

Treball de Fi de Grau

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

Estudi del potencial i els reptes de la resposta a la demanda elèctrica en edificis

MEMÒRIA

Autor: Mestre Millón, Daniel
Director: Canals Casals, Lluç
Convocatòria: Gener 2020



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

L'oferta energètica actual es genera en gran part per mitjans no renovables. L'energia produïda de manera renovable és més difícil d'aprofitar i depèn de factors externs no controlables com el sol o el vent.

Per poder aprofitar millor aquest tipus d'energia caldria que la demanda intentés adequar el seu consum a la generació per part de les renovables o no congestionar tant la xarxa elèctrica en hores on la demanda és tan gran que l'oferta ha de consumir més recursos no renovables per poder abastir als consumidors. Aquesta flexibilitat en el consum i resposta a la demanda global s'estudia a SABINA, on amb una sèrie de simulacions d'edificis amb característiques energètiques diferents es tracta d'analitzar si aquest comportament millora el comportament actual que no varia el seu consum energètic depenent del mercat.

A SABINA es persegueix un objectiu mediambiental ja que tracta de disminuir l'impacte ambiental negatiu del consumidor i de la xarxa, però hi ha altres objectius que es poden plantejar per fer de la flexibilitat i la resposta a la demanda un model de negoci.

Els resultats de SABINA confirmen que el seu model aconsegueix l'objectiu ambiental tot i que necessita de major precisió i robustesa i hi ha certa recompensa econòmica en la seva pràctica malgrat no és un objectiu principal.

D'altra banda encara hi ha grans barreres legislatives i conceptuals en el sector energètic per a que es puguin desenvolupar models de negoci basats en la resposta a la demanda i la flexibilitat, però poc a poc s'està treballant en un entorn més favorable en aquest sentit.

Índex

RESUM	3
ÍNDEX	5
ÍNDEX DE FIGURES	6
1. ORIGEN DEL PROJECTE I MOTIVACIÓ	8
2. INTRODUCCIÓ	9
2.1. Introducció a SABINA.....	14
2.2. Objectius del projecte.....	15
2.3. Abast del projecte.....	15
3. METODOLOGIA	16
3.1. Metodologia de SABINA.....	19
4. RESULTATS	24
4.1. Balanços energètics.....	24
4.2. Resposta a la Demanda.....	27
4.3. Discussió dels resultats.....	33
5. MARC LEGISLATIU ACTUAL	36
6. PRESSUPOST I IMPACTE AMBIENTAL	38
6.1. Pressupost.....	38
6.2. Impacte ambiental.....	39
7. CONCLUSIONS	40
8. BIBLIOGRAFIA	41
8.1. Referències bibliogràfiques.....	41

Índex de Figures

Figura 1: Regulació de la DR i els agregadors a Europa [13]	12
Figura 2: Possibilitats de flexibilitat presentades a l'estudi d'Henríquez et al.	17
Figura 3: Esquema de l'estudi per Iria et al.	18
Figura 4: Imatge de l'edifici simulat a SMARTLAB i SEILAB	19
Figura 5: Esquema de les configuracions de SABINA (esquerra) i REFERENCIA (dreta) ...	20
Figura 6: Condicions meteorològiques durant el test	21
Figura 7: Efecte rebot.....	23
Figura 8: Sankey pel cas REFERENCIA de l'escenari 3 a SEILAB	24
Figura 9: Balanç elèctric en l'escenari 3 a SEILAB.....	25
Figura 10: Activacions per dies a SMARTLAB a l'escenari 1	29
Figura 11: Activacions per dies a SMARTLAB a l'escenari 2.....	29
Figura 12: Exemple de Mapa de Flexibilitat de 2 dies a SMARTLAB pels 3 escenaris	30
Figura 13: Resultat econòmics de les activacions de flexibilitat.....	32

1. Origen del projecte i motivació

El mercat energètic a la Unió Europea té la capacitat d'abastir als consumidors en tot moment de la quantitat d'energia que necessitin, tant per producció pròpia com per la importació de recursos [1]. Actualment, aquest servei és dut a terme per plantes de generació energètica de fonts no renovables [2], és a dir, la oferta s'adequa a la demanda: si en un moment concret del dia la demanda puja per sobre de les previsions per aquell instant, els productors són capaços d'augmentar la seva producció i tornar a situar l'oferta al nivell de la demanda.

Es innegable que les plantes generadores d'energia no renovable són molt contaminants i l'efecte hivernacle que provoca l'emissió de CO₂ degut a aquests mètodes és altament perjudicial pel medi ambient. És per aquest motiu que les energies renovables cada vegada juguen un paper més important en la generació d'energia elèctrica [3]. Però aquest tipus de generació depèn de recursos no controlables i altament estocàstic com són per exemple el sol i el vent.

En el cas que la producció d'energia renovable augmentés fins al punt de ser el mètode principal d'obtenció d'energia, la capacitat de variar aquesta producció per tal de satisfer la demanda es veuria altament reduïda [4]. Aquí és on apareix el Projecte SABINA, que tracta de trobar una solució a aquest fet mitjançant la capacitat per canviar el perfil de consum en base a les necessitats de la xarxa. Aquest concepte és conegut com a flexibilitat energètica. La flexibilitat permetria evitar els pics de demanda i reduir les emissions de gasos contaminants, ja que no caldria reforçar la xarxa augmentant la producció, i també afectaria positivament a la despesa en energia, maximitzant l'autoconsum i evitant la compra d'energia en les franges horàries on és més cara [5].

2. Introducció

El canvi climàtic és un fet que cada vegada més esdevé una prioritat [6]. Actualment, la societat es troba en una situació d'alarma respecte aquest tema, com es pot veure en les múltiples concentracions i mobilitzacions que es desenvolupen arreu del món, així com les mesures en tots els sectors que els governs i institucions mundials tracten d'establir per tal de reduir l'impacte negatiu que la humanitat està produint al planeta. Aquest canvi climàtic és degut a diferents aspectes, però un dels que té un paper clau és l'augment de l'efecte hivernacle. Les temperatures estan incrementant cada vegada més degut a unes concentracions de CO₂ en l'atmosfera majors.

El sector energètic és un dels més contaminants de l'economia [7]. La utilització de combustibles fòssils i les grans emissions de CO₂ constitueixen un problema en termes ambientals. A més, és un sector de gran importància. A Espanya, l'energia elèctrica és la segona font d'energia més utilitzada per darrere del petroli i els seus derivats (degut al pes que tenen en el transport). Per tant, al ser un sector tan contaminant i alhora tan important, fa que sigui un àmbit clau en el que s'han de plantejar alternatives.

D'altra banda, el sector elèctric és el més susceptible d'utilitzar les energies renovables i per tant un dels sectors que més possibilitats té en la reducció de les emissions que genera sense comprometre el seu creixement. Per aquest motiu, els últims anys s'ha experimentat un augment en la producció mitjançant energies renovables, malgrat encara no són la via principal d'obtenció d'energia elèctrica [7].

L'increment en l'ús d'energies renovables, així com el desenvolupament i introducció de noves tecnologies en el funcionament dels edificis, obren noves vies tant en la generació com el consum d'energia. Un dels grans reptes que planteja l'obtenció d'energia mitjançant les renovables és resoldre els desajustos que es donen entre quan es genera aquesta energia i quan es necessita [8]. En definitiva, l'energia generada gràcies a les plantes eòliques o les solars depèn de factors externs i incontrolables com són el vent i el sol, de manera irregular en el temps, i el consumidor final necessitarà aquesta energia en diferents moments del dia on, potser, aquesta energia no està sent generada. Per exemple, un pic de demanda a les 22h no podrà ser abastit per la generació d'energia solar en aquell mateix moment, ja que és de nit. També sorgeix a l'inrevés, es produeix una quantitat d'energia en alguns moments del dia en els que la demanda està molt per sota de la oferta, i aleshores s'aprofiten molt menys els recursos renovables.

Actualment és relativament senzill resoldre aquest problema: s'incrementa la generació

mitjançant recursos no renovables fins a equilibrar la oferta i la demanda en moments de pics de demanda i així s'abasteixen totes les necessitats dels consumidors, això sí, a un preu més elevat. També pot succeir a l'inrevés, es disminueix la generació perquè la demanda és inferior a la que s'havia estimat en el moment de preparar l'oferta [9].

L'objectiu és reduir la utilització de fonts no renovables en favor de les que sí que ho són sense que això provoqui un desajust en el sistema energètic. Per aconseguir-ho, s'ha de recórrer a un mètode que permeti equilibrar aquest desajust entre oferta i demanda. Aquí és on pot ser d'utilitat la flexibilitat de la demanda.

El fenomen de flexibilitat fa referència a la capacitat que té la demanda (el consumidor) a canviar el seu patró de consum d'energia com a resposta a canvis que es donen en el seu entorn energètic [10]. Per exemple, pot ser flexible davant canvis en el preu de l'energia. També ho pot ser perquè la seva vivenda té incorporat un mètode d'obtenció d'energia renovable, com per exemple plaques solars, i vol maximitzar el seu autoconsum i dependre el mínim possible de la xarxa comercial. També pot interactuar amb la xarxa de tal manera que pugui canviar el seu rol de consumidor i passi ser productor i consumidor alhora, rebent el nom de prosumidor o prosumer, o reduir el seu consum de manera deliberada perquè el productor li demana i d'aquesta manera els pics de consum es veuen reduïts. D'això se'n diu resposta de la demanda (DR).

En l'àmbit residencial, un únic prosumer té molt poca incidència en el mercat global ja que la proporció d'energia que gestiona és ínfima en relació al conjunt de la societat. Com que té un pes molt petit a nivell individual, haurà de formar un col·lectiu de prosumers amb intenció de cedir energia a la xarxa. Les entitats encarregades d'unir a diferents agents que volen participar en el mercat fent aquest canvi de rol s'anomenen agregadors de demanda (DA), que com el seu nom indica agreguen diversos prosumers i, ara sí, formen un col·lectiu que gestiona molta més energia en el seu conjunt i sí que té una influència representativa en el mercat [11].

La participació d'aquests petits prosumers en el mercats auxiliars ha de ser coordinada. Per això els agregadors han d'escollir quin és l'entorn que més els convé depenent de les particularitats dels seus consumidors i del marc legislatiu del seu país. En aquest sentit, hi ha dues maneres d'entendre com coordinar-los [12]:

- Orientada al sistema o centralitzada: Es tracta d'entendre la flexibilitat com un recurs que l'agregador posa a disposició de l'operador del sistema (oferta), i pot comptar amb ella si ho necessita en un moment donat.
- Orientada al prosumer o descentralitzada: Es tracta de maximitzar el benefici dels consumidors oferint serveis que el DA pot utilitzar i revendre a la xarxa elèctrica.

