

TRANSICIÓ ENERGÈTICA: ELECTRIFICACIÓ DE LA DEMANDA I GESTIÓ DE LA FLEXIBILITAT

Joaquim Meléndez Frigola

Institut d'Informàtica i Aplicacions. Universitat de Girona. joaquim.melendez@udg.edu

Resum: Les agendes europees dels propers anys progressivament limiten les emissions de gasos d'efecte hivernacle forçant, per una banda, la substitució de fonts fòssils per fonts renovables i, per una altra, l'electrificació de la demanda. Aquesta electrificació és més evident en dos sectors principals, el transport per carretera i la climatització d'espais (edificis principalment del sector terciari i residencial). D'aquesta manera passem la responsabilitat de les emissions a la combinació de fonts primàries utilitzades en la generació elèctrica i posant pressió en la substitució de generadors convencionals (combustible fòssil) per generadors de fonts renovables. Aquest canvi comporta una reducció de la capacitat de control de la xarxa (tant de la freqüència com de la tensió) degut a una major volatilitat d'aquestes fonts d'energia renovable (eòlica i solar) i, a la vegada, a una major distribució de la generació per tota la xarxa. Es fa necessària una millor gestió de la flexibilitat que la demanda pot oferir per tal d'incorporar el màxim de generació renovable al sistema. Existeixen diferents estratègies per gestionar la demanda, que poden consistir en tarifes variables (flexibilitat implícita) o en l'establiment de mercats de flexibilitat (flexibilitat explícita), en què el consumidor final podrà participar mitjançant un representant encarregat de proporcionar serveis d'agregació i de gestió de la flexibilitat. La generació distribuïda a la xarxa de distribució, el desplegament d'estacions de recàrrega de vehicle elèctric i l'electrificació dels sistemes de calefacció i refrigeració afegeixen complexitat a l'operació de la xarxa de distribució. Es fa necessari incrementar l'observabilitat de la mitjana i baixa tensió i dotar de més intel·ligència els sistemes de gestió de la xarxa de distribució (xarxa elèctrica intel·ligent) i comptar amb una participació més activa del consumidor final en la cadena de valor del sistema elèctric a partir de programes de gestió de la demanda.

Paraules clau: generació renovable, electrificació de la demanda, generació distribuïda, xarxes elèctriques intel·ligents, flexibilitat de la demanda.

ENERGY TRANSITION: ELECTRIFICATION OF DEMAND AND FLEXIBILITY MANAGEMENT

Summary: The European agendas for the coming years progressively limit greenhouse gas emissions. This implies the replacement of fossil sources with renewable sources and the electrification of the demand. Electrification is most evident in two main sectors: road transport and space heating and cooling (mainly in the tertiary and residential sectors). Thus, the responsibility for emissions falls directly to the electricity generation mix and increases the pressure to replace conventional generators (fossil fuels) with renewable resources. This change entails a reduction in the control capacity of the network (both in frequency and voltage) due to the greater volatility of wind and solar energies in their distribution throughout the network. Better management of the flexibility that the demand can offer is needed to incorporate maximum renewable generation into the system. Different demand management strategies exist, which can consist of variable signal prices (implicit flexibility) or the establishment of flexibility markets (explicit flexibility), where the end consumer can participate through a representative manager for the provision of services of aggregation and of flexibility management. Distributed generation in the distribution network, the deployment of electric vehicle charging points and the electrification of heating/cooling systems add complexity to the distribution network's operation. It is necessary to increase the observability of the medium and low voltage grid and to provide greater intelligence to the distribution management systems (smart grid), with a greater participation of consumers in the electricity value chain.

Keywords: renewable generation, electrification of demand, distributed generation, smart grids, flexibility of demand.

Introducció

Estem en una època de transició en el model energètic, esperonada per una situació d'emergència climàtica, reconeguda i declarada formalment pels governs i parlaments d'arreu d'Europa (per exemple, Resolució del Parlament Europeu de 28 de novembre,

RSP 2019/2930) i que en l'àmbit europeu va suposar un gran acord dels vint-i-set estats membres, conegut com a Pacte Verd Europeu (European Green Deal, COM/2019/640), per tal de convertir Europa en el primer continent climàticament neutre l'any 2050. L'acord es fonamenta en tres pilars: a) garantir l'accés i la seguretat del subministrament energètic en l'àmbit europeu; b) esta-

blir un mercat energètic europeu totalment digitalitzat i interconnectat, i c) un model energètic més eficient, que implica millores en l'edificació i un desenvolupament del sector elèctric fortament basat en les fonts renovables. Per tant, a Europa, aquesta transició energètica és afavorida per un fort reconeixement polític i les conseqüents iniciatives legislatives (Llei europea del clima, EU 2021/1119) i financeres que se'n derivin, per tal d'assolir fites quantificables i acotades en el temps, com són la voluntat de no incrementar la temperatura mitjana per sobre dels 1,5 °C o reduir les emissions en un 55% (respecte a nivells de 1990) el 2030. Així, la Comissió Europea, amb la participació dels estats membres, ha fixat per al 2030 una sèrie d'objectius, els indicadors corresponents i els mecanismes per al seu seguiment. Els principals indicadors inclouen la reducció d'emissions dels cotxes en un 55% i el 50% per a furgons i camionetes (i no emissions per als nous vehicles a partir del 2035), una penetració de les energies renovables del 40% i objectius del 36% en eficiència per a l'energia final (usada pel consumidor final) i del 39% per a l'energia primària (demanda de recurs energètic real, abans de transformar, per satisfer el consum final). L'abril del 2023, el Consell del Parlament Europeu va aprovar cinc noves lleis específiques per tal de garantir els objectius de reducció d'emissions de gasos d'efecte hivernacle en sectors clau de l'economia (Fit for 55). Recentment, el setembre de 2023, es va aprovar la Directiva d'eficiència en l'ús de l'energia (EU 2023/1791), en la qual es revisa l'objectiu per al 2030 i es

fixa una reducció de com a mínim un 11,7% del consum d'energia respecte a les projeccions anteriors (que daten de 2020). La directiva també fixa l'obligació d'actualitzar els estudis i plans de climatització (calefacció i aire condicionat) de cada país per tal d'identificar les tecnologies més eficients per a cada àrea geogràfica amb l'objectiu d'abandonar tecnologies contaminants, incloent-hi la cogeneració, i arribar al 2050 amb sistemes que consumeixin només energies renovables i energia provinent de la valorització de residus. També es revisa, entre altres aspectes, l'actuació exemplar del sector públic i es fixa una reducció de l'1,9% del consum final per al sector públic, lligada a una planificació de renovació dels edificis públics (3% anual del total de superfície climatitzada). La suma de totes les actuacions ha de portar a una reducció efectiva de les emissions.

La figura 1 mostra com seria la contribució dels diferents sectors a la reducció d'emissions a partir dels escenaris definits en el Winter Package de 2016 (Hancher i Winters, 2017) i utilitzant per a la simulació el model PRIMES (de anglès *price-induced market equilibrium system*, sistema d'equilibratge del mercat induït per preus) (Capros *et al.*, 2017). Aquest model cobreix tots els estats membres i s'utilitza per a prediccions a mitjà i llarg termini (fins al 2070), amb una resolució de cinc anys. Podem veure que la reducció d'emissions ve per la substitució de fonts fòssils per renovables en el subministrament d'energia. I, pel que fa a la demanda, es diferencien tres grans sectors: el transport

