateries de sals foses

D'una banda necessiten força temps per funcionar (s'han d'escalfar), són cares, la tecnologia encara ha de millorar-se i actualment hi ha pocs fabricants d'aquests tipus de bateries.

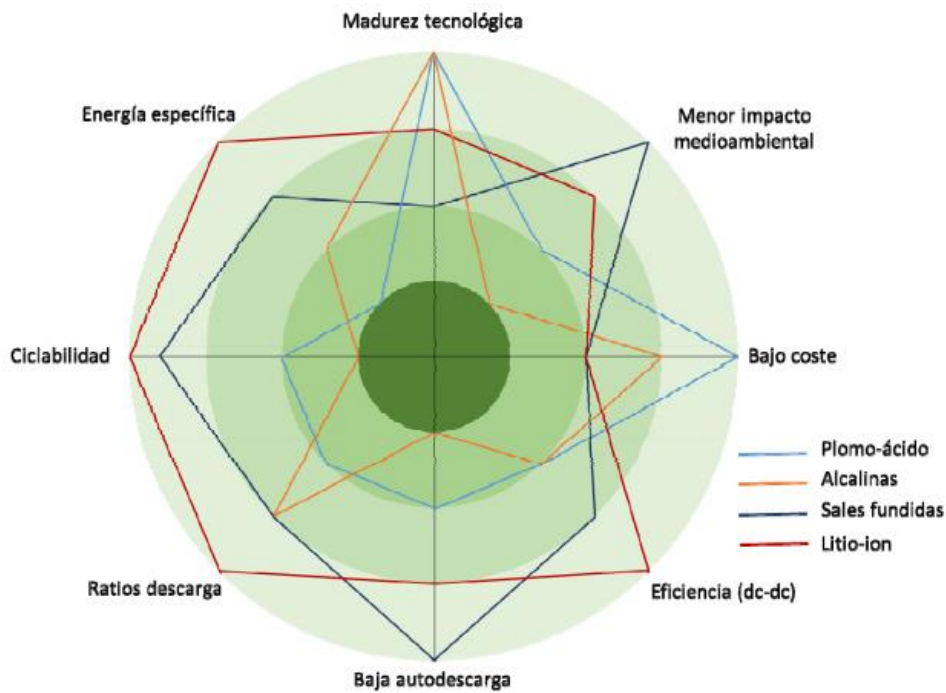
D'altra banda, tenen una elevada eficiència global, poden ser modulars i es poden escalar, no tenen autodescàrrega, i presenten alta densitat energètica i alta ciclabilitat. A més a més, són les que generen un menor impacte mediambiental.

- Bateries d'ions de liti

D'una banda tenen elevat cost, es necessiten elements de protecció, són inestables en condicions de sobrecàrrega i per excés de temperatura o voltatge.

D'altra banda, tenen una elevada eficiència energètica, baixa autodescàrrega, alta densitat energètica, alta ciclabilitat i permeten una alta intensitat de càrrega i descàrrega.

En la Gràfica 34 es poden observar gràficament les diferències comentades entre les diferents tecnologies.



Gràfica 34. Comparació entre els diferents tipus de bateries [27]

A banda d'aquest tipus de bateries, que totes elles consisteixen en un recipient tancat, existeixen també un tipus de bateries, anomenades "Bateries de flux" en que l'electricitat s'emmagatzema o es genera per mitjà de la circulació d'un fluid (electròlit) a través de les cel·les de la bateria (vegeu la Figura 1). Aquest electròlit roman emmagatzemat en dipòsits quan no s'ha de generar o acumular energia, i només circula a través de les cel·les en cas contrari.

El més interessant d'aquest tipus de bateria és que és senzill incrementar o reduir la capacitat d'emmagatzematge de la bateria, simplement utilitzant dipòsits d'acumulació més o menys grans. A més, aquests tipus de bateries no presenten autodescàrrega al no estar l'electròlit i les cel·les de la bateria en contacte contínuament.

Dos són els principals tipus de bateries de flux actualment: les de vanadi i les de Bromur de zinc.

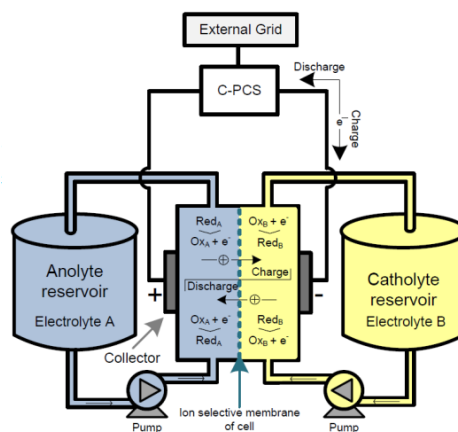


Figura 1. Esquema i principi de funcionament de les bateries de flux [27]

En la Taula 6 es poden veure les característiques resumides de cadascun dels tipus de bateries comentades prèviament.

Taula 6. Resum de les principals propietats dels diferents tipus de bateries [27]

Tipus	Bateries				Bateries de flux	
	Àcid-plom	Niquel-Cadmi	Sodi-Sofre	Ions de liti	Vanadi	Bromur de zinc
Temperatura de treball (nominal)	-40/50 °C (25 °C)	-20/60 °C (20 °C)	300-3000 °C (300 °C)	-20/55 °C (25 °C)	-25/30 °C	15/50 °C
Ciclabilitat	1800	800	4500	3000	25000	3500
Densitat energètica	19-24 Wh/kg	47 Wh/kg	122 Wh/kg	133 Wh/kg	25-35 Wh/kg	70-90 Wh/kg
Eficiència global	70-80%	60-80%	89%	92%	80 %	80%
Autodescàrrega mensual	2-4%	20%	0%	5%	0%	0%
Profunditat de descàrrega	≈80%	≈80%	≈80%	≈80%	100%	100%
Preu (aprox.)¹³	300 €/kWh	400 €/kWh	350 €/kWh	700 €/kWh	-	-

7.2. ACUMULACIÓ PER EMMAGATZEMATGE TÈRMIC (ETES)

Els sistemes d'acumulació d'energia basats en l'emmagatzemament tèrmic, anomenats sistemes ETES (Electro-Thermal Energy Storage) es basen en la utilització d'electricitat per produir energia tèrmica i posteriorment reconvertir aquesta energia tèrmica en electricitat novament, aconseguint així un sistema d'acumulació que pot arribar a ser de gran capacitat (de l'ordre de MWh).

Actualment aquesta tecnologia està en fase de desenvolupament, tot i que ja s'han construït alguns prototips. Les empreses SIEMENS Gamesa i MAN Energy Solutions són unes de les que han invertit més en aquesta tecnologia, en que han dissenyat dos tecnologies diferents però amb la mateixa finalitat: aprofitar els excedents elèctrics provinents de fonts de generació renovable. Aquestes tecnologies són:

¹³ Valors orientatius. Poden presentar variacions grans depenent de la bibliografia utilitzada.

- Tecnologia aire-aigua. Implementada per Siemens Gamesa.
- Tecnologia CO₂. Implementada per Man Energy Solutions.

7.2.1. TECNOLOGIA AIRE-AIGUA

L'empresa SIEMENS Gamesa ha implementat la tecnologia aire-aigua pels sistemes d'acumulació ETES.

Aquesta tecnologia transforma l'energia elèctrica a ser acumulada en energia tèrmica, la qual es transmesa en un fluid (aire), i emmagatzemada en un dipòsit. Posteriorment, per reconvertir aquesta energia tèrmica en electricitat, s'utilitza un circuit d'aigua [28].

A més a més, aquesta tecnologia no només genera electricitat sinó que també permet utilitzar l'energia tèrmica emmagatzemada quan convingui per finalitats diverses.

En la Figura 2 s'observa esquematitzat el procés d'acumulació i generació d'energia elèctrica.

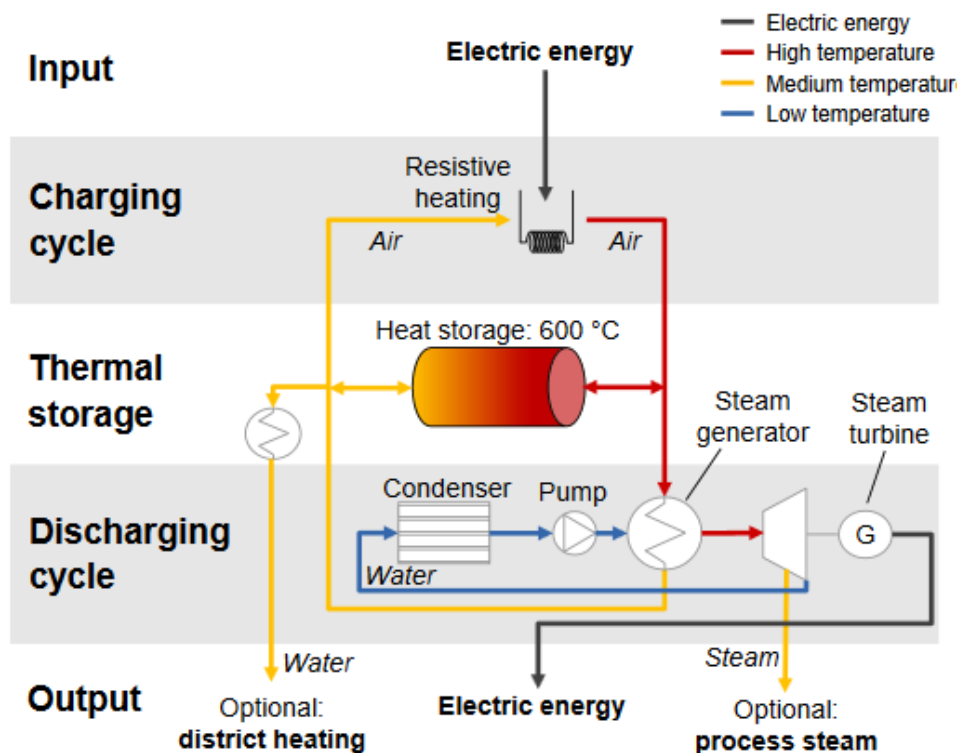


Figura 2. Esquema de funcionament d'un sistema ETES basat en la tecnologia aire-aigua [28]

Així doncs, d'acord amb la Figura 2, els components principals de la instal·lació pel cycle de càrrega (escalfament de l'aire) són: resistències elèctriques i el tanc d'emmagatzematge d'aire calent. Pel cycle de descàrrega (generació d'electricitat) els components principals utilitzats són: intercanviador per la generació de vapor, bomba, turbina de vapor i condensador.