Altres tipus de consumidors d'energia com és una gran indústria no necessitarien agregar-se per tal de poder participar en el mercat energètic, o en el cas de fer-ho, seria formant un grup reduït de plantes industrials d'un volum energètic considerable, ja que els seus nivells de consum energètic són tan elevats que sí que són representatius. D'altra banda, segurament no siguin agents tan interessats en aquest mercat, ja que el gruix de la seva facturació i els seus beneficis venen donats per la seva producció i venda de productes, i haver de modificar la seva manera d'actuar per tal de respondre a la demanda pot ser contraproductiu en la seva activitat habitual.

Segons Barbero et al. [12] La Xarxa Europea de Gestors de Xarxes de Transport i Electricitat distingeix tres grups de mecanismes d'ajust, que per ordre d'activació són: FCR (reserva primària), FRR (reserva secundària) i RR (reserva terciària). Els requisits tècnics per participar en aquests mercats varien depenent de cada país, però hi ha alguns aspectes que són comuns. Aquests requisits han d'actualitzar-se per permetre la participació de la DR, ja que han estat pensats històricament focalitzats en les plantes de generació. Els requisits tècnics més importants a tenir en compte són:

- Volum mínim de la oferta: indica els MW mínims necessaris per participar en el mercat. Com menor sigui aquest paràmetre, menys consumidors necessitarà el DA.
- Nombre màxim d'activacions: Indica quantes vegades pot activar, un recurs, la seva flexibilitat en un període de temps.
- Temps d'avís: És el temps màxim de reacció que una unitat pot tenir per activar la seva flexibilitat. Si és massa curt, poden haver problemes de comunicació entre el DA i el consumidor i de reacció per part dels consumidors .
- Durada del servei: com més curta sigui la durada màxima del servei, més consumidors podran participar del mercat ja que molts consumidors poden activar la seva flexibilitat en períodes curts de temps (1-2 hores).
- Resolució del producte: És el temps mínim durant el qual una unitat ha d'oferir la flexibilitat. Si és molt gran, per exemple un dia, limita la participació per part de la demanda, ja que moltes unitats poden oferir la seva flexibilitat únicament durant unes hores del dia.
- Període de contractació: Indica cada quant de temps s'obre el mercat. Si no s'obre diàriament és complicat fer previsions sobre la demanda dels consumidors, desaprofitant tots els recursos de flexibilitat disponibles i dificultant les opcions del DA.

Malgrat els requisits tècnics varien depenent del país, generalment per participar en serveis

FCR es requereixen recursos molt ràpids i capaços de variar el seu consum de manera continuada. Al contrari, els serveis RR tenen una activació més lenta i requereixen unitats que mantinguin la seva flexibilitat durant un període més llarg de temps.

La Directiva Europea d'Eficiència Energètica (2012/27 / UE) es pren per a molts països com a base per al desenvolupament de la resposta a la demanda i la DA a tota Europa. Tot i això, cada país els va definir d'una manera determinada, i n'hi ha alguns (com Espanya o Itàlia) que ni tan sols els consideren (Figura 1). A més, no en tots els països on la legislació permet la participació dels DA en els serveis d'ajust s'han desenvolupat models de negoci per a DR. El motiu es que molts mercats estan oberts "de facto" a DR, malgrat encara hi hagi barreres legislatives i econòmiques tan grans que no permeten crear un model de negoci vàlid. Per aquest motiu és important que els països del sud d'Europa obrin els seus mercats a la DR tenint com a referència les bones i males pràctiques de la resta de països, i així poder introduir-se en el mercat de manera més eficient i satisfactòria.

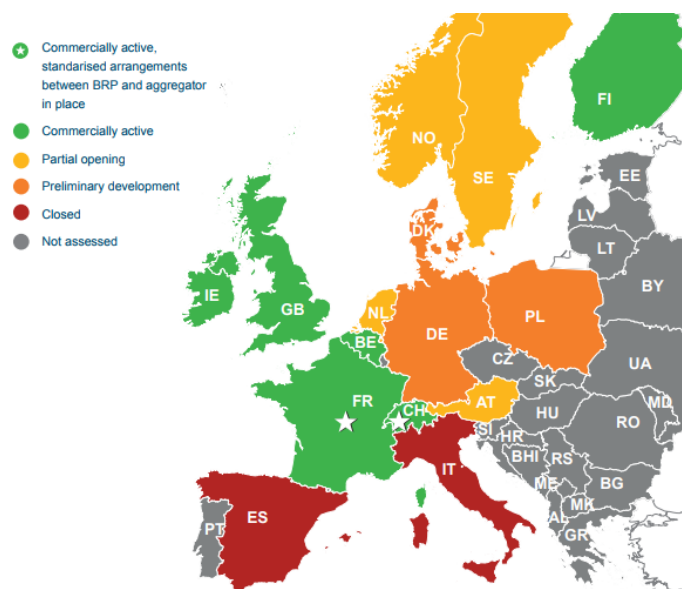


Figura 1: Regulació de la DR i els agregadors a Europa [13]

Amb tots aquests mecanismes de comportament intel·ligent queden solucionats els problemes de desajustos energètics esmentats anteriorment: els desajustos positius d'energia (oferta > demanda) són una gran oportunitat pels prosumers per augmentar la seva demanda a un preu més barat o fins i tot cobrant, i els desajustos negatius (oferta < demanda) poden ser contrarestats o bé utilitzant aquella energia comprada anteriorment durant el desajust positiu, o bé responenent a la demanda disminuint el consum particular i aconseguint beneficis d'aquesta acció, per exemple. A més, tota resposta a la demanda també genera uns beneficis pel prosumer, independentment del sentit d'aquesta resposta.

Aquest comportament intel·ligent no és possible sense uns mètodes tecnològics que regulin el comportament de l'edifici. Aquests mètodes poden anar des d'un regulador tèrmic que s'encarregui de mantenir una temperatura interior entre uns màxims i mínims de la manera més eficient possible, fins a sistemes més sofisticats on entrin en joc electrodomèstics intel·ligents que detectin quan actuar, reguladors que permetin interactuar amb la xarxa per injectar energia (canvi de rol)...

Pot haver-hi moltes maneres d'interactuar entre el prosumer i la xarxa depenent de quanta informació és compartida entre l'un i l'altre. Des d'un coneixement total per part de la xarxa de quin és l'estat de cada element que forma el l'equipament que té despesa elèctrica del prosumer (sistema d'escalfament de l'habitatge, electrodomèstics, enllumenat...) fins a només un intercanvi d'informació on el prosumer trasllada quin és el seu estat energètic i com pot ajudar a la xarxa en un moment donat.

El fet que la xarxa tingui un perfecte coneixement de la funció de costs de l'algorisme de l'edifici, pot fer que simuli la resposta dels edificis als incentius. Això pot ser utilitzat per preparar l'oferta el dia següent al mercat d'electricitat. Amb això, la DA redueix enormement la incertesa en quant a la quantitat de flexibilitat en relació amb un incentiu. Aleshores, durant el dia, si finalment la xarxa elèctrica requereix algun ajustament energètic, el DA activaria la flexibilitat de l'edifici enviant l'incentiu econòmic prèviament calculat. Aquest mètode va ser utilitzat al projecte europeu IDE4L [14].

D'altra banda, si el DA no coneix els costos de flexibilitat, això dificulta la determinació del senyal d'activació adequat i el DA tampoc sap com calcula el Building Algorithm (BA) la seva flexibilitat. El fet de no conèixer la configuració, la programació o les capacitats interiors d'una BA vol dir que és bastant realista [15]. En el futur, s'instal·laran moltes BA diferents en edificis de diferents proveïdors i cadascun comportarà de manera diferent. En conseqüència, serà difícil poder transferir moltes dades o saber-ho tot. Es podria dir que com més coneixement té la xarxa del prosumer, menys poder d'actuació té aquest últim per obtenir el màxim benefici.

El projecte tracta d'estudiar diferents escenaris amb característiques més o menys complexes, i analitzar si aquest comportament intel·ligent és també eficient. Es simulen diferents tipus d'edifici amb graus de complexitat tecnològica diferents amb l'objectiu de maximitzar l'autoconsum, i es compara amb el comportament energètic i el cost econòmic amb un habitatge convencional.

2.1. Introducció a SABINA

SABINA és un projecte de recerca i innovació H2020 finançat per la UE que té com a objectiu desenvolupar nous models tecnològics i financers per connectar, controlar i gestionar activament els actius de generació i emmagatzematge per explotar sinergies entre la flexibilitat elèctrica i la inèrcia tèrmica dels edificis.

SABINA la formen un consorci d'institucions europees que treballen conjuntament per portar a terme aquests objectius dedicant-se cadascuna d'elles a un espai més reduït dintre d'aquest gran projecte. La institució que s'encarrega de la tasca de simulació de diferents estats energètics en un edifici per tal de poder analitzar el seu comportament és l'IREC.

L'IREC proporciona dos laboratoris dins del projecte de simulació i assaig de laboratori: el Semi-Virtual Laboratory for Integration Energy (SEILAB) i el SmartEnergy Lab. Els dos laboratoris IREC estan equipats amb una tecnologia que inclou sistemes de generació i emmagatzematge. Seilab disposa de sistemes de generació i emmagatzematge de calor i l'Smartlab, d'energia elèctrica, i instal·lacions d'última generació per a la prova d'equips elèctrics i tèrmics. Aquests dos laboratoris estan connectats per al projecte SABINA per tal de provar diferents perfils de prosumer, eines agregadores i comunicacions.

Aquests laboratoris simulen el funcionament d'un habitatge de 4 plantes. Cada 3 minuts s'emmagatzema informació sobre l'estat tèrmic de l'edifici mitjançant unes mesures reals. Aquesta informació és enviada a un altre laboratori anomenat CSEM (a Suïssa), que mitjançant un Model Predictive Controller (MPC) que funciona com a Building Algorithm (BA) envia uns setpoints a l'habitatge per tal que actuï d'aquesta manera. Els setpoints s'envien cada 15 minuts i tracten de fer actuar l'edifici maximitzant el seu autoconsum.

2.2. Objectius del projecte

Els objectius que s'han d'assolir per tal d'aconseguir satisfer les necessitats del projecte són:

- Analitzar si els escenaris plantejats mitjançant la simulació són eficients i efectius i, en aquest cas, estudiar quin d'aquests escenaris és el més avantatjós.
- Analitzar la possible implantació del sistema a la realitat
- Estudiar les possibilitats legislatives al respecte i la possible integració del cas en aquest àmbit

2.3. Abast del projecte

Amb la finalitat de limitar l'abast del projecte i poder avaluar i analitzar de forma rigorosa i efectiva els resultats obtinguts, es tracta de dedicar aquest Treball a l'anàlisi i plantejament d'opcions beneficioses i reals pel futur en el marc de SABINA. Els diferents sistemes simulats a l'IREC són capaços de proporcionar una gran quantitat de dades i informació estudiant situacions diferents. Aquesta informació és en la qual es basa el projecte.

Malgrat també s'han realitzat i es realitzen diferents projectes amb una temàtica similar a Europa, no es tindran en compte els resultats d'aquests altres estudis. Les dades mesurades a SABINA seran les úniques utilitzades.