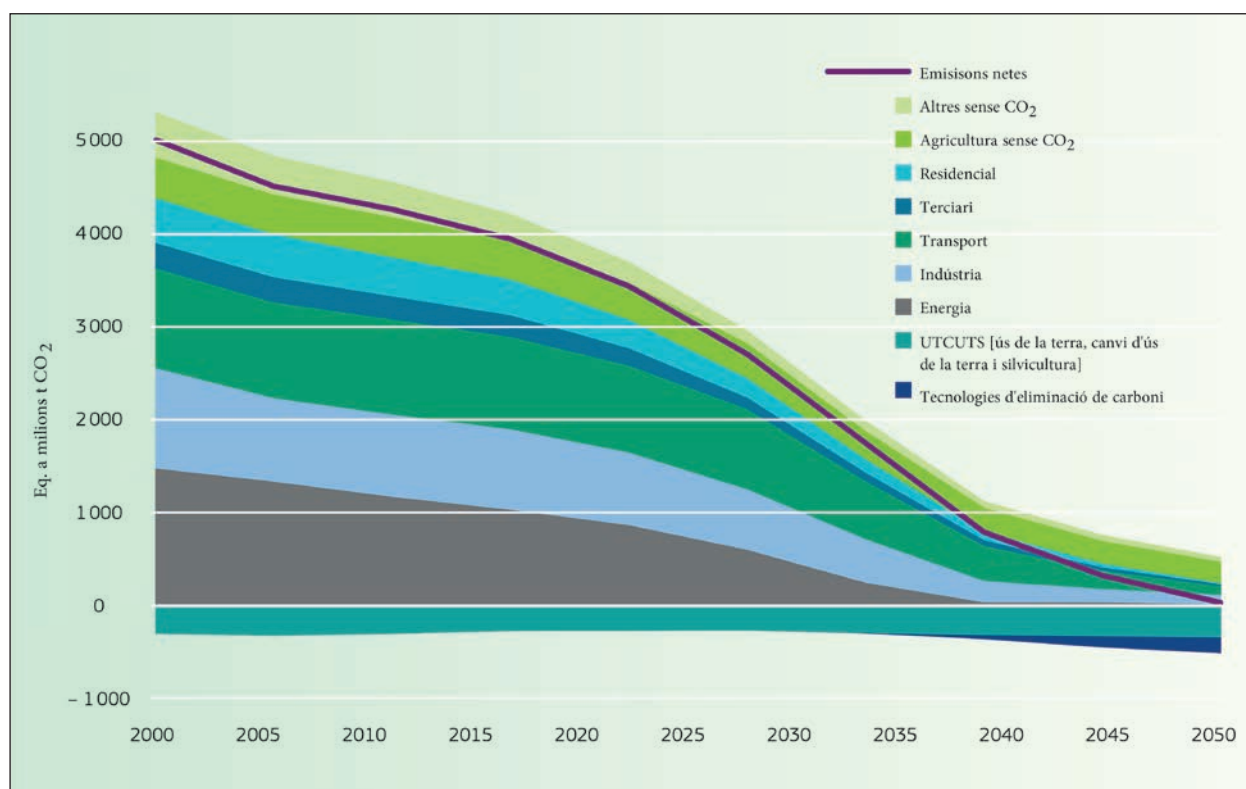


FIGURA 1. Trajectòria d'emissions de gasos d'efecte hivernacle en un escenari d'1,5 °C.
FONT: Comissió Europea (2019).

(substitució dels combustibles derivats del petroli en la mobilitat); el domèstic (dominat per la climatització d'espais que implica l'electrificació dels sistemes de calefacció i refrigeració —bombes de calor— o l'ús de biocombustibles, i la millora de l'aïllament), i el sector industrial, on es preveu una substitució més progressiva dels combustibles fòssils per combustibles alternatius com els biocombustibles o l'hidrogen verd. Tenen un impacte menor les emissions derivades d'activitats que no requereixen aportació d'energia, com l'agricultura, la ramaderia o la gestió de residus.

L'escenari ja està definit i és per això que estem veient com s'accelera l'electrificació de la mobilitat amb la proliferació de vehicles elèctrics i la climatització d'edificis amb bombes de calor (aerotèrmia, hidrotèrmia, geotèrmia); s'implanten xarxes de calor i fred (district *heating and cooling*) amb producció energètica a partir de centrals de valorització de residus, de biomassa o alimentades per fonts renovables; sorgeixen contínuament nous projectes de generació d'hidrogen verd (a partir de fonts renovables); es milloren les tecnologies d'emmagatzematge (bateries), i es modernitzen les xarxes de distribució, per mencionar alguns canvis tecnològics destacables. Aquesta transició cap a fonts renovables comporta inevitablement una major electrificació (increment de la demanda, generació distribuïda, renovació i redisseny de les xarxes de distribució), però també una visió i gestió integrals dels sistemes energètics multivector per tal de fer-ne un ús òptim i més eficient en tot moment i que han de comptar amb una participació més activa del consumidor (ciutadà energètic). Aquesta transformació suposa un sèrie de reptes tecnològics que comporten la digitalització de l'energia en un sentit global, cosa que implica l'accés a les dades de consum i generació en temps real, tant individualment com de manera agregada, i la interacció en temps real (a diferents escales temporals) entre els múltiples actors de la cadena de valor del sistema energètic (entre ells, consumidors, generadors, agregadors de flexibilitat, distribuïdores, transportistes i mercats) i una participació més activa del ciutadà consumidor (i ara també productor) d'energia.

En les seccions següents veurem les implicacions d'aquestes iniciatives legislatives sobre el sistema energètic europeu amb l'objectiu de mostrar quines transformacions tecnològiques calen i el seu impacte. La primera gran transformació és la progressiva substitució de la generació i la demanda que utilitzen combustibles fòssils. Introduïrem la complexitat que suposa gestionar una xarxa elèctrica amb alta penetració de generació renovable eòlica i solar degut a la seva alta volatilitat. A aquesta volatilitat cal afegir la major electrificació del consum a causa de l'electrificació del transport i de la climatització. Aquests dos aspectes ens portaran a introduir el concepte *xarxes elèctriques intel·ligents* (*smart grids*) com a tecnologia facilitadora de la gestió de la xarxa i la necessitat de gestionar la flexibilitat que el consumidor pot aportar de cara a millorar aquesta gestió.

Generació renovable: gestionar la volatilitat

El primer gran repte que suposa substituir els grans generadors elèctrics convencionals per generadors renovables és la volatilitat d'algunes de les energies renovables. Tot i que algunes fonts renovables són controlables (la hidràulica, per exemple), altres com la solar fotovoltaica o l'eòlica no ho són, o ho són en menor grau. És a dir, l'electrònica que incorporen aquestes fonts de generació (inversors) permeten controlar la potència injectada respecte a la seva capacitat de producció en un instant determinat, però no podem incrementar o disminuir la font primària (la intensitat del vent o irradiància solar). La capacitat de controlar (incrementar o disminuir, activa i reactiva) la quantitat de potència que les fonts de generació donen en un instant determinat és limitada i en certa manera volàtil, ja que la producció es pot veure afectada per les variacions sobtades del vent o el pas de núvols en una àrea geogràfica amb alta presència de generadors. Per tant, no podem comptar amb aquests generadors com a únics recursos per mantenir l'equilibri entre la demanda i generació en tot moment i fer un control efectiu de la xarxa.

La generació convencional, per contra, té el gran avantatge que és controlable i, per tant, en tot moment permet ajustar la producció a la demanda d'una forma gairebé instantània (depenent de la tecnologia), de manera que no només es cobreix la demanda en termes d'energia, sinó que, a més, es fa sota estrictes condicions d'estabilitat del sistema elèctric i de qualitat en el subministrament. És a dir, controlant la freqüència i la tensió en tot el sistema elèctric. Un desajust entre la demanda i la generació pot produir una variació de la freqüència del sistema que cal compensar immediatament per evitar l'acceleració, o frenada, no desitjada d'algun generador. Aquest efecte, prolongat en el temps, podria posar en perill la màquina i, per tant, prèviament faria saltar les seves proteccions amb la consegüent pèrdua de generació. Com a conseqüència d'aquesta aturada, el desequilibri entre demanda i generació es veuria incrementat, cosa que provocaria un efecte similar en altres generadors i, per tant, la seva desconexió en cascada, que podria acabar en una apagada general. Per tant, el control de la freqüència és molt important per mantenir el sistema elèctric en funcionament. Avui dia aquests desajustos els compensen els generadors sota una estratègia coordinada per l'operador del sistema elèctric, i suportat per mecanismes de mercat, que operen durant tot el dia per garantir l'existència i actuació de reserves de generació suficients. El control de freqüència en el sistema elèctric és un mecanisme multinivell (mercats de balanç o de reserves), en el qual els diferents proveïdors se les enginyen per oferir de manera òptima la seva disponibilitat per actuar (reserves) en els diferents mercats, que operen a diferents escales temporals (primari, secundari, terciari) (Perninge i Eriksson, 2018). El control primari (FCR, *frequency containment reserve*, reserves per al control de freqüència) implica els llaços de control dels mateixos generadors que estan cobrint la demanda, de manera que

una disminució o increment de la freqüència degut a un increment o disminució del consum es compensa incrementant o disminuint la producció de forma pràcticament immediata. Si el desajust es manté, s'activa el mecanisme de reserva secundari (aFRR, *automatic frequency restoration reserve*, reserva automàtica de control de freqüència), també de manera automàtica, que respon en segons o minuts (el temps dependrà de la regulació de cada país) per alliberar el control primari i deixar-lo disponible per actuar davant nous canvis sobtats. De manera similar, si el desajust es manté, s'activa la reserva terciària (mFRR, *manual frequency restoration reserve*, reserva manual de control de freqüència). Aquest control de freqüència es fa en el sistema de transport elèctric i és el seu operador l'encarregat de gestionar-lo a través dels diferents mercats globals (en l'àmbit de país o zones). Un sistema amb alta penetració de generació renovable i alta volatilitat tendirà a reduir les reserves d'ajust i, per tant, a encarir aquest servei. Davant la reducció de reserves de generació, s'obre la possibilitat d'aportar aquesta reserva a partir d'actuacions en la demanda (incrementar o disminuir) per tal de mantenir en tot moment aquest equilibri necessari entre la demanda i la generació elèctrica. Parlem llavors de conceptes com *flexibilitat* i *gestió activa de la demanda*, i, per tant, d'una participació més activa del consumidor en la cadena de valor del sistema elèctric, posant a disposició dels mercats de balanç la seva flexibilitat en el consum i producció d'electricitat.