El cycle de funcionament pel cas de la càrrega consisteix en:

1. S'escalfa l'aire a través d'unes resistències elèctriques fins uns 600 °C.
2. L'aire escalfat s'emmagatzema en un dipòsit aïllat.

Pel cas de la descàrrega, el cicle de funcionament consisteix en:

1. Es fa circular l'aire calent emmagatzemat per l'intercanviador on circula l'aigua i aquesta s'evapora.
2. Es turbinava el vapor per obtenir electricitat.
3. El vapor turbinat passa per un condensador i es condensa.
4. Una bomba fa circular l'aigua novament cap a l'intercanviador de generació de vapor.

Respecte al rendiment, aquest sistema d'acumulació d'energia pot arribar a rendiments elèctrics del 45% en la conversió energia tèrmica-electricitat.

Com a curiositat, aquest 2019 a Hamburg (Alemanya) s'ha posat en marxa la primera planta pilot amb aquesta tecnologia, amb una capacitat de 120 MWh, una potència del generador elèctric de 1,4 MW i amb autonomia de fins a 24h. La instal·lació ha estat finançada pel govern Alemany [28].

Com es pot observar doncs, aquesta tecnologia a dia d'avui encara està en fase de desenvolupament.

7.2.2. TECNOLOGIA CO₂

L'empresa MAN Energy Solutions ha implementat la tecnologia amb CO₂ pels sistemes d'acumulació ETES. Aquesta tecnologia es basa en dos circuits de CO₂, un d'aire calent i un de fred, per lo que, a banda de generar electricitat, també es pot subministrar calor i fred per finalitats diverses [29].

En la Figura 3, s'observa esquematitzat el procés d'acumulació i generació d'energia elèctrica.

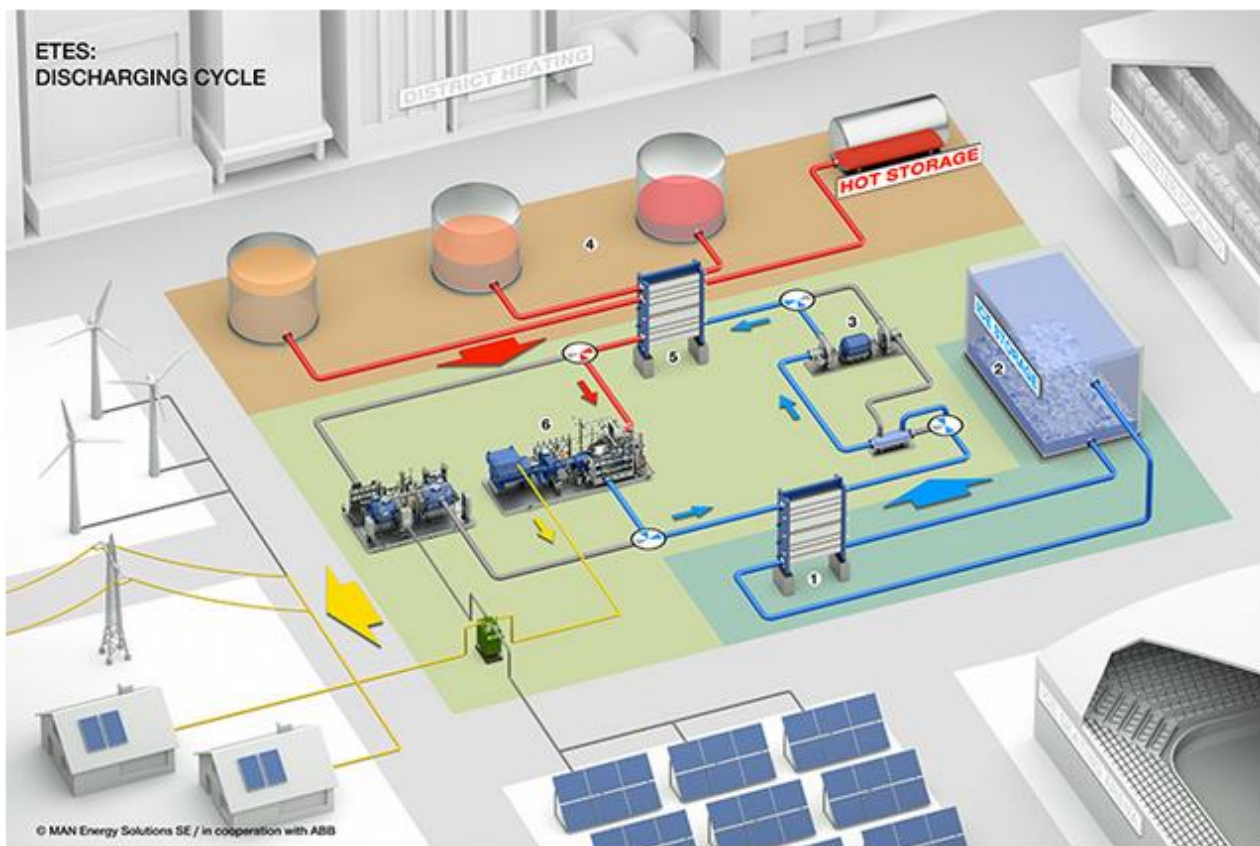


Figura 3. Esquema de funcionament d'un sistema ETES basat en la tecnologia CO₂ [29]

D'acord amb la Figura 3, els components principals de la instal·lació pel cicle de càrrega són: compressor, intercanviadors, tancs d'aigua calenta, evaporador i tanc de gel. Pel cicle de descàrrega (generació d'electricitat) els components principals utilitzats són: intercanviadors, bomba i turbina.

El cicle de funcionament pel cas de la càrrega consisteix en:

1. El compressor (turbo-compressor) comprimeix el CO₂ escalfant-lo fins als 120 °C.
2. El CO₂ comprimit i escalfat passa a través d'un intercanviador (de la zona calenta) on cedeix el calor a l'aigua que s'emmagatzema als tancs corresponents.
3. Encara amb el gas a alta pressió, s'expansiona a l'evaporador on es redueix la pressió, es refreda i liqua.
4. El CO₂ líquid i refredat es bombeja cap a l'intercanviador de la zona freda on cedeix el fred a un circuit d'aigua. Aquesta aigua s'emmagatzema en forma de gel a un tanc.

Pel cas de la descàrrega, el cicle de funcionament consisteix en:

1. El CO₂ en forma de gas entra a l'intercanviador de la zona freda en que es condensa gràcies al fred cedit pel gel emmagatzemat al tanc de gel.
2. Amb una bomba s'augmenta la pressió del gas líquid.
3. El CO₂ passa a través de l'intercanviador de la zona calenta on s'escalfa gràcies a la calor acumulada pels tancs d'aigua calenta on s'evapora.
4. El gas passa a través de la turbina generant així electricitat.

Aquesta tecnologia a dia d'avui encara està en fase de desenvolupament, i de fet no s'ha trobat informació referent a cap tipus de planta pilot, a diferència de la tecnologia impulsada per Siemens Gamesa.

7.3. ACUMULACIÓ PER AIRE COMPRIMIT (CAES)

Els sistemes d'acumulació d'energia per aire comprimit CAES (Compressed Air Energy Storage) és un sistema que transforma energia elèctrica, en aire comprimit, s'emmagatzema durant un període determinat i posteriorment es reconverteix en energia elèctrica.

Actualment, els sistemes CAES estan en un nivell d'ús generalitzat baix a pesar que la tecnologia que utilitza està ben consolidada: compressors d'aire i turbines. Des de l'any 1978 que es va construir la primera instal·lació CAES a gran escala, a dia d'avui hi ha empreses especialitzades en el disseny d'instal·lacions d'aquest tipus, tal i com es comenta en aquest mateix apartat.

Aquest sistema d'emmagatzematge d'energia consisteix bàsicament en comprimir aire per mitjà d'un compressor quan es vulgui emmagatzemar energia. Aquest aire comprimit és acumulat en dipòsits, cavitats subterrànies, etc. fins que es necessiti de nou energia elèctrica. Llavors, l'aire comprimit es turba, fent girar així un alternador que és el que genera l'electricitat.

Actualment existeixen dos plantes CAES en funcionament: una a Alemanya i l'altra a Estats Units. Totes dos són instal·lacions de gran escala (potència nominal de l'ordre de varis MW), amb la finalitat d'ajudar en la regulació del sistema elèctric, d'entre d'altres [30].

La primera instal·lació CAES a gran escala va ser construïda a Huntorf (Alemanya), l'any 1978. La funció per la qual va ser creada és per subministrar energia elèctrica a les centrals nuclear properes per ajudar-les en la posta en marxa, per reduir els preus de l'electricitat en hores pic i també per equilibrar la generació elèctrica en cas de baixa producció de renovables o per subministrar energia mentre les centrals tèrmiques de carbó es posaven en marxa.

En el cas d'aquesta instal·lació, l'aire s'emmagatzema en cavitats sota terra situades a uns 600 m de profunditat, ocupant un volum d'aproximadament 310.000 m³ i a una pressió d'entre 4,8 MPa i 6,6 MPa. El cicle de funcionament és 8h per la compressió de l'aire i 2h per a la generació elèctrica a màxima potència. El rendiment total de la planta és d'aproximadament el 42%. Durant els primers 30 anys la central va estar funcionant de manera correcta amb un 90% de temps de funcionament.

Una altra instal·lació CAES és la construïda a McIntosh (Alabama) l'any 1991. Amb una potència instal·lada de 110 MW, podia funcionar durant 26h ininterrompudament a màxima potència. L'emmagatzematge de l'aire es realitza també soterrat a uns 450 m de profunditat, a una pressió d'entre 4,5 MPa i 7,4 MPa. El rendiment total de la planta és d'un 54%. Entre el 1998 i el 2008, la central ha mantingut una fiabilitat de funcionament del 92% aproximadament.

A banda d'instal·lacions de gran potència dedicades pel sistema elèctric, també hi ha hagut interès per sistemes CAES d'ús industrial/telecomunicacions. És el cas de Pnu Power, una branca de l'empresa Energetix Group. Encara que a dia d'avui sembla que no estiguin en actiu, pels volts del 2010, van desenvolupar sistemes d'emmagatzematge per aire comprimit anomenat CAB (Compressed Air Battery), amb potències a partir de 3 kW fins als 200 kW principalment [30].

També, l'empresa Hydrostor, actualment activa, està especialitzada en sistemes CAES de grans dimensions en els que no s'utilitzen combustibles fòssils. Ja té en funcionament una instal·lació situada a Toronto des del 2015, amb una potència instal·lada de 660 kW. Aquesta instal·lació ha estat finançada pel mateix govern de Canadà i s'utilitza com a gran bateria per una part de la ciutat.