3. Metodologia

La gestió de la flexibilitat pot estar orientada al sistema (centralitzada) o al prosumidor (descentralitzada). En el cas de SABINA, i després d'analitzar les diferents possibilitats, s'escull una gestió de la flexibilitat centralitzada. En el cas centralitzat, es poden donar diferents enfocaments.

Segons el projecte EMPOWER [16], es consideren dos tipus de control de càrregues o generació per tal de proporcionar flexibilitat en un sistema centralitzat:

- Mitjançant la reducció de la càrrega/generació durant un període de temps determinat. Aquesta energia es considera “perduda” o desaprofitada. Per exemple, una reducció d'energia d'un generador solar no es podrà recuperar en el futur.
- Mitjançant un canvi en el moment en el que es consumeix/genera l'energia. Per exemple, si es decideix aturar la calefacció d'un edifici durant el període de temps en el que actua la flexibilitat, després es torna a activar per recuperar el rang de temperatures preestablert.

Al projecte EMPOWER s'utilitza un senyal de semàfor per activar la DR. Quan el senyal és de color taronja o vermell, és a dir, a prop o a fora de la previsió de consum per aquell moment, el DA (anomenat SESP en aquest estudi) pren el control del BA i té al seu abast tots els elements del prosumer per conèixer els costos de flexibilitat depenent del sistema que s'utilitza per aconseguir-la. En aquest cas la flexibilitat es pot obtenir a partir de sistemes de generació, emmagatzematge i càrrega.

El SESP té en compte diversos factors per minimitzar els costos de flexibilitat, com són el cost de reduir la generació o desactivar-la totalment (en el cas que no es pogués regular), el cost de carregar i descarregar les bateries, el cost d'activar la reducció de càrrega i el cost de reestructurar les càrregues modificables.

Henríquez et al. [11] presenta una altra perspectiva, ja que, independentment de quins siguin els elements que proporcionin la flexibilitat, considera tres possibilitats (Figura 2) que es poden donar per tal de proveir-la en el seu model:

- Càrrega fixa. El DA no pot comptar amb flexibilitat.
- Reducció de la càrrega. Es pot reduir per tal d'oferir flexibilitat disminuint el consum.

- Desplaçament de la càrrega. Pot ser utilitzada per augmentar la demanda en un moment donat

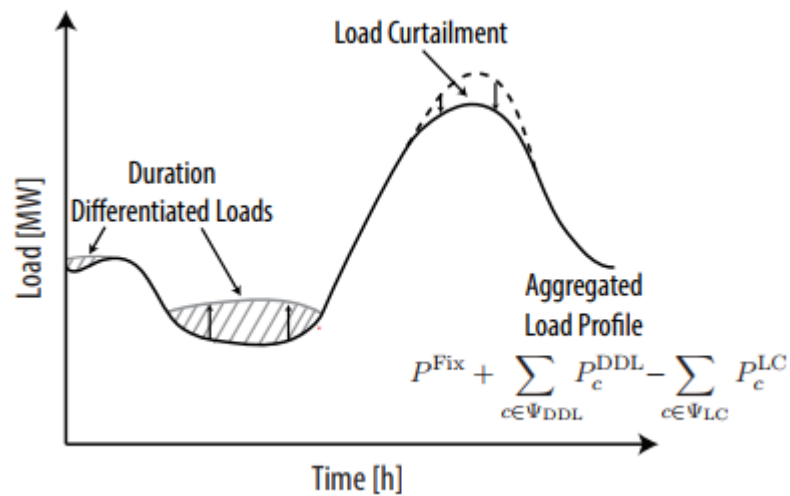


Figura 2: Possibilitats de flexibilitat presentades a l'estudi d'Henríquez et al.

A més, s'actua de diferent manera per aprofitar els contractes establerts el dia anterior i els intradiaris. Pels contractes amb 1 dia de marge, el BA programa el seu consum per reduir la seva càrrega en les hores de preu elèctric més elevades, i tracta de desplaçar-la durant les hores on hi ha un cost més baix. Pels contractes intradiaris, tracta de desviar el consum que havia previst en el dia anterior per tal de poder crear una franja en la que pugui participar en aquests mercats i oferir la flexibilitat requerida.

Els resultats es veuen influenciats pels costos dels competidors, que són presentats amb anterioritat i en principi no tenen cap relació amb els costos de flexibilitat del sistema de l'estudi. A més, en aquest estudi el BA sempre és capaç de proporcionar un preu de licitació per participar en el mercat, però això a la realitat podria arribar a no ser així. Aquest fet fa que no es pugui comprovar que sigui un model prou realista, i és per aquest motiu que SABINA s'allunya d'aquesta perspectiva.

D'altra banda, l'enfocament seguit per Iria et al. al seu estudi [17] tracta de minimitzar els costos del DA als mercats diaris i a temps real per tal de maximitzar el benefici. Malgrat SABINA no persegueix el mateix objectiu, utilitza una estructura comunicativa similar. Tal i com es veu a la Figura 3, l'agregador (DA a SABINA) pren la informació del Home Energy Management Systems (HEMS) i utilitza aquesta informació, les dades meteorològiques i els preus del mercat per tal de generar la resposta optimitzada sobre la manera d'actuar futura de l'edifici. Aquests setpoints s'envien al HEMS, que els executa amb els diferents elements de la casa.

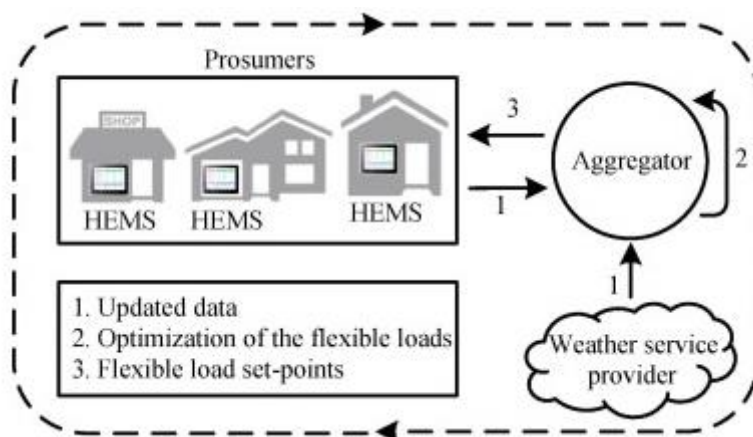


Figura 3: Esquema de l'estudi per Iria et al.

La diferència a nivell comunicatiu es basa en que el DA de SABINA no sap com el BA gestiona els elements dins l'edifici, sinó només les seves capacitats de flexibilitat i consum esperat.

A partir d'aquest enfocament, s'ha de decidir quin sigui el factor principal que condicioni al DA de SABINA, és a dir, si ha de basar-se en unes fites econòmiques o ambientals. L'objectiu principal del BA és maximitzar la integració d'energies renovables. Per seguir amb la perspectiva mediambiental i entenent que el DA de SABINA no coneix les particularitats dels elements de l'edifici, es decideix que l'objectiu sigui reduir l'impacte ambiental en la interacció amb la xarxa elèctrica.

El DA tracta de reduir l'impacte ambiental en el seu entorn modificant la solució òptima de l'edifici gràcies a la flexibilitat disponible. Per poder fer-ho, el DA ha de seguir un mètode robust i precís, que ha de servir per poder decidir quan participar als mercats de regulació de banda secundària i, en cas de fer-ho, en quina direcció oferir la flexibilitat.

D'altra banda, la flexibilitat s'activa si, a més de reduir les emissions, no genera un cost econòmic addicional pel prosumer. Malgrat SABINA té un objectiu principal de caràcter ambiental, els diferents agents que participen en el mercat i, més concretament, el prosumer, han de tenir un benefici econòmic perquè sinó no hi participaria.

3.1. Metodologia de SABINA

L'edifici simulat consisteix en un habitatge de 4 plantes de 104,3 m² per planta. Aquest edifici serà simulat amb diferents característiques en cada cas (Figura 4). Es simularà un cas d'una casa convencional (cas 1), una casa amb bateries (cas 2) i una que inclogui bateries i cotxe elèctric (cas 3). Aquests 3 models es simularan amb i sense flexibilitat energètica tèrmica (model REFERENCIA o model SABINA), és a dir, s'avaluaran 6 casos diferents. SABINA utilitza 2 laboratoris diferents per fer la simulació (SMARTLAB i SEILAB), que es diferencien en la manera de gestionar la calefacció de l'edifici. Tots ells tenen plaques solars integrades.

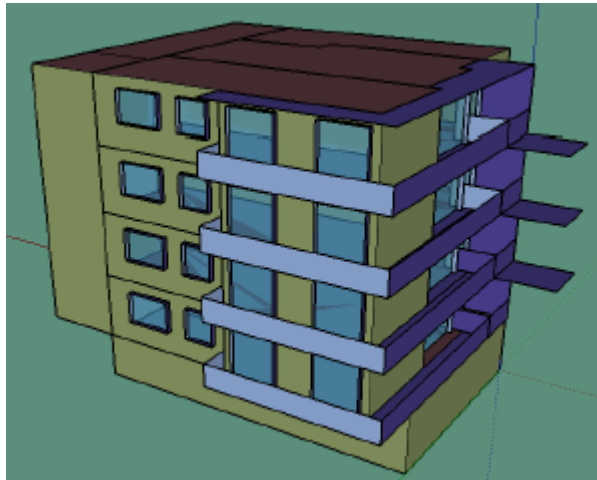


Figura 4: Imatge de l'edifici simulat a SMARTLAB i SEILAB

Aquests 6 models són simulats mitjançant un algoritme que tracta de reproduir el dia a dia d'una vivenda. Quan la família entra i surt de casa o els comportaments depenent del clima són aspectes que influeixen en el consum energètic en una llar, i l'algoritme també tracta de reproduir-ho.

Els tests de simulació de cadascun dels casos és d'una setmana. L'objectiu principal d'aquestes proves és avaluar els avantatges (i inconvenients) dels diferents escenaris on la solució SABINA s'implementa, especialment, el rendiment dels Building Algorithms (BA) i el Market Integrated District Algorithm (MIDA), que fa la funció de Demand Aggregator (DA) i que seria una simulació de l'entorn, en comparació amb els mateixos escenaris sense solució SABINA, també anomenat cas de referència.

Cal destacar que els diferents escenaris, tant al cas de referència com el que presenta flexibilitat, tenen les mateixes configuracions. La única diferència que hi ha és que el cas de

referència no utilitza ni el BA ni el DA (Figura 5), i no aprofita l'avantatge que proporcionen els setpoints que generen. Els casos SABINA operen amb informació real de temps a l'instant, pronòstic de temps, producció fotovoltaica i preu de l'energia, emmagatzemant tota aquesta informació a l'agregador.