D'altra banda, les variacions de tensió a les línies són degudes a la impedància dels cables i les variacions del corrent que hi circula a causa de variacions en la demanda (més consum suposa més corrent i, per tant, una major caiguda de tensió per una mateixa línia). Aquestes variacions de tensió a extrems de les línies poden afectar el funcionament de les càrregues connectades, per la qual cosa s'ha de mantenir la tensió dins uns marges. Per exemple, variacions per sobre del 10% del valor nominal poden afectar greument els equips electrònics. La figura 2 mostra aques-

ta sensibilitat dels equips electrònics a les variacions de tensió segons la durada i magnitud d'aquestes variacions. Les sobretensions poden causar danys irreversibles als equips, mentre que solen ser més robustos a baixades de tensió.

Habitualment són els transformadors les màquines encarregades de mantenir aquestes tensions variant la relació de transformació per tal de mantenir la tensió en tota la línia entre uns valors mínim i màxim (fixats per la regulació i les normes d'explotació de cada sistema). El control de tensió afecta tant el sistema de transport com el de distribució, essent cada cop més problemàtic en l'àmbit de la distribució degut a les fortes variacions que experimenta la demanda en zones geogràfiques concretes. Aquestes variacions es veuen amplificades per la instal·lació d'aquesta generació renovable de fort caràcter volàtil, i poden afectar diferents escales de temps. Per exemple, podem tenir comportaments estacionals o diaris (feiners, vacances o caps de setmana) fortament marcats en zones turístiques. Però també tenim variacions intradiàries de la demanda degut a la proliferació d'instal·lacions d'autoconsum i de generació distribuïda. Aquestes variacions poden ser tan importants com la diferència entre el pic de consum al vespre, quan no hi ha generació solar, i els excedents de generació a les hores de màxima irradiància solar, en què el flux de potència anirà en sentit contrari. I aquesta variació es pot veure alterada durant el dia pel pas de núvols o per l'aturada de vent en zones amb forta presència d'aerogeneradors. Aquestes variacions de demanda i generació afecten directament el corrent i indirectament la tensió, i, en gran manera, les línies llargues a causa de la seva major impedància.

En aquest escenari de substitució de la generació convencional (combustible fòssil) per generadors de fonts renovables, perdem capacitat de control tant de la freqüència com de la tensió, degut a la volatilitat d'aquestes fonts d'energia renovable. La pèrdua sobtada de producció en aquests generadors produeix desequilibris que haurà de

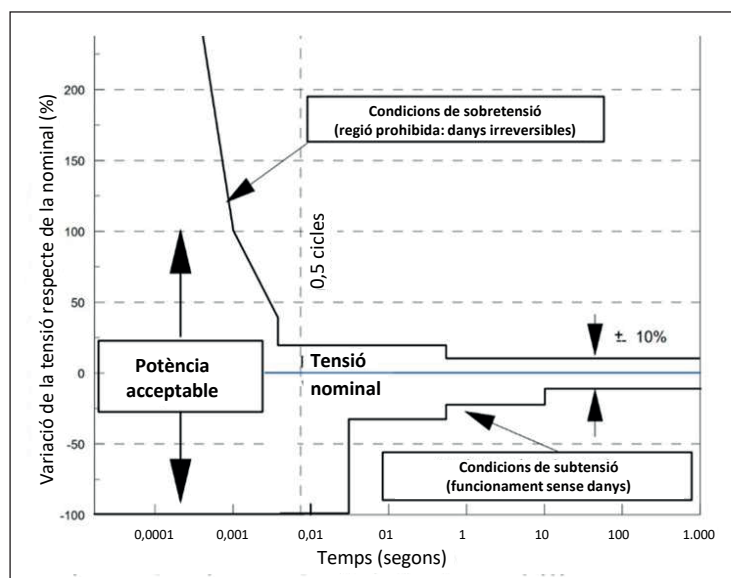


FIGURA 2. Corba ITIC (Information Technology Industry Council). Regions de funcionament dels equips electrònics segons les variacions de tensió a què es veuen sotmesos. FONT: Elaboració pròpia segons els criteris de l'ITIC.

compensar un altre generador, a la vegada que es disminueix la disponibilitat per efectuar noves accions de control.

La generació distribuïda (típicament de potència inferior a 10 kW) d'aquests generadors renovables habitualment instal·lats a la xarxa de mitjana i baixa tensió és beneficiosa, en tant que ajuda a reduir pèrdues de transport (producció més propera al consum) i aporten fiabilitat al sistema (la fallada en un d'aquests generadors petits no afecta el sistema). Com hem vist també, però, pot causar problemes de qualitat en el subministrament i provocar sobretensions i altres mal funcionaments (per exemple, harmònics degut a l'electrònica de potència dels inversors). En l'àmbit d'operació de la xarxa, els problemes apareixen quan, en punts en què està prevista una determinada demanda (consum), aquesta és substituïda per una injecció de potència (per exemple, excedents d'autoconsum o simplement una nova planta de generació) suficient per produir un flux de potència invers (cap al transformador) i, per tant, una elevació de tensió en aquell punt. La mateixa elevació, si és prou gran, pot provocar la desconexió de les mateixes fonts (valors anormalment elevats de la tensió poden produir el mal funcionament o fins i tot la destrucció dels equips connectats) i d'altres, per tal de protegir la instal·lació. Per tant, aquell excedent de generació de sobte desapareix (degut a l'activació de la protecció de sobretensió) i passa a ser un consum elevat amb el consegüent desequilibri del sistema i caiguda de tensió en la zona. Aquest flux de potència invers causat per la generació injectada a la xarxa, en una línia d'un transformador, també pot provocar altres fenòmens, com l'activació no desitjada d'algunes proteccions o l'envelliment prematur de fusibles si no s'ha tingut en compte aquest fenomen en el moment de la instal·lació.

Electrificació de la demanda energètica: impacte del vehicle elèctric i les bombes de calor

Tal com s'ha introduït, les agendes europees dels propers anys limiten progressivament les emissions de gasos d'efecte hivernacle i, per tant, cal la substitució gradual de combustibles fòssils derivats del petroli per altres de bai-

xes emissions o directament electrificant la demanda. Aquesta electrificació ja és evident en dos sectors: el transport per carretera i la climatització d'espais (edificis principalment del sector terciari i residencial). Estem assistint a la progressiva penetració del vehicle elèctric i la instal·lació de sistemes de calefacció i refrigeració per bomba de calor (aerotèrmia, geotèrmia), amb el consegüent increment de la demanda elèctrica, al qual podríem afegir també costos energètics de la digitalització massiva de tots els sectors (consum dels centres de dades). D'aquesta manera passem la responsabilitat de les emissions individuals (vehicle i climatització d'habitatges) a les fonts de generació elèctrica. A mode il·lustratiu, la figura 3 mostra les prediccions d'aquest augment de demanda elèctrica fetes per l'Agència Internacional de l'Energia (IEA) i l'increment per als països associats a l'ENTSO-E (associació d'empreses operadores del sistema de transport elèctric) per assolir l'escenari d'emissions zero el 2050. Aquest increment de la demanda elèctrica forçosament s'ha de cobrir amb generació renovable per tal que aquesta electrificació tingui l'efecte esperat de reducció d'emissions (escenari Net Zero).

Impacte del vehicle elèctric

L'electrificació de la mobilitat comporta l'ús intensiu dels carregadors connectats a la xarxa, cosa que crea pics de consum localitzats en el temps i l'espai, ja que la càrrega dels vehicles elèctrics es concentra en punts concrets de la geografia i en franges horàries determinades pels hàbits dels conductors. En la figura 4 es mostra un estudi sobre l'impacte del vehicle elèctric respecte al pic de demanda actual (en blau fosc) obtingut de dades de consum del període 2008-2022 en diverses ciutats sueques. En groc es mostra l'increment esperat de la demanda degut a l'electrificació de la mobilitat fent algunes suposicions (vegeu Letha i Bollen, 2021). Es pot veure que en pràcticament totes les ciutats aquest increment suposa més que doblar la demanda d'electricitat.

