



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

TREBALL FI DE GRAU

Grau en Enginyeria de l'Energia

**OPTIMITZACIÓ DE LA OPERACIÓ DE XARXES DE
DISTRIBUCIÓ AMB PENETRACIÓ DE RENOVABLES**



Memòria

Autor: Núria Franco Emiliano
Director: Eduard Bullich Massague
Departament Enginyeria Elèctrica
Convocatòria: Gener 2022

Resum

Aquest treball desenvolupa un programa informàtic a partir dels Softwares GAMS i MATLAB per aconseguir determinar l'òptim global de diversos fluxos de potència creats a una xarxa de distribució radial de mitja tensió connectada a la xarxa general.

Pel fet que el problema a estudiar conté equacions no lineals, per tal d'aconseguir una solució òptima global s'aplica una programació de con de segon ordre enter mixt la qual garanteix aconseguir la solució desitjada per a cada cas d'estudi. També s'ha de tenir en compte que la xarxa de distribució és operada a partir de dos sistemes de generació interns, un fotovoltaic i un altre de dièsel, però també es permet la connexió amb la xarxa externa per tal de comprar energia i d'aquesta manera garantir el correcte subministrament a les diferents càrregues del sistema, tot i que no és possible la bidireccionalitat en el flux de potència el que impedeix la venda d'excedents energètics produïts pels sistemes de generació de la mateixa xarxa estudiada.

En conseqüència, l'objectiu principal del treball és la creació d'un programa que minimitza els mínims costos d'operació i la màxima eficiència de cada cas d'estudi a partir d'unes dades inicials, les quals inclouen les demandes de cada node de la xarxa. A més, pel fet que no és possible garantir trobar la solució òptima del problema inicial, és a dir a partir de les equacions i restriccions no relaxades, el treball també ofereix un nou model per determinar la solució òptima que compleixi la relaxació imposada per linealitzar el problema.

Els dos primers casos d'estudi fan operar la xarxa a partir d'una generació fotovoltaica i dièsel però mantenint uns nivells de producció solar inferiors a la demanda general del sistema. En canvi, el tercer cas fa operar el sistema a partir d'una generació solar superior en alguns casos a la demanda del sistema, cosa que permetrà visualitzar el segon algoritme implementat. Per últim es torna a crear un escenari al tercer, però introduint un sistema d'emmagatzematge el qual permetrà crear un sistema més independent i amb uns costos d'operació menors.

Resumen

Este trabajo desarrolla un programa informático a partir de los Softwares GAMS y MATLAB para conseguir determinar el óptimo global de varios flujos de potencia creados en una red de distribución radial de media tensión conectada a la red general.

Debido que el problema a estudiar cuenta ecuaciones no lineales, para conseguir una solución óptima global se aplica una programación de cono de segundo orden entero mixto la cual garantiza conseguir la solución deseada para cada caso de estudio. También se tiene que tener en cuenta que la red de distribución es operada a partir de dos sistemas de generación internos, un fotovoltaico y otro de diésel, pero también se permite la conexión con la red externa para comprar energía y de este modo garantizar el correcto suministro a las diferentes cargas del sistema, a pesar de que no se posible la bidireccionalidad en el flujo de potencia el que impide la abanica de excedentes energético producidos por los sistemas de generación de la propia red estudiada.

Consecuentemente, el objetivo principal del trabajo es la creación de un programa que minimiza los mínimos costes de operación y la máxima eficiencia de cada caso de estudio a partir de unos datos iniciales, las cuales incluyen las demandas de cada nodo de la red. Además, debido que no se posible garantizar encontrar la solución óptima del problema inicial, es decir a partir de las ecuaciones y restricciones no relajadas, el trabajo también ofrece un nuevo modelo para determinar la solución óptima que cumpla la relajación impuesta por linealizar el problema. Los dos primeros casos de estudio hacen operar la red a partir de una generación fotovoltaica y diésel pero manteniendo unos niveles de producción solar inferiores a la demanda general del sistema. en cambio, el tercer caso hace operar el sistema a partir de una generación solar superior en algunos casos a la demanda del sistema, el que permitirá visualizar el segundo algoritmo implementado.

Por último, se vuelve a crear un escenario al tercero, pero introduciendo un sistema de almacenamiento el cual permitirá crear un sistema más independiente y con unos costes de operación menores.

Abstract

This work develops a computer program based on GAMS and MATLAB softwares to determine the global optimum of various power flows created in a medium voltage radial distribution network connected to the general network.

Because the problem to be studied has non-linear equations, to achieve a global optimal solution a mixed integer second-order cone programming is applied which guarantees to achieve the desired solution for each case study. It must also be taken into account that the distribution network is operated from two internal generation systems, one photovoltaic and the other diesel, but connection with the external network is also allowed to buy energy and thus guarantee the correct supply to the different loads of the system, despite the fact that bidirectionality in the power flow is not possible, which prevents the fan of energy surpluses produced by the generation systems of the studied network itself.

Consequently, the main objective of the work is the creation of a program that minimizes the minimum operating costs and the maximum efficiency of each case study from some initial data, which includes the demands of each node of the network. In addition, since it is not possible to guarantee to find the optimal solution of the initial problem, that is, from the non-relaxed equations and restrictions, the work also offers a new model to determine the optimal solution that complies with the relaxation imposed by linearizing the problem.

The first two case studies operate the grid from photovoltaic and diesel generation but maintaining levels of solar production lower than the general demand of the system. On the other hand, the third case makes the system operate from a solar generation superior in some cases to the demand of the system, which will allow the visualization of the second algorithm implemented. Finally, a third-party scenario is created again, but by introducing a storage system which will allow the creation of a more independent system and with lower operating costs.

Índex

RESUM	I
RESUMEN	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.II
ABSTRACT	III
1. INTRODUCCIÓ	1
1.1. Organització del treball	1
1.2. Objectius principals i abast del treball	2
2. ESTAT DE L'ART	4
2.1. Estat actual del sistema elèctric espanyol	4
2.2. Models d'optimització.....	5
2.2.1. Problemes linelas.....	6
2.2.2. Problemes no linelas	6
2.3. Reptes i justificació del treball	¡Error! Marcador no definido.
3. SISTEMA DE CONTROL D'UN FLUX DE POTÈNCIA	9
3.1. Estructura del sistema de control	9
3.2. Sistemes de generació d'energia elèctrica	13
3.2.1. Generació fotovoltaica	13
3.2.2. Generació dièsel	14
3.3. Sistemes d'emmagatzematge	16
4. MODEL D'OPTIMITZACIÓ D'UN FLUX DE POTÈNCIA	19
4.1. Equacions OPF	19
4.2. Restriccions OPF	20
4.3. Convexificació OPF	¡Error! Marcador no definido.
4.4. Creació de la funció objectiu	22
4.4.1. Generació fotovoltaica	23
4.4.2. Generació dièsel	23
4.4.3. Compra a la xarxa externa.....	24
4.4.4. Pèrdues energètiques	25
4.4.5. Funció objectiu	25
5. APLICACIÓ DEL MODEL OPTIMITZACIÓ	26
5.1. Paràmetres de la xarxa de distribució.....	26
5.2. Paràmetres de la xarxa exterior	28
5.3. Paràmetres de la generació fotovoltaica	32

5.4. Paràmetres de la generació diesel	34
5.5. Paràmetres del sistema d'emmagatzematge.....	37
5.6. Paràmetres de la demanda energètica.....	38
6. RESULTATS	43
6.1. Cas d'estudi 1.....	43
6.2. Cas d'estudi 2.....	47
6.3. Cas d'estudi 3.....	50
6.4. Cas d'estudi 4.....	55
7. ANÀLISIS DE L'IMPACTE AMBIENTAL	60
CONCLUSIONS	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.61
TREBALLS FUTURS	62
PRESSUPOST	63
BIBLIOGRAFIA	64

1. Introducció

1.1. Organització del treball

El treball realitzat estudia el comportament d'una xarxa de distribució aèria de trenta-tres nodes amb una demanda i generació coneguda, la qual està formada a partir de dos tipus de sistemes, un fotovoltaic i l'altre dièsel els quals funcionen conjuntament amb un sistema d'emmagatzematge el qual permet al sistema ser més autosuficient, robust davant de possibles fallades i ajuda a prevenir sobrecàrregues. Una altra dada a tenir en compte és el fet que el sistema només està pensat per un flux de potència unidireccional, el qual sempre va dirigit des de la xarxa de transport fins a la de distribució i, conseqüentment el sistema intern no pot generar molts excedents d'energia a causa del fet que es donaria una sobrecàrrega. Tot i això, el sistema sí que està connectat a la xarxa d'alta tensió habilitant la possibilitat de comprar energia quan el sistema intern no és capaç de produir l'energia necessària per abastir la totalitat de la demanda.

En aquest cas, el treball es divideix en nou capítols diferents els quals mostraran la base teòrica del model utilitzat, la realització del treball, els resultats obtinguts, les conclusions, el pressupost contemplat per la seva realització, l'estudi ambiental i finalment les possibles millores que podrien ser aplicades per a realitzar futurs treballs.

Al primer capítol es fa una breu introducció del treball realitzat i es mostra l'estructura que es seguirà per tal de desenvolupar-lo, aconseguir els resultats esperats, satisfer els objectius principals a i l'abast del treball realitzat. A continuació, es troba l'estat de l'art del sistema estudiat el qual permet determinar la situació actual d'aquest tipus de xarxes i les mesures preses per tal de millorar-lo. També es fa un breu resum sobre els sistemes fotovoltaics utilitzats actualment per subministrar energia elèctrica a les xarxes de distribució de mitja i baixa tensió, així com les diverses restriccions per poder connectar-se a aquestes de manera segura. Per últim es presenten els diferents models d'optimització, descrivint el model emprat en aquest treball.

El tercer apartat mostra l'esquema del sistema de la xarxa de distribució de mitja tensió a estudiar, juntament amb les diverses equacions, paràmetres, variables i sets que permetran formular el software d'optimització. En aquest cas, pel fet que el sistema està constituït a partir de sistemes d'emmagatzematge i dos sistemes de generació, un de fotovoltaic i un de dièsel és necessari modelar aquests tres sistemes per tal d'obtenir els resultats esperats de cada cas d'estudi.

A continuació es mostra les equacions finals utilitzades al software GAMS, així com la funció objectiu i les diverses restriccions que permeten modelar el sistema tal com es vol estudiar. En aquest cas, serà necessari introduir equacions que no permetin un flux de potència bidireccional a la xarxa i variar les equacions obtingudes en el capítol anterior per tal de convertir el problema original en convex i, d'aquesta manera aconseguir una solució fiable i correcte.

La cinquena secció del treball mostra les dades numèriques introduïdes al programa MATLAB per tal de modelar el sistema a estudiar. Com en el cas del tercer capítol s'ha dividit aquesta secció en diferents apartats, un per cada element del sistema a dimensionar. En primer lloc, es descriuen els paràmetres de la xarxa de transport connectada al sistema de distribució,

seguidament es modelen els sistemes de generació, tant renovable com no renovable, seguit pel sistema d'emmagatzematge d'energia el qual està constituït per diverses bateries i, finalment es mostra la demanda energètica associada a cada node de la xarxa.

Un cop descrit tot el sistema, es duen a terme diverses simulacions al capítol sis executades a partir del programa MATLAB i GAMS per tal de veure l'evolució de la xarxa creada en funció de la generació interna. Aquest apartat permet observar el funcionament intern del sistema mantenint estable la demanda energètica del sistema en tot moment.

El setè capítol mostra les conclusions obtingudes a partir de la realització del treball, seguides per projectes futurs pensats pel treball els quals inclouen possibles modificacions per tal d'aconseguir un model més realista, el pressupost realitzat i, per acabar l'estudi ambiental.

1.2. Objectius principals i abastiment del treball

La realització del treball es fa amb l'objectiu principal de saber modelar una xarxa de distribució de mitja tensió aèria a partir d'un únic software que permeti modelar posteriorment qualsevol cas d'estudi. D'aquesta manera és possible realitzar l'estudi de qualsevol mena de model i obtenir resultats realistes sobre el seu funcionament intern a partir de les variables introduïdes.

Per a fer-ho, es crea la xarxa de distribució i es determinen els perfils de demanda activa i reactiva de cada node, així com els perfils de generació tan pel que fa a les bombes dièsel com als sistemes fotovoltaics i les condicions inicials del sistema de bateries. Finalment, s'escriuen les equacions del flux de potència unidireccional del sistema tenint en compte els anteriors sistemes exposats i les restriccions de cada un d'ells. En aquest cas el programa d'optimització es realitza a partir del software GAMS, el qual recull totes les restriccions i equacions del model. En canvi, els valors numèrics dels paràmetres s'introdueixen a partir del programa MATLAB el qual transfereix la informació al GAMS per tal de començar les simulacions. Finalment, els resultats calculats pel GAMS són traslladats un altre cop al MATLAB a partir de les comandes adients per tal de visualitzar els resultats en un format més fàcil de tractar, ja que d'aquesta manera és més senzill realitzar un tractament dels resultats finals obtinguts. En el procés de creació dels diferents paràmetres, com ara la demanda de cada node, també s'ha utilitzat el programa EXEL per tal de facilitar la introducció d'aquestes al programa MATLAB.

El programa està pensat per poder modelar cada simulació de manera diferent, és a dir, permet la variació de tots els paràmetres del sistema, tot i que en aquest cas els perfils de demanda es mantenen constants perquè sigui més senzill poder comparar els diferents casos estudiats entre si. Dit això, és evident que el treball se centra a analitzar el comportament del sistema a partir de la variació de la producció d'energia per part del sistema fotovoltaic i dièsel, ja que el sistema d'emmagatzematge roman constant així com el seu estat de càrrega inicial. Per consegüent, els resultats obtinguts mostren l'òptim flux de potència en format multi-period de la xarxa de distribució.

A més, degut que la funció objectiu del sistema esta pensada per minimitzar no només les pèrdues energètiques sinó també els mínims costos d'operació, els quals també romanen constants per a tots els casos d'estudi, els diferents resultats obtinguts variaran en funció de la generació produïda per cada tipus de sistema instal·lat, de manera que serà possible detectar quin sistema és més viable econòmicament durant les hores punta i vall.

Aquesta última restricció també permetrà observar en quins casos és més favorable retallar part de la generació fotovoltaica el que podria ser utilitzat per implementar noves mesures per tal de minimitzar aquest succés i d'aquesta manera evitar perdre generació fotovoltaica. Tot i això, s'ha de tenir en compte que això no es produirà a no ser que la generació total sigui superior a la demanda del sistema i el sistema de bateries no es trobi a la màxima capacitat, ja que les restriccions de la funció objectiu situen la producció solar per sobre de la resta degut que és el mètode més econòmic.

Per últim, s'ha de tenir en compte que el model d'optimització utilitzat segueix l'estructura d'un SOCP-OPF i, per tant, s'hauran de relaxar algunes de les equacions del sistema per tal de convertir-lo en convex i, d'aquesta manera garantir obtenir l'òptim global com a solució. Tot i això, s'ha de tenir en compte que serà essencial implementar al programa inicial un algoritme que garanteixi trobar la solució global que satisfaci totes les equacions del flux de potència del sistema, ja que és possible que el problema no sempre sigui factible per al model relaxat.

2. Estat de l'art

2.1. Estat actual del sistema elèctric espanyol

El sistema elèctric espanyol actual prové d'una estructura centralitzada la qual estava constituïda a partir de grans centrals amb una elevada capacitat per generar energia elèctrica, convertint-la en una xarxa formada per un baix nombre de plantes operades principalment a partir de combustibles fòssils. Això implica obtenir una xarxa poc robusta per dos motius principals, el primer és el fet que el sistema depèn en gran manera dels preus dels fixats pels combustibles fòssils a utilitzar els quals provenen de fora i els preus són variables perquè poden augmentar dràsticament i produir que el cost total de producció sigui molt elevat. En segon lloc, el sistema no té una capacitat de reacció elevada, ja que si es produeix un problema en alguna de les centrals la xarxa sofrirà aturades energètiques pel fet que la demanda serà superior a la producció i pel fet que tampoc es contempla la possibilitat d'un sistema de bateries el sistema no seria capaç de cobrir la totalitat de la demanda.