A més a més, tenen 2 projectes més en fase de construcció, un a Canadà i l'altre a Austràlia [31].

A banda d'aquestes empreses, actualment també hi ha grups de recerca que han realitzat avenços en els sistemes CAES. Alguns d'ells són els següents [32]:

- El grup de recerca dirigit per Yulong Ding, de la universitat de Birmingham, ha començat a utilitzar l'energia tèrmica absorbida en l'expansió per liquar l'aire.
- La Start-up canadenca Hydrostor ha dissenyat un sistema per mantenir constant la pressió dins el tanc d'acumulació, introduint-hi o extraient-hi aigua de mar.
A més, aquesta empresa, conjuntament amb la universitat de Nottingham, han desenvolupat un sistema per emmagatzemar l'aire utilitzant grans bosses col·locades dins el mar i aprofitant així la pressió hidrostàtica.
- El grup de recerca dirigit per Jihong Wang, de la universitat de Wawick, han desenvolupat un sistema pel control de la pressió d'entrada a la turbina d'aire.
- Un grup de recerca de la Universitat de Birmingham ha estudiat un mètode anomenat optimització multipunt, en que es pretén assegurar rendiments acceptables de la turbina dins un rang d'operació determinat.

7.3.1. PRINCIPI DE FUNCIONAMENT I CARACTERÍSTIQUES

El principi de funcionament de qualsevol sistema CAES és el següent:

1. Compressió de l'aire per mitjà d'un compressor alimentat amb l'energia elèctrica excedentària.
2. Emmagatzematge en una cavitat subterrània o bé en dipòsits.
3. Expansió de l'aire en una turbina/motor pneumàtic
4. Generació d'electricitat en alternador gràcies a l'energia mecànica de la turbina/motor pneumàtic.

Com en qualsevol procés de compressió/expansió, el fluid s'escalfa o s'arrefreda, això indica que part de l'energia utilitzada/generada per comprimir/expandir el fluid es transforma en calor, fet que condiona el rendiment elèctric per una banda, però per altra, es disposa d'energia tèrmica, tant calor (obtinguda en la compressió) com fred (obtinguda en l'expansió).

Així doncs, per a tenir un rendiment elèctric elevat, en el procés d'expansió el fluid s'ha d'escalfar. Això es pot realitzar o bé amb la mateixa calor generada en la compressió del fluid o bé amb una font externa d'energia (combustibles fòssils com en el cas de les dos instal·lacions construïdes el 1978 i 1991).

Així doncs, teòricament resulta molt útil aprofitar l'energia tèrmica residual del procés de compressió ja que no serà necessària una font externa d'energia per escalfar el fluid en l'expansió, i per tant, el rendiment global de la instal·lació s'incrementarà.

7.3.2. CLASSIFICACIÓ DELS SISTEMES CAES

A continuació es comenten diversos tipus de sistemes CAES segons: l'aprofitament tèrmic que realitzin, segons les dimensions de la instal·lació i segons el tipus d'emmagatzematge de l'aire comprimit.

7.3.2.1. SEGONS APROFITAMENT TÈRMIC

D'acord amb l'article científic "Harnessing free energy from nature for efficient operation of compressed air energy storage system and unlocking the potential of renewable power generation" [32], actualment hi ha 4 configuracions estudiades pels sistemes CAES respecte l'aprofitament tèrmic de la calor generada en la fase de compressió: diabàtic, adiabàtic, adiabàtic avançat i isotèrmic. En que cadascuna d'aquestes configuracions té relació directa amb el rendiment elèctric i el cost de la instal·lació.

El sistema diabàtic (D-CAES), és el més senzill d'implementar de tots els tipus de configuracions. No utilitza cap tipus de recuperador de calor per aprofitar l'energia tèrmica alliberada en la compressió, i per tant, requereix d'una font externa per escalfar el fluid en el procés d'expansió. Vegeu l'esquema de funcionament en la Figura 4.

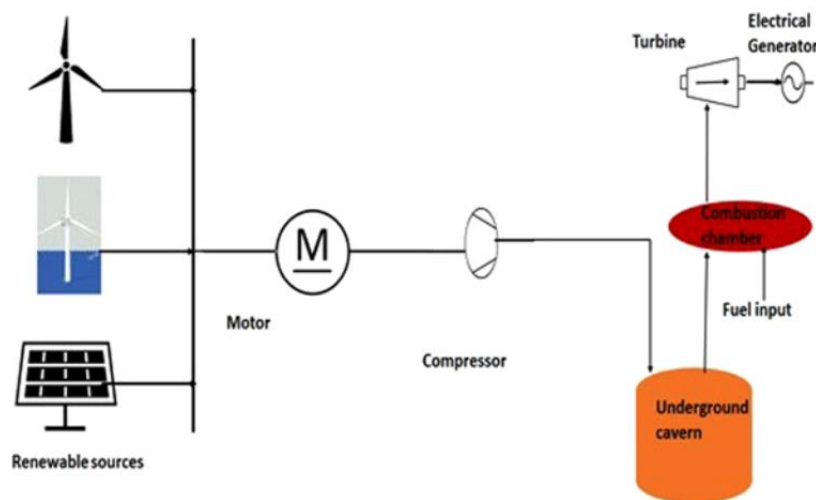


Figura 4. Esquema de funcionament d'un sistema CAES diabàtic

El sistema adiabàtic (A-CAES), disposa d'un tanc d'acumulació perfectament aïllat, en que l'energia tèrmica generada en la compressió és transmesa al mateix fluid i retinguda en el tanc fins que es turbinat (vegeu la Figura 5). D'aquesta manera, no és necessari utilitzar una font externa d'energia per escalfar el fluid abans de ser turbinat. No obstant això, el tanc ha de ser capaç de suportar altes temperatures i ha d'estar molt ben aïllat per tenir un bon rendiment global. També, com més temperatura tingui el fluid emmagatzemat menys densitat tindrà, el que suposa un volum ocupat més elevat per unitat de massa i per tant també més pressió alhora d'emmagatzemar-lo o bé un volum del tanc més gran. Amb aquest sistema doncs, la capacitat d'acumulació del sistema CAES es pot veure reduïda respecte a altres sistemes.

L'avantatge principal d'utilitzar aquest sistema és la senzillesa tècnica (pocs elements necessaris). Com a inconvenients, el volum del tanc més gran o més pressió d'emmagatzematge, el que suposa un increment del cost de la instal·lació.

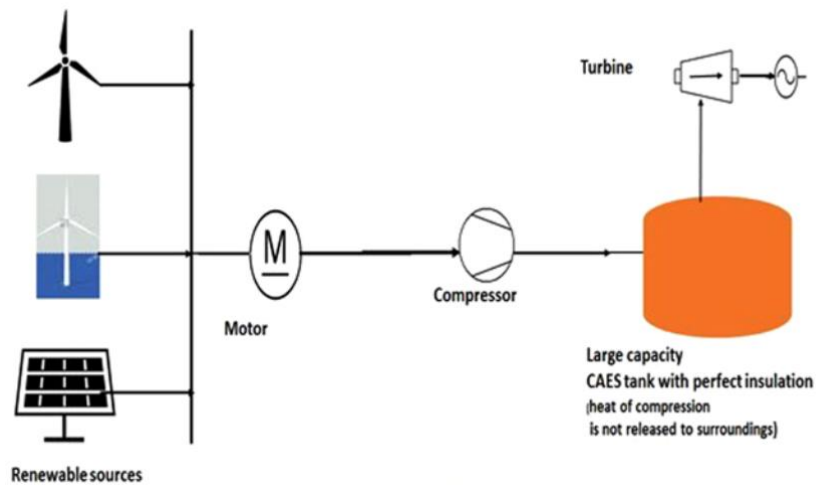


Figura 5. Esquema de funcionament d'un sistema CAES adiabàtic

En el sistema CAES adiabàtic avançat (AA-CAES), la calor generada en la compressió és extreta del fluid i emmagatzemada a part. Aquesta calor es reincorpora al fluid abans de ser turbinat. Així doncs, es requereix d'un recuperador de calor en la instal·lació amb un tanca auxiliar que emmagatzemi l'energia tèrmica. A més, el sistema es pot combinar amb una font externa d'energia tèrmica per incrementar el rendiment global (vegeu la Figura 6).

Com avantatges d'aquest sistema: el rendiment global és elevat gràcies a l'aprofitament de l'energia tèrmica residual, el tanca d'emmagatzematge del fluid pot ocupar menys espai, o pot treballar a una pressió d'emmagatzematge inferior que pel sistema A-CAES. Com a inconvenients, el cost de la instal·lació és més elevat degut al sistema de recuperació de calor.

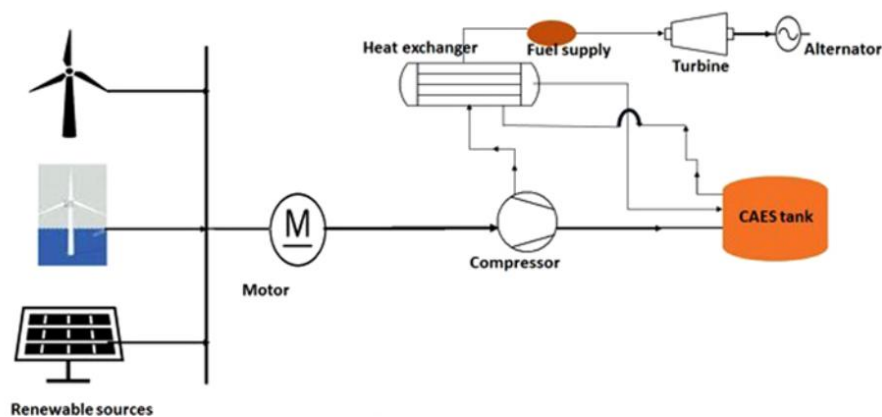


Figura 6. Esquema de funcionament d'un sistema CAES adiabàtic avançat

En el sistema CAES isotèrmic (I-CAES), la temperatura dins del tanca d'acumulació es manté constant, extraient calor durant la compressió del fluid i subministrant-ne durant l'expansió (vegeu la Figura 7). D'aquesta manera es pot aconseguir un equilibri entre la capacitat del tanca i el rendiment global de la instal·lació.