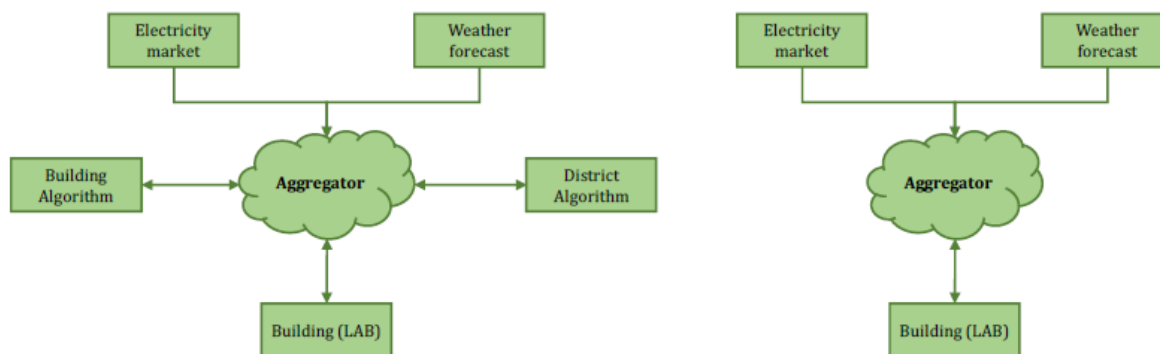


Figura 5: Esquema de les configuracions de SABINA (esquerra) i REFERENCIA (dreta)

SABINA realitza els test des de l'agost fins al novembre, però si s'utilitzessin les condicions climàtiques reals en l'instant que s'analitza hi hauria molta informació que estaria afectada per les condicions climàtiques diferents, és a dir, les mesures d'un model a l'agost es veuen influenciades de manera molt diferent a les d'un altre model simulat a l'octubre. Per situar tots els models en un mateix cas i veure com afecten les mateixes condicions a la manera d'actuar en cada cas, SABINA escull la setmana del dia 5 al dia 9 del mes de març. S'escull un mes d'hivern perquè el consum tèrmic es considera que és més elevat, ja que els sistemes de calefacció no són d'un ús habitual a l'estiu.

També es té en compte en tot moment la temperatura interior i exterior (Figura 6) de l'edifici. Aquestes dades tèrmiques són captades cada 3 minuts gràcies a unes mesures reals i transferides al BA, que analitza la situació actual i envia unes ordres al controlador energètic que faran que actuï d'una manera determinada. Per explicar de manera més visual com pot funcionar aquest sistema en termes de flexibilitat, es pot representar amb un exemple.

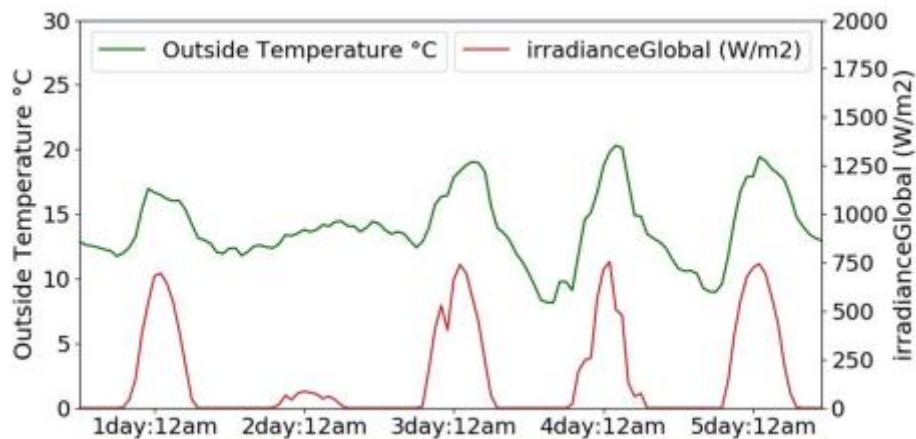


Figura 6: Condicions meteorològiques durant el test

Cal imaginar-se que el sistema tèrmic de l'edifici està programat per tal de mantenir una temperatura en un rang de valors, de tal manera que en el moment que detecti que la temperatura és inferior a 20°C, activarà la calefacció per tal d'augmentar-la a 24°C. Aquest seria un mètode fix i només activaria la calefacció quan s'arriba a la temperatura mínima preestablerta independentment del moment del dia. En aquest cas no participaria la flexibilitat energètica, sinó simplement un sistema de calefacció programada. En el moment que entra en joc la flexibilitat energètica (i l'MPC), el problema pot prendre una altra solució. Potser la informació tèrmica que li arriba a l'MPC és d'una temperatura interior de 21°C. No s'ha arribat al mínim en el qual s'activaria la calefacció, però potser seria més beneficiós fer-ho ara. Per què? Perquè les condicions actuals inviten a fer aquest canvi ja que potser el preu de l'energia en el moment que la temperatura és de 21°C és molt inferior al que serà quan la temperatura sigui de 20°C.

D'aquesta manera l'MPC pren la decisió de com actuar en el període de temps actual i envia la informació al termòstat de l'edifici, que executa l'ordre rebuda aprofitant la seva connexió amb la xarxa.

El BA té un comportament intrínsec, ja que el seu objectiu és la maximització de l'autoconsum. Això significa que no es fixa en les necessitats de la xarxa, sinó que tracta d'aconseguir que l'edifici sigui el més eficient possible.

El MIDA, en canvi, fa la funció d'agent extrínsec, és a dir, tracta d'actuar en favor de la Resposta a la Demanda. Això vol dir que tracta amb el mercat energètic i tracta de modificar el seu consum en favor d'aquest. Per exemple, si rep una petició per part del mercat de disminuir el seu consum en una franja horària i l'accepta, aquesta ordre influenciarà la manera d'actuar del BA, ja que potser aquesta manera d'actuar no maximitza l'autoconsum. En aquest punt l'agent intrínsec haurà de trobar quina és la manera més satisfactòria

d'actuar sempre respectant les restriccions que l'agent extrínsec li imposa. Aquí ja hi hauria una simulació total de flexibilitat energètica, DR, prosumer...

En els casos on se simula la capacitat d'emmagatzemar energia en forma de bateries per part de l'edifici també entra en joc la capacitat d'injectar energia a la xarxa i canviar el rol totalment.

En els casos on entra en joc el cotxe elèctric, hi ha una gran diferència de com resol el fet de carregar el vehicle el cas SABINA respecte al de referència. Mentre que el de referència inicia la càrrega del vehicle en el moment que s'estaciona i es connecta fins que s'ha carregat completament, en el mètode SABINA el BA decideix quanta càrrega dóna i quan carrega el vehicle durant l'estona que està estacionat. Es tracta d'un sistema de càrrega intel·ligent, no d'un sistema Vehicle-to-grid (V2G) que també podria decidir descarregar la bateria del vehicle en favor de l'edifici o MIDA.

A SABINA, el BA envia la informació estrictament necessària al MIDA. Aquesta informació s'envia només un cop durant el dia anterior, per a que l'agent extrínsec pugui preparar les ofertes als mercats. La informació enviada conté:

- Mapa de flexibilitat. Es presenta el consum òptim d'electricitat a cada hora pel BA, amb uns límits inferiors i superiors a aquest òptim que indiquen la flexibilitat màxima que pot assumir (tant en una direcció com en l'altra).
- Efecte rebot per hora (Figura 7). Significa les conseqüències que té fer ús de la flexibilitat en les hores posteriors a aquesta modificació en el consum. És a dir, disminuir el consum per satisfer les necessitats de la xarxa pot provocar que en les següents hores hi hagi un augment d'aquest respecte l'òptim que havia establert el BA. MIDA ha de calcular si activar la flexibilitat no tindrà un efecte contraproductiu, és a dir, que malgrat reduir les emissions de CO₂ durant l'etapa flexible (zona verda a la Figura 7), no hi hagi un augment d'emissions durant l'etapa rebot (zona grisa a la Figura 7) que faci que el balanç total sigui negatiu. El mateix passa econòmicament, l'efecte rebot no ha de provocar que el prosumer surti perjudicat econòmicament per oferir flexibilitat. En cas que aquestes restriccions no es compleixin, no s'activa la flexibilitat.
- Eficiència. És l'energia oferida per flexibilitat dividida entre l'energia necessària per recuperar l'òptim en el futur, és a dir, l'energia extra causada pel rebot.

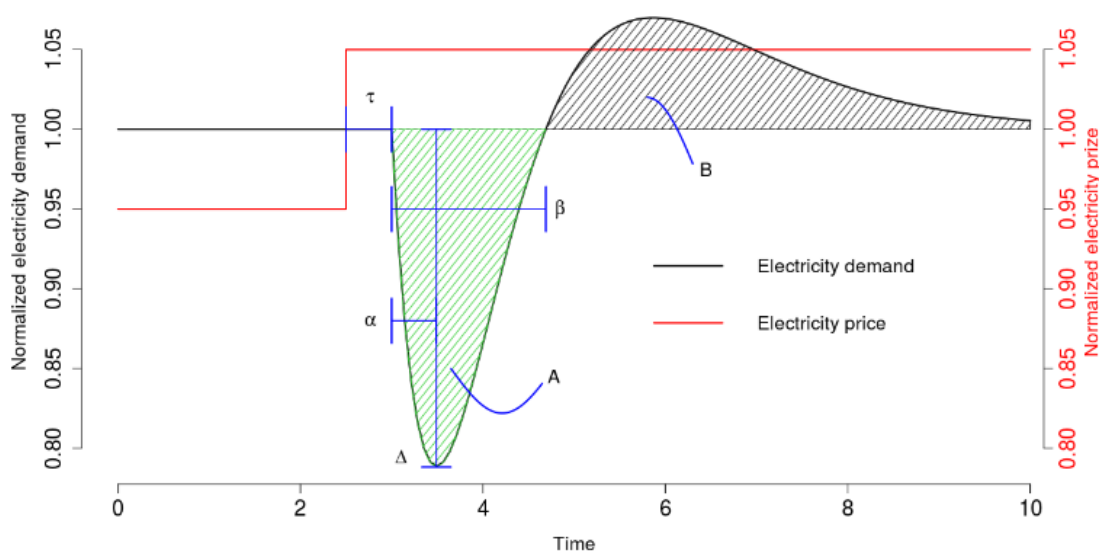


Figura 7: Efecte rebot

Amb aquesta informació, el DA és capaç d'estudiar el mercat del dia següent i presentar ofertes gràcies a la flexibilitat dels diferents prosumers que li envien la informació. Al dia següent, si finalment aquella oferta és contractada, el DA demana al BA la confirmació d'aquella flexibilitat que podia donar el prosumer.

4. Resultats

Com es menciona al capítol 3.1 *Metodologia de SABINA*, els 2 laboratoris que SABINA utilitza en l'estudi per la seva simulació (SMARTLAB i SEILAB) tenen certes diferències en quant al sistema de calefacció i el seu respectiu equipament, ja que SMARTLAB utilitza un sistema de bateries i SEILAB, bomba de calor.

SMARTLAB obté informació simulada del sistema de calefacció, el vehicle elèctric i la pròpia estructura de l'edifici, mentre que aconsegueix informació real del clima, el sistema de plaques fotovoltaïques i les bateries integrades. Aquestes últimes són simulades a SEILAB, però en aquest laboratori el sistema de calefacció és real. La resta de paràmetres s'obtenen de la mateixa manera que a SMARTLAB.