Aquest increment del consum no és uniforme durant el dia, sinó que dependrà dels hàbits de mobilitat de cada zona i de les potències de càrrega dels vehicles. Així, en

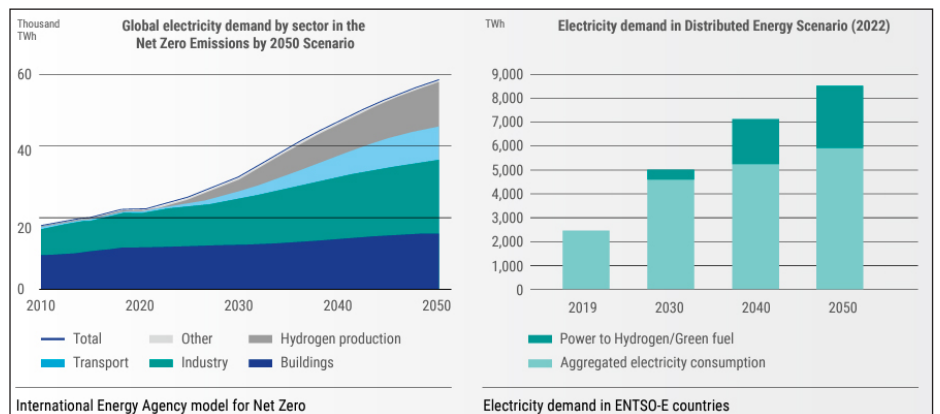


FIGURA 3. Evolució de la demanda elèctrica cap a un escenari lliure d'emissions segons la IEA i l'ENTSO-E. FONT: ENTSO-E (2022).

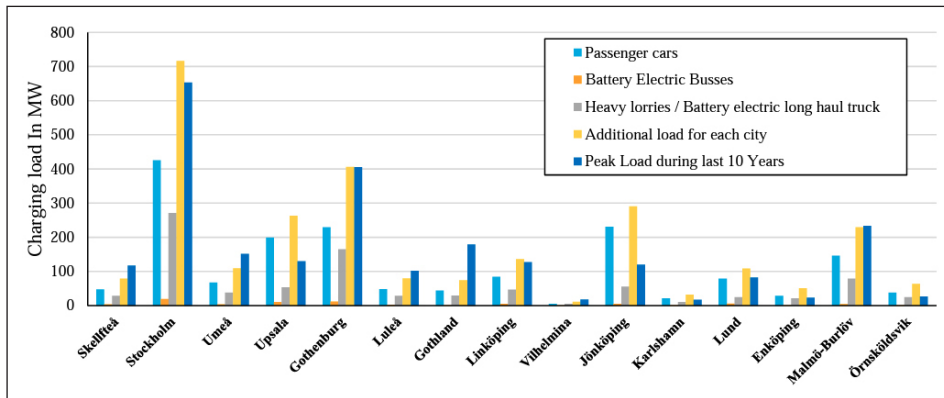


FIGURA 4. Increment de la demanda degut a la càrrega de vehicles elèctrics a Suècia.
FONT: Z. N. Ahmad i M. Bollen (2021).

una mateixa ciutat coincideixen diferents perfils d'usuari de vehicle elèctric amb necessitats de càrrega diverses, que totes juntes generen un perfil de demanda de càrrega amb importants variacions durant el dia. A mode d'exemple, la figura 5 mostra el perfil de càrrega diari dels punts de càrrega públic a la ciutat neerlandesa d'Arnhem, extret dels consums agregats dels carregadors públics d'aquesta ciutat (Cañigüeral i Meléndez, 2021). S'hi diferencien clarament dos pics, un al matí (que coincideix amb l'horari laboral majoritari) i l'altre al vespre (associat al retorn dels usuaris als domicilis i altres activitats de tarda i nit), que coincideix amb les hores en què els vehicles estan aturats. Al marge d'aquests dos grans grups, es poden diferenciar altres perfils de càrrega associats als hàbits dels usuaris. Aquestes diferències també es posen de manifest en l'àmbit espacial, tal com mostra la figura 6, en què es detalla la distribució d'aquests perfils en noranta districtes de la mateixa ciutat d'Arnhem (Cañigüeral i Meléndez, 2023). D'altra banda, les polítiques europees promouen aquesta electrificació, que suposarà un ràpid increment dels punts de càrrega en zones geogràfiques concretes i també de les potències demandades en aquestes zones, la qual cosa generarà per a aquestes àrees perfils de demanda molt concrets. Per exemple, la nova regulació europea preveu que a partir del 2025 s'instal·lin estacions de recàrrega ràpida (potències superiors o iguals a 150 kW) cada 60 km (37 mi-

lles) al llarg del sistema d'autopistes europeu conegut com a TEN-T. L'existència i el coneixement d'aquests perfils, que poden anar canviant, són importants de cara a afrontar estratègies de gestió automàtica de les infraestructures de càrrega intel·ligent (*smart charging*) o estratègies d'incentivació als usuaris (gestió activa de la demanda) per tal de modular la demanda i disminuir-ne els pics per evitar congestions de la xarxa o, simplement, per millorar l'aprofitament de la generació renovable solar durant el dia (més endavant, en aquest article, se'n descriu un exemple, figura 10). Aquesta participació del vehicle elèctric en una millor gestió de la xarxa elèctrica o de l'aprofitament dels recursos renovables s'espera que es vegi incrementada amb el concepte *vehicle connectat a la xarxa* (V2G, *vehicle-to-grid*). És a dir, l'aprofitament de la capacitat d'emmagatzematge elèctric (bateria) en els dos sentits, càrrega i descàrrega, mentre aquest està connectat. La ràpida velocitat de resposta de les bateries, juntament amb el potencial que suposarà tenir un parc molt gran de vehicles connectats, ofereix una capacitat de gestió energètica (o flexibilitat) molt gran, que pot servir per donar suport a l'operació de la xarxa (control de freqüència i tensió, penetració de renovables, més eficiència, reducció de pèrdues en el transport, etc.).

Altres efectes que la càrrega de vehicles elèctrics pot produir sobre el sistema elèctric estan associats a la qualitat del subministrament. Això inclou l'aparició de pam-

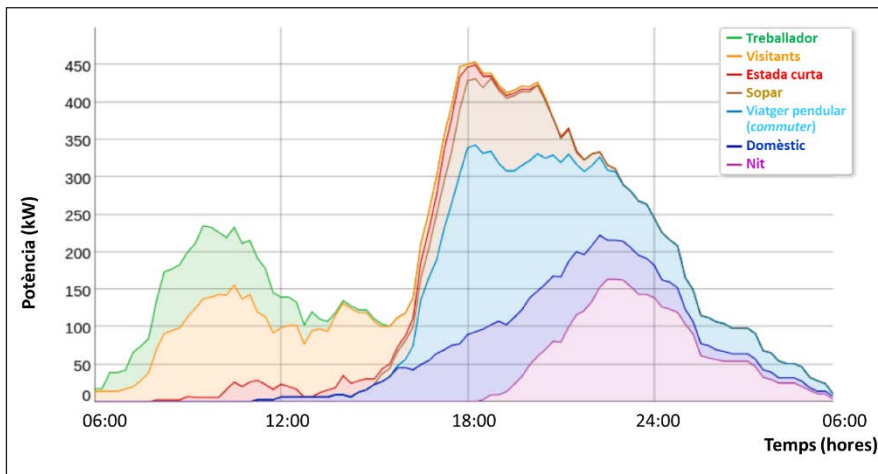


FIGURA 5. Demanda de potència de càrrega de vehicles elèctrics segons el perfil dels usuaris.
FONT: Adaptat de Cañigüeral i Meléndez (2021), sota llicència Creative Commons Attribution 4.0 International, <<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>>.

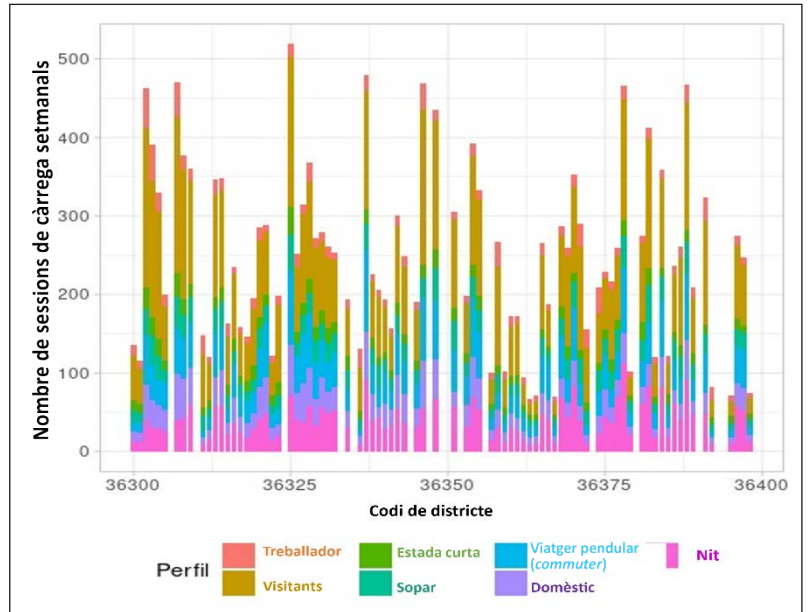


FIGURA 6. Distribució de sessions de càrrega setmanals per districte.
FONT: Cañiguer i Meléndez (2023).

pallugueig (*flicker*) degut a pics elevats de corrent durant la càrrega, la distorsió de la forma d'ona (presència d'harmònics, inter- i supraharmònics) a causa de l'alta freqüència a què treballen els convertidors, o les fallades dels sistemes de protecció (per la presència de tercer harmònic i supra-harmònics en els conductors de neutre i terra d'instal·lacions monofàsiques) (Letha i Bollen, 2021).