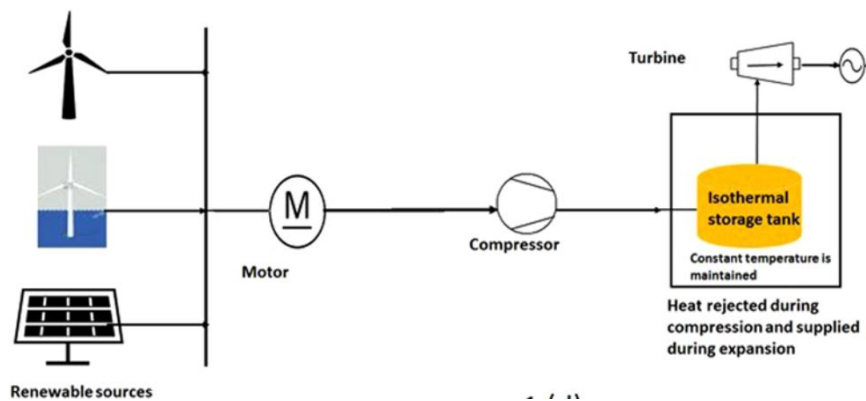


Figura 7. Esquema de funcionament d'un sistema CAES isotèrmic

7.3.2.2. SEGONS DIMENSIONS

Per "Sistemes CAES" actualment s'entén sistemes de grans dimensions, amb alta capacitat d'emmagatzematge (de l'ordre de centenars de milers de m³) i gran potència (a partir de l'ordre de centenars de KW). Les principals aplicacions dels quals són com a instal·lació de suport pel sistema elèctric [33]:

- Incidir en el preu de venda d'electricitat en el mercat elèctric.
- Equilibrar l'oferta i la demanda d'energia elèctrica.
- Millorar la integració i l'aprofitament de les energies renovables.
- Serveis auxiliars que incloguin regulació del sistema elèctric.
- Estabilització de la generació d'energia elèctrica convencional (millorant-ne el rendiment).
- Subministrar energia pel restabliment d'instal·lacions després d'una apagada del sistema elèctric.

A banda d'aquestes instal·lacions de gran potència amb finalitats en el sistema elèctric, també n'hi de menor potència i menor capacitat, són les anomenades MICRO-CAES. No obstant, aquests sistemes no estan tant desenvolupats com els CAES convencionals, ja que competeixen directament amb el sistema d'acumulació per bateries, i a més aquestes presenten rendiments superiors als obtinguts per CAES.

Algunes de les aplicacions de MICRO-CAES, relacionant-ho amb l'autoconsum, poden ser les següents:

- Sistema d'emmagatzematge d'energia per habitatge/habitatges autònoms.
- Sistema d'acumulació d'excedents elèctrics en habitatges/indústries/etc. connectades a xarxa amb instal·lacions d'autoconsum.

Aquestes instal·lacions MICRO-CAES es poden classificar en dos tipus: MICRO-CAES de baixa pressió i MICRO-CAES d'alta pressió:

- MICRO-CAES de baixa pressió:
L'aire emmagatzemat es troba a una pressió no superior a 10 bar aproximadament. Això per una banda afecta a les dimensions del dipòsit d'acumulació (ocuparà més espai), i d'altra banda afecta al rendiment global del sistema, ja que al ser baixos els ratios de pressió en la compressió i expansió, l'increment i decrement de temperatura seran baixos també, per lo que hi hauran poques pèrdues tèrmiques.

Com a exemple, en un estudi es va calcular que per emmagatzemar 3 kWh d'energia a una pressió de 8 Bar, es requereix d'un dipòsit de 65 m³, el que equival (13 m de llarg per 2,5 de diàmetre per exemple) [34]. Aquesta modalitat de CAES podria ser adequada per zones aïllades on no hi ha problemes d'espai.

- MICRO-CAES d'alta pressió:

Els sistemes MICRO-CAES d'alta pressió són els antagònics dels de baixa pressió. Per una banda, el volum del dipòsit serà més reduït, però el rendiment global del sistema podria ser menor ja que es genera més energia tèrmica, i caldria aprofitar-la per garantir un rendiment elèctric acceptable. D'aquesta manera, la calor obtinguda en la compressió i la alliberada en l'expansió es poden aprofitar i transmetre-les a altres zones en cas que hi hagin instal·lacions que requereixin tant de calor com fred, a part d'electricitat.

Aquesta modalitat de CAES pot ser adequada per zones urbanes on els espais són reduïts.

7.3.2.3. SEGONS EMMAGATZEMATGE

Depenent del lloc on s'emmagatzemi l'aire comprimit els sistemes CAES es poden classificar en:

- Emmagatzematge geològic

Les primeres instal·lacions CAES ja aprofitaven cavitats subterrànies per emmagatzemar l'aire comprimit.

o Cavitats salines:

Són les cavitats menys costoses d'obtenir i les més estudiades en sistemes CAES. Les primeres instal·lacions CAES que es van construir, utilitzen cavitats salines per l'emmagatzematge de l'aire comprimit. A més a més, gràcies a la baixa permeabilitat de la sal, s'aconsegueix una bona estanqueïtat de la cavitat [35].

o Cavitats en roca dura:

Ja s'han utilitzat conductes de roca dura per transportar gas natural cap a l'exterior, proporcionant una estanqueïtat excel·lent. No obstant, l'excavació de cavitats en roca dura és més costosa que en el cas de cavitats salines [36].

o Roca porosa:

Actualment, més del 95% de les instal·lacions d'emmagatzematge del gas natural es realitzen en roca porosa, el que suposa que ja es té àmplia experiència en emmagatzematge de gas en aquest tipus de roca. D'aquesta manera, encara que les propietats de l'aire siguin diferents a les del gas natural, la major part de la tecnologia i processos coincideixen [36].

- En dipòsits

Dipòsits d'acer al carboni per exemple, enterrats o en superfície.

- Dins l'aigua

L'aire a pressió és emmagatzemat ja sigui en bosses flexibles o en un contenidor de formigó al llit marí o a la base dels llacs [37]. Vegeu la Figura 8 com a exemple.

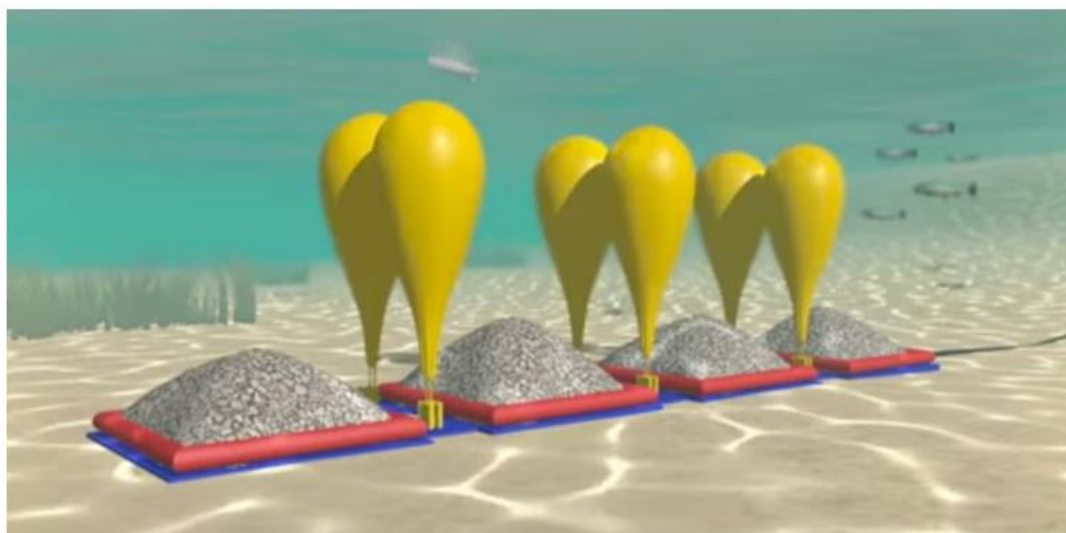


Figura 8. Sistema d'emmagatzematge d'aire a pressió dins l'aigua

8. CONCLUSIONS

Amb la realització d'aquest estudi queden determinades les corbes de rendibilitat per les instal·lacions de generació fotovoltaïques i eòliques en funció de la demanda energètica diària d'un o varis habitatges i la potència instal·lada de les instal·lacions, gràcies a l'estudi del sistema elèctric i del mercat elèctric de l'estat espanyol, els quals han servit per fixar les dades de partida a partir de les quals s'ha desenvolupat tot el treball.

Val a dir que, per a que aquestes corbes de rendibilitat obtingudes tinguin sentit pràctic, faltaria tan sols conèixer el cost de la instal·lació de generació. D'aquesta manera s'acabaria determinant el període de retorn de la inversió, el qual és un dels factors importants per decidir si val la pena invertir-hi o no, tot i que no és l'únic; com ja s'ha comentat a la introducció, el factor mediambiental també és molt rellevant.

Com a propostes de millora d'aquest treball, primerament, els resultats serien molt més acurats si s'utilitzessin les corbes de generació i demanda reals d'un habitatge en concret, ja que en aquest cas, al partir de les corbes de generació i demanda del sistema elèctric de l'estat espanyol doncs probablement hi hauran valors horaris de les corbes que distarien bastant d'un resultat real concret. No obstant, el fet d'utilitzar les corbes de generació i demanda del sistema elèctric es considera un bon mètode per proporcionar resultats orientatius.

També afegir que, en el càlcul de les rendibilitats obtingudes per les instal·lacions de generació no se'ls hi ha inclòs l'IVA del preu de compra de l'electricitat ni l'impost elèctric. Això suposa resultats conservadors de rendibilitat, i en el cas d'aquest estudi pot estar justificat pel fet de no disposar de corbes de demanda i generació concretes, però en cas que es realitzés un estudi detallat, caldria considerar-ho, ja que la rendibilitat serà superior.

També, relacionat amb els sistemes d'acumulació, seria interessant trobar les corbes de rendibilitat pels diferents sistemes comentats al treball, de la mateixa manera que s'ha fet per les instal·lacions de generació, i així comprovar quina rendibilitat presenten i poder comparar-los entre ells.