4.1. Balanços energètics

A SABINA es tracta d'aconseguir optimitzar l'energia distribuïda a l'edifici per maximitzar l'autoconsum. Per entendre millor aquesta distribució de l'energia s'utilitza un diagrama d'Sankey (Figura 8) de l'escenari amb més components en l'edifici de SEILAB. Es pot veure com gran part de l'energia rebuda prové de la xarxa elèctrica i la resta és generada pels panells fotovoltaïcs. Es pot identificar un flux circular d'energia que representa la càrrega i descàrrega de les bateries. Un gran volum de l'energia rebuda i descarregada de les bateries s'utilitza per cobrir les necessitats energètiques de l'edifici, com són el sistema de regulació tèrmica, electrodomèstics, enllumenat... A més, es té en compte l'energia que s'utilitza per carregar el vehicle elèctric (EV). L'energia que no és consumida per l'edifici ni pel cotxe elèctric és injectada a la xarxa.

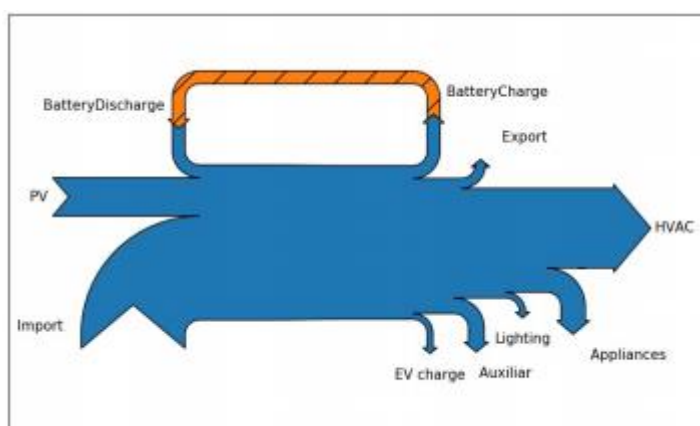


Figura 8: Sankey pel cas REFERENCIA de l'escenari 3 a SEILAB

A la Figura 9 es pot veure com en aplicar la solució SABINA a SEILAB el flux d'energia es redueix entre un 15% i un 20%. Si s'analitza l'energia importada total, es pot veure que el volum d'energia generada per plaques solars es manté malgrat disminuir l'energia rebuda total. Les dades reflecteixen una reducció del 27% en l'energia importada de la xarxa. D'aquesta manera s'està augmentant l'autoconsum (ja que l'energia rebuda per plaques fotovoltaïques representa un percentatge més alt al cas SABINA que al REFERENCIA).

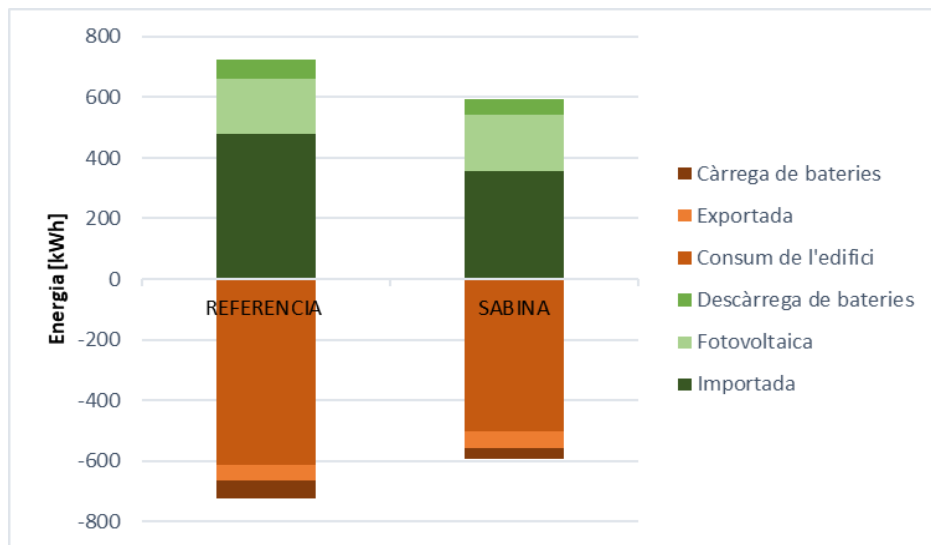


Figura 9: Balanç elèctric en l'escenari 3 a SEILAB

A partir d'aquestes dades es pot estudiar quina és la capacitat que té el sistema d'aprofitar l'energia generada per l'edifici (ja sigui mitjançant la generació amb plaques fotovoltaïques o amb la descàrrega de bateries) pel seu propi consum. Aquesta relació s'utilitza com a factor de cobertura del subministrament. Un valor d'1 significaria que tota l'energia generada per l'edifici és també consumida per ell mateix, mentre que un 0 representa que no s'aprofita pel propi consum cap quantitat d'energia generada pels seus mitjans.

El percentatge de la demanda d'electricitat de l'edifici facilitada per la generació d'energia d'ell mateix reb el nom de factor de cobertura de càrrega. En aquest cas, un valor d'1 expressa que tota la demanda d'electricitat de l'habitatge és aconseguida pels seus propis mitjans generadors (autoconsum màxim), mentre que un 0 vol dir que no utilitza l'energia generada per ell mateix (si en genera) per cobrir les seves necessitats elèctriques.

A la Taula 1 es pot veure com en general el factor de cobertura de subministrament augmenta introduint el cas SABINA. Això vol dir que s'està incrementant l'ús d'energia generada pel propi edifici, la qual cosa és positiva ja que implica un augment de l'autoconsum, que és un dels objectius principals de SABINA. L'únic cas on no es veu una millora significativa és en l'escenari 1 de SEILAB, on els resultats són pràcticament idèntics.

FACTOR DE COBERTURA		SUBMINISTRAMENT		CÀRREGA	
EDIFICI		SMARTLAB	SEILAB	SMARTLAB	SEILAB
ESCENARI 1	Cas SABINA	0,43	0,43	0,23	0,15
	Cas REFERENCIA	0,36	0,44	0,24	0,16
ESCENARI 2	Cas SABINA	0,89	-	0,19	-
	Cas REFERENCIA	0,52	-	0,21	-
ESCENARI 3	Cas SABINA	0,89	0,8	0,25	0,3
	Cas REFERENCIA	0,54	0,5	0,3	0,26

Taula 1: Factor de cobertura de subministrament i càrrega

És destacable que el factor de subministrament augmenta fins gairebé 0,9 en escenaris amb més components que permeten al BA gestionar el consum de manera flexible. Tenir bateries permet que l'energia generada pels panells fotovoltaics sigui aprofitada per satisfer les demandes energètiques de l'edifici.

D'altra banda, les dades no reflecteixen una variació significativa en el factor de cobertura de càrrega quan s'aplica el mètode SABINA.

L'objectiu de maximitzar l'autoconsum és el mitjà que té SABINA per tractar de reduir les emissions de CO₂. Per estudiar aquest impacte ambiental es considera un factor calculat tenint en compte la quantitat d'energia importada i exportada i el factor d'emissions de CO₂ de la xarxa elèctrica global espanyola. A SEILAB el BA aconsegueix reduir el consum energètic considerablement en el cas SABINA, així com les emissions de CO₂, que disminueixen en més d'un 25% respecte al cas REFERENCIA tant en l'escenari 1 com en l'escenari 3. Aquests resultats són molt positius ja que s'aconsegueix l'objectiu de reduir les emissions mitjançant la flexibilitat. A més, en escenaris com el 3 que té una composició més complexa que l'1 també s'aconsegueix disminuir aquestes emissions per sobre del 27%. La Taula 2 aporta un resum d'aquestes dades.

EQUIVALÈNCIA D'EMISSIONS DE CO ₂ (Kg) a SEILAB		
ESCENARI 1	Cas SABINA	21,7
	Cas REFERENCIA	29,7
ESCENARI 3	Cas SABINA	43,2
	Cas REFERENCIA	59,5

Taula 2: Equivalència d'emissions de CO₂ (Kg) a SEILAB

Segurament en una altra època de l'any on les condicions climàtiques siguin encara més favorables per prescindir de sistemes de calefacció les emissions encara seran menors. A més la captació de llum solar seria més gran i es prescindiria encara menys de la xarxa. És interessant que SEILAB aconsegueixi reduir en un percentatge tan alt les emissions només amb flexibilitat intrínseca, ja que no ha hagut activacions per aquest cas. Si s'haguessin donat aquestes activacions, segurament hagués disminuït encara més el volum d'emissions ja que no s'accepta la sol·licitud del MIDA si no hi ha disminució de preu i d'emissions.

4.2. Resposta a la Demanda

Malgrat el sistema generalment està orientat a maximitzar l'autoconsum de l'edifici, SABINA compta amb el MIDA, un agent que té una visió més àmplia, ja que tracta de reduir les emissions causades pel consum d'electricitat en tota la xarxa i d'aconseguir beneficis econòmics interactuant amb l'operador del sistema. MIDA juga el paper de demanar flexibilitat als edificis que controla en els moments del dia que considera oportuns per distribuir o recaptar energia de la xarxa, tenint en compte l'efecte rebot en el consum que suposaria ser particip d'aquesta flexibilitat.

A la Taula 3 es presenten els resultats de les activacions i el volum d'energia acceptat pel BA a SMARTLAB. MIDA té més edificis sota control, però aquí només es consideren els 2 que disposen de BA. En el cas de SEILAB, en cap moment el MIDA ha detectat oportunitats d'activar la resposta a la demanda. La resta d'edificis es considera que accepten les sol·licituds de MIDA.

	EDIFICI	SMARTLAB
ESCENARI 1	Número de sol·licituds	3
	Sol·licituds acceptades	1
	Wh sol·licitats	15296
	Wh acceptats	1825
ESCENARI 2	Número de sol·licituds	3
	Sol·licituds acceptades	3
	Wh sol·licitats	14259
	Wh acceptats	11797
ESCENARI 3	Número de sol·licituds	5
	Sol·licituds acceptades	0
	Wh sol·licitats	24633
	Wh acceptats	0

Taula 3: Activacions de la flexibilitat

Si s'interpreten les dades que presenta la Taula 3, es pot veure com en l'escenari 2 hi ha una interacció molt més fiable entre MIDA i BA (pràcticament un 83% de Wh demanats són acceptats pel BA, i totes les sol·licituds són ateses satisfactòriament) que a l'escenari 1 (només un 12% d'Wh són proporcionats i només 1/3 de les sol·licituds són acceptades). Per contra, no es troba una millora en l'escenari 3, on el BA no accepta cap de les sol·licituds de MIDA. Aquest resultat sorprèn ja que s'esperava major fiabilitat degut al major nombre d'elements que participen en aquest escenari. Això es deu a les particularitats del desenvolupament del BA i als efectes de l'estocasticitat de l'ús de l'edifici.