En conseqüència, el sistema elèctric s'ha desenvolupat per tal de ser més robust i independent dels preus fixats exteriorment pels combustibles fòssils, creant un nou sistema descentralitzat creat a partir d'una extensa xarxa de centrals les quals ja no acostumen a produir potències tan elevades.

Com s'ha comentat anteriorment, les xarxes de distribució estan evolucionant cap a sistemes amb generació distribuïda formada a partir de petites centrals renovables i no renovables, les quals acostumen a disposar d'altres sistemes d'emmagatzematge d'energia. Tot i això, és necessari tenir en compte que la seva instal·lació presenta dificultats, ja que ha de complir diverses normatives per tal de no afectar l'estabilitat del sistema elèctric general.

Evidentment, aquests requeriments han anat evolucionant amb l'increment de la introducció de tecnologies de generació renovables, les quals han augmentat considerablement dins del mix energètic general. En un principi, aquests requeriments no eren gaire exhaustius i estaven pensats per assegurar que aquestes petites centrals complissin les mateixes proteccions requerides a les càrregues connectades a aquests tipus de sistemes, és a dir, que comptessin amb proteccions pels usuaris, els equips elèctrics utilitzats a la instal·lació i es fes un seguiment constant dels límits tant dels harmònics absorbits o injectats a la xarxa com de la potència reactiva intercanviada entre aquest sistema i la xarxa a la qual estava connectat. Conseqüentment, el sistema de control d'aquestes primeres centrals de baixa potència consistien en dispositius que asseguraven la injecció de la màxima potència activa que la petita central podia generar en un instant de temps i l'absorció o injecció de la mínima potència reactiva permesa, ja que d'aquesta manera s'aconsegueix una reducció de les pèrdues energètiques i reduir la mida del sistema de conversió d'energia [1].

A mesura que augmentava no només el nombre d'instal·lacions connectades sinó també les seves potències nominals es van crear petites regions autosuficients les quals podien abastir les demandes de les càrregues connectades encara que els nodes posteriors es trobessin fora de servei, ja que la producció energètica era suficient durant un cert període de temps. Això va generar nous inconvenients sobre la seguretat d'aquest tipus de sistemes i, conseqüentment es van desenvolupar nous esquemes anti-aïllament, els quals asseguraven que aquestes petites centrals es desconnectarien del sistema central sempre que es detectés un funcionament

anormal aconseguint d'aquesta manera una xarxa desenergitzada fins que es pogués restablir la connexió [2].

Tot i això, aquests models de generació presenten certs avantatges pel que fa a la regulació del voltatge a la xarxa de distribució, modificant els antics sistemes de control de potència reactiva, cosa que permet controlar el voltatge de cada node de la xarxa a partir dels convertidors de potència distribuïts [3]. A més, pel que fa a les centrals solars d'alta potència connectades a les xarxes de transport el seu funcionament intern també permet regular la freqüència, el que ha portat que alguns països utilitzin aquesta metodologia per controlar-la, de manera que la central actua com un generador síncron, disminuint o augmentant la seva potència interna per aconseguir la freqüència desitjada. Això es deu que aquest tipus de sistemes permeten alliberar o absorbir energia de la xarxa i emmagatzemar-la com energia cinètica de rotació als rotors dels diferents motors de la central. A més, les respostes de les màquines síncrones presenten formes més esmoreïdes el que ajuda a reduir les possibles oscil·lacions de la freqüència, el que és possible gràcies als sistemes bobinats i la fricció entre les peces mecàniques del mateix motor de la central. Finalment, aquests sistemes són capaços de suportar corrents d'intensitats cinc vegades superiors al corrent nominal de la instal·lació, cosa que permet crear sistemes més robusts davant de possibles curtcircuits.

Dit això és evident que les grans centrals operades a partir de recursos renovables que utilitzen motors síncrons per a generar energia, com ara les centrals hidràuliques o solars de concentració, tenen unes proteccions i sistemes de control similars a la resta de centrals no renovables, amb la particularitat essencial que aquestes tenen una disponibilitat de generació limitada en funció de les condicions climàtiques externes i necessiten un disseny especial per controlar els convertidors electrònics de potència.

En canvi, les centrals de gernació renovables que no compten amb un generador síncron requereixen d'un sistema de sincronització que permeti a l'operador de la xarxa extreure informació sobre el punt de connexió entre el convertidor de la central i la xarxa externa i, d'aquesta manera obtenir dades de referència com ara el voltatge o la freqüència. Tot i això, s'ha de tenir en compte que aquest tipus de dispositius presenten certs errors induïts a causa del mateix soroll del sistema, les variacions entre la freqüència o voltatge prefixats i els reals o fallades en algun punt de la xarxa que impliquin caigudes de tensió a tot el sistema. A més, aquests convertidors de potència, al no estar formats per rotors ni bobines, no tenen la possibilitat d'autoregular la freqüència, dificultant encara més els seus sistemes de control i, pel fet que els convertidors de potència utilitzats en aquests tipus d'instal·lacions no poden suportar intensitats superiors a les nominals durant un període de temps superior als segons, aquest tipus de generació necessita comptar amb sistemes de seguretat addicionals contra possibles curtcircuits del sistema.

2.2. Models d'optimització

Els models d'optimització són utilitzats a molts àmbits quan es desitja trobar el màxim o mínim d'una funció objectiu concreta i l'usuari coneix l'impacte de cada un dels paràmetres del problema a resoldre. En el cas de l'estudi realitzat a les xarxes de transport i distribució d'energia, aquestes models són regulats per determinar el flux de potència òptim de la xarxa sota unes condicions inicials donades, les quals poden variar en el temps en funció del cas d'estudi.

Una de les particularitats essencials en aquests models de corrent altern és el fet que es tracta d'un problema d'optimització de gran escala no lineal i no convex, el que implica la necessitat d'utilitzar softwares potents els quals sovint no poden garantir trobar una solució al problema introduït i, de fer-ho no és possible assegurar que aquesta sigui l'òptim global, ja que podria donar-se el cas que el programa trobés una solució al problema, però es tractés d'un òptim local, el que implicaria que la resposta donada, tot i ser factible no és la millor [4].

Per aquest motiu, s'ha generat diverses variants del problema a partir de relaxacions de les equacions i restriccions, linealitzacions per parts, relaxacions lagrangianes i mètodes de punts interiors entre d'altres.

Conseqüentment, no hi ha una única manera d'abordar el problema, ja que pot ser resolt a partir de diverses tècniques deterministes, i cada una d'elles disposa d'unes característiques diferents de la resta, com ara la rapidesa per obtenir el resultat, l'eficiència o la pressió donada [5]. Tot i això, la principal classificació entre els diferents problemes es dona en funció de si el model comporta equacions o restriccions lineals o no lineals. La taula 1 mostra els principals models actuals en funció de si són lineals o no. Tot i això, s'ha de tenir en compte que els sistemes no lineals no sempre impliquen que es tracti d'un problema no convex, el que fa possible determinar l'òptim global.

La taula mostra la classificació dels diferents problemes en funció de si són lineals o no.

Lineal	No lineal
Programació lineal	Programació no lineal
Programació lineal entera	Programació quadràtica
Programació entera mixta	Programa restringit quadràticament
Programació lineal entera mixta	Programa de con de segon ordre
	Programa de con de segon ordre enter mixt

Taula 1. Classificació dels models d'optimització.

2.2.1. Problemes lineals

La programació lineal es dona quan les variables del sistema d'equacions està subjecte a igualtats lineals i restriccions en forma de desigualtats lineals. En conseqüència la seva resolució és molt senzilla, aconseguint temps d'optimització molt baixos. A més, l'avantatge principal d'aquest tipus de problemes és el fet que és possible garantir la convexificació, ja que és possible satisfer totes les equacions lineals imposades.

A continuació es troben els problemes programació lineal entera, on totes les variables han de prendre valors enters i, per tant, només tenen sentit aquelles solucions de la regió factible que siguin enteres. En canvi, si aquestes variables poden ser discretes es considera un problema de programació entera mixta. Finalment, es troben els problemes de programació lineal entera mixta on les variables obtingudes poden ser contínues o discretes.

2.2.2. Problemes no lineals

Els problemes no lineals es donen quan una o més de les equacions o restriccions imposades pel problema no és lineal i, conseqüentment no és possible garantir que es compleixin totes les equacions donades. En conseqüència aquest tipus de problemes no poden garantir la convexificació i a més impliquen temps de resolució elevats, ja que és necessari treballar a partir d'algoritmes més elaborats. Per aquests motius, actualment s'estan creant diversos

programes que permetin linealitzar aquest tipus de problemes per tal d'aconseguir determinar l'òptim global de cada cas d'estudi sense obtenir un resultat allunyat del resultat real.

La programació quadràtica és una de les més senzilles de resoldre dins dels models no lineals pel fet que la seva estructura està constituïda a partir d'equacions i restriccions lineals, però la funció objectiu és un polinomi de segon ordre, el que converteix tot el problema en no lineal. A continuació es troba el programa restringit quadràticament el qual adopta la mateixa estructura que la programació anterior, però s'afegeix una equació o restricció amb un terme de segon ordre. En canvi, els programes de con de segon ordre es donen quan una de les equacions del problema adopta l'estructura d'un con de Lorentz, i finalment s'anomena un programa de con de segon ordre enter mixt quan aquest model adopta valors discrets i continus per les diferents variables trobades.

Cal tenir en compte que el càlcul relativament simple dels sistemes de fluxos de potència òptims és possible a causa de la creixent utilització de diferents tècniques de solució determinístiques, una de les quals (programa de con de segon ordre enter mixt) permet crear una regió convexa per trobar l'òptim global del problema estudiat a partir en forma de con de segon ordre. Per consegüent, aquest treball opera a partir d'un programa de con de segon ordre enter mixt, el qual assegurarà obtenir l'òptim global de cada cas estudiat.

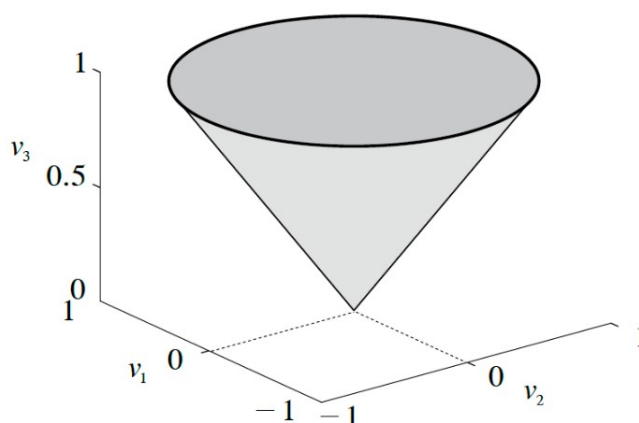


Figura 1. Estructura d'un con de segon ordre [6].

2.3. Reptes i justificació del treball

Com s'ha comentat anteriorment, actualment s'està donant un creixement en la implementació de xarxes de mitja tensió amb generació distribuïda, el que implica la creació de models de càlcul específics per controlar el seu correcte funcionament. Tot i això, s'ha de tenir en compte que aquests sistemes també han d'estar dissenyats per poder controlar correctament la producció d'energia de forma variable, perquè aquestes xarxes acostumen a operar a partir de sistemes renovables, els quals no poden garantir un consum estable al llarg del dia.

Per aquest motiu, és necessari crear models que permetin estudiar el funcionament de xarxes elèctriques reals operades a partir de sistemes renovables descentralitzats, ja que en aquests casos cal determinar la potència generada a partir de les fonts renovables per cada període de temps, pel fet que segurament serà necessari instal·lar un altre tipus de sistema de generació

que actuï com a font base i, consegüentment estarà alimentada a partir d'un combustible no renovable.

Per tant, el treball crea i estudia un programa per estudiar el comportament d'una xarxa de mitja tensió amb una demanda fixada per cada node i és operada a partir d'un sistema fotovoltaic. A més, a causa del fet que aquest sistema, al contrari que l'eòlic, només produeix energia durant un cert període de temps, s'inclou un sistema dièsel per tal de crear una configuració més independent de la xarxa elèctrica exterior, tot i que també es decideix connectar la xarxa estudiada al sistema extern per tal de poder comprar part de l'energia necessària i d'aquesta manera no sobredimensionar el sistema de producció intern.

Per últim, el programa inclou un sistema de bateries el qual permet emmagatzemar part de l'energia excedent produïda pel sistema intern o comparada a la xarxa elèctrica exterior quan el seu preu sigui inferior al de la mateixa producció dins del sistema intern. Això permetrà aconseguir uns costos d'operació menors i més renovable pel fet que serà possible produir més energia a partir del sistema fotovoltaic sense retallar part de la seva generació, el que acostuma a succeir durant les hores de màxima producció solar, ja que les demandes acostumen a ser menors que la producció en aquests períodes de temps.

3. Sistema de control d'un flux de potència

Aquest capítol mostra l'estructura i les equacions d'un model de control per a una xarxa àeria de distribució radial operada a mitja tensió. En aquest cas, pel fet que els casos d'estudi són operats a partir d'un sistema d'emmagatzematge i dos sistemes independents de generació d'energia elèctrica, és necessari definir unes equacions i restriccions per cada un dels sistemes esmentats. S'ha de tenir en compte que en aquest cas no es tenen en compte les afectacions produïdes per la variació de la freqüència perquè el treball fa un anàlisi estàtic del sistema.

3.1. Estructura del sistema de control

Les xarxes de distribució d'energia elèctrica estan classificades en quatre grups diferents en funció de les formes adoptades per cada sistema, les seves característiques de funcionament i sistemes de seguretat. En aquest treball s'utilitzarà una xarxa de 33 nodes d'estructura Radial la qual està representada a la figura 2. Aquest tipus de sistemes es donen quan la geometria de la xarxa crea diverses branques amb diferents càrregues aplicades les quals poden estar constituïdes per diferents habitatges, indústries o comerços entre altres sistemes.

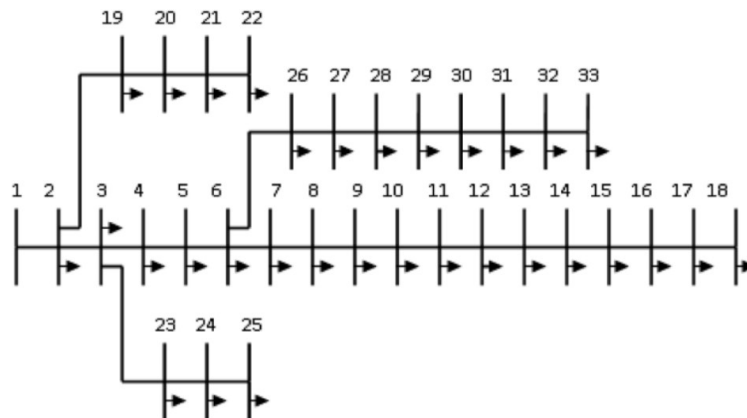


Figura 2. Estructura d'una xarxa de mitja tensió radial [7].

Aquest tipus de sistemes són dels més simples i econòmics d'implementar, ja que només permeten una sola direcció per transmetre el flux de potència elèctrica de la xarxa, la qual és nodes avall. Tot i això, aquest tipus de sistemes no són gaire robustos, pel fet que si algun dels sistemes de generació o d'emmagatzematge d'energia fallessin diverses càrregues quedarien sense poder abastir el consum fins que se solucionés l'error, a més, si algun dels busos es desconnectés per algun motiu, la resta de busos connectats a la mateixa branca també quedarien desconnectats del sistema [8].

Tot i això, aquest tipus de sistema serà utilitzat en aquest cas d'estudi perquè permet aplicar les equacions del flux de potència del sistema d'una manera més senzilla, pel fet que és possible suposar dues relaxacions dins del problema inicial i obtenir resultats exactes i sense límits superiors a les càrregues connectades a la xarxa [9].