BIBLIOGRAFIA

- [1] **Real Decreto 244/2019, de 5 de abril, por el que se regulan las condiciones administrativas, técnicas y económicas del autoconsumo de energía eléctrica.**
Autor: Gobierno de España, publicat el 05/04/2019.
https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2019-5089
- [2] **Definició "Desviaments en el mercat elèctric"**
Autor: REE.
<https://www.ree.es/es/sala-de-prensa/glosario>
- [3] **Comercializadores lliures**
Autor: OCU, publicat el 23 de gener de 2017.
<https://www.ocu.org/vivienda-y-energia/gas-luz/noticias/que-es-eso-del-mercado-libre#>
- [4] **Tarifas PVPC**
Autor: TarifasGasLuz.
<https://tarifasgasluz.com/faq/tarifas#que-son-tarifas-acceso>
- [5] **Potència contractada habitatges**
Autor: Europapress, publicat el 28/10/2016.
<https://www.europapress.es/economia/energia-00341/noticia-11-hogares-tiene-contratada-potencia-electrica-superior-necesaria-holaluz-20161028144624.html>
- [6] **Influencia de las renovables en el precio de la electricidad**
Autor: Héctor Beltrán
<http://www.f2e.es/es/influencia-de-las-renovables-en-el-precio-de-la-electricidad>
- [7] **Formación de precios en el mercado Mayorista diario de electricidad**
Autor: Energía y Sociedad
<http://www.energiaysociedad.es/manenergia/6-1-formacion-de-precios-en-el-mercado-mayorista-diario-de-electricidad/>
- [8] **Base de dades generació, consums i preus de compra d'electricitat**
Autor: REE- e.sios
<https://www.esios.ree.es>
- [9] **Impuesto sobre electricidad**
Autor: Tarifaluzhora
<https://tarifaluzhora.es/info/impuesto-electricidad>
- [10] **Preus de venda d'electricitat en el mercat elèctric espanyol**
Autor: OMIE
<http://www.datosdelmercado.omie.es/es/datos-mercado>
- [11] **El sistema eléctrico español. Síntesis 2018.**
Autor: REE
https://www.ree.es/sites/default/files/11_PUBLICACIONES/Documentos/InformesSistemaElectrico/2018/sintesis_ree_2018.pdf
- [12] **Nota resumen explicativa del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030**
Autor: Ministerio para la transición ecológica
https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/participacion-publica/notaexplicativadelborradordelpniec2021-2030_tcm30-487346.pdf
- [13] **Alemania: líder en la implantación de energías renovables**
- [14] **Energy charts**
Autor: Fraunhofer ISE
<https://www.energy-charts.de/index.htm>

- [15] **European electricity markets panorama: Germany**
 Autor: AleaSoft, publicat el 26/02/2019.
<https://aleasoft.com/european-electricity-markets-panorama-germany/>
- [16] **Electricity price statistics**
 Autor: Eurostat
https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Electricity_price_statistics
- [17] **El comercio de derechos de emisión**
 Autor: Ministerio para la transición ecológica. Gobierno de España.
<https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/comercio-de-derechos-de-emision/que-es-el-comercio-de-derechos-de-emision/>
- [18] **European electricity markets panorama: Nordic Countries**
 Autor: AleaSoft
<https://aleasoft.com/european-electricity-markets-panorama-nordic-countries/>
- [19] **Electricity statistics Norway**
 Autor: Statistisk sentralbyrå
<https://www.ssb.no/en/energi-og-industri/statistikker/elektrisitet/aar>
- [20] **Annual and monthly statistics Denmark**
 Autor: Danish Energy Agency
<https://ens.dk/en/our-services/statistics-data-key-figures-and-energy-maps/annual-and-monthly-statistics>
- [21] **Latvian electricity market overview**
 Autor: AST
<http://www.ast.lv/en/electricity-market-review?year=2018&month=13>
- [22] **Why Norway has Europe's lowest electricity prices**
 Autor: Kinect Energy group, publicat el 28/02/2019.
- [23] **Denmark energy profile**
 Autor: Energy Information Administration U.S., publicat el 06/01/2010.
https://web.archive.org/web/20100304094837/http://tonto.eia.doe.gov/country/country_energy_data.cfm?fips=DA
- [24] **Fossil fuels**
 Autor: Hannah Ritchie i Max Roser
<https://ourworldindata.org/fossil-fuels>
- [25] **España tiene solicitudes de renovables que cuadruplican el consumo eléctrico**
 Autor: elEconomista, publicat el 08/04/2019.
<https://www.eleconomista.es/empresas-finanzas/noticias/9809498/04/19/Espana-tiene-solicitudes-de-renovables-que-cuadruplican-el-consumo-electrico.html>
- [26] **Electric Thermo Energy Storage (ETES)**
 Autor: Siemens Gamesa
https://windenergietage.de/wp-content/uploads/sites/2/2017/11/26WT0811_F11_1120_Dr_Barmer.pdf
- [27] **Introduction to energy storage systems: secondary batteries**
 Autor: Francisco Díaz-González
- [28] **ETES technology by Siemens Gamesa**
 Autor: Siemens Gamesa
<https://www.siemensgamesa.com/products-and-services/hybrid-and-storage/thermal-energy-storage-with-etes>
- [29] **Introducing ETES, the pioneering solution that facilitates the sector coupling of heating, cooling and electricity in the fight for decarbonization**
 Autor: Man Energy Solutions
<https://www.man-es.com/discover/a-tale-of-fire-and-ice>
- [30] **Overview of current development on Compressed Air Energy Storage**
 Autors: Xing Luo, Jihong Wang, publicat el 12/2013.

https://www.eera-set.eu/wp-content/uploads/Overview-of-Current-Development-on-Compressed-Air-Energy-Storage_EERA-report-2013.pdf

[31] **Advanced compressed air energy storage**

Autor: Hydrostor

<https://www.hydrostor.ca/>

[32] **Harnessing free energy from nature for efficient operation of compressed air energy storage system and unlocking the potential of renewable power generation**

Autor: Gayathri Venkataramani, Velraj Ramalingam, Kishore Viswanathan

https://www.researchgate.net/publication/326129759_Harnessing_Free_Energy_From_Nature_For_Efficient_Operation_of_Compressed_Air_Energy_Storage_System_and_Unlocking_the_Potential_of_Renewable_Power_Generation

[33] **Applications for CAES systems**

Autor: Energy Storage Association

<http://energystorage.org/compressed-air-energy-storage-caes>

[34] **Small compressed air energy storage systems**

Autor: Kayne Herriman, publicat el 24/08/2013.

https://eprints.usq.edu.au/24651/1/Herriman_2013.pdf

[35] **Geology of CAES**

Autor: Solar Energy, publicat el 15/08/2018.

<http://energyprofessionalsymposium.com/?p=26412>

[36] **Compressed air energy storage: characteristics, basic principles and geological considerations**

Autor: Li Li, Haojie Lian, Wiguo Liang, Jianfeng Yang, publicat el 03/2018.

https://www.researchgate.net/publication/323946453_Compressed_air_energy_storage_characteristics_basic_principles_and_geological_considerations

[37] **Hydrostor wants to stash energy in underwater bags**

Autor: Jean Kumagai, publicat el 10/07/2014.

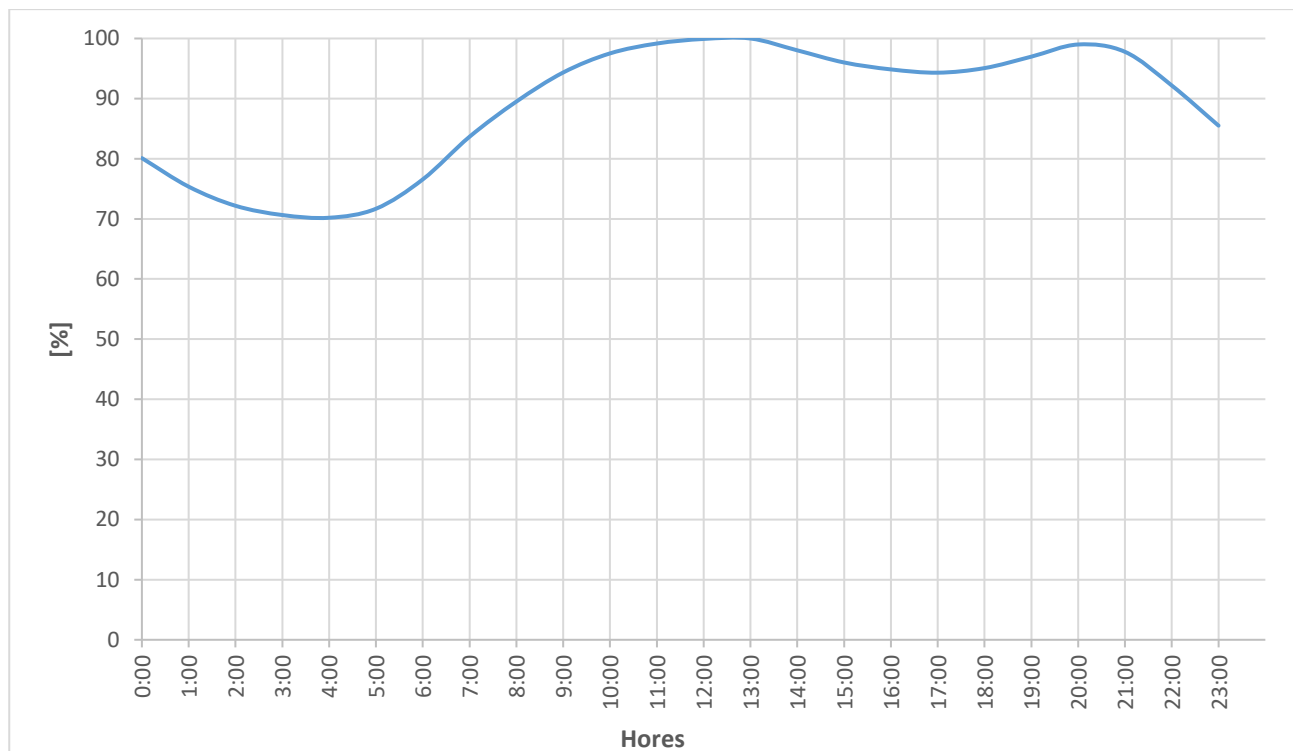
<https://spectrum.ieee.org/energy/renewables/hydrostor-wants-to-stash-energy-in-underwater-bags>

ANNEX

A.1. CORRECCIÓ CORBA DE DEMANDA ELÈCTRICA

L'objectiu d'aquest apartat és el d'obtenir la corba de demanda d'un habitatge tipus a partir de la corba de demanda de l'estat espanyol, vista en l'apartat 3.4.

Primerament comentar que, la corba de demanda obtinguda de l'estat espanyol, és una corba amb valors relativament constants, és a dir, els valors pic i vall de demanda no disten massa entre ells. Vegeu-ho en la Gràfica 35 en que es mostra en % la demanda horària respecte la demanda horària màxima.



Gràfica 35. Corba en percentatge de la demanda horària respecte la demanda horària màxima

Com es pot observar, els valors fluctuen entre el 70% i el 100%, és a dir, a les hores nocturnes de mínima demanda energètica, es requereix d'un 70% de l'energia que es necessitaria a les 13h.

Així doncs, per tal d'adequar aquesta corba a una corba més real d'un habitatge, cal corregir-la, per tal de tenir un percentatge inferior en les hores de mínima demanda.