A la Figura 10 i la Figura 11 es poden veure cadascuna de les sol·licituds del MIDA i la corresponent resposta. Hi ha certes diferències entre el volum d'energia acceptat i l'enviat. Això és perquè la sol·licitud s'accepta 1 hora abans d'activar la flexibilitat, i en aquella hora el consum que tenia previst el BA es pot veure modificat.

A l'escenari 1 només es respon a la tercera sol·licitud, la del Dia 4, i el volum de la resposta és molt inferior al sol·licitat. En canvi l'escenari 2 interactua molt positivament amb el MIDA: les 3 sol·licituds són acceptades i els volums d'energia són força pròxims als demanats. És normal que l'escenari 2 pugui respondre millor a la demanda que l'1 ja que té més mecanismes per adequar el seu consum i poder interactuar amb la xarxa complint els requeriments del BA (reduir emissions i aconseguir benefici econòmic). A més, en l'escenari 2 és capaç de respondre a la demanda tant incrementant el consum com disminuint-lo. És una bona senyal ja que això significa que es poden obtenir beneficis realitzant qualsevol de les dues accions, i no només disminuint el consum com semblaria lògic.

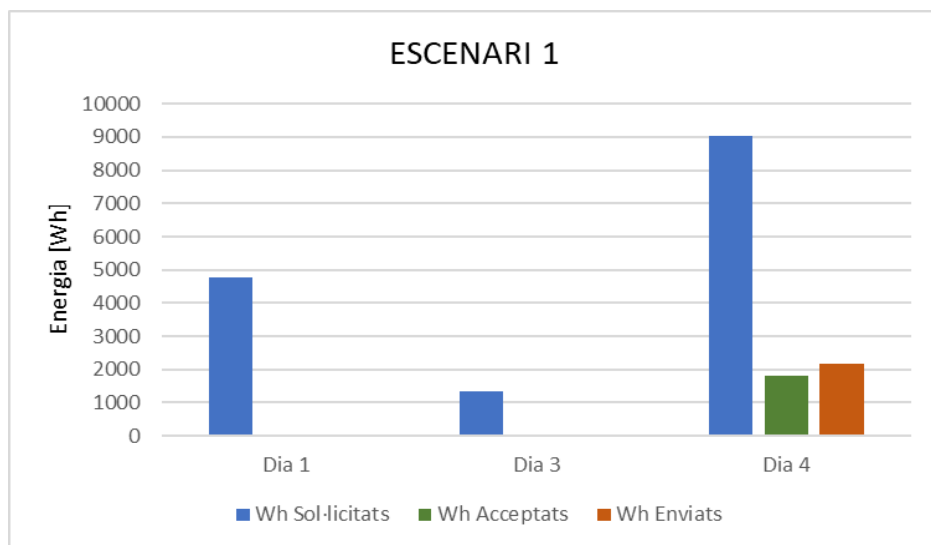


Figura 10: Activacions per dies a SMARTLAB a l'escenari 1

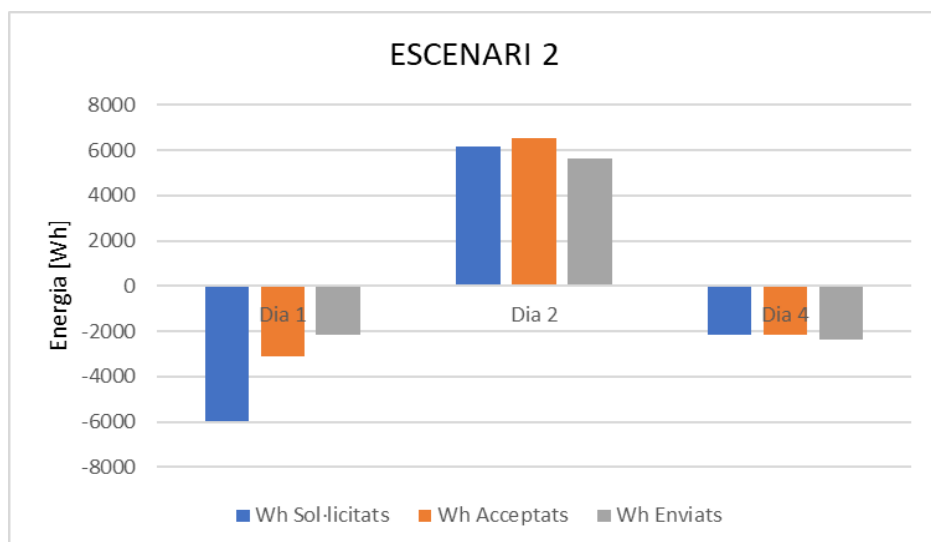


Figura 11: Activacions per dies a SMARTLAB a l'escenari 2

A la Figura 12 es mostra el Mapa de Flexibilitat que el BA genera el dia anterior al consum, i que el MIDA utilitza per optimitzar les activacions. Es poden observar diverses qüestions:

- Quan el consum base es troba a prop del no consum pràcticament no hi ha capacitat de cedir electricitat, ja que SABINA té com a objectiu no injectar electricitat a la xarxa.
- La capacitat de disminuir el consum és reduïda, però hi ha la possibilitats depenent del moment en diferents escenaris. Com el BA optimitza el consum propi, ja treballa en diferents instants en el seu mínim.
- La capacitat de ser flexible consumint més energia és molt més àmplia, sent possible pràcticament en tot moment.

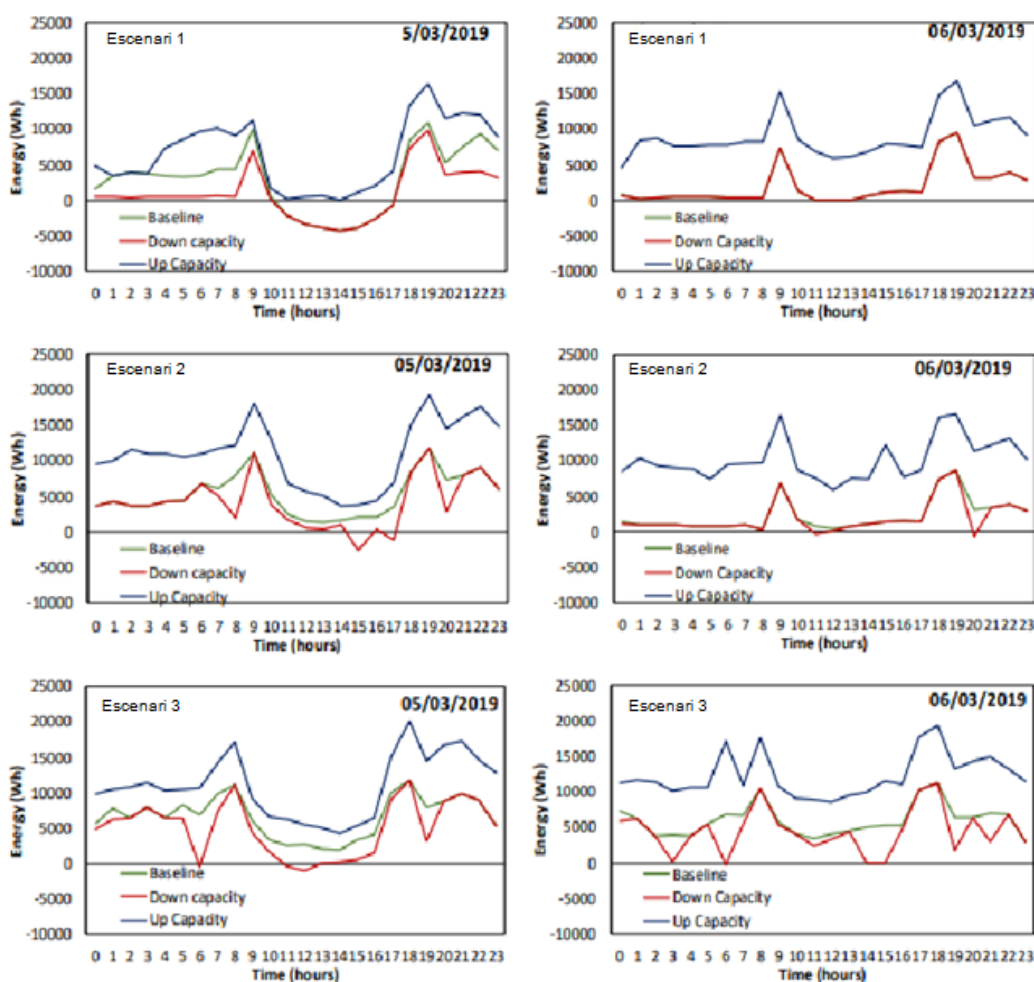


Figura 12: Exemple de Mapa de Flexibilitat de 2 dies a SMARTLAB pels 3 escenaris

Si es parla de beneficis econòmics degut a la resposta a la demanda, durant els dies de

simulació SABINA és capaç d'estalviar 0,46€ en l'escenari 1 i 1,49€ en l'escenari 2. A l'escenari 3 no hi ha cap estalvi perquè no hi ha activacions de flexibilitat. En qualsevol cas, gran part del benefici es troba en les ofertes de capacitat disponible realitzades en els mercats del dia previ, i no en l'estalvi energètic al variar el consum. Per poder aconseguir aquests beneficis s'ha de ser capaç d'oferir aquesta flexibilitat si finalment l'operador del sistema la demana. Si al mercat de dia anterior es presenta una oferta i finalment l'operador l'accepta i demana el volum ofert, però per qualsevol motiu no es pot cedir aquesta flexibilitat, òbviament la recompensa econòmica desapareixerà.

Més enllà d'aquests beneficis, existeixen variacions en el consum posterior degut a l'activació de la flexibilitat (l'efecte rebot). Aquest canvi en la corba de consum també provoca uns beneficis econòmics. La Taula 4 presenta els beneficis per les 4 activacions de flexibilitat (1 en l'escenari 1 i 3 en l'escenari 2).

Beneficis per variacions de consum (€)		
ESCENARI 1	Dia 4	1,56€
ESCENARI 2	Dia 1	1,47€
	Dia 2	- 1,3€
	Dia 4	0,05€

Taula 4: Beneficis per variacions de consum (€)

Malgrat en general les activacions han comportat beneficis, hi ha un cas on s'identifiquen pèrdues (Dia 2 de l'escenari 2). Això és degut a que les previsions dels rebots encara no són del tot fiables i precises. Amb un BA real més desenvolupat els riscos de perdre diners amb DR serien mínims i la segona activació de l'escenari 2 hagués estat denegada pel BA.

També hi ha un estalvi provocat per la flexibilitat intrínseca, que permet disminuir el consum a SEILAB i gestionar-lo de manera més optimitzada quan s'aplica el cas SABINA (Taula 5). El preu de venda de l'energia publicat a la web de <https://www.esios.ree.es/es> es multiplica per l'energia consumida per avaluar el cost econòmic d'aquesta energia. Com es pot veure a la Taula 5, hi ha una correlació entre aquestes dades i l'energia importada a l'edifici (Figura 9). Al disminuir el consum, els costos derivats d'aquesta energia importada també disminueixen.