Com s'ha comentat anteriorment, actualment les xarxes elèctriques de distribució estan evolucionant cap a nous sistemes operats a partir de petites centrals distribuïdes, les quals estan formades a partir de sistemes de generació renovables o no renovables juntament amb sistemes d'emmagatzematge d'energia. Tot i això, aquests nous sistemes poden implicar una generació

d'energia superior a la demanda total de les càrregues aplicades de la xarxa de distribució de mitja tensió el que genera un flux de potència en sentit contrari al planificat, és a dir en direcció a la xarxa de transport d'alta tensió. Evidentment, aquest tipus de fenòmens no estan contemplats dins dels marcs de les xarxes actuals, ja que aquestes estan pensades per assumir un flux de potència unidireccional des de la xarxa de transport fins a la de distribució, el que comporta la necessitat de canviar el disseny i els models de control de l'actual sistema per tal que estigui dissenyat per actuar correctament durant períodes de generació i càrrega punta.

Segons l'Estudi sobre la integració efectiva dels Recursos Energètics Distribuïts per dotar de flexibilitat al sistema elèctric publicat per la Unió Europea l'any 2015 [10], per a fer-ho és necessari ajustar els paràmetres de protecció, la composició dels dispositius de protecció i els conceptes de descàrrega automàtica. A més, el flux d'energia inversa i fluctuant requereix operacions extensives del sistema per part dels operadors de la xarxa de distribució de mitja tensió per tal de controlar els límits dels seus actius i regular el flux d'energia total del sistema.

És per això, que el sistema estudiat estarà connectat a la xarxa de transport general, però només permetrà un flux de potència unidireccional des de la xarxa d'alta tensió fins a la de mitja tensió.

A més, també s'ha de tenir en compte que els sistemes elèctrics de distribució poden estar dissenyats de manera aèria o subterrània, en funció de les necessitats de cada cas d'estudi. Les línies aèries són aquelles on la instal·lació elèctrica està situada a l'exterior i, conseqüentment es veu exposada a les condicions meteorològiques ambientals. Pel fet que aquest tipus de sistemes són visibles, ocupen un gran espai terrestre, generen camps magnètics i elèctrics que restringeixen l'ús del terreny prop d'aquestes línies i soroll originat a causa de l'efecte corona, s'acostumen a utilitzar principalment a les línies d'alta tensió, és a sistemes de transport de grans potències d'energia el que permet als conductors una millor evacuació de la calor dels conductors produïda a causa de les diferents pèrdues energètiques donades durant el procés de transport. Tot i això, aquest tipus de configuracions poden donar-se també a sistemes operats amb mitja tensió amb longituds inferiors, d'entre 10 i 20 km a les xarxes de distribució de poblacions amb densitats de població baixes, pel fet que els seus efectes negatius no impliquen un gran impacte negatiu sobre la població i el sistema pot aprofitar els avantatges d'aquests tipus de configuracions, aconseguint un model més econòmic i robust davant de possibles sobrecàrregues.

Tot i això, hi ha poblacions on no és possible utilitzar aquest tipus de sistemes perquè hi ha una alta densitat de població, obligant a crear una xarxa de distribució soterrada. Aquests tipus de sistemes tenen els avantatges de disposar d'una millor estètica i seguretat, un camp magnètic nul a la superfície del terreny, un manteniment més fàcil, ja que han estat construïdes per facilitar-lo, tot i que també acostuma a implicar molèsties pels usuaris. A més, pel fet que els conductors tenen seccions més reduïdes s'aconsegueixen reactàncies inductives inferiors, obtenint caigudes de tensió menors.

No obstant això, aquests sistemes també presenten certs desavantatges com ara la dificultat d'evacuar la calor produïda per l'efecte Joule dels conductors i el causat pel camp elèctric originat durant el transport d'electricitat d'un node a un altre, el qual augmenta com més gran sigui el voltatge de la línia. Això implica la necessitat d'introduir aïllaments més gruixuts als sistemes soterrats, el que es tradueix en un cost econòmic final significativament més gran.

En aquest cas, per tal de simplificar les equacions a introduir al sistema s'ha escollit estudiar un sistema de distribució de mitja tensió aeri, pel fet que d'aquesta manera no és necessari contemplar la capacitat de la línia estudiada. A continuació es mostra els esquemes elèctrics d'una línia aèria (primer esquema) i una de soterrada (segon esquema).

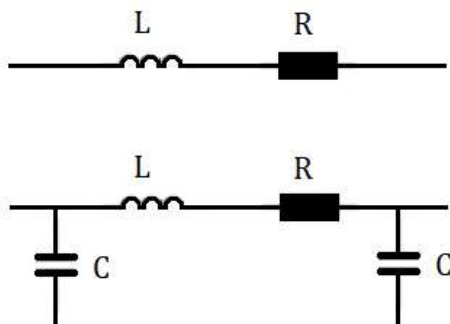


Figura 3. Esquema d'un sistema aeri i subterrani.

Com es pot comprovar, en aquest cas només s'estudiaran els efectes de la resistència i la inductància de la línia, eliminant la capacitat per aconseguir un sistema d'equacions més simplificat.

La figura 4 mostra el diagrama del sistema estudiat amb les diverses notacions de cada paràmetre i variable utilitzat. Com es pot apreciar, es contempla una única direcció en el flux de potència del sistema.

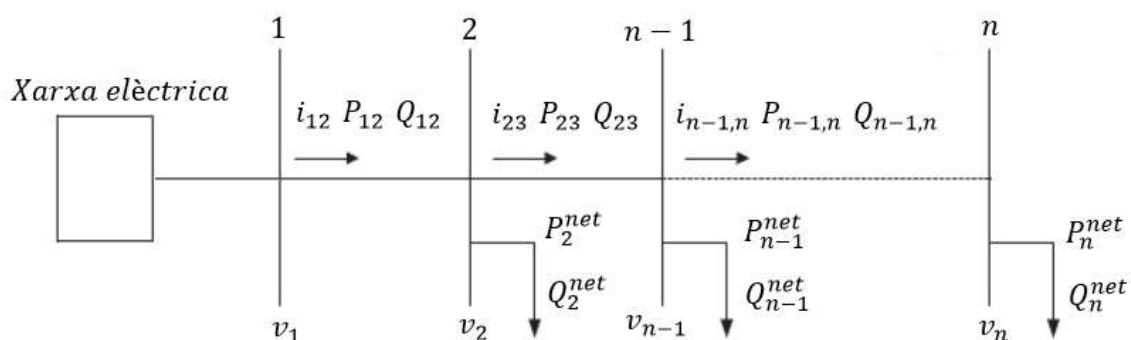


Figura 4. Diagrama de la xarxa estudiada.

La taula 2 mostra les notacions seguides per implementar les equacions el flux de potència de la xarxa al programa utilitzat per resoldre l'optimització proposada. En aquest cas, el programa emprat distingeix entre sets, variables i paràmetres per definir els diferents casos d'estudi, les quals es mostren a continuació.

Set	Descripció
N	Conjunt de nodes de la xarxa
l	Conjunt de línies de la xarxa
U	Conjunt de nodes anteriors connectats a $n \ n \in N, (n, m) \in l$
D	Conjunt de nodes posteriors connectats a $n \ m \in N, (n, m) \in l$
t	Temps

Taula 2. Sets introduïts al programa.

En aquest cas s'ha escollit identificar els nodes anteriors amb la nomenclatura n i els posteriors amb la m .

Variable	Descripció
P_n^g	Potència activa generada al node $n \in N$
Q_n^g	Potència reactiva generada al node $n \in N$
P_{nm}	Potència activa que va des del node $n \in N$ fins al $m \in N$, $(n, m) \in l$
Q_{nm}	Potència reactiva que va des del node $n \in N$ fins al $m \in N$, $(n, m) \in l$
v_n	Voltatge al node $n \in N$
i_{nm}	Corrent des del node n fins al m

Taula 3. Variables principals del programa.

Paràmetre	Descripció
P_n^{net}	Potència activa consumida al node $n \in N$
Q_n^{net}	Potència reactiva consumida al node $n \in N$
r_{nm}	Resistència de la línia
x_{nm}	Reactància de la línia
u_{slack}	Voltatge del node slack, el qual només és el primer ($n = 1$)

Taula 4. Paràmetres principals del programa.

A part d'aquests valors i paràmetres s'ha de tenir en compte les següents funcions, les quals mostren, en primer lloc, la resistència de la línia entre el node n i el m i, en segon lloc, la potència aparent, la qual pot ser obtinguda a partir de les dues igualtats.

$$\underline{z}_{nm} = r_{nm} + i \cdot x_{nm} \quad (\text{Eq. 2.1})$$

$$\underline{S}_{nm} = P_{nm} + i \cdot Q_{nm} = \underline{V}_n \cdot \underline{I}_{nm}^* \quad (\text{Eq. 2.2})$$

A partir d'aquestes notacions es desenvolupen les diverses equacions a seguir per resoldre el problema del flux de potència del treball. En primer lloc, s'ha de garantir que el programa compleixi la llei d'Ohm per totes les variables introduïdes al sistema, ja que d'altra manera el resultat obtingut mancaria de sentit. Per tal d'assegurar el correcte seguiment s'aplica la següent fórmula.

$$\underline{V}_n - \underline{V}_m = \underline{I}_{nm} \cdot \underline{z}_{nm}; \forall (n, m) \in l \quad (\text{Eq. 2.3})$$

Sent la \underline{I}_{nm} el corrent que circula per la línia des del node n fins el m i la \underline{z}_{nm} resistència de la línia entre el node n i el m .

Les quatre equacions següents mostren el balanç de potències actives i reactives del sistema les quals es divideixen en dos grups, les primeres permeten calcular les potències del primer node del sistema, és a dir, del node Slack, i les altres dues determinen les potències de la resta de nodes de la xarxa.

$$P_n^{net} = \sum_{m \in D(n)} P_{nm}; n = 1 \quad (\text{Eq. 2.4})$$

$$Q_n^{net} = \sum_{m \in D(n)} Q_{nm}; n = 1 \quad (\text{Eq. 2.5})$$

$$P_n^{net} = \sum_{m \in U(n)} (P_{nm} - r_{nm} \cdot i_{nm}^2) - \sum_{m \in D(n)} P_{nm}; \forall n \in N - \{1\} \quad (\text{Eq. 2.6})$$

$$Q_n^{net} = \sum_{m \in U(n)} (Q_{nm} - x_{nm} \cdot i_{nm}^2) - \sum_{m \in D(n)} Q_{nm}; \forall n \in N - \{1\} \quad (\text{Eq. 2.7})$$

A més, el sistema també ha de controlar les caigudes de tensió de la xarxa les quals es determinen a partir de l'expressió següent:

$$v_m^2 = v_n^2 - 2(r_{nm} \cdot P_{nm} + x_{nm} \cdot Q_{nm}) + i_{nm}^2(x_{nm} + r_{nm}); \forall n \in N; \forall m \in D(n) \quad (\text{Eq. 2.8})$$

A continuació, es fixa la relació de voltatges i corrents.

$$i_{nm}^2 \cdot v_n^2 = P_{nm} + Q_{nm}; \forall n \in N; \forall m \in D(n) \quad (\text{Eq. 2.9})$$

A partir de les equacions exposades en aquest capítol es crearà el programa principal, el qual també dependrà de variables, paràmetres i equacions de les diferents fonts de generació d'energia elèctrica connectats al sistema i de la demanda de consum. A més, s'ha de tenir en compte que les equacions exposades anteriorment no estan formulades per dependre del temps, però pel fet que el cas d'estudi serà multipèriod aquestes hauran de variar la seva formulació, el que es veurà a capítols posteriors.

Tal com es pot observar, les equacions descrites anteriorment no tenen en compte les possibles pèrdues originades a les línies perquè les seves magnituds són molt inferiors a les operades per la xarxa de distribució.

3.2. Sistemes de generació d'energia elèctrica

En aquest apartat es mostraran els diferents paràmetres, variables i equacions que descriuen cada model de generació d'energia elèctrica connectat a la xarxa. En aquest cas, es consideren dues possibles formes de generació: a partir de petites centrals fotovoltaïques i per generadors dièsel. A més, també es contempla la possibilitat de connectar sistemes d'emmagatzematge d'energia, els quals en aquest cas són bateries, ja que es vol garantir el subministrament elèctric a les diferents càrregues connectades.

S'ha de tenir en compte que aquest capítol només mostrarà les diferents equacions, paràmetres i variables utilitzades per modelar el sistema a estudiar i que, en cap cas es mostraran els valors dels diferents paràmetres, perquè aquests seran presentats a capítols posteriors.

3.2.1. Generació fotovoltaica

Actualment, hi ha diverses formes per produir energia elèctrica a partir de la radiació solar, però pel fet que en aquest treball el sistema de generació està pensat per estar connectat a la xarxa de distribució en comptes de la de transport, no es pot contemplar la idea de generar grans quantitats d'energia pel fet que el sistema estudiat està pensat per suportar potències inferiors a les obtingudes a les xarxes de transport convencionals. Per aquest motiu, s'ha optat per

modelar petits sistemes de generació fotovoltaica operats a partir de plaques solars. Tot i això, s'ha de tenir en compte que els sistemes utilitzats estan modelats per aconseguir energia elèctrica i no tèrmica perquè les demandes energètiques del sistema són totes elèctriques.

Per definir el model de generació a partir dels sistemes fotovoltaics és necessari definir prèviament les equacions que descriuen les restriccions de les potències actives i reactives màximes i mínimes per tal d'implementar-les al software d'optimització.

En primer lloc, la potència activa està restringida per la previsió solar diària i la potència màxima que la planta podrà arribar a generar. Tal com mostra l'equació, la variable depèn del temps, el que succeeix pel fet que el paràmetre d_t^{pv} és multipèriod per tal de simular realment l'evolució del sistema al llarg del dia, ja que d'altra manera el software generaria grans quantitats d'energia en períodes del dia on no hi ha tanta irradiància solar, creant escenaris amb resultats no reals.

$$Pg_{n,t}^{pv} \leq d_t^{pv} \cdot g_t^{pv}; \forall n \in N^{PV}, \forall t \in T \quad (\text{Eq. 2.10})$$

En canvi, la potència reactiva del sistema es regula a partir de la següent funció:

$$-0,35 \cdot Pg_{n,t}^{pv} \leq Qg_{n,t}^{pv} \leq 0,4 \cdot Pg_{n,t}^{pv}; \forall n \in N^{PV}, \forall t \in T \quad (\text{Eq. 2.11})$$

En aquest cas, la potència reactiva està regulada a partir de la comissió reguladora europea 2016/631 [11], la qual estableix les normes a seguir per connectar generadors d'energia elèctrica a la xarxa elèctrica.

Tal com mostren les equacions anteriors, el sistema de generació fotovoltaic no necessita estar definit a partir d'una variable binària perquè aquest sistema no presenta discontinuïtat.

A continuació les taules mostren les variables i paràmetres del sistema fotovoltaic de la xarxa així com les unitats de càrrega al sistema d'optimització.

Variable	Descripció	Unitat
$Pg_{n,t}^{pv}$	Potència activa generada a partir de FV	p.u.
$Qg_{n,t}^{pv}$	Potència reactiva generada a partir de FV	p.u.

Taula 5. Variables del sistema fotovoltaic.

Paràmetre	Descripció	Unitat
d_t^{pv}	Previsió solar diària	p.u.
g_t^{pv}	Potència màxima generada	p.u.

Taula 6. Paràmetres del sistema fotovoltaic.

3.2.2. Generació dièsel

Actualment, la generació d'energia elèctrica a partir de fonts renovables és cada vegada més elevat pel fet que no produeixen gasos d'efecte hivernacle i no depenen de la compra de cap combustible per poder operar, el que suposa uns costos de compra de matèria prima igual a zero. Evidentment, aquests aspectes són atractius, però encara no és possible crear models de xarxes de distribució operades únicament a partir de la generació fotovoltaica. A més, encara que el sistema disposés de sistemes de bateries prou grans per a emmagatzemar l'energia necessària per abastir la demanda total de totes les càrregues connectades a la xarxa, tant el

sistema solar com el de les bateries hauria d'estar molt sobredimensionat, implicant una elevada inversió econòmica la qual podria reduir-se considerablement amb la implementació d'un sistema de generació independent de les condicions climatològiques exteriors.