La nomenclatura utilitzada és:

$e_{demanda,i}$ = Demanda elèctrica horària

$E_{demanda}$ = demanda diària d'energia elèctrica a l'habitatge

$e_{generada,i}$ = quantitat d'energia generada horàriament

Els passos que es segueixen són els següents:

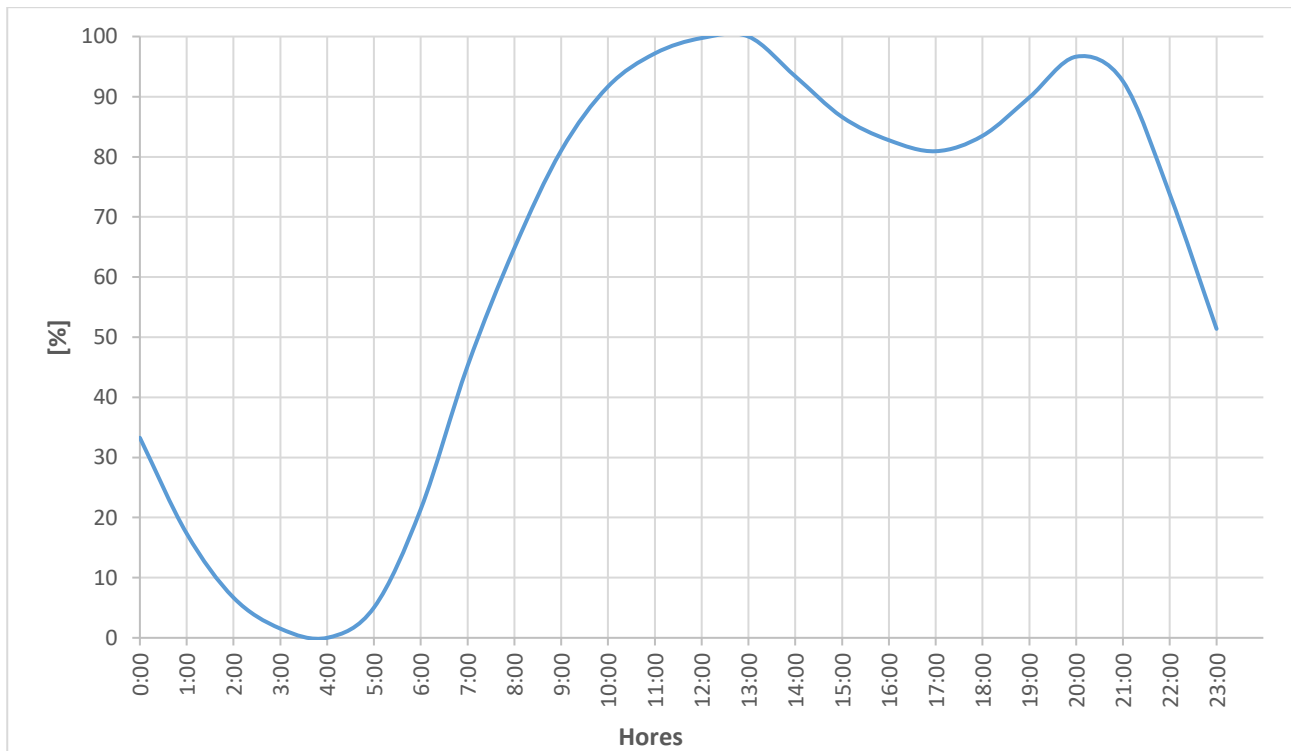
1. Càlcul del tant per 1 horari de demanda respecte la demanda elèctrica diària

$$e_{demanda,i}^p = \frac{e_{demanda,i}}{E_{demanda}}$$

2. Correcció de la corba de demanda inicial. S'imposa que d'entre totes les hores del dia, n'ha d'haver una que tingui consum zero, realitzant així una aproximació de les hores nocturnes de menor demanda a l'habitatge:

$$e_{demanda,c,i}^p = \frac{e_{demanda,i}^p - \text{MIN}(e_{demanda,i}^p)}{\sum [e_{demanda}^p - \text{MIN}(e_{demanda,i}^p)]}$$

Així doncs, amb el càlcul de $e_{demanda,c}^p$ s'obté el tant per 1 de la demanda horària corregida per les 24 hores del dia. El conjunt d'aquests valors representa la corba de demanda (vegeu la Gràfica 36) que és la que s'utilitzarà al llarg de tot l'estudi. Els valors numèrics es mostren en l'apartat A.4.1.



Gràfica 36. Corba de demanda horària corregida

Val a dir que, com es pot observar la Gràfica 36, a les 4 de la matinada la demanda energètica és zero. Aquest valor, en un habitatge habitual no seria normal, ja que durant la nit hi segueixen havent consums d'alguns aparells elèctrics com neveres, leds d'aparells electrònics, etc. No obstant, a efectes pràctics, com que aquests consums durant la matinada acostumen a ser molt baixos comparats amb els que es puguin tenir durant el dia, s'assumeix que la demanda a les 4h de la matinada pugui ser zero.

A.2. ANÀLISI CORBES DE RENDIBILITAT PER LES INSTAL·LACIONS DE GENERACIÓ

Vistos els resultats de les corbes de rendibilitat de les instal·lacions de generació obtingudes en l'apartat 5, en aquest apartat es pretén entendre el sentit físic del comportament d'aquestes corbes de rendibilitat a partir de l'anàlisi de les equacions de rendibilitat introduïdes en el mateix apartat 5.

La rendibilitat es calcula com:

$$R = \frac{B}{E_{generada}}$$

On, pel cas de modalitat amb compensació d'excedents,

$$B = \sum [(e_{generada,i} - e_{exc,i}) \cdot p_{compra,i}] + K \cdot \sum [e_{exc,i} \cdot p_{venda,i}] + (1 - K) \cdot \sum [e_{compra,i} \cdot p_{compra,i}]$$

En que,

$$K = 1 \text{ si } \frac{\sum [e_{exc,i} \cdot p_{venda,i}]}{\sum [e_{compra,i} \cdot p_{compra,i}]} < 1$$

$$K = 0 \text{ si } \frac{\sum [e_{exc,i} \cdot p_{venda,i}]}{\sum [e_{compra,i} \cdot p_{compra,i}]} \geq 1$$

I pel cas de modalitat amb venda d'excedents,

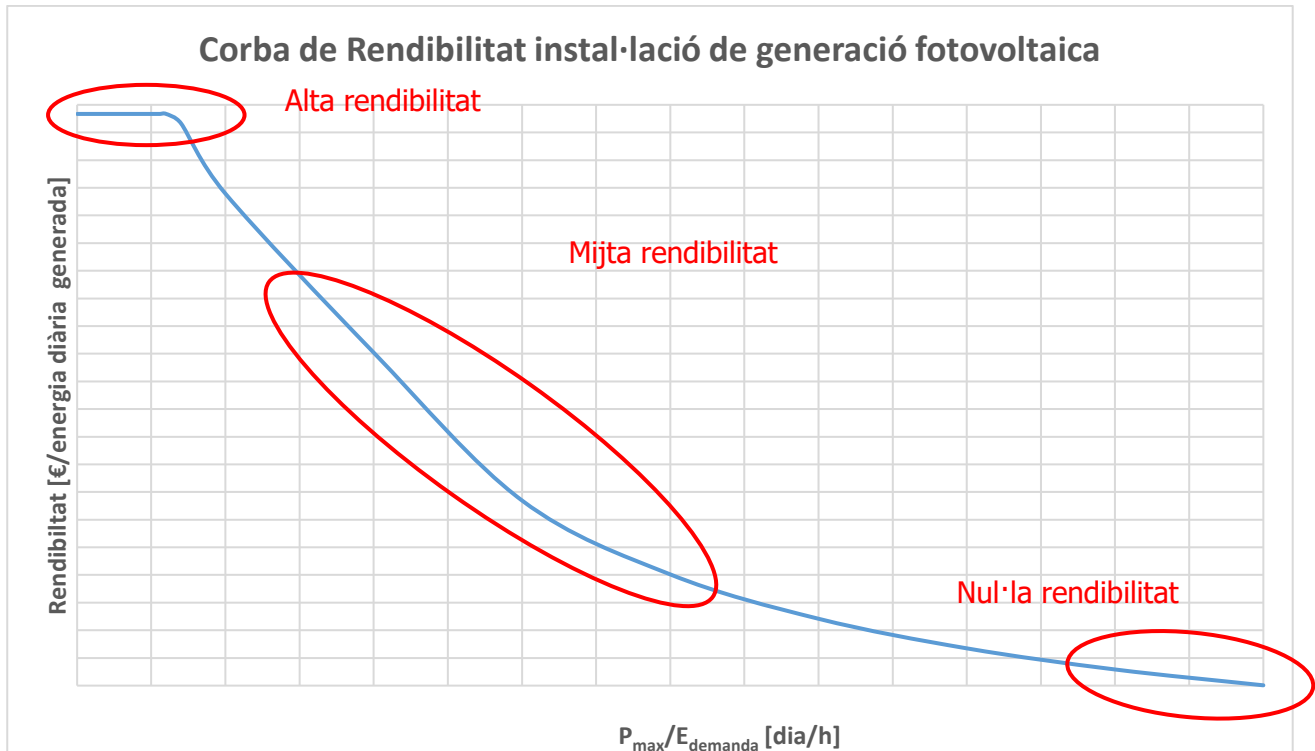
$$B = \sum [(e_{generada,i} - e_{exc,i}) \cdot p_{compra,i}] + \left(\sum [e_{exc,i} \cdot p_{venda,i}] - \sum [e_{exc,i} \cdot p_{venda,i} \cdot 0,07] - 0,5 \cdot E_{exc} \right)$$

A.2.1. CORBES DE RENDIBILITAT PER INSTAL·LACIONS ACOLLIDES A COMPENSACIÓ D'EXCEDENTS

D'acord amb els resultats obtinguts en els apartats 5.3 i 5.4, s'analiza la geometria de les corbes de rendibilitat per les instal·lacions de generació fotovoltaïques i eòliques.

Tal i com s'analiza a continuació, les corbes de rendibilitat per una instal·lació de generació acollida a compensació d'excedents, presenten 3 zones diferenciades: una zona d'alta rendibilitat, una de rendibilitat mitja i una de nul·la rendibilitat.