Impacte de les bombes de calor

A la Unió Europea aproximadament un terç de la demanda energètica de calefacció d'edificis del 2021 es va cobrir amb gas natural (la resta, a parts similars entre gasoil, electricitat, biocombustibles i sistemes de calefacció urbana i, no tant, carbó). Segons la IEA, la calefacció és responsable del 10% de les emissions globals de CO₂ i el 2050 un total de 2.600 milions de persones viuran en regions amb necessitats de calefacció i refrigeració (Monschauer *et al.*, 2022). La substitució de calderes per tecnologies de

baixes emissions és una necessitat. Les bombes de calor són, ara per ara, la millor alternativa, ja que són energèticament molt més eficients (fins a cinc vegades més). El seu principi de funcionament és el de moure la calor entre punts a diferent temperatura, amb el suport d'intercanviadors de calor i una màquina que de manera contínua implementa un cicle termodinàmic (evaporació, compressió, condensació i expansió) sobre un líquid refrigerant contingut en un circuit tancat. En l'evaporador i el condensador s'efectua l'intercanvi de calor amb els fluids als quals volem aportar o extreure calor, respectivament. Habitualment el destí de la calor o fred extreta de la font és un acumulador d'aigua, de manera que aquest permet un cert desacoblament entre la demanda de l'edifici i la producció de calor i fred. En la figura 7 es pot veure aquest desacoblament entre el consum d'una bomba de calor de geotèrmia i la temperatura de la sala, fins i tot a nivells de consigna elevats (pels voltants de 25 °), gràcies a l'existència d'un acumulador tèrmic en el sistema. A diferència d'altres sistemes, l'aportació d'energia no és com a

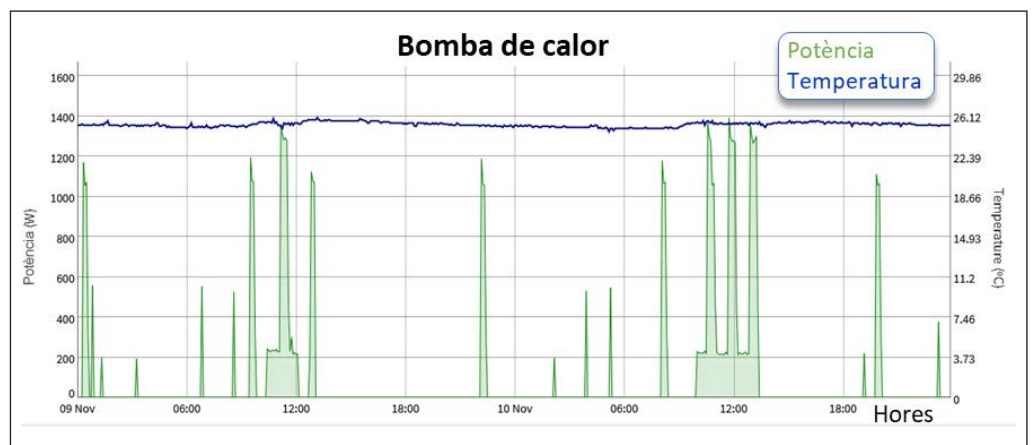


FIGURA 7. Consum elèctric d'una bomba de calor.
FONT: Elaboració pròpia.

combustible, sinó simplement com a electricitat per fer funcionar la màquina termodinàmica, el seu control i les bombes d'impulsió que faciliten l'intercanvi de calor en els bescanviadors. Així s'aconsegueixen altes eficiències energètiques. A més, aquests sistemes són reversibles, de manera que, invertint el cicle, la mateixa màquina pot extreure calor i, per tant, proporcionar fred. D'aquesta manera s'elimina la necessitat d'un segon equip de climatització (aire condicionat). Avui, la substitució de calderes de gas per bombes de calor és una necessitat energètica i una realitat en tota obra nova. L'ús de bombes de calor a la indústria per a processos de baixa temperatura (per sota de 150 °C) també és una alternativa de millora de l'eficiència i la reducció d'emissions. Es preveu que gairebé el 40% de la demanda de calefacció industrial el 2030 es pugui cobrir amb bombes de calor, i el seu ús també és adequat per a les xarxes de distribució de calor en barris o districtes, de manera que el seu ús forma part de les agendes de descarbonització de molts països europeus. Aquest desplegament accelerat de bombes de calor comportarà un augment del consum elèctric, que s'estima en un 24% global en el període 2021-2030, segons l'estudi de la IEA (Monschauer *et al.*, 2022).

Igual que passa amb el vehicle elèctric, la instal·lació massiva de bombes de calor comportarà una actualització de les infraestructures de connexió dels consumidors a la xarxa i, per tant, també de la xarxa de distribució. Així, una gestió adequada d'aquests sistemes de climatització s'espera que pugui aportar flexibilitat al sistema i, per tant, contribuir a modular la demanda. El fet que les bombes de calor portin associat un acumulador tèrmic, unit a les millors mesures d'aïllament de l'edificació i la seva inèrcia tèrmica, permet a aquesta tecnologia aportar flexibilitat (gestió del consum sense afectar el confort) i acostar el consumidor final a una participació activa en la gestió del sistema elèctric.

Xarxes elèctriques intel·ligents

La xarxa elèctrica actual fou dissenyada fa més de setanta anys per transportar l'energia elèctrica des dels grans centres de producció d'energia elèctrica (centrals hidroelèctriques, tèrmiques o nuclears) cap als consumidors, i des de llavors ha anat creixent amb aquesta mateixa lògica. Tenim, per tant, una xarxa de transport fortament mallada, per tal d'assegurar que el subministrament es pot garantir per diversos camins, i un elevat grau d'observabilitat i control sobre aquesta xarxa de transport per tal de garantir-ne el funcionament. I tenim una xarxa de distribució, d'exploració radial, que s'alimenta de la xarxa de transport i connecta els consumidors finals a l'energia elèctrica generada aigües amunt. S'ha comentat prèviament en aquest article la importància del control de freqüència, que implica l'increment o la disminució de generació, i s'executa a través de diferents mercats de balanç o de reserves, en els quals principalment participen els generadors controlables.

En aquest escenari, simplificat, no cal un gran control sobre les xarxes de distribució, ja que s'exploten de manera radial i es poden considerar com a càrregues agregades de la xarxa de transport. No obstant això, a mesura que es van incorporant elements de generació renovable a la xarxa de distribució, es fa necessari un major control d'aquesta mateixa xarxa. En la figura 8 es mostra la combinació de tecnologies de generació per al dia 2 de novembre de 2023 en el sistema elèctric peninsular espanyol, quan la demanda es va cobrir amb més del 70% d'energia renovable, majoritàriament eòlica.

La proliferació d'instal·lacions d'autoconsum, l'increment de generació distribuïda renovable i volàtil a la xarxa de baixa tensió, el desplegament d'estacions de recàrrega de vehicle elèctric i l'electrificació dels sistemes de calefacció i refrigeració afegeixen complexitat a l'operació de la xarxa de distribució. La generació distribuïda controlable aporta una sèrie de beneficis, com són robustesa (la fallada d'un generador no suposa un gran impacte i és fàcilment substituïble per un altre), reducció de pèrdues (consum proper a la generació), suport a l'estabilitat de la xarxa de transport (cooperació entre transport i distribució), retard de la necessitat d'ampliar infraestructures de transport, etc. Però també aporta nous reptes i complexitat a la xarxa de distribució, com són l'aparició de flux de potència invers (del consumidor, ara generador, cap als transformadors degut als excedents de generació), possibles congestions (pics de demanda, o generació, que portin les línies o transformadors al seu límit operatiu), l'afectació de la qualitat del subministrament (variacions de tensió fora dels límits de regulació, presència d'harmònics i energia reactiva, desequilibri de fases) o possibles pèrdues (a causa del desequilibri de fases, per la presència de majors pics de corrent o els harmònics) (Pepermans *et al.*, 2005). Cal incrementar l'observabilitat de la mitjana i baixa tensió i dotar de més intel·ligència els sistemes de gestió de la xarxa de distribució i construir un sistema avançat de gestió de la distribució (ADMS, de l'anglès *advanced distribution management system*) per tal de fer un ús eficient de la generació renovable i garantir la seguretat i la qualitat del subministrament. L'adaptació de la xarxa de distribució a aquests nous reptes mitjançant un ús intensiu de les tecnologies de la informació i les comunicacions és el que en diem *xarxa elèctrica intel·ligent*, una xarxa capaç de gestionar fluxos de potència bidireccionals de manera segura i eficient.