Això permetria modelar un escenari amb un sistema de bateries amb una capacitat inferior, el que disminuiria el preu d'inversió final i crearia una xarxa més independent del clima exterior, fent-la més robusta.

En conseqüència, el treball descriu un model operat a partir de generació fotovoltaica, la qual s'ha comentat anteriorment, però també a partir d'un sistema de generació no renovable, que en aquest cas es tracta de diversos generadors dièsel. S'ha escollit aquest tipus de sistemes pel fet que, en tractar-se d'una xarxa de distribució i no de transport, les potències de generació han de ser inferiors i, conseqüentment, no és possible implementar grans centrals operades a partir de gas natural, centrals nuclears o de cogeneració.

Tot i això, s'ha de tenir en compte que el sistema donarà prioritat a la utilització de les plantes fotovoltaïques per sobre dels sistemes dièsel pel fet que la funció objectiu és minimitzar els costos de generació i, perquè les centrals solars tenen uns costos de compra associats igual a zero, la seva utilització sempre serà afavorida en comparació amb els sistemes dièsel.

Com en el cas anterior, per tal de descriure el model dièsel del sistema és necessari restringir les diferents potències i els seus límits màxims i mínims per tal d'obtenir resultats realistes en els diferents casos d'estudi posteriors.

$$Pg_{n,t}^{GD} \leq P_{\max,n}^{GD} \cdot Y_{n,t}; \forall n \in N^{GD}, \forall t \in T \quad (\text{Eq. 2.12})$$

$$Pg_{n,t}^{GD} \geq P_{\min,n}^{GD} \cdot Y_{n,t}; \forall n \in N^{GD}, \forall t \in T \quad (\text{Eq. 2.13})$$

$$Qg_{n,t}^{GD} \leq Q_{\max,n}^{GD} \cdot Y_{n,t}; \forall n \in N^{GD}, \forall t \in T \quad (\text{Eq. 2.14})$$

$$Qg_{n,t}^{GD} \geq Q_{\min,n}^{GD} \cdot Y_{n,t}; \forall n \in N^{GD}, \forall t \in T \quad (\text{Eq. 2.15})$$

Com es pot observar de les equacions anteriors, el model depèn d'una variable Y_n comuna per totes les restriccions d'aquest sistema, la qual fa referència a una variable binària que permetrà identificar si la xarxa utilitza o no la generació dièsel per tal de cobrir les diferents demandes de les càrregues connectades, adoptant el valor 0 si no ho fan i 1 en els períodes on sí que es necessiti. Evidentment, al tractar-se d'una variable binària aquesta no tindrà unitats.

Les taules 7, 8 i 9 mostren les diferents variables i paràmetres que defineixen els sistemes de generació de la xarxa a partir de dièsel.

Variable	Descripció	Unitat
$Pg_{n,t}^{GD}$	Potència activa generada a partir del dièsel	p.u.
$Qg_{n,t}^{GD}$	Potència reactiva generada a partir del dièsel	p.u.

Taula 7. Variables del sistema dièsel.

Variable binària	Descripció	Unitat
$Y_{n,t}$	Connexió o desconnexió del sistema dièsel	-

Taula 8. Variables binàries del sistema dièsel.

Paràmetre	Descripció	Unitat
$P_{max_n}^{GD}$	Màxima potència activa generada pel dièsel	p.u.
$P_{min_n}^{GD}$	Mínima potència activa generada pel dièsel	p.u.
$Q_{max_n}^{GD}$	Màxima potència reactiva generada pel dièsel	p.u.
$Q_{min_n}^{GD}$	Mínima potència reactiva generada pel dièsel	p.u.

Taula 9. Paràmetres del sistema dièsel.

3.3. Sistemes d'emmagatzematge

Els sistemes d'emmagatzematge d'energia són cada vegada més utilitzats, no només a les xarxes de distribució, sinó també a les de transport, i adopten diverses tecnologies en funció del tipus d'energia que es vulgui acumular, com per exemple energia tèrmica, química o elèctrica entre alguns dels models utilitzats actualment. Aquesta creixent implementació d'aquest tipus de sistemes permeten modelar noves xarxes menys dependents dels factors meteorològics externs i dels sistemes de generació a partir de combustibles fòssils.

Pel fet que les xarxes de distribució operen a potències més baixes que les de transport, els sistemes d'emmagatzematge d'energia disposen de capacitats inferiors i en la major part dels casos s'utilitzen per emmagatzemar energia elèctrica, ja que aquest tipus de xarxes no disposen de grans centrals solars o de cogeneració el que implica que no hi ha suficient energia tèrmica per a aprofitar-la en altres usos. Per aquest motiu, els sistemes convencionals són les bateries operades a partir d'io-liti, sodi-sulfur, àcid i redox, i la seva implementació a les xarxes de distribució varien en funció de la capacitat, els costos d'implementació, la densitat d'energia i l'eficiència de cada sistema [12].

També s'ha de tenir en compte que s'estan implementant nous models de xarxes de distribució operades a partir de petites generacions renovables distribuïdes i sistemes d'emmagatzematge constituïts per vehicles elèctrics, sistemes de bateries i petites bombes de calor. Tot i això, en aquest cas d'estudi les flotes de vehicles elèctrics estan contemplades com càrregues associades al sistema el que implica que no es tindrà en compte la seva regulació per tal de simplificar el problema, ja que en aquest treball es formula considerant una xarxa de distribució amb les tres fases equilibrades [13]. Tampoc es tindran en compte petites bombes de calor perquè el sistema només contempla demandes elèctriques, però és evident que en un altre cas d'estudi la seva implementació seria molt necessària per a formular un model on les demandes de les càrregues fossin tèrmiques i elèctriques, ja que la utilització de bombes de calor és una manera més eficient d'abastir demandes tèrmiques que altres dispositius operats a partir d'electricitat.

A més, també s'ha de tenir en compte que les bateries, a partir de proporcionar reserves operatives per sistema al qual estan connectades, poden proporcionar suport auxiliar a l'hora de controlar la freqüència de la xarxa paràmetre que regulat constantment per tal d'aconseguir una xarxa estable i facilitar voltatge o en moments de caiguda del sistema per tal d'assegurar un correcte abastiment de les càrregues del sistema.

Tot i això, el treball no es centrarà en les diferents metodologies internes de cada model de bateria, sinó que treballarà a partir de les restriccions donades pel sistema per tal de modelar el seu funcionament dins la xarxa de distribució. Per a fer-ho, cal expressar les diverses equacions que restringeixen les potències de càrrega i descàrrega, la capacitat de la bateria, la seva eficiència i l'estat inicial de càrrega.

La primera equació mostra l'estat inicial del nivell de càrrega de la bateria, el qual serà definit a capítols anteriors, ja que depèn del model de bateria escollit.

$$SoC(t=0) = SoC_i; \forall n \in N^B, \forall t \in T \quad (\text{Eq. 2.16})$$

A més, l'estat inicial de càrrega ha de tenir uns límits per tal d'aconseguir resultats realistes dins del model. En primer lloc, perquè el sistema treballa en per unitats, el valor del SoC ha d'estar comprès entre 0 i 1.

$$0 \leq SoC(t) \leq 1; \forall n \in N^B, \forall t \in T \quad (\text{Eq. 2.17})$$

També és necessari definir uns límits pels processos de càrrega i descàrrega de les diferents bateries utilitzades.

$$0 \leq P_t^{bc} \leq B_t \cdot P_{max}^b; \forall n \in N^B, \forall t \in T \quad (\text{Eq. 2.18})$$

$$0 \leq P_t^{bd} \leq (1 - B_t) \cdot P_{max}^b; \forall n \in N^B, \forall t \in T \quad (\text{Eq. 2.19})$$

L'equació 3.20 mostra el procés de càrrega del sistema i la següent la descàrrega. Es pot observar que les equacions inclouen una variable binària B la qual no permet que la bateria es carregui i descarregui simultàniament, ja que d'altra manera el programa podria retornar solucions impossibles.

En canvi, la potència reactiva del sistema està definida a partir de la següent funció:

$$-0,35 \cdot Pg_{n,t}^b \leq Qg_{n,t}^b \leq 0,4 \cdot Pg_{n,t}^b; \forall n \in N^B, \forall t \in T \quad (\text{Eq. 2.20})$$

Com es pot observar s'ha escollit una expressió igual a la definida a l'apartat de generació fotovoltaica, tot i que també s'hauria pogut deixar igual a 0, ja que un sistema de bateries no necessita una regulació estricta de la potència reactiva.

Les següents equacions controlen la capacitat de la bateria a l'inici de l'assaig i per la resta dels períodes estudiats.

$$SoC_{n,t} = SoC_0 - \frac{P_t^{bd} \cdot \Delta t}{\eta \cdot c^b} + \frac{\eta \cdot P_t^{bc} \cdot \Delta t}{c^b}; \forall n \in N^B, t = 1 \quad (\text{Eq. 2.21})$$

$$SoC_{n,t} = SoC_{n,t-1} - \frac{P_t^{bd} \cdot \Delta t}{\eta \cdot c^b} + \frac{\eta \cdot P_t^{bc} \cdot \Delta t}{c^b}; \forall n \in N^B, \forall t \in T - \{1\} \quad (\text{Eq. 2.22})$$

Evidentment, ambdues restriccions són dependents del temps pel fet que el cas d'estudi és multiperíode.

Tal com s'ha realitzat en els dos casos anteriors, a continuació es mostraran les diferents variables i paràmetres utilitzats per modelar el sistema d'emmagatzematge.

Variable	Descripció	Unitat
$SoC(t)$	Estat de càrrega de la bateria	p.u.
$P_t^{b,c}$	Potència de càrrega de la bateria	p.u.
$P_t^{b,d}$	Potència de descàrrega de la bateria	p.u.
$Pg_{n,t}^b$	Potència activa generada a partir de la bateria	p.u.
$Qg_{n,t}^b$	Potència reactiva generada a partir de la bateria	p.u.

Taula 10. Variables del sistema d'emmagatzematge.

Variable binària	Descripció	Unitat
B_t	Càrrega i descàrrega de la bateria	-

Taula 11. Variables binàries del sistema d'emmagatzematge.

Paràmetre	Descripció	Unitat
c^b	Capacitat de la bateria	p.u.
η	Rendiment de càrrega i descàrrega la bateria	p.u.
P_{max}^b	Potència màxima que la bateria pot emmagatzemar	p.u.

Taula 12. Paràmetres del sistema d'emmagatzematge.

4. Model d'optimització d'un flux de potència

Aquest capítol mostrà les equacions finals utilitzades pel software, juntament amb el conjunt de variables i paràmetres utilitzats al sistema. En aquest cas, el model està pensat per retornar els mínims costos d'operació de la xarxa radial de 33 nodes operada a partir de generadors fotovoltaics i dièlsels simultàniament i amb suport de sistemes de bateries. S'ha de tenir en compte que el treball està pensat per modelar la xarxa al llarg d'un dia el que implica la necessitat d'introduir el set temps a les diferents equacions, el que es farà dividint els períodes d'utilització de cada sistema en 24 períodes iguals, els quals simularan cada hora del dia.

A més, tal com s'ha comentat prèviament el sistema suposa una xarxa de distribució amb les tres fases equilibrades, i per tal de facilitar els càlculs dins del sistema les variables i paràmetres s'introdueixen en per-unitat i, tal com es veurà en el següent capítol, els valors obtinguts hauran de ser canviats per seguir aquesta metodologia.

Com s'ha vist al capítol 3.1. el sistema no contempera les diverses pèrdues ocasionades per les línies de la xarxa, el que permetrà simplificar el model d'optimització sense obtenir resultats no realistes, ja que les magnituds de les pèrdues són molt inferiors als voltatges nominals als que opera la xarxa.

4.1. Equacions OPF

En aquest primer apartat es mostraran totes les equacions del sistema en funció del període estudiat. Les primeres equacions estan extretes del capítol 3.1. i s'han reescrit per dependre del temps estudiat.

$$\underline{V}_{n,t} - \underline{V}_{m,t} = \underline{I}_{nm,t} \cdot \underline{Z}_{nm}; \forall (n,m) \in l, \forall t \in T \quad (\text{Eq. 4.1})$$

$$\underline{S}_{nm,t} = \underline{V}_{n,t} \cdot \underline{I}_{nm,t}^*; \forall (n,m) \in l, \forall t \in T \quad (\text{Eq. 4.2})$$

$$P_{n,t}^{net} = \sum_{m \in D(n)} P_{nm,t}; n = 1, \forall t \in T \quad (\text{Eq. 4.3})$$

$$Q_{n,t}^{net} = \sum_{m \in D(n)} Q_{nm,t}; n = 1, \forall t \in T \quad (\text{Eq. 4.4})$$

$$P_{n,t}^{net} = \sum_{m \in U(n)} (P_{nm,t} - r_{nm} \cdot i_{nm,t}^2) - \sum_{m \in D(n)} P_{nm,t}; \forall n \in N - \{1\}, \forall t \in T \quad (\text{Eq. 4.5})$$

$$Q_{n,t}^{net} = \sum_{m \in U(n)} (Q_{nm,t} - x_{nm} \cdot i_{nm,t}^2) - \sum_{m \in D(n)} Q_{nm,t}; \forall n \in N - \{1\}, \forall t \in T \quad (\text{Eq. 4.6})$$

$$v_{m,t}^2 = v_{n,t}^2 - 2(r_{nm} \cdot P_{nm,t} + x_{nm} \cdot Q_{nm,t}) + i_{nm,t}^2 (x_{nm} + r_{nm}); \forall n \in N, \forall m \in D(n), \forall t \in T \quad (\text{Eq. 4.7})$$

$$i_{nm_t}^2 \cdot v_{n_t}^2 = P_{nm_t} + Q_{nm_t}; \forall n \in N, \forall m \in D(n), \forall t \in T \quad (\text{Eq. 4.8})$$

Es pot observar que les quatre primeres equacions només depenen d'una variable, ja que la resta d'elements són paràmetres prèviament fixats, les quals no estan elevades a cap potència superior a 1 i no estan constituïdes a partir de multiplicacions o divisions entre les diferents variables. Això implica que les equacions són lineals i, a més també són convexes el que permet resoldre l'optimització fàcilment i trobar sempre el punt òptim global del sistema.

Això es dona perquè les demandes actives i reactives totals del sistema són fixades prèviament, convertint-les en variables, d'altra manera el sistema comptaria amb quatre variables a controlar pel fet que a les potències de demanda també s'ha de sumar les potències de generació. En aquest cas només es fixen les demandes de les càrregues del sistema deixant que el programa trobi els perfils i les potències de generació més òptims per cada cas d'estudi.

En canvi, la resta d'equacions no són ni lineals ni convexes pel fet que estan formades per diferents variables a controlar, el que dificulta el procés d'optimització i no garanteix establir el millor resultat, sinó que en cada cas es trobaran punts òptims locals els quals són possibles solucions del problema, però no tenen per què ser les òptimes.

4.2. Restriccions OPF

L'apartat mostra les diverses restriccions imposades al sistema per tal d'obtenir resultats realistes. Les tres primeres fan referència als límits de tensió dels nodes de la xarxa, sent la primera pel primer node slack de la xarxa i les dues següents per la resta de nodes del sistema.

$$\underline{v}_{n_t} = \underline{u}_n^{slack}; n = 1, \forall t \in T \quad (\text{Eq. 4.9})$$

$$\underline{v}_{n_t} \leq \underline{v}_n^{max}; \forall n \in N, \forall t \in T \quad (\text{Eq. 4.10})$$

$$\underline{v}_{n_t} \geq \underline{v}_n^{min}; \forall n \in N, \forall t \in T \quad (\text{Eq. 4.11})$$

Aquestes dos últimes restriccions no impliquen que el valor dels voltatges dels nodes posteriors al primer adoptin un valor fix, sinó que únicament limiten el seu rang de valors. En canvi, la primera equació és utilitzada per fixar la tensió de referència de la xarxa i poder d'aquesta manera realitzar els càlculs pertinents de cada cas d'estudi.