COST ECONÒMIC (€) A SEILAB		
ESCENARI 1	Cas SABINA	16,9
	Cas REFERENCIA	23,1
ESCENARI 3	Cas SABINA	38,8
	Cas REFERENCIA	51,7

Taula 5: Cost econòmic (€) a SEILAB

La Figura 13 representa la suma dels beneficis per canvi en la corba de consum i per la participació en el mercat. Els valor numèrics totals són presentats a la Taula 6.

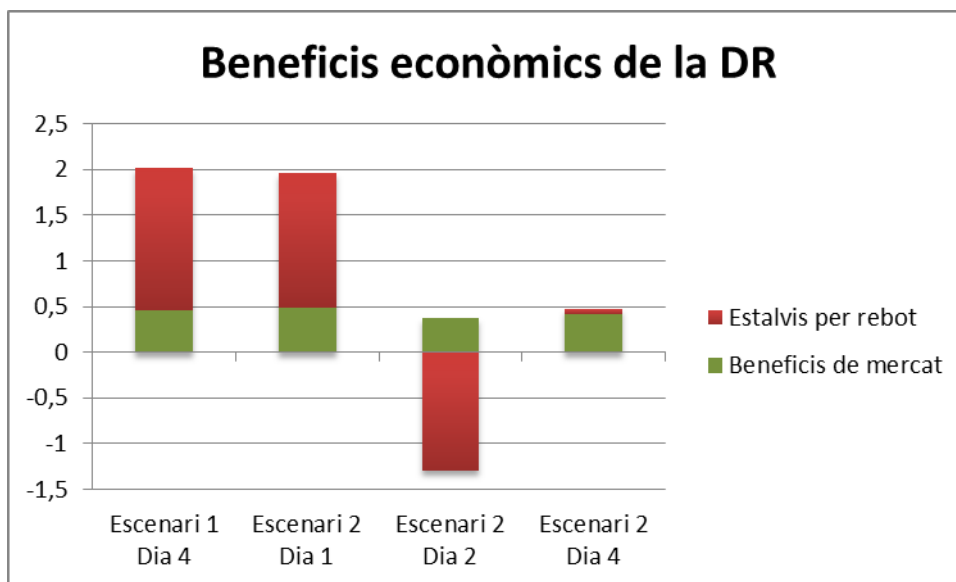


Figura 13: Resultat econòmics de les activacions de flexibilitat

Resultats econòmics per escenari (€)		
ESCENARI 1	Dia 4	2,02€
	TOTAL	2,02€
ESCENARI 2	Dia 1	1,96€
	Dia 2	- 0,92€
	Dia 4	0,47€
	TOTAL	1,71€
ESCENARI 3	TOTAL	0€

Taula 6: Resultats econòmics globals (€)

Es pot observar com l'estalvi aproximat quan actua MIDA (a l'escenari 5 no hi ha cap activació) és d'uns 2€ pels 5 dies de simulació. És interessant veure que hi ha uns beneficis prou regulars (al voltant de 0,4€) només per respondre a la demanda independentment de la quantitat d'energia cedida o consumida. Això vol dir que un prosumer actiu als mercats intradiaris pot treure molt de rendiment d'aquesta pràctica. Un edifici amb un BA amb uns objectius més econòmics i menys dedicats a maximitzar l'autoconsum podria desenvolupar una previsió de consum que li permetés més flexibilitat en les dues direccions. Igualment, una xifra de 2€ semanals de guanys sumats a una reducció del consum i el conseqüent estalvi són xifres significatives tot i no ser l'objectiu principal del BA.

4.3. Discussió dels resultats

Els resultats de SABINA donen lloc a un ampli ventall de possibilitats i dubtes. Si es parla de flexibilitat, es pot veure que l'enfocament de SABINA fa possible una adaptació a la xarxa i l'entorn per incrementar l'autoconsum. Seguint el mateix objectiu hi podria haver altres possibilitats que milloressin els resultats actuals. Tot depèn del tipus d'estructura de gestió de l'energia s'utilitzi. En el cas de SABINA s'utilitza un BA que controla diferents paràmetres dins de l'edifici i un MPC que té unes capacitats molt potents per gestionar de manera òptima els diferents edificis que controla (entre ells el de SABINA). Però poden haver-hi diferents solucions que potser serien més beneficioses econòmicament per l'usuari, com tenir un computador d'unes capacitats similars a l'MPC però al propi habitatge. En aquest

cas s'eliminarien els costos de pagar a un intermediari per aconseguir una gestió òptima. Paral·lelament, com més components elèctrics intel·ligents tingui l'edifici (electrodomèstics, termòstat, carregador intel·ligent de vehicle...) menys complex caldria que fos el computador.

També es podria optar per una visió totalment contrària: tenir un aparell de mesura del consum global a la sortida del comptador que informi a l'MPC de les dades de l'edifici. Com menys informació tingui el computador per modificar el consum de l'edifici, menys flexible serà.

En qualsevol cas, els resultats reflecteixen com una gestió de l'energia orientada a incrementar l'autoconsum fa que l'energia importada des de la xarxa i les emissions de CO₂ es vegin reduïdes.

Una altra orientació més econòmica segurament tractaria de consumir durant el dia l'energia generada amb plaques fotovoltaïques i variar el seu consum depenent de la captació. També dispararia el seu consum per la nit ja que el preu és més barat, fent les tasques que potser no depenen tant de la immediatesa com carregar components elèctrics (entre ells el cotxe), posar en marxa electrodomèstics com rentadores i assecadores...

Els resultats relacionats a la resposta a la demanda deixa obertes vies interessants d'orientació cap a objectius més comercials. És cert que l'estudi SABINA no es planteja amb aquest objectiu però es poden extreure idees molt aprofitables. En primer lloc, una orientació comercial podria tenir diferents estratègies: Per exemple, el disseny de consum del BA podria tractar d'aprofitar el màxim nombre d'activacions independentment del volum de la oferta i aprofitar-se econòmicament del fet de participar (s'ha vist com a SABINA cada activació reporta uns 0,4€).

Una altra estratègia podria ser, coneixent l'evolució típica del mercat i el consum global durant el dia, ser capaç de dissenyar unes previsions de consum pròpies molt baixes a les hores on el mercat té poca demanda. Així quan s'aproximen aquestes hores, el prosumer tindria una capacitat altíssima per augmentar el seu consum. D'aquesta manera trauria beneficis d'activar la flexibilitat i a més del volum de la seva resposta. També podria fer-se a l'inrevés, unes previsions de consum pròpies molt altes a les hores on hi ha pics de demanda. D'aquesta manera quan s'apropa l'hora conflictiva l'agregador podria detectar que aquell prosumer té una capacitat molt gran de disminuir el seu consum. Aquestes pràctiques tenen cert risc ja que si no hi ha ofertes de resposta a la demanda el prosumer haurà de consumir un volum d'energia molt alt en el moment del dia més car.

Per tant, es pot veure que les possibilitats són molt àmplies i hi ha un gran espai per la recerca i identificació d'oportunitats. En qualsevol cas, un estudi com el de SABINA reflexa

que es necessita un BA molt més precís que sigui capaç d'analitzar molt més acuradament els rebots, les previsions de consum o les oportunitats de flexibilitat extrínseca perquè en diferents casos no s'ha pogut aprofitar l'oportunitat que hi havia d'obtenir benefici de l'entorn, com per exemple les pèrdues pel rebot en la segona activació de l'escenari 2 o el no poder acceptar cap de les 5 sol·licituds de l'escenari 3 a SEILAB.

5. Marc legislatiu actual

Actualment la flexibilitat intrínseca, així com l'agregació de generació no està prohibida a Espanya. La capacitat de variar el propi consum depenent de factors externs (evolució del mercat, condicions climàtiques, optimització de recursos...) és totalment legal. Allò que no està permès és que els recursos energètics distribuïts (DER) de baixa tensió, com bateries, petites instal·lacions d'energia renovable i en definitiva prosumers participin en els mercats d'energia, equilibri i capacitat [18].

No obstant, es va avançant per tractar d'eliminar diferents barreres que dificulten l'entrada de nous agents participants. Com reflexa el RD 15/2018 [19] la capacitat mínima de participació en els mercats s'ha reduït de 10MW a 1MW. Aquesta reducció ja suposaria l'entrada en els mercats de participants amb un consum intermedi entre els particulars i les grans indústries, com poden ser supermercats, campus universitaris, hotels...

En qualsevol cas, l'agregació encara no està permesa per respondre a la demanda. Sí que hi ha opcions per treure profit d'aquesta pràctica amb altres estratègies legals. Per exemple, es pot impulsar l'autoconsum compartit en un edifici on hi hagi diferents veïns, o dissenyar un punt de connexió entre diferents usuaris d'una zona que comparteixin comptador [18]. A nivell particular també es poden utilitzar components elèctrics com bateries per gestionar el consum i evitar importar energia en les hores punta.

Malgrat les petites millores que s'estan donant per avançar cap a un futur on la resposta a la demanda sigui una realitat, hi ha diferents barreres legals, econòmiques, tècniques i socials que impedeixen l'entrada d'agents participants [18].

Un dels grans obstacles es troba en el disseny del sistema elèctric espanyol, sostingut per la Llei del Sector Elèctric (Llei 24/2013) que es basa en el principi d'estabilitat financera com a resposta al dèficit tarifari acumulat en el sector elèctric (30.000M€). Això implica que qualsevol mesura que incrementi el cost pel sistema elèctric o redueixi els ingressos d'aquest ha de preveure una compensació equivalent per garantir l'equilibri econòmic del sistema. La participació dels DER pot provocar una reducció significativa en el consum d'energia o potencia contractada, que donaria lloc a una reducció en els ingressos del sistema. Amb la llei actual es cobririen aquestes pèrdues del sistema elèctric augmentant els costos fixos de tots els consumidors en la seva factura de la llum. Així que l'estalvi que s'aconseguiria per reduir la importació d'energia o augmentar l'autoconsum seria pràcticament inútil ja que el sistema elèctric té eines per cobrar-o d'una altra manera. Per eliminar aquesta barrera s'hauria de modificar la Llei del Sector Elèctric i eliminar de la

factura elèctrica els costos no relacionats amb el subministrament. S'ha de tenir en compte que el concepte d'electricitat suposa únicament un 40% del preu de la factura [20]. A més caldria repartir els costos de la transició energètica de manera més justa implicant a tots els consumidors d'energia, i no només als consumidors d'electricitat com fins ara.

Un obstacle important per l'aparició d'empreses internacionals relacionades amb l'agregació i el proveïment de bateries així com de mitjans i grans inversors és el alt grau d'incertesa que transmet l'Estat. En primer lloc falta un marc regulador estable amb unes directrius clares i un pla estratègic a mig i llarg termini com s'ha fet en altres països [21], i en segon lloc els continus canvis que ha patit el sector d'energies renovables amb els conseqüents canvis legislatius i de retribució fan que la inversió sigui molt més reticent a participar en el mercat energètic espanyol en estratègies innovadores com la resposta a la demanda. Per atraure actius al mercat de l'agregació cal que es convenci a aquestes empreses amb accions reals (eliminant barreres per la entrada de l'agregació) que demostrin que s'aposta clarament en aquesta direcció.