La digitalització que requereix la xarxa elèctrica intel·ligent va començar amb la instal·lació dels anomenats *comptadors intel·ligents* o *smart meters*, que aporten una major resolució temporal i espacial a l'observació de la xarxa. Tot i que aquest primer desplegament principalment satisfà les necessitats de facturació horària del consum, també aporta molta informació útil per a la gestió i planificació de la xarxa. Per exemple, els comptadors intel·ligents permeten una ràpida localització de fallades a la xarxa i la detecció de pèrdues no tècniques (fraud). No obstant això, encara no són un element útil per a l'operació de la xarxa en temps

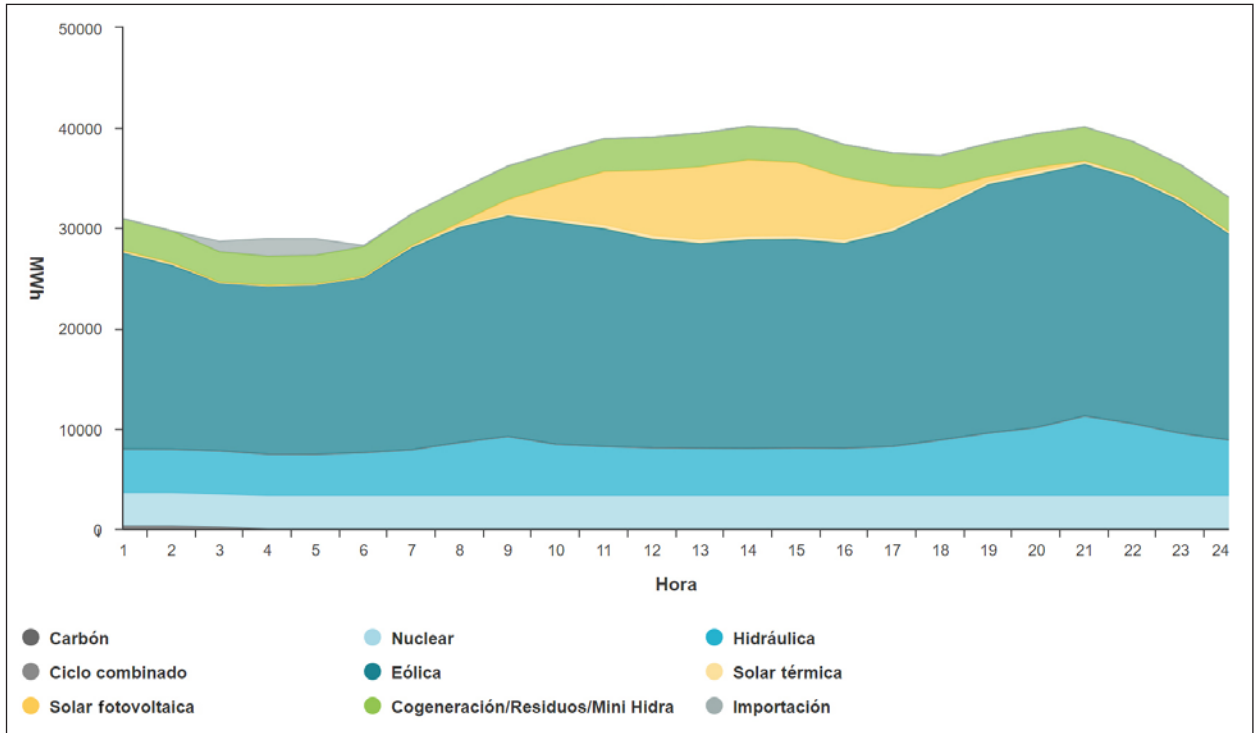


FIGURA 8. Generació del dia 2 de novembre de 2023 en el sistema elèctric peninsular segons tecnologies. Aquest dia es va assolir el màxim de generació renovable, amb un 73,3%.

FONT: OMIE, *Resultados del mercado* (en línia), <<https://www.omie.es/>> (consulta: 24 juliol 2024), (web interactiva).

real i no és habitual que la informació que proveeixin estigui integrada amb els sistemes de supervisió, control i adquisició de dades (SCADA) i ADMS usats en els centres de control de xarxa. En aquest sentit, actualment es tendeix a la digitalització dels transformadors de distribució dotant-los de més intel·ligència computacional, de manera que es pugui complementar l'actuació reactiva de les proteccions amb estratègies d'actuació coordinada amb els punts de generació i s'hi puguin afegir capacitats de detecció predictives (predicció de congestions o sobretensions) i d'actuació preventiva (reconfiguració i gestió de la demanda). L'ús d'elements d'electrònica de potència connectats a les línies permet més control sobre la qualitat del subministrament compensant harmònics, controlant la tensió mitjançant la injecció de reactiva o equilibrant les fases.

Tot i aquesta major observabilitat i control, continua el repte de gestionar eficientment la generació renovable i els pics de demanda degut a una major i ràpida electrificació. La participació activa dels consumidors (amb capacitat de generació) ofereix una bona alternativa, prevista en les directives europees, per afrontar aquesta transició i com a forma complementària al redisseny de la xarxa. La idea de gestionar la demanda de manera activa parteix de la premissa que la demanda és flexible. És a dir, el consumidor té capacitat per canviar (incrementar o disminuir) el seu consum (o generació) dins d'uns marges, i ho farà (automàticament o manualment) si té algun incentiu. Aquest incentiu, normalment econòmic, és el que servirà per mo-

tiuar la participació del consumidor i, finalment, acordar i quantificar els canvis a través de mecanismes de mercat.

Flexibilitat: el consumidor en la cadena de valor energètica

La recentment aprovada directiva EU 2023/1791, de 13 de setembre de 2023, estableix clarament que la flexibilitat de la demanda pot aportar amplis beneficis econòmics, ambientals i socials als consumidors i a la societat en general, incloses les comunitats locals, pot millorar l'eficiència dels sistemes energètics i reduir el cost de l'energia, per exemple disminuint el cost d'operació del sistema, de la qual cosa poden resultar, per tant, unes tarifes menors per a tots els consumidors. La gestió d'aquesta flexibilitat que tenen el consumidor i productor es coneix com a *gestió activa de la demanda* i hi ha dos grans enfocaments per fer-la possible:

— *Gestió implícita*: suposa que el consumidor reacciona a determinats senyals, com el preu de l'energia, i, com a resposta, modifica el seu consum. La suma agregada de la resposta de molts consumidors permet modular la corba de demanda per reduir-ne els pics, o desplaçar aquests consums a les hores vall, i fer el sistema més eficient. Tot i que els senyals de preu poden canviar de manera molt dinàmica (hora a hora, dia a dia), normalment aquest dinamisme no es veu reflectit en el comportament de l'usuari final de manera instantània i els canvis de comportament

solen tenir un impacte a mitjà termini i quan les variacions dels senyals de preu presenten una certa repetibilitat mantinguda. Una implementació simplificada d'aquesta estratègia són les tarifes que canvien segons les franges horàries (hores vall i hores punta, per exemple), però podríem pensar en estratègies de preus dinàmics i canvians d'acord amb els mercats (resolució horària).

— *Gestió explícita*: comporta més interacció, en l'àmbit de mercat i negociació, de manera que, per una banda, hi ha d'haver una demanda explícita de flexibilitat (petició de canvi a pujar o baixar en la demanda) i, per una altra, el consumidor, habitualment a través d'un *agregador* (agent amb capacitat d'agregar flexibilitat de múltiples consumidors i representar-los en un mercat), respon amb una oferta de flexibilitat que s'ajusta a la capacitat de variar el seu consum. La casació entre oferta i demanda es fa en un mercat de flexibilitat tenint en compte una estratègia de minimització de costos.