L'última restricció fixada correspon als límits de corrent que el sistema podrà assolir a les seves línies de distribució per tal de no superar la potència nominal de la xarxa i d'aquesta manera evitar possibles sobre càrregues i danys del sistema.

$$|i_{nm_t}| \leq i_{(nm-max)_t}; \forall n \in N, \forall m \in D(n), \forall t \in T \quad (\text{Eq. 4.12})$$

A més, com a l'apartat anterior, l'última restricció tampoc és lineal ni convexa el que implica que la resolució de l'optimització sigui complicada i no garanteixi determinar l'òptim global.

4.3. Convexificació OPF

Tal com s'ha comentat al principi del capítol, algunes de les equacions i restriccions que descriuen el flux de potència de la xarxa estudiada no són lineals ni convergeixen pel fet que el sistema presentat és mallat, el que suposa més d'una variable a controlar, estan expressades a partir de potències superiors a 1 i estan constituïdes a partir de la multiplicació o divisió de les variables.

Per tal d'obtenir una solució al problema plantejat és possible realitzar l'optimització a partir d'un solver no lineal, acceptant que és possible no trobar l'òptim global del sistema i que el procés de resolució pot comportar temps d'espera llargs, ja que el programa haurà de realitzar diverses iteracions per trobar la solució.

Una altra opció és modificar les antigues equacions per tal d'aconseguir un nou sistema que descriu d'igual manera el flux de potència de la xarxa, però transformant els antigues equacions perquè siguin lineals i convergeixin, simplificant d'aquesta manera el solver d'optimització i garantint trobar l'òptim global per cada cas estudiat.

En aquest cas, s'ha decidit solucionar el problema de la no-linealitat i convexitat a partir del segon model descrit i, conseqüentment s'escriuen les equacions d'una manera equivalent però diferent. Per aconseguir-ho és necessari eliminar els termes elevats a la segona potència, el que es realitza a partir de dos canvis de variable, un pels voltatges i un altre pels corrents del sistema.

$$i_{nm,t}^2 = \theta_{nm,t}; \forall (n, m) \in l, \forall t \in T \quad (\text{Eq. 4.13})$$

$$v_{n,t}^2 = \vartheta_{n,t}; n = 1, \forall t \in T \quad (\text{Eq. 4.14})$$

Tot i el canvi de variable realitzat, les variables han de dependre del temps, ja que el cas d'estudi continua sent multiperiod.

A partir dels dos canvis de variable anterior s'aconsegueix linealitzar i convexificar gairebé totes les equacions del flux de potència del problema.

$$\underline{V}_{n,t} - \underline{V}_{m,t} = \underline{I}_{nm,t} \cdot \underline{Z}_{nm}; \forall (n, m) \in l, \forall t \in T \quad (\text{Eq. 4.15})$$

$$\underline{S}_{nm,t} = \underline{V}_{n,t} \cdot \underline{I}_{nm,t}^*; \forall (n, m) \in l, \forall t \in T \quad (\text{Eq. 4.16})$$

$$P_{n,t}^{net} = \sum_{m \in D(n)} P_{nm,t}; n = 1, \forall t \in T \quad (\text{Eq. 4.17})$$

$$Q_{n,t}^{net} = \sum_{m \in D(n)} Q_{nm,t}; n = 1, \forall t \in T \quad (\text{Eq. 4.18})$$

$$P_{n,t}^{net} = \sum_{m \in U(n)} (P_{nm,t} - r_{nm} \cdot \theta_{nm,t}) - \sum_{m \in D(n)} P_{nm,t}; \forall n \in N - \{1\}, \forall t \in T \quad (\text{Eq. 4.19})$$

$$Q_{n,t}^{net} = \sum_{m \in U(n)} (Q_{nm,t} - x_{nm} \cdot \theta_{nm,t}) - \sum_{m \in D(n)} Q_{nm,t}; \forall n \in N - \{1\}, \forall t \in T \quad (\text{Eq. 4.20})$$

$$\vartheta_{m,t} = \vartheta_{n,t} - 2(r_{nm} \cdot P_{nm,t} + x_{nm} \cdot Q_{nm,t}) + \theta_{nm,t}(x_{nm}^2 + r_{nm}^2); \forall n \in N, \forall m \in D(n), \forall t \in T \quad (\text{Eq. 4.21})$$

$$\theta_{nm,t} \cdot \vartheta_{n,t} = P_{nm,t}^2 + Q_{nm,t}^2; \forall n \in N, \forall m \in D(n), \forall t \in T \quad (\text{Eq. 4.22})$$

Tal com mostren les equacions anteriors totes queden amb variables a la primera potència i sense multiplicar-se o dividir-se entre elles el que fa possible una correcta resolució de l'optimització. Tot i això, l'última presenta les variables $\theta_{nm,t}$ i $\vartheta_{n,t}$ multiplicant-se entre si, originant una equació que no és ni lineal ni convexa. Convertint una altra vegada el problema en no lineal ni convexa.

Per solucionar-ho, es relaxa l'equació obtenint la següent expressió:

$$\theta_{nm,t} \cdot \vartheta_{n,t} < P_{nm,t}^2 + Q_{nm,t}^2; \forall n \in N, \forall m \in D(n), \forall t \in T \quad (\text{Eq. 4.23})$$

Tot i això, s'ha de tenir en compte que la funció principal representava la superfície d'una equació de segon ordre en forma de con i, conseqüentment la resolució del punt òptim global trobada pel software a partir de la nova equació relaxada ha de trobar-se dins la superfície cònica creada per la nova equació, ja que d'altra manera el resultat trobat no serà una solució possible del problema descrit inicialment [14].

Pel que fa a les diverses restriccions del problema del flux de potència totes elles aconseguen linealitzar-se i convexificar gràcies als dos canvis de variable exposats a l'inici de l'apartat, les quals es mostren a continuació amb la formulació final.

$$\vartheta_{n,t} = u_n^{slack^2}; n = 1, \forall t \in T \quad (\text{Eq. 4.24})$$

$$\vartheta_{n,t} \leq v_n^{max^2}; \forall n \in N, \forall t \in T \quad (\text{Eq. 4.25})$$

$$\vartheta_{n,t} \geq v_n^{min^2}; \forall n \in N, \forall t \in T \quad (\text{Eq. 4.26})$$

$$|i_{nm,t}| \leq i_{(nm-max),t}; \forall n \in N, \forall m \in D(n), \forall t \in T \quad (\text{Eq. 4.27})$$

4.4. Creació de la Funció objectiu

En aquest cas, la funció implementada és multiobjectiu pel fet que descriu un model per aconseguir operar la xarxa de distribució minimitzant les pèrdues i aconseguit d'aquesta manera el sistema més eficient, però també prioritza el cas més econòmicament viable, és a dir, aquell on els costos d'operació siguin mínims, però implementant la generació fotovoltaica, la dièsel i els sistemes d'emmagatzematge.

Per tal de definir-la correctament, en primer lloc, s'ha determinat els diferents costos associats a cada sistema de generació implementat i definir la funció que permeti minimitzar les pèrdues energètiques.

4.4.1. Generació fotovoltaica

El primer cost associat és originat a partir de la generació fotovoltaica, la qual tot i no originar despeses a partir de la compra de matèria prima per funcionar, produeix pèrdues degudes al retallament de la producció fotovoltaica. Aquests costos són donats a partir de dos successos diferents regulats pel Reglament del Parlament Europeu i el Consell 2019/943 [15]: el primer es dóna quan l'estat no dóna prioritat d'inserció a la xarxa energia produïda a partir de fonts renovables (contemplat a l'article 12 del codi) i el segon succeeix quan es produeix un retallament a la producció d'energia elèctrica.

El primer cas no es dóna en aquesta xarxa pel fet que el sistema està pensat per minimitzar els costos d'operació i, perquè el sistema fotovoltaic no té costos de compra associats, ja que no és necessari cap matèria prima el mateix programa sempre donarà prioritat a la generació fotovoltaica. En canvi, el segon escenari pot donar-se al sistema exposat quan les demandes de les càrregues siguin inferiors a la generació solar i el sistema de bateries estigui completament carregat. En aquest cas, el sistema deixaria inactiu algun bus de generació fotovoltaica el que suposaria una penalització econòmica per cada kWh que es podria haver generat a partir de les centrals solars inoperatives [16].

$$Cost_{FV} = \sum_{n=0}^{33} \sum_{t=0}^{24} [(d^{pv} \cdot g_t^{pv} - P g_{n,t}^{pv}) \cdot \delta]; \forall n \in N^{FV}, \forall t \in T \quad (\text{Eq. 4.28})$$

4.4.2. Generació dièsel

Els costos de generació d'energia elèctrica a partir de dièsel estan expressats a partir de la següent equació de segon ordre:

$$Cost_d = \sum_{n=0}^{33} \sum_{t=0}^{24} [Y_{n,t} \cdot a_g + P g_{n,t}^{GD} \cdot b_g + P g_{n,t}^{GD^2} \cdot c_g] + \varepsilon_d \cdot \sigma \cdot E_d; \forall n \in N^{GD}, \forall t \in T \quad (\text{Eq. 4.29})$$

S'observa que aquesta depèn de tres valors associats als costos de producció a partir del dièsel multiplicats per la variable binària i la potència de generació del sistema dièsel. S'ha de tenir en compte que el primer terme està multiplicat per $Y_{n,t}$ per evitar sumar els costos fixos de generació quan aquests sistemes no estan operatius.

A més, la funció també està constituïda pel paràmetre σ el qual simbolitza els costos d'emissió de Co2 generats a partir d'aquest tipus de sistemes, els quals també estan regulats a partir del Reglament del Parlament Europeu i el Consell 2019/943 [17]. Per últim, es col·loca el paràmetre ε_d el qual representa el factor d'emissions de CO2 equivalent a la generació d'energia elèctrica, la qual en aquest cas fa referència a la generació a partir de dièsel.

Ambdós paràmetres estan multiplicats per la potència activa generada per les bombes de dièsel instal·lades a la xarxa d'estudi.

Tot i això, s'ha de tenir en compte que la funció que regula els costos associats a la generació dièsel és una equació polinòmica de segon ordre, el que la converteix en una funció no lineal, per aquest motiu es reformula de la següent manera:

$$Cost_d = \sum_{n=0}^{33} \sum_{t=0}^{24} [Y_{n,t} \cdot a_g + P_{g_{n,t}}^{GD} \cdot b_g] + \eta_d \cdot \varepsilon_d \cdot \sigma \cdot E_d; \forall n \in N^{GD}, \forall t \in T \quad (\text{Eq. 4.30})$$

4.4.3. Compra a la xarxa externa

Els costos de compra d'energia a la xarxa elèctrica es produeixen quan la demanda total del sistema és superior a la capacitat de generació i l'energia emmagatzemada al sistema de bateries i estan modelats a partir de la següent equació.

$$Cost_g = \sum_{n=0}^{33} \sum_{t=0}^{24} [P_{n,t}^g \cdot \gamma] + \varepsilon_g \cdot \sigma \cdot E_g; n = 1, \forall t \in T \quad (\text{Eq. 4.31})$$

Sent γ el preu per hores de compra a la xarxa.

En aquest cas, pel fet que la xarxa està modelada per ser operada dins del territori espanyol, els perfils de producció fotovoltaica, les normatives aplicades i els costos de compra d'energia són modelats a partir de les dades actuals del territori.

Com en el cas anterior, el preu de comprar energia a l'exterior de la xarxa té associat una penalització per la producció de CO2 el qual està representat per la mateixa variable i la taxa associada a les emissions de CO2. En aquest cas, pel fet que el sistema elèctric espanyol està constituït a partir de diversos sistemes és necessari establir el percentatge de la generació total que emet aquests gasos, el que es veurà al següent capítol. També s'ha de tenir en compte el fet que la potència activa generada fa referència a la comprada a la xarxa externa del sistema.

A causa del fet que l'objectiu principal d'aquesta última equació és reduir els costos de compra d'energia a la xarxa exterior, s'aconsegueix paral·lelament una funció que redueixi les pèrdues generals de sistema, ja que tota l'energia perduda haurà de ser comprada a la xarxa augmentant d'aquesta manera els costos elèctrics.

A més, s'ha de tenir en compte que l'equació adoptaria valors negatius quan la xarxa de distribució generés excedents i es venguessin a la xarxa exterior, disminuint d'aquesta manera els costos finals d'operació. Tot i això, aquesta possibilitat no és factible en aquest cas d'estudi perquè, com s'ha comentat anteriorment, la xarxa de distribució estudiada, tot i estar connectada a la xarxa de transport no pot aportar energia.

Per aquest motiu és necessari fixar una altra restricció al model GAMS per poder mantenir un flux de potència unidireccional, la qual és la següent:

$$Pg.lo('1', t) = 0 \quad (\text{Eq. 4.32})$$

Aquesta restricció no permet generar excedents d'energia elèctrica superiors a l'espai d'emmagatzematge disponible al sistema de bateries per cada instant de temps estudiat o a l'energia necessària per abastir el sistema tenint en compte les pèrdues energètiques produïdes al sistema elèctric de la xarxa de distribució estudiada.

4.4.4. Pèrdues energètiques

Per últim, s'inclou a la funció objectiu una equació que permeti reduir les pèrdues energètiques a diferents línies específiques de la xarxa de distribució estudiada, cosa que permet obtenir un sistema més eficient pel fet que es redueixen no només les pèrdues energètiques generals del sistema sinó també es centra a reduir aquelles originades a cada línia del sistema de distribució.

$$Cost_p = \sum_{n=0}^{33} \sum_{t=0}^{24} [r_n \cdot l_{nm_t}]; \forall n \in N^{GD}, \forall t \in T \quad (\text{Eq. 4.33})$$

També s'ha de tenir en compte que aquesta última funció exposada és l'única que assegura aconseguir determinar l'òptim global i, conseqüentment una solució exacta del problema perquè aquesta minimitza les pèrdues del sistema.

4.4.5. Funció objectiu

La funció objectiu del sistema mostra que la finalitat principal del problema és modelar els perfils de generació a partir dels recursos renovables i no renovables, el sistema de bateries i la compra d'energia a la xarxa externa per tal d'aconseguir abastir la totalitat de les diferents demandes de cada càrrega connectada al sistema minimitzant els costos d'operació. S'ha de tenir en compte que, l'equació no limita la generació d'energia dins de la xarxa de distribució, tot i que sí que ho fa la restricció exposada a l'anterior apartat, ja que no permet obtenir una energia a l'interior de la xarxa de distribució superior a la demanda total i a la capacitat de càrrega de les bateries perquè d'aquesta manera es limita la possibilitat d'obtenir sobrecàrregues les quals no podrien dirigir-se cap a la xarxa de transport.

Si el sistema estudiat estigués pensat per assumir fluxos de potència bidireccionals el sistema no limitaria la generació d'energia més enllà de minimitzar els costos totals d'operació i, conseqüentment seria possible vendre energia a la xarxa d'alta tensió a partir dels excedents generats internament. Una possibilitat seria carregar la bateria col·locada al segon node de la xarxa durant les ores vall, on l'energia està més barata i vendre o aprofitar aquesta energia en hores punta i d'aquesta manera obtenir un sistema més viable econòmicament parlant. Tot i això, s'ha de tenir en compte que aquesta solució va estretament lligada amb els rendiments de càrrega i descàrrega de la bateria col·locada i que podria ser que al final de la vida útil d'aquesta el sistema exposat deixés de ser rendible en disminuir ambdós rendiments.

$$Cost_{total} = \min[Cost_{FV} + Cost_d + Cost_g + Cost_p] \quad (\text{Eq. 4.34})$$

L'equació 4.33 mostra que els costos totals vénen donats a partir de la suma dels costos d'operació de cada un dels sistemes utilitzats. En aquest cas no es tenen en compte els costos associats al sistema de bateries perquè el sistema no contempla costos de compra de material, ja que d'altra manera s'hauria de tenir en compte els costos d'implementació de tots els generadors dièsel i dels sistemes fotovoltaics usats a la xarxa. Aquesta visió seria adequada si es volgués fer un estudi sobre la viabilitat econòmica del sistema estudiat en un període a llarg termini i, conseqüentment no es contempla en aquest treball.