La geometria de la corba de rendibilitat per una instal·lació de generació fotovoltaïca és del tipus següent:



Tal i com pot observar-se, la zona constant d'alta rendibilitat es correspon en aquelles instal·lacions de generació en que $e_{\text{generada},i} < e_{\text{demanda},i} \forall i$, per lo que no es produeixen excedents en cap hora del dia. Aleshores, tota l'energia generada és multiplicada per $p_{\text{compra},i}$, en que $p_{\text{compra},i} > p_{\text{venda},i}$, motiu pel qual fa que sigui la zona de màxima rendibilitat. La rendibilitat en aquesta zona es pot expressar com:

$$R = \frac{B}{E_{\text{generada}}} = \frac{\sum[e_{\text{generada},i} \cdot p_{\text{compra},i}]}{E_{\text{generada}}} \approx ct.$$

Analitzant la zona de rendibilitat mitja, s'inicia quan per $e_{\text{generada},i} \geq e_{\text{demanda},i}$. Té sentit lògic que tingui aquesta tendència decreixent, ja que l'equació de rendibilitat es pot expressar com:

$$R = \frac{B}{E_{\text{generada}}} = \frac{\sum[(e_{\text{generada},i} - e_{\text{exc},i}) \cdot p_{\text{compra},i}]}{E_{\text{generada}}} + \frac{\sum[e_{\text{exc},i} \cdot p_{\text{venda},i}]}{E_{\text{generada}}}$$

I en el cas límit hipotètic s'assumeix que $e_{\text{generada},i} \geq e_{\text{demanda},i} \forall i$, per lo que l'equació es pot expressar com:

$$R = \frac{\sum[e_{\text{demanda},i} \cdot p_{\text{compra},i}]}{E_{\text{generada}}} + \frac{\sum[e_{\text{exc},i} \cdot p_{\text{venda},i}]}{E_{\text{generada}}}$$

I, en cas que $\sum[e_{\text{exc},i} \cdot p_{\text{venda},i}] \geq \sum[e_{\text{compra},i} \cdot p_{\text{compra},i}]$ ¹⁴,

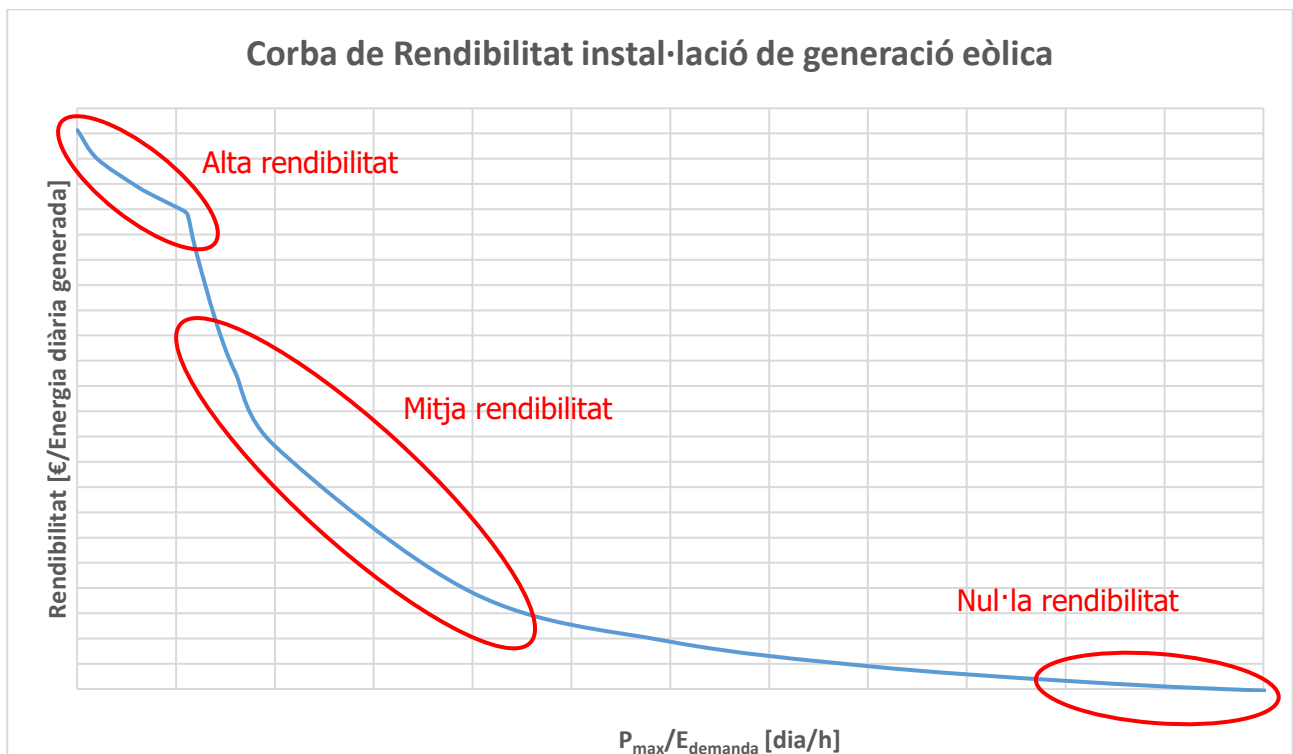
$$R = \frac{\sum[e_{\text{demanda},i} \cdot p_{\text{compra},i}]}{E_{\text{generada}}} + \frac{\sum[e_{\text{compra},i} \cdot p_{\text{compra},i}]}{E_{\text{generada}}}$$

¹⁴ D'acord amb el Real Decret 244/2019, en el període d'un mes, el guany obtingut per la compensació d'energia excedentària no pot ser superior al preu que es paga pel consum d'electricitat comprada a la xarxa convencional. D'aquesta manera, tota l'energia excedentària que segueixi generant arribats a aquest llindar serà energia regalada.

Es pot observar que el primer terme de l'equació anirà disminuït a mesura que $E_{generada}$ augmenti ($e_{demanda,i} = ct.$). El segon terme també tendirà a disminuir ja que $\sum[e_{compra,i} \cdot p_{compra,i}]$ anirà reduint-se per valors alts de $E_{generada}$.

Finalment, la rendibilitat acabarà sent nul·la, ja que $E_{generada}$ serà molt elevada en comparació amb els numeradors de l'equació.

Respecte la geometria de la corba de rendibilitat per una instal·lació de generació eòlica es del tipus següent:



El comportament de la corba de rendibilitat és equivalent al de les instal·lacions fotovoltaïques, a diferència de la zona d'alta rendibilitat que té tendència decreixent.

Aquest fet és degut a què per una potència instal·lada molt baixa ja es generen excedents¹⁵, que fan baixar la rendibilitat del sistema, ja que $p_{venda,i} < p_{compra,i}$

$$R = \frac{B}{E_{generada}} = \frac{\sum[(e_{generada,i} - e_{exc,i}) \cdot p_{compra,i}]}{E_{generada}} + \frac{\sum[e_{exc,i} \cdot p_{venda,i}]}{E_{generada}}$$

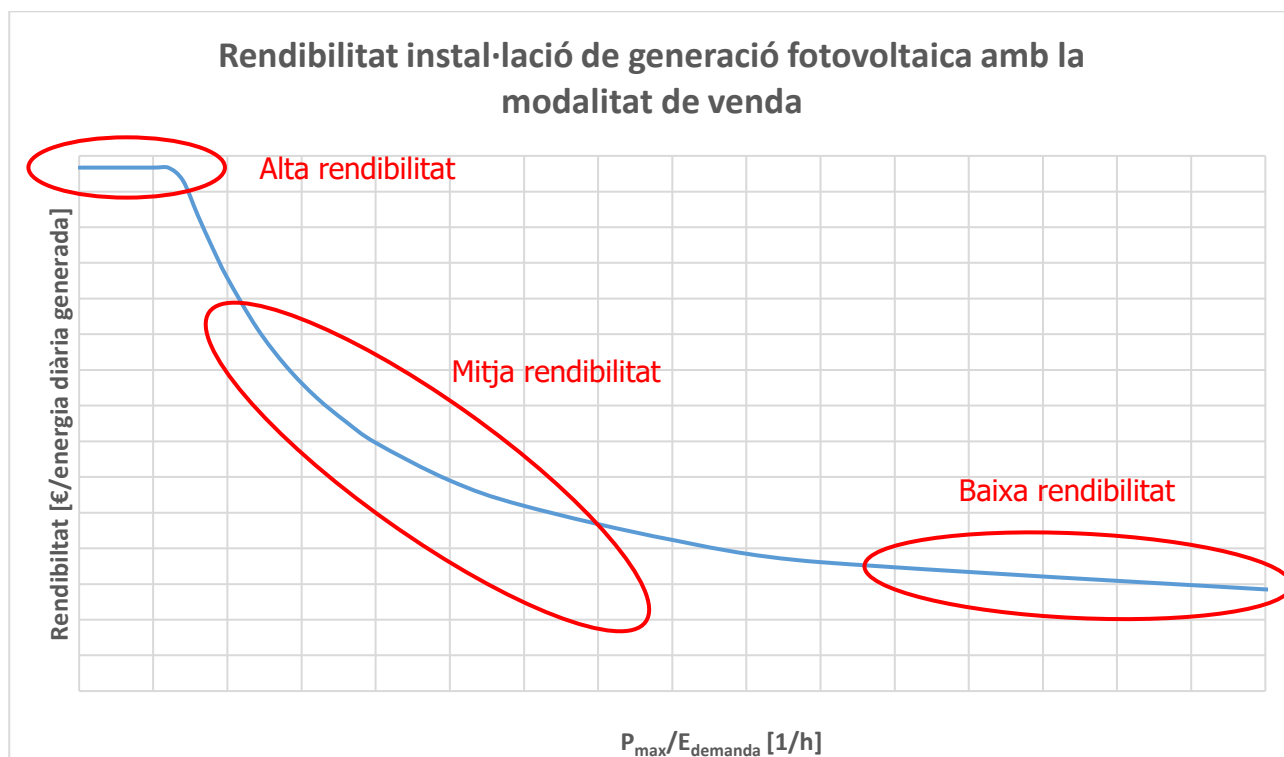
¹⁵ Vegeu la Gràfica 13, pàgina 22 per veure les corbes de generació considerades.