Un altre obstacle es troba en el major cost comparatiu de les tecnologies més verdes respecte a les tradicionals. Malgrat hi ha la intenció de reduir l'impacte ambiental del sector elèctric, no hi ha impositions suficientment grans sobre el CO₂ i residus nuclears que equilibrin la balança de costos amb les renovables. A més, els costos del sistema que sostenen els propis consumidors amb la seva factura ajuda econòmicament als grans generadors d'energia (que són carbó i nuclears). Totes aquestes accions promouen un model energètic centralitzat i dona l'esquena a mètodes distribuïts com els DER.

D'altra banda, al ser un sistema on la interacció entre prosumidor i agregador és constant, hi ha certa vulnerabilitat en el canal de comunicació entre aquests. La informació energètica de l'edifici és molt valuosa perquè amb ella l'operador del sistema pot saber quines estratègies de consum està practicant cada individu. Aquesta informació podria ser recopilada per zones reduïdes (no cal que sigui una ciutat completa, pot ser un barri o districte) i que l'empresa operadora gestionés els preus de l'energia en relació a la informació que ha obtingut de cada àrea. És per aquest motiu que la via de comunicació entre agregador i prosumer es pot veure atacada hackejant el comptador intel·ligent, per exemple. Això implica desenvolupar i invertir en un sistema de ciberseguretat per aquest àmbit.

A més s'ha de dissenyar una nova manera de compartir les dades de l'usuari amb agents intermediaris com els agregadors. Actualment les dades disponibles per mitjà de comptadors intel·ligents es resumeixen a consum cada 15 minuts, però si algú vol crear una estructura més complexa on es puguin controlar els components de l'habitatge de manera independent cal un altre model de gestió de la informació. Amb el model actual la resposta a la demanda seria molt difícil de desenvolupar al sector residencial.

6. Pressupost i impacte ambiental

6.1. Pressupost

Per analitzar el cost del projecte es divideix en costos de recursos humans (Taula 7) i costos d'equipament i material necessari pel desenvolupament de l'estudi (Taula 8). Es considera un preu per hora de 20€.

FASE DEL PROJECTE	HORES DEDICADES	COST [€]
Reunions amb el Tutor	15	300
Recerca i formació teòrica	170	3400
Redacció de la Memòria	120	2400
TOTAL	305	6100

Taula 7: Costos derivats de recursos humans

MATERIAL	COST UNITARI [€/unitat]	UNITATS	COST [€]
Ordinador portàtil	350	1	350
Documents i articles de divulgació científica	18	25	450
TOTAL			800

Taula 8: Costos d'equipament i material

D'aquesta manera el pressupost total de l'estudi és de 6900€.

6.2. Impacte ambiental

Al ser SABINA un estudi amb un objectiu de reducció d'emissions en el sistema elèctric, és molt important que l'impacte sigui positiu.

Com es reflexa al capítol de resultats, la solució SABINA aconsegueix reduir les emissions de CO₂ degut a la reducció de consum d'energia importada des de la xarxa. A més ho fa amb unes condicions climàtiques que no són les més favorables per treure profit de l'energia solar. Als mesos d'estiu l'energia generada per les plaques fotovoltaïques seria major i això implicaria menys necessitat d'importar energia de la xarxa perquè es podria abastir un percentatge més gran de l'energia consumida per mitjà de la generada a nivell particular.

Si es valora l'estudi com la implantació de flexibilitat i resposta a la demanda en un habitatge independentment del cas SABINA, és evident que aquests mecanismes amb unes directrius concretes poden ser de gran ajuda per reduir l'impacte ambiental negatiu del sistema elèctric. Però per això cal que s'interposin restriccions a l'hora d'entendre la resposta a la demanda com una oportunitat de negoci. Aquest tipus de restriccions poden ser imposades a diferents agents.

Podrien ser imposades per cada prosumer a nivell individual, qui hauria de complir unes reduccions en el seu impacte ambiental en períodes de temps estipulats per mitjà de la flexibilitat.

Un altre cas seria imposar a l'agregador que les seves gestions comercials i energètiques suposin una reducció d'un percentatge d'emissions de CO₂ estipulat. L'agregador hauria de ser capaç de combinar les flexibilitats dels diferents prosumers per aconseguir aquests objectius en matèria ambiental. Segurament seria un mètode menys restrictiu que l'anterior ja que permetria al prosumer adoptar diferents posicions en matèria de flexibilitat i l'agregador tindria la tasca de coordinar-los.

El projecte SABINA també reflexa la necessitat d'instaurar uns sistemes de gestió de l'energia (l'equivalent al BA i l'MPC) suficientment precisos com per no generar previsions errònies que poden provocar situacions contraproductives com un volum d'emissions finals de CO₂ més elevat que si no s'apliqués la flexibilitat.

7. Conclusions

La flexibilitat energètica i la resposta a la demanda són dos conceptes que ja són una realitat però que s'utilitzen per actuar davant les particularitats de la xarxa només a nivell particular. És clar que la flexibilitat intrínseca permet disminuir consum, costos i/o emissions (depenent quin sigui l'objectiu), però el següent pas és interactuar amb la xarxa. Amb l'anàlisi del projecte SABINA i més concretament aquest estudi s'han pogut extreure diverses conclusions respecte aquest tema.

En primer lloc, les experimentacions de SABINA demostren que un sistema amb més components elèctrics capaços d'emmagatzemar i consumir energia de manera deliberada és més capaç de respondre a la demanda.

En segon lloc, el BA creat per SABINA aconsegueix augmentar l'autoconsum, que és el seu principal objectiu, però hi ha certs casos en els que el consum total també augmenta i conseqüentment el preu.

En tercer lloc, la flexibilitat extrínseca pot tenir diversos enfocaments depenent de la configuració del computador que gestioni l'edifici. Una gestió més comercial pot generar molts més beneficis que els aconseguits a SABINA, sobretot si ofereix un gran nombre d'activacions.

En quart lloc, aquesta gestió comercial pot desenvolupar-se seguint diferents estratègies que seran més o menys factibles depenent del marc legislatiu futur.

En cinquè lloc, les barreres legislatives, socials i de disseny del sistema elèctric actual impossibiliten actualment l'entrada d'agregadors i prosumers en el mercat actual. Malgrat tot, està havent-hi avenços que ajuden a imaginar un futur més optimista a Espanya de l'actual.

En sisè lloc, una evolució del sistema cap a la DR caldrà anar acompanyada de restriccions ambientals per a que els objectius comercials individuals no siguin contraproductius en aquest aspecte.

8. Bibliografia

8.1. Referències bibliogràfiques

- [1] P. Belkin, "The European Union ' s Energy Security Challenges," vol. 7, no. 1, pp. 76–102, 2018.
- [2] Great Britain Parliament House of Lords: Select Committee on Economic Affairs, *The Economics of Renewable Energy: 4th Report of Session 2007-08, Vol. 1: Report, Volumen 1*. 2008.
- [3] "Estadísticas de energía renovable," 2019. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Renewable_energy_statistics/es. [Accessed: 18-Dec-2019].
- [4] M. Barbero, L. Canals Casals, and C. Corchero, "COMPARISON BETWEEN ECONOMIC OR ENVIRONMENTAL DRIVERS FOR DEMAND SIDE AGGREGATOR."
- [5] EPRI, "Electric Power System Flexibility CHALLENGES AND OPPORTUNITIES," 2016.
- [6] S. E. Austin, J. D. Ford, L. Berrang-Ford, R. Biesbroek, and N. A. Ross, "Enabling local public health adaptation to climate change," *Soc. Sci. Med.*, vol. 220, no. October 2018, pp. 236–244, 2019, doi: 10.1016/j.socscimed.2018.11.002.
- [7] Á. C. SÁNCHEZ, M. F. GARCÍA, and P. D. F. SAGUAR, "Análisis económico y medioambiental del sector eléctrico en España," *Estud. Econ. Apl.*, vol. 29, no. 2, pp. 493–514, 2011.
- [8] A. Internacional de Energías Renovables, *Flexibilidad del sistema eléctrico para la transición energética*. 2018.
- [9] ADB, "Climate Risk and Adaptation in the Electric Power Sector," 2015.
- [10] Y. Parag and B. K. Sovacool, "Electricity market design for the prosumer era," *Nat. Energy*, vol. 1, no. 4, p. 16032, 2016, doi: 10.1038/nenergy.2016.32.
- [11] R. M. Henríquez Auba, "Participación de un agregador de respuesta de demanda en mercados eléctricos: manejo óptimo de contratos," 2016.
- [12] M. Barbero, C. Corchero, L. Igualada, and L. Canals Casals, "Estudio de mercados de flexibilidad de la demanda y algoritmos de agregadores," p. 9, 2018.
- [13] Smart Energy Demand Coalition, "Mapping Demand Response in Europe Today," *SEDC. Smart Energy Demand Coalit.*, no. April, p. 92, 2014.
- [14] G. Lipari, G. Del Rosario, C. Corchero, and F. Ponci, "A real-time commercial

- aggregator for distributed energy resources flexibility management,” *Sustain. Energy, Grids Networks*, vol. 15, pp. 63–75, Sep. 2018, doi: 10.1016/J.SEGAN.2017.07.002.
- [15] L. Canals Casals, “Smart BI-directional multi energy gateway,” no. 731211, pp. 1–28, 2019.
- [16] P. Olivella-Rosell *et al.*, “Optimization problem for meeting distribution system operator requests in local flexibility markets with distributed energy resources,” *Appl. Energy*, vol. 210, pp. 881–895, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.APENERGY.2017.08.136.
- [17] J. Iria, F. Soares, and M. Matos, “Optimal supply and demand bidding strategy for an aggregator of small prosumers,” *Appl. Energy*, vol. 213, pp. 658–669, Mar. 2018, doi: 10.1016/J.APENERGY.2017.09.002.
- [18] P. Salas and A. Carrasco, “Agregación de Recursos Energéticos Distribuidos (DER),” pp. 1–60, 2017.
- [19] JEFATURA DEL ESTADO, “BOLETÍN OFICIAL DEL ESTADO 06/10/2018,” *Aging, Technol. Heal.*, p. 38, 2018, doi: 10.1016/B978-0-12-811272-4.00002-6.
- [20] COWI CONSORTIUM, “Impact Assessment Study on Downstream Flexibility , Price Flexibility, Demand Response & Smart Metering,” no. July 2016, p. 192, 2016.
- [21] L. Ojea, “La flexibilidad, la palanca de cambio que debe incluirse en la nueva regulación del mercado eléctrico,” 2019. [Online]. Available: <https://elperiodicodelaenergia.com/la-flexibilidad-la-palanca-de-cambio-que-debe-incluirse-en-la-nueva-regulacion-del-mercado-electrico/>. Consultat el 03/01/2020