5. Aplicació del model d'optimització

En aquest apartat es mostraran els diferents valors utilitzats per parametritzar les variables comunes a tots els casos d'estudi, les quals estan expressades en la seva majora en per unitat, per tal de facilitar els càlculs originats a partir del canvi d'unitats, totes elles s'introdueixen al sistema d'optimització en per unitat a no ser que s'indiqui el contrari.

5.1. Paràmetres de la xarxa de distribució

Aquest capítol descriu l'esquema general de la xarxa elèctrica de distribució aèria estudiada al treball, mostrant els diferents nodes dotats amb sistemes emmagatzematge o de generació elèctrica, les demandes energètiques de cada càrrega connectada al sistema i els valors numèrics de cada paràmetre utilitzat per modelar el problema estudiat.

En aquest cas, el sistema a estudiar és el d'una xarxa de distribució aèria de mitja tensió de 33 nodes operada a partir d'un conjunt de sistemes de generació fotovoltaics i dièsel i bateries, els quals permeten abastir total o parcialment les càrregues connectades a la xarxa. Una particularitat essencial a exposar del sistema és que aquest només està pensat per acollir un flux de potència unidireccional, el qual sempre anirà dirigit des de la xarxa de transport cap a la de distribució. Això implica que el sistema estarà connectat a la xarxa d'alta tensió i que aquesta podrà subministrar energia elèctrica sempre que el sistema de generació i d'emmagatzematge intern no sigui capaç d'abastir la totalitat de la demanda, però que els excedents d'energia no podran ser enviats a la xarxa de transport.

També es mostra la distribució dels sistemes de generació d'energia i d'emmagatzematge de la xarxa de distribució. En aquest cas, ja que el sistema està connectat a la xarxa elèctrica general no és necessari sobredimensionar el sistema de generació i de bateries per tal de cobrir el total de la demanda energètica.

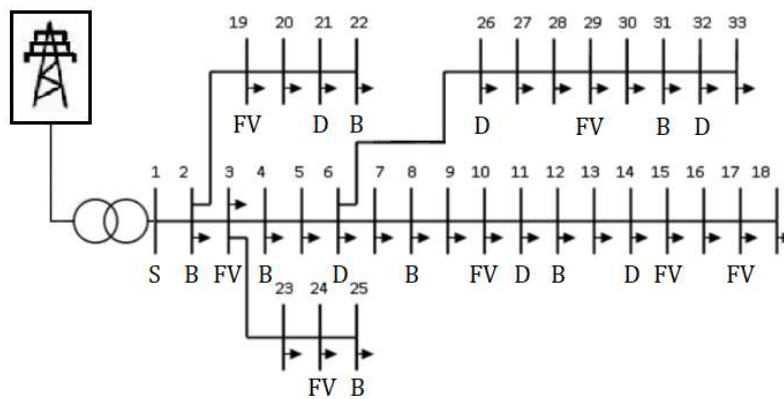


Figura 5. Esquema de la xarxa radial a estudiar.

En aquest cas, el primer node és representat amb una S perquè es tracta d'un node Slack, el que implica que està connectat a la xarxa elèctrica general mitjançant un transformador, el qual té al debarat primari una línia d'altra tensió, és a dir una xarxa de transport, i al secundari una xarxa operada a partir de mitja tensió, la qual s'anomena una xarxa de distribució. Per aquest motiu, aquest node no presenta demandes energètiques, ja que no té associada cap càrrega. S'ha d'especificar que en aquest cas d'estudi es considera un sistema sense possibilitat d'inserir energia generada a la xarxa de distribució a la xarxa general, és a dir, que es prohibeix

el *reverse power flow*, implicant d'aquesta manera que el flux de potència d'aquest primer node del sistema sempre estarà dirigit cap al segon node.

A més, es decideix col·locar una bateria al segon node del sistema a causa del fet que d'aquesta manera estarà situada a la subestació, aprofitant els seus sistemes de control, i el convertidor que du implementat permetrà ajudar a prevenir possibles problemes al transformador connectat a la xarxa de distribució al debarat secundari i a la xarxa elèctrica general al primari. Això és possible pel fet que el condensador del sistema d'emmagatzematge actuant com a filtre davant dels possibles harmònics creats a la xarxa de distribució. Aquesta col·locació de la bateria també ajudaria a preveure possibles saturacions al transformador perquè aquesta aprofitaria els excedents d'energia generada carregant-se i ajudaria a l'abastiment del sistema quan aquesta es descarregués, evitant d'aquesta manera la necessitat d'utilitzar un transformador més gran, el que suposaria una despesa econòmica important.

També s'ha de tenir en compte que la resta de bateries utilitzades al sistema no només tindran la funció de sistema d'emmagatzematge d'energia elèctrica del sistema, sinó que també actuaran com un sistema de regulació de la tensió de la xarxa interna de distribució, el que és necessari perquè el seu valor del voltatge disminueix si ho fa la demanda energètica, el que succeeix a cada node del problema estudiat.

Un altra dada a tenir en compte és el fet que la col·locació dels diferents sistemes de generació i d'emmagatzematge no han estat escollits per un programa d'optimització que garantis les mínimes pèrdues tant econòmiques com energètiques, ja que la seva implementació constituiria un altre treball i, conseqüentment s'han escollit les diverses localitzacions en funció de les demandes de cada node.

L'esquema també mostra nodes amb generació fotovoltaica (FV) i a partir de bombes dièsel (D), els quals ajudaran a abastir les demandes totals del sistema estudiat.

En aquest cas, els valors comuns de la línia s'han extret de l'article publicat per l'IEEE [18] i són els contemplats a la taula 13. A més, es prefixa que el voltatge de cada node del sistema ha d'estar comprès entre 1,1 i 0,9 p.u. per tal d'assegurar el correcte funcionament de la xarxa estudiada.

Paràmetre	Valor adoptat	Unitats
S_{base}	1.000.000	VA
V_{base}	12660	V
V_{slack}	1	p.u.

Taula 13. Paràmetres base de la xarxa de distribució de mitja tensió.

A partir d'aquests valors es calcula la intensitat i la impedància base del sistema a dissenyar.

$$Z_{base} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}} = 160,2756 \Omega \quad (\text{Eq. 5.1})$$

$$I_{base} = \frac{V_{base}}{\sqrt{3} \cdot Z_{base}} = 45,6043 \text{ A} \quad (\text{Eq. 5.2})$$

A continuació es defineixen els paràmetres de cada línia del sistema creats entre els diferents busos. En aquest cas, tots els valors ja han estat introduïts en p.u. per tal de simplificar la col·locació de les dades al programa MATLAB.

Per a fer-ho, s'utilitzen les equacions següents, les quals utilitzen els valors amb el subíndex donats per l'article anterior.

$$R = \frac{R'}{Z_{base}} \quad (\text{Eq. 5.3})$$

$$X = \frac{X'}{Z_{base}} \quad (\text{Eq. 5.4})$$

En aquest cas, els valors de línia del sistema són els recollits a la taula 14:

Bus <i>n</i>	Bus <i>m</i>	R [p.u.]	X [p.u.]	Bus <i>n</i>	Bus <i>m</i>	R [p.u.]	X [p.u.]
1	2	0,000575	0,000293	17	18	0,004567	0,003581
2	3	0,003076	0,001567	18	19	0,001023	0,000976
3	4	0,002284	0,001163	19	20	0,009385	0,008457
4	5	0,002378	0,001211	20	21	0,002555	0,002985
5	6	0,005110	0,004411	21	22	0,004423	0,005848
6	7	0,001168	0,003861	22	23	0,002815	0,001924
7	8	0,004439	0,001467	23	24	0,005603	0,004424
8	9	0,006426	0,004617	24	25	0,005590	0,004374
9	10	0,006514	0,004617	25	26	0,001267	0,000645
10	11	0,001227	0,000406	26	27	0,001773	0,000903
11	12	0,002336	0,000772	27	28	0,006607	0,005826
12	13	0,009159	0,007206	28	29	0,005018	0,004371
13	14	0,003379	0,004448	29	30	0,003166	0,001613
14	15	0,003687	0,003282	30	31	0,006080	0,006008
15	16	0,004656	0,0034	31	32	0,001937	0,002258
16	17	0,008042	0,010738	32	33	0,002128	0,003308

Taula 14. Paràmetres de línia de la xarxa de distribució de mitja tensió.

5.2. Paràmetres de la xarxa elèctrica exterior

Com s'ha comentat anteriorment, el sistema comprarà energia a la xarxa externa quan el total de generació renovable i no renovable i l'energia emmagatzemada al sistema de bateries sigui inferior a la demanda total de les càrregues connectades, però també ho farà quan la compra d'energia permeti millorar la funció objectiu. Això es donarà quan els preus de compra siguin inferiors als costos de producció associats als generadors instal·lats i no hi hagi energia emmagatzemada, a part de garantir que serà la solució més eficient. En aquest apartat es mostra la tarifa del mercat elèctric espanyol el 22 d'octubre de l'any 2020, informació extreta de la web de la xarxa elèctrica espanyola [19]. La figura 6 mostra l'evolució horària del preu de l'energia a la xarxa elèctrica, el que és necessari, ja que el sistema necessita definir els costos de compra per cada període de temps a estudiar.

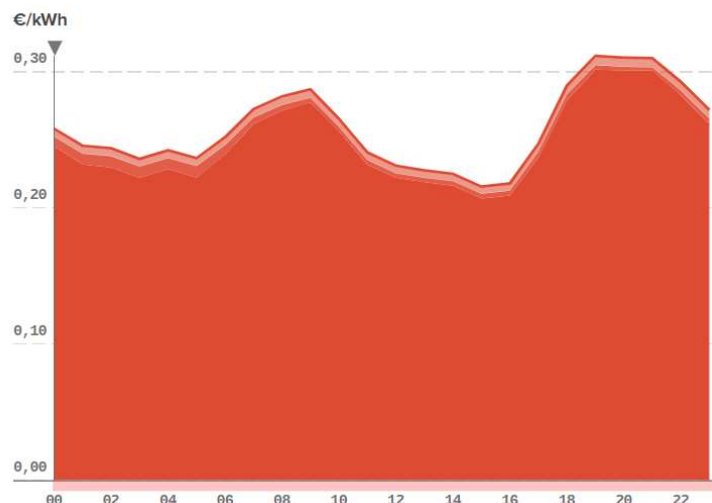


Figura 6. Cost de compra d'energia a la xarxa exterior.

La taula 15 mostra els valors de la figura anterior, els quals s'han utilitzat per definir l'evolució diària dels costos de compra d'energia a la xarxa elèctrica.

Període [h]	Preu [€/kWh]	Període [h]	Preu [€/kWh]
1	0,2582	13	0,23099
2	0,24565	14	0,22754
3	0,24384	15	0,22510
4	0,23599	16	0,21565
5	0,24230	17	0,21792
6	0,23648	18	0,24713
7	0,25202	19	0,28991
8	0,27262	20	0,31177
9	0,28202	21	0,31038
10	0,28713	22	0,31004
11	0,26553	23	0,29274
12	0,24080	24	0,27203

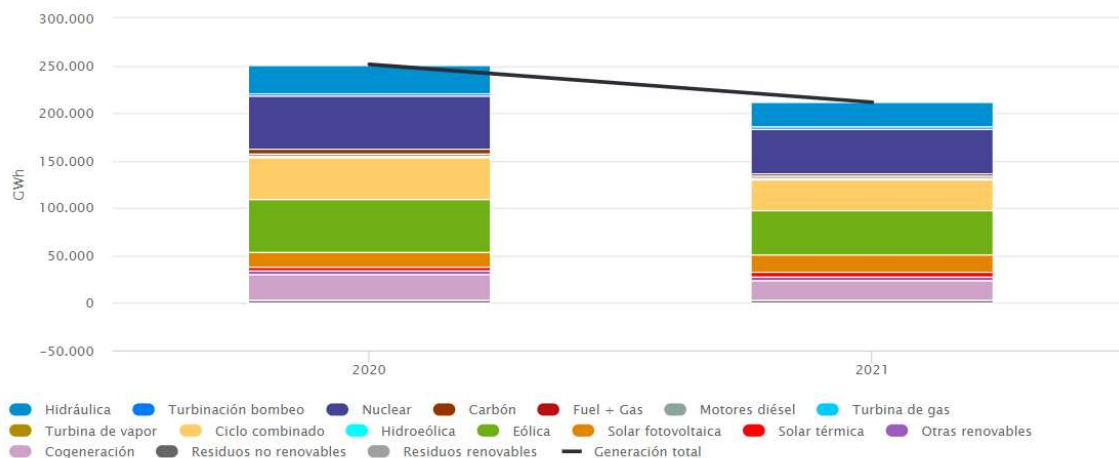
Taula 15. Costos diaris associats a la compra d'energia a la xarxa exterior.

A més, pel fet que la funció que regula els costos associats a la xarxa elèctrica també depèn de les emissions de Co2 és necessari determinar la proporció de generació a partir de combustibles fòssils dins del mix energètic general anual de la xarxa elèctrica espanyola.

La figura 7 mostra el mix energètic utilitzat per abastir la demanda elèctrica els anys 2020 i 2021. Es pot observar que la producció disminueix considerablement entre els dos anys, ja que la demanda total va sofrir una baixa important, comportant una estructura amb una generació inferior a la de l'any 2020. Tot i això, s'aprecia un manteniment en els percentatges d'utilització de cada tecnologia de generació cosa que permet suposar un tant per cent d'emissions de CO2 igual entre anys.

ESTRUCTURA DE LA GENERACIÓN POR TECNOLOGÍAS (GWh) | SISTEMA ELÉCTRICO: Nacional

Del 2020 al 2021



Estado de los datos

Datos definitivos*: hasta el 31/05/20
 Datos provisionales: hasta el 30/09/21

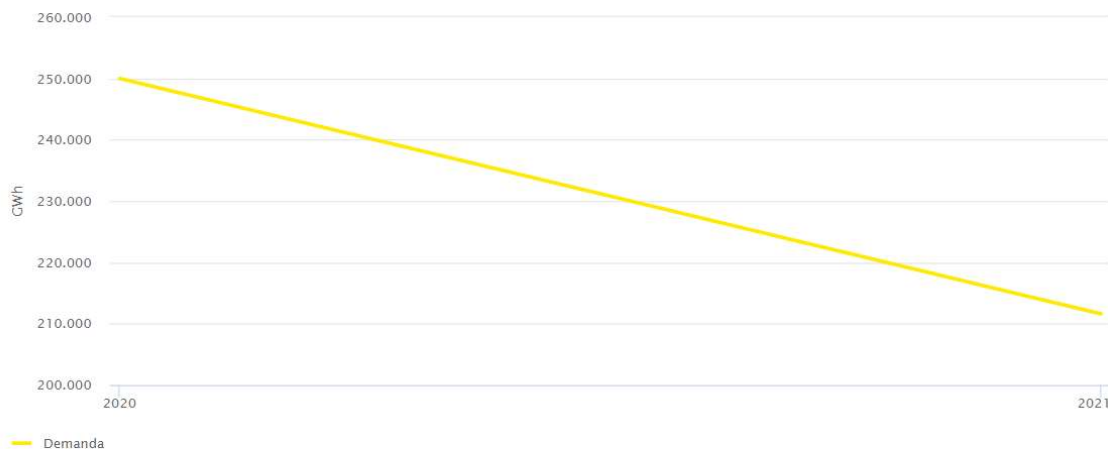
Datos programados: hasta el 28/10/21
 Datos previstos: hasta el 29/10/21

*Nota: las fechas sin subrayado presentan datos definitivos

Figura 7. Configuració del sistema elèctric espanyol els anys 2020 i 2021 [20].