La figura 9 mostra diferents fonts de flexibilitat i les relaciona amb els diferents serveis que poden aportar a la xarxa. Aquests serveis es gestionen a través de diferents mercats, establerts segons les regulacions de cada país. Habitualment, l'energia que gestiona el consumidor és petita respecte al que requereix el sistema. Per tant, el canvi de comportament d'un usuari suposa un impacte mínim a la xarxa. Per aquest motiu, aquesta participació està previst que es gestioni a través d'un agregador de flexibilitat. L'agregador és un nou agent, encarregat de conèixer la flexibilitat de cada consumidor, i té la capacitat de gestionar múltiples càrregues (o generadors) de múltiples consumi-

dors i oferir la seva operació conjunta al mercat de flexibilitat. Per exemple, un gestor de punts de càrrega públics de vehicle elèctric podria actuar com a agregador, o podria ser representat per aquest, i aplicar una estratègia de càrrega intel·ligent, de manera que la càrrega coordinada del múltiples vehicles permeti modular la demanda que suposa aquesta càrrega (normalment retardant l'inici de la càrrega del vehicle connectat o variant la potència entregada) per tal de reduir els pics de càrrega per evitar congestions o maximitzar l'ús de generació renovable propera, cosa que pot resultar en una corba més aplanada i minimitzar l'impacte sobre els usuaris. La figura 10 il·lustra el resultat d'aquesta estratègia aplicat als punts de càrrega pública de la ciutat d'Arnhem, als Països Baixos (Cañigueral i Meléndez, 2021). Un cop aplicada l'estratègia de càrrega intel·ligent, podem veure que hi ha un major aprofitament solar i una reducció del pic total gràcies a un desplaçament de la càrrega de tan sols un 21 % de les sessions de càrrega (retard de la càrrega dintre els temps de connexió).

El concepte *gestió activa de la demanda* és molt ampli i l'estratègia concreta dependrà dels problemes que es vulguin resoldre. Serà molt diferent fer front a problemes de congestió estacional (excés de demanda en determinades èpoques i llocs, per exemple, degut al turisme), o un control de tensió continu a causa de la generació renovable, o el control de pics de demanda diaris. Algunes estratègies poden implicar un canvi en els hàbits de consum (llarg termini) i altres simplement requereixen l'automatització en l'operació de les càrregues flexibles (carregador, bateries, bombes de calor, termos elèctrics, etc.).

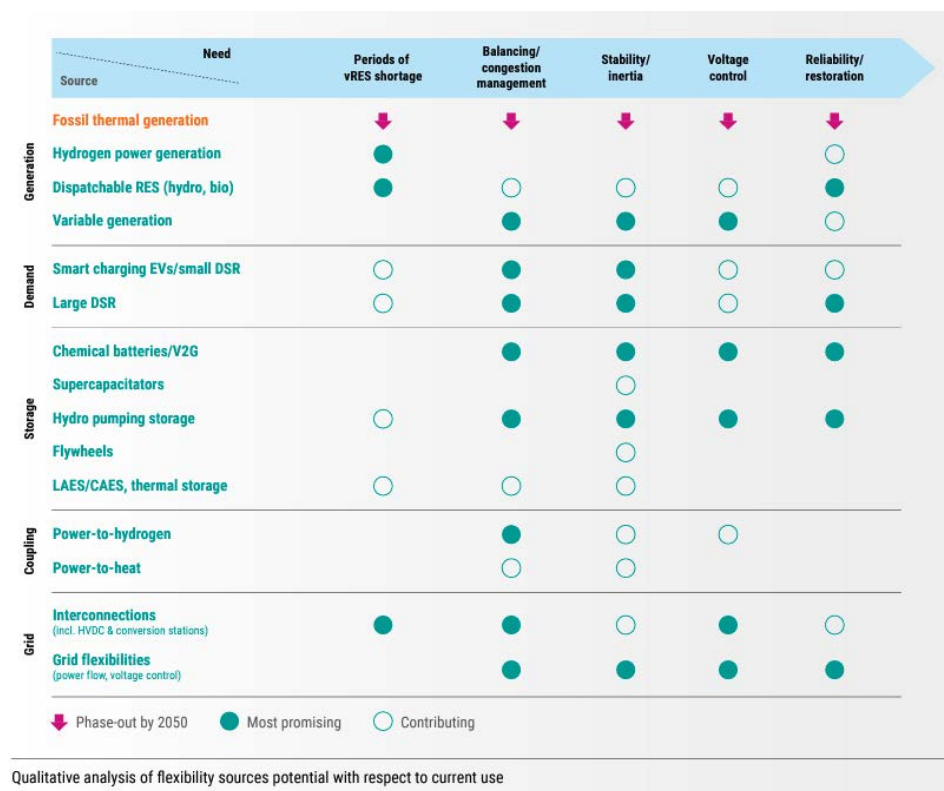


FIGURA 9. Fonts de flexibilitat i usos. FONT: ENTSO-E (2022).

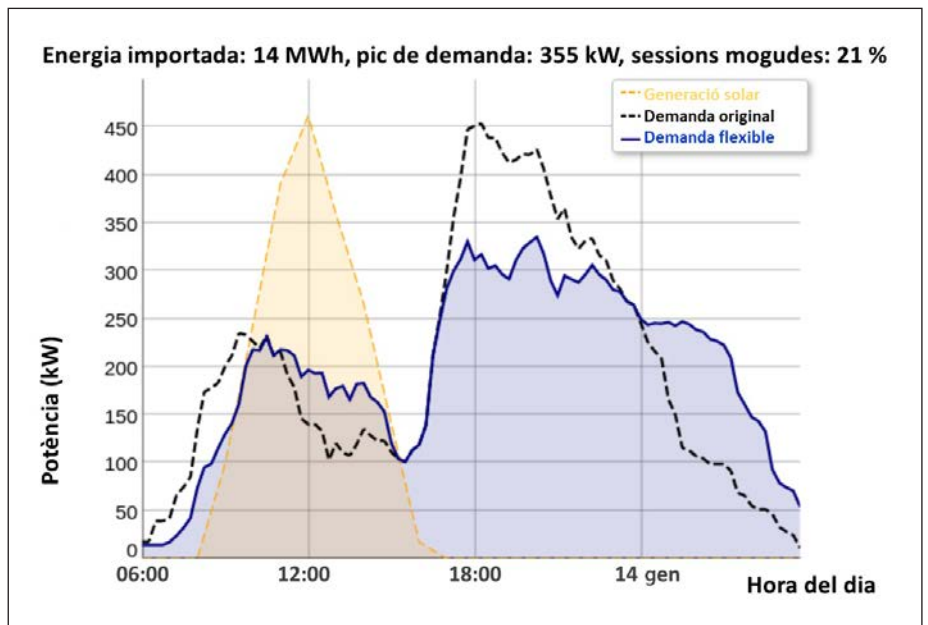


FIGURA 10. Gestió flexible de la càrrega de vehicles elèctrics: reducció de pics i aprofitament de generació solar. FONT: Adaptat de Cañigueral i Meléndez (2021), sota llicència Creative Commons Attribution 4.0 International, <<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>>.

De l'autoconsum compartit a comunitats energètiques flexibles

El pas següent en la participació activa de l'usuari en la cadena de valor del sistema elèctric implica una millor coordinació i organització d'aquests usuaris, que ara no solament són consumidors, sinó també productors. No només la participació a través dels anomenats *agregadors*, sinó una col·laboració més activa dels consumidors per fer front a iniciatives i projectes de més impacte en la sostenibilitat. Una de les fórmules que des de la Unió Europea es proposen són les comunitats energètiques: comunitats ciutadanes d'energia (CEC, de l'anglès *citizen energy communities*) i comunitats d'energies renovables (REC, de l'anglès *renewable energy communities*), definides a les directives EU 2019/944 i EU 2018/2001, respectivament. Aquestes comunitats són agrupacions legals de ciutadans que, sense perseguir un objectiu econòmic, tenen l'objectiu d'explorar accions col·lectives i proposades pels ciutadans per impulsar la transició energètica i contribuir a mitigar el canvi climàtic. Es preveu que les comunitats energètiques impactin en l'augment de la generació renovable distribuïda a través de l'autoconsum individual i col·lectiu, però que també interactuïn amb els mercats elèctrics com a proveïdors de flexibilitat gràcies a la seva capacitat per modular la demanda agregada. Un exemple del progrés i l'evolució d'aquestes iniciatives és el projecte RESCHOOL (2023-2026), finançat pel programa Horitzó Europa, en el qual es dona valor a diferents casos d'ús en què les comunitats energètiques poden aportar flexibilitat i beneficiar-se de la gestió d'aquesta flexibilitat.

La transposició de les dues directives mencionades anteriorment varia molt segons els països de la Unió Europea i, per tant, també el desplegament d'aquestes comunitats. Així, al nostre país estan proliferant instal·lacions d'autoconsum compartit, en què típicament la producció

elèctrica d'una planta fotovoltaica es reparteix entre els membres associats, seguint un criteri de coeficients participatius. Després, aquesta producció associada a cada individu es resta de la seva demanda. Al marge del tractament que es pugui fer dels excedents (venda, bateria virtual, etc.), aquestes iniciatives de moment no van més enllà, entre altres coses per limitacions en la regulació. No obstant això, cal esperar que les comunitats evolucionin cap a un model de gestió energètica més elaborat i que puguin interaccionar amb les xarxes de distribució per donar suport a la seva operació local (gestió de congestions i control de tensió) i també puguin oferir la gestió de la seva flexibilitat als mercats, ja sigui directament o a través dels agregadors.