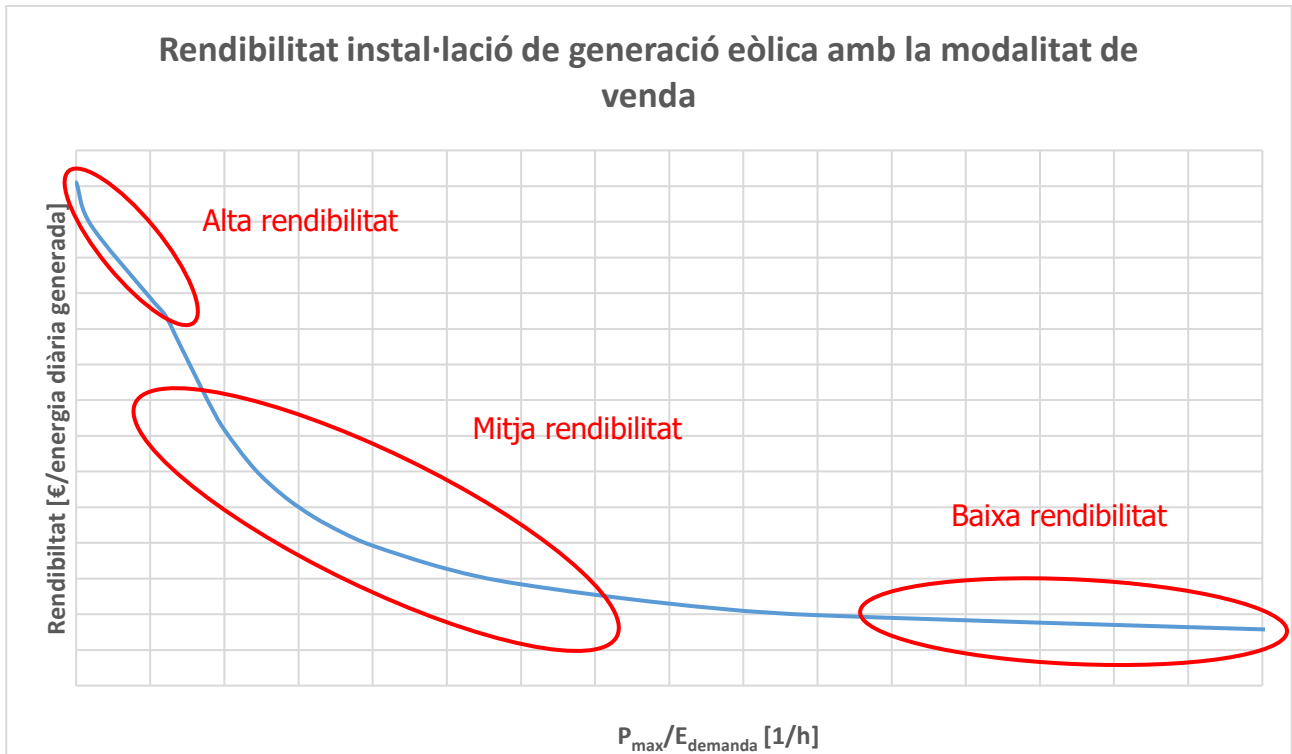
A.2.2. CORBES DE RENDIBILITAT PER INSTAL·LACIONS ACOLLIDES A VENDA D'EXCEDENTS

D'acord amb els resultats obtinguts en els apartats 5.3 i 5.4, s'analitzen la geometria de les corbes de rendibilitat per les instal·lacions de generació fotovoltaïques i eòliques acollides a venda d'excedents.

Tal i com s'analitza a continuació, les corbes de rendibilitat per una instal·lació de generació acollida a venda d'excedents, presenten 3 zones diferenciades: una zona d'alta rendibilitat, una de rendibilitat mitja i una de baixa rendibilitat.

La geometria de les corbes de rendibilitat per ambdós sistemes de generació són les següents:





Com pot observar-se, la geometria d'ambdós corbes de rendibilitat per la modalitat de venda són homòlogues a les de la modalitat de compensació, a diferència de l'última zona. En aquest cas, la rendibilitat mai és zero, sinó que acaba sent constant i amb valor.

Això és degut a què en el cas de venda, a diferència de la compensació, tota l'energia excedentària és pagada. Tenint en compte l'equació de rendibilitat que aplica en aquesta zona d'alta quantitat d'excidents, el resultat acaba sent aproximadament constant.

$$R = \frac{B}{E_{generada}} = \frac{\sum[e_{exc,i} \cdot p_{venda,i}] - \sum[e_{exc,i} \cdot p_{venda,i} \cdot 0,07] - 0,5 \cdot E_{exc}}{E_{generada}} \approx ct.$$

A.3. PROCEDIMENT PEL CÀLCUL DE L'INTERVAL PER LA VIABILITAT DE LES INSTAL·LACIONS D'ACUMULACIÓ

Per determinar l'interval de viabilitat de les instal·lacions d'acumulació, partint d'un valor $E_{demanda}$ es calcula quina és la potència mitja $P_{lim,i}$ que hauria de tenir la instal·lació de generació horàriament en funció de la demanda energètica horària $e_{demanda,i}$ per tal que $e_{exc,i} = 0 \forall i$ o bé $e_{compra,i} = 0 \forall i$, segons l'equació:

$$P_{lim,i} = \frac{f_{d,i}}{f_{g,i}} \cdot \frac{E_{demanda}}{t_i}$$

El valor màxim de tots els obtinguts és el que determinarà la potència límit de la instal·lació de generació que fa que $e_{compra,i} = 0 \forall i$ i per tant, no tingui sentit utilitzar un sistema d'acumulació en que es vulgui emmagatzemar energia per consumir-la en hores de dèficit energètic:

$$P_{max,lim} = MAX(P_{lim,i})$$

El valor mínim de tots els obtinguts és el que determinarà la potència límit de la instal·lació de generació que fa que $e_{exc,i} = 0 \forall i$ i per tant, no tingui sentit utilitzar un sistema d'acumulació.

$$P_{min,lim} = MIN(P_{lim,i})$$

Amb $P_{max,lim}$ i $P_{min,lim}$ calculades, s'obtenen els valors de l'energia generada límit per cada cas:

$$E_{generada,lim}^{max} = P_{max,lim} \cdot t_i$$

$$E_{generada,lim}^{min} = P_{min,lim} \cdot t_i$$

Finalment, s'obté el rati entre energia diària generada $E_{generada}$ i demanda energètica diària $E_{demanda}$:

$$r_{lim}^{max} = \frac{E_{generada,lim}^{max}}{E_{demanda}}$$

$$r_{lim}^{min} = \frac{E_{generada,lim}^{min}}{E_{demanda}}$$

Val a dir que aquests dos ratis són constants independentment de $E_{generada}$.

En termes de potencia instal·lada P_{max} , aquesta relació es pot expressar com:

$$P_{max,lim} = \frac{r_{lim}^{max}}{\sum(f_{g,i} \cdot t_i)} \cdot E_{demanda}$$

$$P_{min,lim} = \frac{r_{lim}^{min}}{\sum(f_{g,i} \cdot t_i)} \cdot E_{demanda}$$

Així doncs, aquestes dues equacions són les que permeten obtenir els valors límit de l'interval de viabilitat dels sistemes d'acumulació per qualsevol valor de $E_{demanda}$.

A.4. TAULES DE VALORS

Les següents dades són les utilitzades per la realització dels càlculs del present estudi.

A.4.1. VALORS HORARIS PERCENTUALS MITJOS DE LA DEMANDA ENERGÈTICA DIÀRIA

La taula següent indica el percentatge horari de demanda elèctrica respecte la demanda elèctrica diària.

Hores	$f_{d,i}$ [%]
0:00	2,22
1:00	1,16
2:00	0,45
3:00	0,10
4:00	0,00
5:00	0,34
6:00	1,43
7:00	3,02
8:00	4,33
9:00	5,42
10:00	6,13
11:00	6,49
12:00	6,67
13:00	6,68
14:00	6,24
15:00	5,79
16:00	5,53
17:00	5,41
18:00	5,58
19:00	6,01
20:00	6,46
21:00	6,19
22:00	4,93
23:00	3,43

A.4.2. VALORS HORARIS PERCENTUALS MITJOS DE LA GENERACIÓ ELÈCTRICA DIÀRIA

La taula següent mostra el percentatge horari de potència mitja de les instal·lacions de generació respecte la potència instal·lada, tant per una instal·lació fotovoltaica com una d'eòlica.

Hores	fg,i solar [%]	fg,i eòlica [%]
0:00	0,03	96,98
1:00	0,01	95,00
2:00	0,00	92,80
3:00	0,01	90,63
4:00	0,01	88,67
5:00	0,01	87,13
6:00	0,05	86,03
7:00	2,06	84,44
8:00	14,68	81,24
9:00	42,22	77,11
10:00	68,85	75,49
11:00	86,76	76,41
12:00	96,65	78,80
13:00	100,00	81,76
14:00	97,64	85,15
15:00	89,30	88,20
16:00	73,93	91,08
17:00	52,71	93,70
18:00	32,05	96,52
19:00	15,38	98,60
20:00	4,37	99,47
21:00	0,29	99,78
22:00	0,01	100,00
23:00	0,01	99,13

A.4.3. VALORS HORARIS MITJOS DEL PREU DE COMPRA

En la següent taula es mostren els preus horaris de compra d'electricitat utilitzats en el present estudi.

Hores	$p_{\text{compra},i}$ [€/MWh]		
	2.0A	2.0DHA	2.0DHS
0:00	125,02	75,39	79,90
1:00	121,65	72,10	68,66
2:00	118,87	69,38	65,99
3:00	117,53	68,11	64,76
4:00	116,91	67,51	64,18
5:00	117,87	68,50	65,17
6:00	121,54	72,18	68,87
7:00	125,35	75,98	80,24
8:00	125,55	76,65	80,52
9:00	126,16	77,41	81,15
10:00	125,51	76,85	80,51
11:00	124,70	76,07	79,70
12:00	124,21	104,37	79,37
13:00	123,67	142,41	142,24
14:00	122,21	140,95	140,95
15:00	120,90	139,65	139,65
16:00	120,36	139,10	139,10
17:00	121,96	140,72	140,72
18:00	124,06	142,82	142,82
19:00	126,45	145,24	145,24
20:00	128,48	147,31	147,31
21:00	129,21	148,07	148,07
22:00	127,62	117,31	146,34
23:00	125,19	75,86	80,27
PROMIG	123,37	102,50	102,99

A.4.4. VALORS HORARIS MITJOS DEL PREU DE VENDA I COMPENSACIÓ

En la següent taula es mostren els preus horaris de venda/compensació d'electricitat utilitzats en el present estudi.

Hores	pvenda, _i [€/MWh]
0:00	58,71
1:00	57,77
2:00	54,26
3:00	51,77
4:00	50,43
5:00	49,90
6:00	50,92
7:00	54,53
8:00	58,31
9:00	60,08
10:00	61,39
11:00	61,32
12:00	60,74
13:00	60,43
14:00	60,01
15:00	58,51
16:00	57,01
17:00	56,58
18:00	58,08
19:00	59,82
20:00	61,63
21:00	62,88
22:00	63,16
23:00	61,33
PROMIG	57,90