EVOLUCIÓN DE LA DEMANDA (GWh) | SISTEMA ELÉCTRICO: Nacional

Del 2020 al 2021



Estado de los datos

Datos definitivos*: hasta el 31/05/20
 Datos provisionales: hasta el 30/09/21

Datos programados: hasta el 28/10/21
 Datos previstos: hasta el 29/10/21

*Nota: las fechas sin subrayado presentan datos definitivos

Figura 8. Evolució de la demanda energètica entre els anys 2020 i 2021 [21].

Per tal de determinar els costos totals d'emissió de CO₂, en primer lloc, es determinen les tones anuals emeses per la xarxa general, el qual es mostra a la imatge 9. Com en el cas anterior, s'observa una disminució en les emissions anuals degudes a una demanda inferior i no per la utilització d'un mix energètic constituït a partir de més tecnologies renovables.

EMISIONES Y FACTOR DE EMISIÓN DE CO2 EQ. DE LA GENERACIÓN (tCO2 eq. | tCO2 eq./MWh) | SISTEMA ELÉCTRICO: Nacional

Del 2020 al 2021

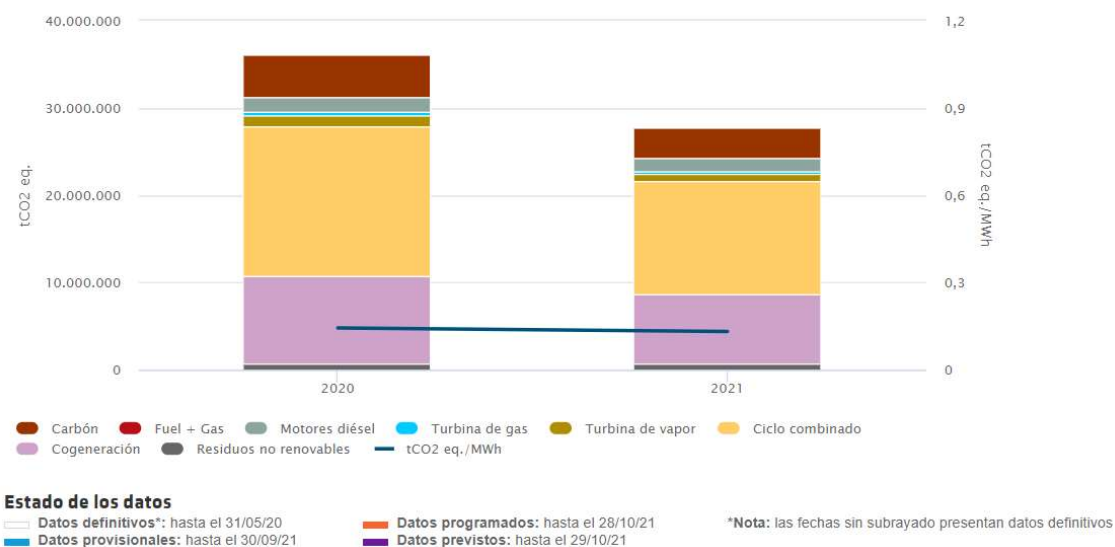


Figura 9. Emissions i factor d'emissions de CO2 produïts per la xarxa elèctrica espanyola al 2020 i 2021.

La figura anterior exposa que l'any 2020 es van emetre 0,2 tCO2 eq./ MWh i al 2021 0,17 tCO2 eq./ MWh.

La figura 10 mostra els percentatges del sistema de generació espanyol en funció de les tecnologies que emeten CO2 durant el seu cicle de producció i les que no ho fan, i d'aquesta manera poder aplicar la proporció correcta als costos associats a la producció de CO2 quan el sistema estudiat compra energia de la xarxa externa. En aquest cas, pel fet que els costos energètics associats s'han extret de les dades de l'any 2020, el treball assumirà un mix energètic per la xarxa externa igual al de 2020.

ESTRUCTURA DE LA GENERACIÓN CON/SIN EMISIONES CO2 EQ. (%) | SISTEMA ELÉCTRICO: Nacional

Del 2020 al 2021

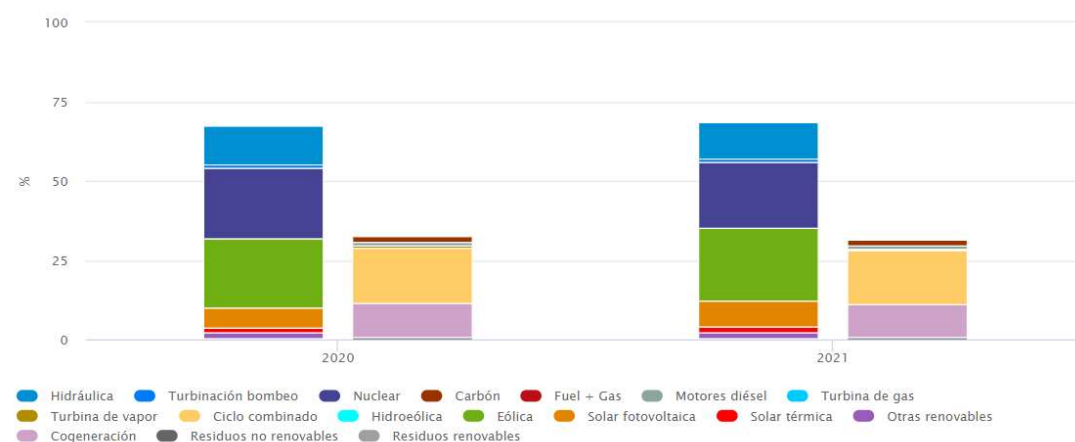


Figura 10. Estructura del sistema elèctric espanyol en funció de la producció de CO2.

En aquest cas la figura anterior mostra que l'any 2020 es va donar un sistema productor format per un 67,3% de sistemes sense emissions de CO₂ i un 32,7% restant amb emissions. Per aquest motiu, el coeficient associat a les taxes imposades per la producció de CO₂ està multiplicat per 0,327.

A més, és necessari establir un cost per cada tona de CO₂ emès el qual està estipulat per la normativa ISO creada l'any 2019 per tal d'assolir els Objectius de desenvolupament sostenible 11 i 13. L'onzè objectiu proposa crear pobles i ciutats més inclusives, segures, resilents i sostenibles a partir d'un ús responsable dels recursos de cada territori, preservant el medi ambient i millorant el benestar global de tots els seus ciutadans. D'altra banda, l'objectiu 13 s'anomena acció climàtica i, com el seu nom indica, està pensat per ajudar en la lluita contra el canvi climàtic i els diferents impactes que aquest comporta arreu del món. Per tal d'assolir aquest últim objectiu l'organització ha implementat diverses normatives pensades per ajudar a controlar el canvi climàtic, quantificar les emissions de gasos d'efecte hivernacle i promoure bones pràctiques en gestió ambiental [22].

La figura 11 mostra diverses taxes associades al cost d'emissió d'una tona de CO₂. Totes elles segueixen la normativa ISO però inclouen una taxa associada a la devaluació al llarg dels anys [23]. En aquest cas, s'ha escollit una taxa total intermèdia la qual suposa uns costos totals de 38,8 €/tCO₂ per l'any 2020.

Assumptions	2015	2025	2030*	2035	2045	2050*	2055	2065
No equity weighting								
• 0% PRTP	62.6	73.4	749	76.5	82.9	100.7	118.5	107.3
• 1% PRTP	15.1	19.6	20.7	21.8	25.0	31.9	38.8	35.5
• 3% PRTP	0.20	1.37	1.65	1.94	2.91	4.88	6.84	5.73
Equity weighting based on the global average income level								
• 0% PRTP	129	140	132	125	126	148	170	144
• 1% PRTP	35.6	42.0	40.4	38.8	40.8	49.0	57.2	49.8
• 3% PRTP	3.74	5.90	5.69	5.48	6.59	8.87	11.15	9.64
Equity weighting based on Western European income levels								
• 0% PRTP	636	707	670	633	632	733	835	685
• 1% PRTP	176	212	205	197	205	243	281	236
• 3% PRTP	18.4	29.8	28.8	27.8	33.1	43.9	54.8	45.8

Figura 11. Costos associats a l'emissió de CO₂.

Finalment, a partir de les dades anteriors es determina cost associat a la compra d'energia elèctrica a la xarxa exterior igual a 7,76 €/MWh.

5.3. Paràmetres de la generació fotovoltaica

Com s'ha comentat anteriorment, la generació fotovoltaica del sistema està definida a partir de dos paràmetres diferents: la potència nominal fixada de la planta energètica i la previsió solar de cada dia. Aquesta última dependrà del temps pel fet que el sistema estudiat és multiperíode, el que implica la necessitat de crear paràmetres els quals mostrin la seva variació en el temps d'estudi. També s'ha de tenir en consideració que en aquest treball les plantes fotovoltaïques de la xarxa disposaran d'un sistema de seguiment el qual permetrà col·locar les plaques a l'angle òptim que generi la quantitat més gran d'energia elèctrica durant tot l'any.

Per obtenir una previsió solar realista en p.u. s'ha consultat les dades d'irradiància solar de cada estació de l'any 2015 a la pàgina web PVGIS [24] i, a continuació s'ha calculat la mitjana aritmètica per tal d'aconseguir un resultat final que pugui ser utilitzat durant tot l'any. La taula 16 mostra els valors donats pel PVGIS per cada estació de l'any, la seva mitjana aritmètica i el seu valor en p.u., el qual serà introduït al programa per tal de realitzar les simulacions dels casos d'estudi.

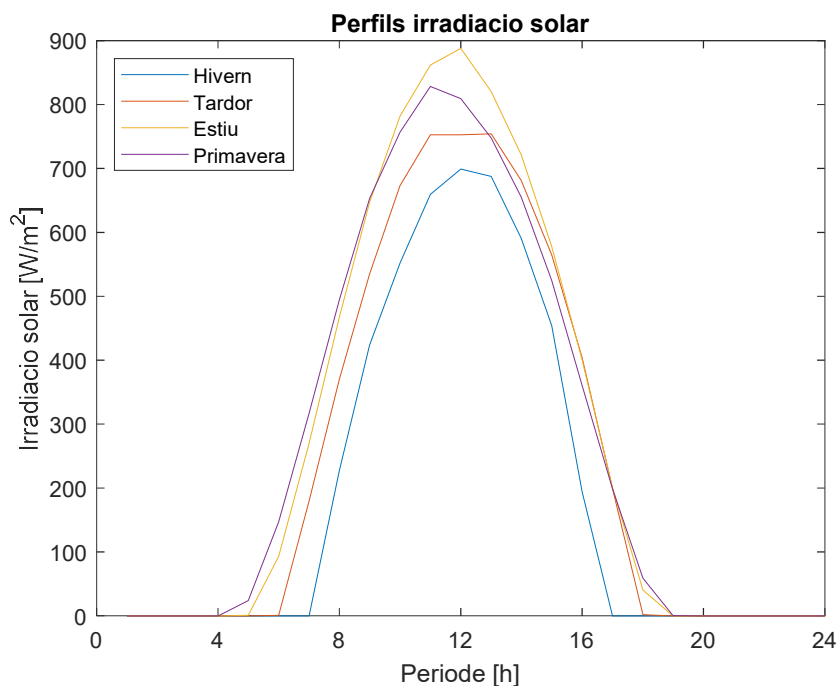


Figura 12. Perfils d'irradiació solar en funció de l'hora del dia utilitzats.

La figura anterior mostra que el perfil més baix es dona durant els mesos d'hivern, ja que en aquesta època de l'any hi ha una irradiació solar inferior el que implica una generació fotovoltaica inferior, la qual augmenta a l'estiu.

Com s'ha comentat anteriorment, pel fet que el cas d'estudi no està fixat a cap època de l'any en concret les dades de predicció fotovoltaica han de representar perfils anuals, els quals s'obtenen calculant la mitjana aritmètica dels valors anteriorment obtinguts i convertint-los en tant per u, ja que d'aquesta manera les dades podran ser introduïdes directament al programa d'optimització.

Període [h]	Mitjana anual [p.u.]	Període [h]	Mitjana anual [p.u.]
1	0,000	13	0,956
2	0,000	14	0,841
3	0,000	15	0,674
4	0,000	16	0,432
5	0,008	17	0,190
6	0,077	18	0,032
7	0,243	19	0,000
8	0,496	20	0,000
9	0,717	21	0,000
10	0,877	22	0,000
11	0,985	23	0,000
12	1,000	24	0,000

Taula 16. Potència mitjana anual del sistema fotovoltaic en p.u..

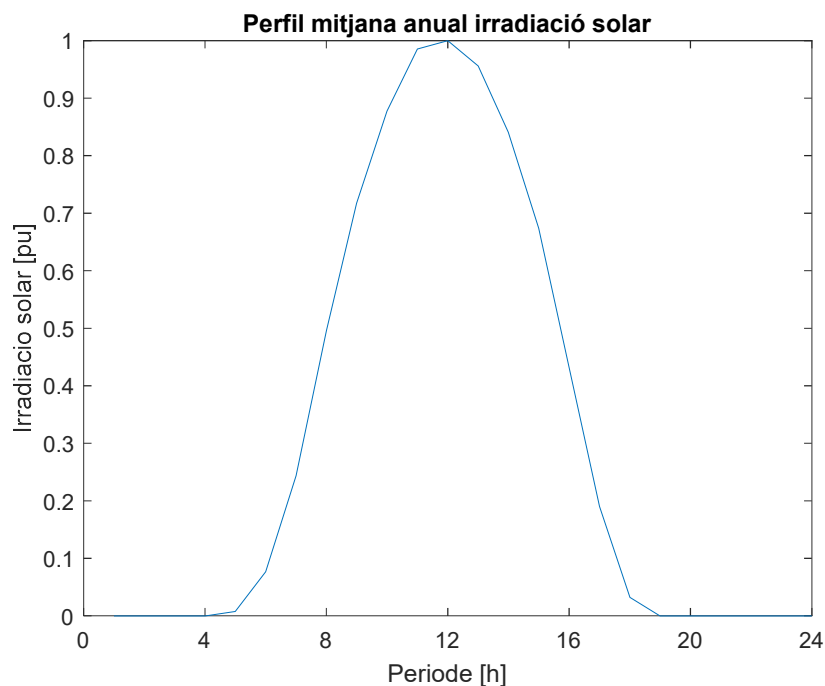


Figura 13. Perfils d'irradiació solar en funció de l'hora del dia utilitzats en tan per u.

La figura anterior mostra que el pic de màxima generació elèctrica a partir de les plantes fotovoltaïques del sistema es donarà a les 12 del migdia, quan la irradiació solar és màxima. Això suposarà que durant aquests períodes de temps la major part de la demanda serà abastida per aquest tipus de sistemes, sempre que la potència nominal fixada no sigui molt baixa i les demandes energètiques del sistema siguin semblants a la capacitat de generació de les plantes solars.

En canvi, el valor adoptat per la variable que descriu la potència màxima que la central podrà generar variarà en funció del cas d'estudi, ja que d'aquesta manera serà possible estudiar l'evolució del sistema en funció de la capacitat de generació de sistema FV. Conseqüentment, el valor del paràmetre serà definit al començament de cada escenari a modelar.

Per últim, és necessari definir el valor numèric del paràmetre δ , el qual és utilitzat per definir la funció de costos associats al retallament de la generació fotovoltaïca de la instal·lació. En aquest cas, el valor és igual 100 €/MWh, ja que d'aquesta manera s'imposa una penalització prou elevada per garantir que el programa no retallarà aquest tipus de generació a no ser que sigui imprescindible.