Conclusions

En l'actual situació d'emergència climàtica, en què s'han de reduir les emissions de gasos d'efecte hivernacle, cal una actuació coordinada de les polítiques, el finançament i les tecnologies. En aquest article es repassen les implicacions d'aquestes polítiques en el context europeu i es posen de manifest els principals reptes tecnològics que suposa el seu desplegament. Una aposta decidida per un canvi de model energètic lliure d'emissions comporta una substitució de fonts d'origen fòssil per fonts renovables i l'electrificació de sectors econòmics tan importants energèticament com el transport i la climatització d'edificis. Aquest canvi de fonts energètiques i de les tecnologies de consum cap a l'electrificació posa pressió a la xarxa elèctrica, tant pel que fa al disseny i la planificació com a la manera d'operar-la. Cal una adaptació continuada de la xarxa actual i la definició de noves estratègies de control per convertir-la en una xarxa intel·ligent. La reducció progressiva de generadors alimentats per combustibles fòssils disminueix també la capacitat de control, i cal incloure la gestió de la flexibilitat

del consumidor (ara també productor) en l'equació que garanteix l'estabilitat de la xarxa. Són les anomenades *estratègies de gestió activa de la demanda*, per a les quals caldrà comptar amb la figura de l'agregador per tal fer una gestió coordinada de la demanda i exercir la representació d'aquests consumidors flexibles davant els mercats. Esperem que els consumidors agafin protagonisme i s'organitzin en comunitats energètiques, és a dir, entitats participatives que persegueixen un ús més eficient de l'energia i que són governades per objectius de sostenibilitat, les quals podran beneficiar-se de la gestió de la seva producció i de la flexibilitat dels seus consums agregats.

Agraïments

Aquest article reflecteix l'activitat de l'autor en el camp de les xarxes elèctriques intel·ligents i les comunitats energètiques. En concret, l'autor agraeix la col·laboració establerta amb els socis dels diferents projectes en què ha participat o que ha coordinat darrerament i el finançament rebut per les entitats respectives. Aquests projectes són els següents: FEVER (GA-864537, 2020-2023, EC, Horizon) sobre gestió de flexibilitat entorn les xarxes de distribució; RESCHOOL (GA-101096490, 2023-2026, Horizon-CL5-2022-D3-01) sobre comunitats energètiques i la seva participació en mercats de flexibilitat; OptiREC (TED2021-131365B-C42, 2022-2024, Ministeri de Ciència i Innovació i Universitats, Proyectos de Transición Ecológica y Transición Digital), sobre gestió de flexibilitat en l'àmbit dels consumidors, i els recentment concedits GERIO (PID2022-142221OB-I00, 2023-2025, Ministeri de Ciència, Innovació i Universitats, Proyectos de Generación de Conocimiento 2022), en què s'elaboraran models de flexibilitat dels consumidors i se n'optimitza l'operació, i el projecte CLIMA (2023 CLIMA 00090, 2024-2025, AGAUR), sobre els reptes tecnològics i socials per al desenvolupament de les comunitats energètiques.

Referències

- AHMAD, Z. N.; BOLLEN, M. (2021). «Risk of overloading and hosting capacity under charging load for Nordic cities». A: *CIREC 2021: The 26th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution* [en línia], p. 2467-2471. DOI: 10.1049/icp.2021.2013.
- CAÑIGUERAL, M.; MELÉNDEZ, J. (2021). «Flexibility management of electric vehicles based on user profiles: The Arnhem case study». *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* [en línia], núm. 133, 107195. <<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107195>>.
- (2023). «A prediction tool to evaluate EV charging demand based on socio-demographic indicators». A: *27th International Conference on Electricity Distribution (CIREC 2023)* [en línia], p. 2213-2217. <<https://doi.org/10.1049/icp.2023.1208>>.
- CAPROS, P.; KANNAVOU, M.; EVANGELOPOULOU, S.; PETROPOLOS, A.; SISKOS, P.; TASIOS, N.; ZAZIAS, G.; DeVITA, A. (2017). «The EU energy system towards 2050: The case of scenarios using the PRIMES model». *Innopaths* [en línia]. <<https://innopaths.eu/2017/08/10/the-eu-energy-system-towards-2050-the-case-of-scenarios-prepared-for-the-clean-energy-for-all-europeans-package-using-the-primex-model/>> [Consulta: 30 octubre 2023].
- COM/2019/640 = *Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee of the Regions: The European Green Deal* [en línia]. <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM:2019:640:FIN>> [Consulta: 30 octubre 2023].
- COMISSIÓ EUROPEA (2019). *Seamos climáticamente neutros en 2050* [en línia]. Luxemburg: Oficina de Publicacions de la Unió Europea. <<https://op.europa.eu/o/opportal-service/download-handler?identifier=92fd5bc-76bc-11e9-9f05-01aa75ed71a1&format=pdf&language=es&productionSystem=cellar&part=>>>.
- ENTSO-E (2022) = EUROPEAN NETWORK OF TRANSMISSION SYSTEM OPERATORS FOR ELECTRICITY. *A power system for a carbon neutral Europe* [en línia]. <https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/tyndp-documents/entso-e_Vision_2050_report_221006.pdf> [Consulta: 30 octubre 2023].
- EU 2018/2001 = *Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources* [en línia]. <<https://data.europa.eu/eli/dir/2018/2001/2022-06-07>> [Consulta: 30 octubre 2023].
- EU 2019/944 = *Directive (EU) 2019/944 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on common rules for the internal market for electricity and amending Directive 2012/27/EU* [en línia]. <<http://data.europa.eu/eli/dir/2019/944/oj>> [Consulta: 30 octubre 2023].
- EU 2021/1119 = *Regulation (EU) 2021/1119 of the European Parliament and of the Council of 30 June 2021 establishing the framework for achieving climate neutrality and amending regulations (EC) No 401/2009 and (EU) 2018/1999 («European Climate Law»)* [en línia]. <<http://data.europa.eu/eli/reg/2021/1119/oj>> [Consulta: 30 octubre 2023].
- EU 2023/1791 = *Directive (EU) 2023/1791 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 on energy efficiency and amending regulation (EU) 2023/955* [en línia]. <<http://data.europa.eu/eli/dir/2023/1791/oj>> [Consulta: 30 octubre 2023].
- FIT FOR 55 = EUROPEAN COUNCIL. COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION (2023). «Fit for 55» [en línia]. <<https://www.consilium.europa.eu/en/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/>> [Consulta: 30 octubre 2023].
- HANCHER, L.; WINTERS, B. M. (2017). *The EU Winter Package: Briefing paper February 2017* [en línia]. S. II.: Allen & Overy. <<https://fsr.eui.eu/wp-content/uploads/The-EU-Winter-Package.pdf>> [Consulta: 30 octubre 2023].
- LETHA, S. S.; BOLLEN, M. (2021). *Impact of electric vehicle charging on the power grid* [en línia]. Luleå: Luleå University of Techno-

- logy. <<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1530550/FULLTEXT02>> [Consulta: 30 octubre 2023].
- MONSCHAUER, Y. [et al.] (2022). *The future of heat pumps* [en línia]. International Energy Agency. <<https://iea.blob.core.windows.net/assets/4713780d-c0ae-4686-8c9b-29e782452695/TheFutureofHeatPumps.pdf>> [Consulta: 30 octubre 2023].
- OPERADOR DE MERCADO IBÉRICO ESPAÑA (OMIE). *Resultados del mercado* [en línia]. <<https://www.omie.es/>> [Consulta: 24 juliol 2024]. [Web interactiva]
- PEPERMANS, G.; DRIESEN, J.; HAESLONCKX, D.; BELMANS, R.; D'HAESELEER, W. (2005). «Distributed generation: Definition, benefits and issues». *Energy Policy* [en línia], vol. 33, núm. 6, p. 787-798. <<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2003.10.004>>.
- PERNINGE, M.; ERIKSSON, R. (2018). «Market based frequency control in power systems: The multi-period problem». *IFAC Papers Online* [en línia], vol. 51, núm. 28, p. 468-473. <<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.11.747>>.
- RESCHOOL [en línia]. <<https://www.reschool-project.eu/>>.
- RSP 2019/2930 = *European Parliament resolution of 28 November 2019 on the climate and environment emergency (2019/2930(RSP))* [en línia]. <[https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:52019IP0078\(01\)](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:52019IP0078(01))> [Consulta: 30 octubre 2023].
- THALLAM, R. S.; HEYDT, G. T. (2000). «Power acceptability and voltage sag indices in the three phase sense». A: *2000 Power Engineering Society Summer Meeting (Cat. No.00CH37134)*. Vol. 2, p. 905-910. <<https://doi.org/10.1109/PESS.2000.867482>>.