5.4. Paràmetres de la generació dièsel

La generació dièsel del sistema està definida per les dades donades per un estudi del IEEE [25], el qual mostra uns costos de generació definits a partir d'un sistema polinòmic de segon ordre, el qual està definit pels valors de la primera fila de la figura 14. En aquest cas s'han escollit aquests costos pel fet que aquest sistema permet obtenir potències màximes de 300 kW, cosa que permetrà al sistema implementar menys dispositius i aconseguir resultats similars de generació. Una altra opció vàlida seria la implementació de diversos sistemes de generació dièsel, cada un dels amb unes capacitats i costos de generació diferents el que permetria al

programa trobar quin sistema és més adient en cada cas d'estudi, tot i que aquesta opció no s'ha dut a terme per tal de simplificar el problema.

COST DATA FOR A 15 UNIT TEST SYSTEM

Area	DG	Mode	Cost data			Output limit(kW)	
			a_g	b_g	c_g	P^{max}	P^{min}
Area1	G1	FFC	14.526	0.1032	0.0001	300	35
	G2	UPC	5.0797	0.0792	0.0005	100	20
	G3	UPC	8.7657	0.0656	0.0004	150	30
	G4	UPC	0.8505	0.0689	0.0009	80	10
	G5	UPC	2.0491	0.0301	0.0011	100	20
Area2	G6	FFC	8.5957	0.0346	0.0002	250	60
	G7	UPC	0.8505	0.0689	0.0009	80	10
	G8	UPC	5.0797	0.0792	0.0005	100	20
	G9	UPC	3.4047	0.0134	0.0009	120	30
	G10	UPC	3.4047	0.0134	0.0009	120	30
Area3	G11	FFC	14.526	0.1032	0.0001	300	35
	G12	UPC	5.4976	0.1164	0.0002	150	20
	G13	UPC	5.4976	0.1164	0.0002	150	20
	G14	UPC	1.0171	0.0486	0.0013	75	10
	G15	UPC	3.5442	0.1189	0.0003	100	10
Total						2175	360

Figura 14. Costos de producció a partir de la bomba dièsel [26].

Obtenint finalment la següent funció polinòmica de segon ordre:

$$Cost_d = a_g + b_g \cdot x + c_g \cdot x^2 \quad (\text{Eq. 5.5})$$

On a_g representa el preu fix produït per la generació a partir de combustibles dièsel, b_g els costos lineals i c_g els costos quadràtics. Evidentment, aquesta equació no és lineal, el que fa impossible introduir-la a l'enunciat del problema, ja que el convertiria en no lineal. Per aquest motiu, s'utilitza una aproximació lineal de la funció anterior per calcular els costos produïts a partir de la generació dièsel.

Per linealitzar l'equació es calculen els costos de producció mínims, màxims i mitjans a partir de les potències actives de cada bus associat amb la generació dièsel. S'ha de tenir en compte que en aquest cas els valors de les potències estan expressats el kW en comptes de en per unitat perquè la funció que determina els costos associats als generadors dièsel està modelada per introduir aquest tipus d'unitats al sistema. Tot i això, aquest canvi d'unitats és té en compte a l'hora d'introduir la funció final al programa d'optimització.

Bus	P max [kW]	P min [kW]	Cost max [€]	Cost min [€]	P mitjana [kW]	Cost [€]
6	320	96	57,794	25,3588	208	40,322
11	80	24	23,426	17,0644	52	20,1668
14	36	10,8	18,3748	15,656224	23,4	16,99964
21	160	48	33,602	19,714	104	26,3444
26	280	84	51,266	23,9044	182	36,6248
32	60	18	21,082	16,42	39	18,7069

Taula 17. Potències i costos de producció en funció de l'escenari estudiat.

La gràfica 15 mostra l'evolució del preu per generar les potències mínimes i màximes exposades a la taula anterior. També es pot observar les rectes de regressió lineal de cada una de les funcions, les quals adopten coeficients de R molt propers a zero, el que permet assumir les noves equacions de regressió per vàlides.

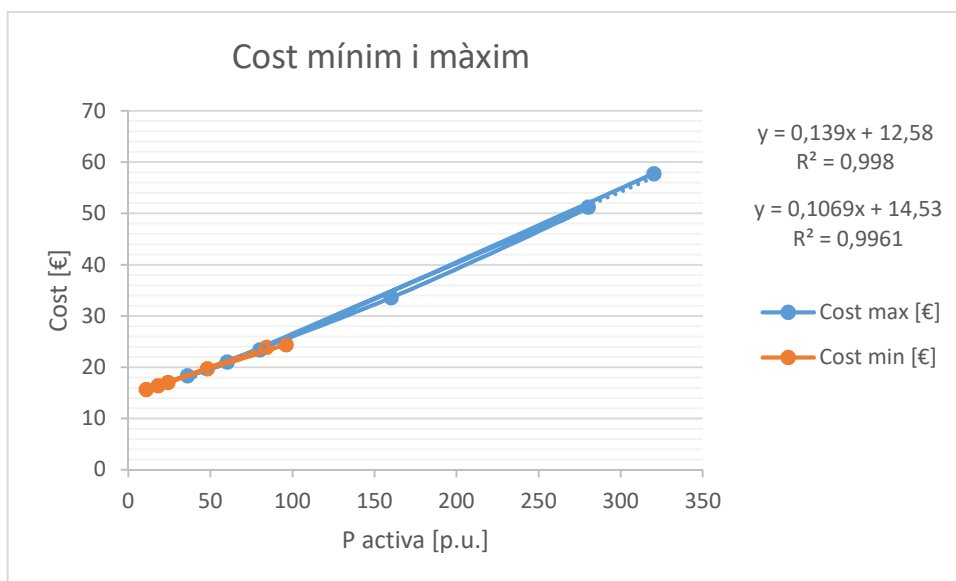


Figura 15. Costos mínims i màxims de produir a partir de bombes dièsel.

Pel fet que la funció costos ha de representar els preus de producció per a tots els rangs de potència activa del sistema, es determina l'equació mitjana, la qual també aconsegueix un valor de R molt proper a 1, el que implica que la regressió lineal aconseguida pot ser utilitzada al programa d'optimització sense menysprear grans errors.

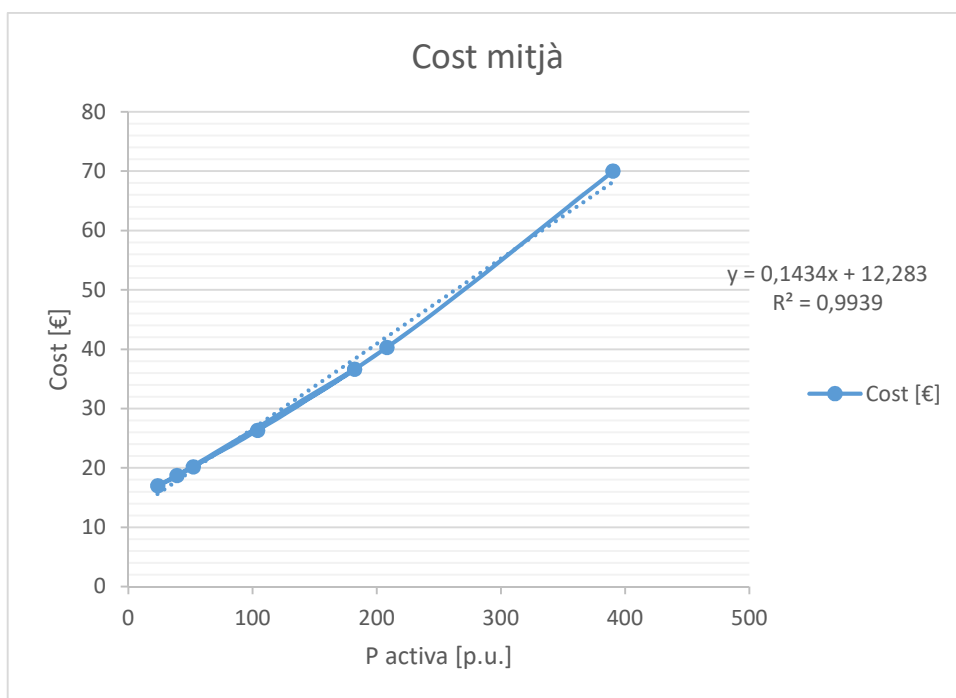


Figura 16. Costos mitjans de produir a partir de bombes dièsel.

Les figures anteriors mostren que la regressió lineal aconseguida aconseguix resultats iguals a la funció polinòmica mostrada a l'inici, ja que s'obté un coeficient R propers a 1. Això succeeix degut que el valor del coeficient c_g és gairebé igual a 0, produint una funció amb un coeficient quadràtic gairebé insignificant.

Finalment, la funció dels costos produïts a causa de la generació a partir del dièsel és la següent:

$$Cost_d = a_g + b_g \cdot x \quad (\text{Eq. 5.6})$$

Adoptant nous valors pels coeficients, els quals es mostren a la taula 18.

Coeficient	Valor
a_g	12,283 [€]
b_g	0,1434 [€/kW]

Taula 18. Valors finals dels coeficients associats als costos de generació a partir d'una bomba dièsel.

Gràcies a aquesta aproximació el programa serà capaç de determinar l'òptim global de cada problema plantejat més ràpidament i sense suposar un gran error en el càlcul dels costos associats a la generació dièsel.

A continuació, es defineix un rendiment del sistema dièsel igual al 30%, el qual serà utilitzat a la funció objectiu dels costos originats a partir de la generació dièsel. En aquest cas, tal com mostra el capítol anterior aquest paràmetre està representat per η_d .

Per últim, és necessari definir el cost de la taxa imposada per l'emissió de CO₂ a l'atmosfera a causa de la utilització de combustibles fòssils i el factor d'emissions de CO₂ en funció del sistema de generació emprat.

Com en el cas de la taxa imposada a la xarxa elèctrica general el cost imposat a l'emissió a partir del dièsel és el mateix, però el valor del factor d'emissions varia perquè el poder calorífic i l'emissió de CO₂ és diferent de la obtinguda per la xarxa externa.

$$\varepsilon_d = \frac{2,508 \text{ kg CO}_2}{\text{l}} \cdot \frac{2,347 \cdot 10^{-5} \text{ kg}}{\text{kJ}} \cdot \frac{3600 \text{ MJ}}{\text{MWh}} \cdot \frac{1000 \text{ kJ}}{\text{MJ}} \cdot \frac{1 \text{ t}}{1000 \text{ kg}} = 0,2119 \frac{\text{tCO}_2}{\text{MWh}} \quad (\text{Eq. 5.7})$$

Sent el primer terme el factor d'emissions de CO₂ per litre consumit durant el procés de producció d'energia elèctrica i el segon al poder calorífics del dièsel. La resta de valors utilitzats són factors de conversió necessaris per introduir els valors al MATLAB de manera unitària i obtenir resultats finals coherents.

5.5. Paràmetres del sistema d'emmagatzematge

Com s'ha vist en capítols anteriors, el sistema d'emmagatzematge utilitzat al sistema està definit a partir de quatre paràmetres els quals han de ser fixats abans de ser introduïts al problema a optimitzar. Per tal de simplificar el problema es considerarà que totes les bateries utilitzades a la xarxa són iguals, adoptant els mostrats a la taula 19 per cada paràmetre a definir [27].

C [MWh]	P_{max}^b [p.u.]	η [%]	SoCi [%]
1,12	2,2	0,9	0,2

Taula 19. Valors principals del sistema d'emmagatzematge.

Per determinar el valor inicial de l'estat de càrrega de la bateria s'ha realitzat diverses simulacions amb el programa d'optimització modificant aquest valor a cada iteració. Es va començar fixant el valor en 1, després a 0,5 i finalment a 0, comprovant que el model més òptim pel sistema es dona quan aquest està fixat a 0,2. Tot i això, s'ha de tenir en compte que aquest valor només a estat calculat pel primer escenari proposat, ja que el temps de simulació de cada un d'ells és molt extens i, conseqüentment no es pot garantir que sigui el més adequat per la resta de simulacions proposades. Tot i això, en el cas del primer escenari, el valor escollit podria variar en funció de les condicions ambientals del dia anterior, perquè si per exemple la previsió solar hagués sigut inferior a l'esperada el sistema de bateries acabaria amb un estat de càrrega diferent de l'esperat i, conseqüentment faria variar l'estat de càrrega inicial de dia següent.

Per aquest motiu no és possible garantir la utilització d'un estat de càrrega inicial el més òptim possible per cada sistema d'emmagatzematge del sistema perquè el programa no disposa de dades anteriors a les suposades.

Pel fet que en aquest cas no es considera la possibilitat de tenir un flux de potència que no sigui unidireccional, no és necessari diferenciar entre el rendiment del procés de càrrega i descàrrega de la bateria, ja que no es considera la possibilitat de vendre energia a l'exterior i, conseqüentment el sistema no ha de calcular si és rendible o no comprar o vendre en funció de cada cas d'estudi. Tot i això, si es volgués obtenir dades més acurades del sistema a estudiar en aquest treball seria possible diferenciar entre els dos estats de la bateria i diferenciar-los a les diferents equacions que la descriuen, però, per tal de simplificar el programa a optimitzar es consideren iguals.

5.6. Paràmetres de la demanda energètica

En aquest apartat es descriurà la metodologia utilitzada per crear els diferents perfils de demanda de cada bus del sistema estudiat i, finalment es mostraran els resultats obtinguts, els quals seran utilitzats per tots els casos d'estudi posteriors. S'ha de tenir en compte que el treball és centra en l'estudi de l'evolució del sistema en un període de temps determinat, el que implica que les potències actives i reactives siguin dependents del temps, creant d'aquesta manera models multiperíode a partir de perfils de consum de 24 períodes.

Per aconseguir perfils de demanda realistes per cada un dels busos s'ha creat sis perfils de demanda diferents, els quals estan basats a partir d'un article publicat per Cigré l'any 2013. L'assagi mostra dos perfils de potència diària aparent, un de residencial i un d'industrial i comercial, els quals estan representats a la figura 17.

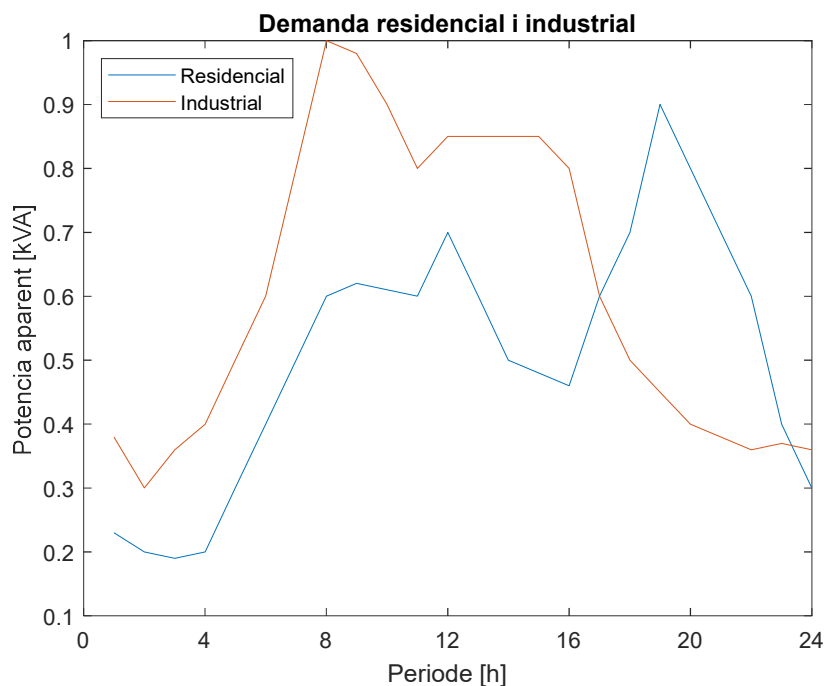


Figura 17. Perfils de demanda residencial i industrial.

A partir dels valors obtinguts anteriorment, es creen dos escenaris diferents per cada un dels dos perfils anteriors, obtenint finalment sis perfils finals amb els quals es crearan les demandes multiperiod de cada un dels 32 busos a estudiar. S’ha de tenir en compte que en aquest cas el primer bus del sistema només representa la connexió de la xarxa IEEE33 amb la xarxa externa de manera que aquest bus no tindrà cap perfil de demanda associat.

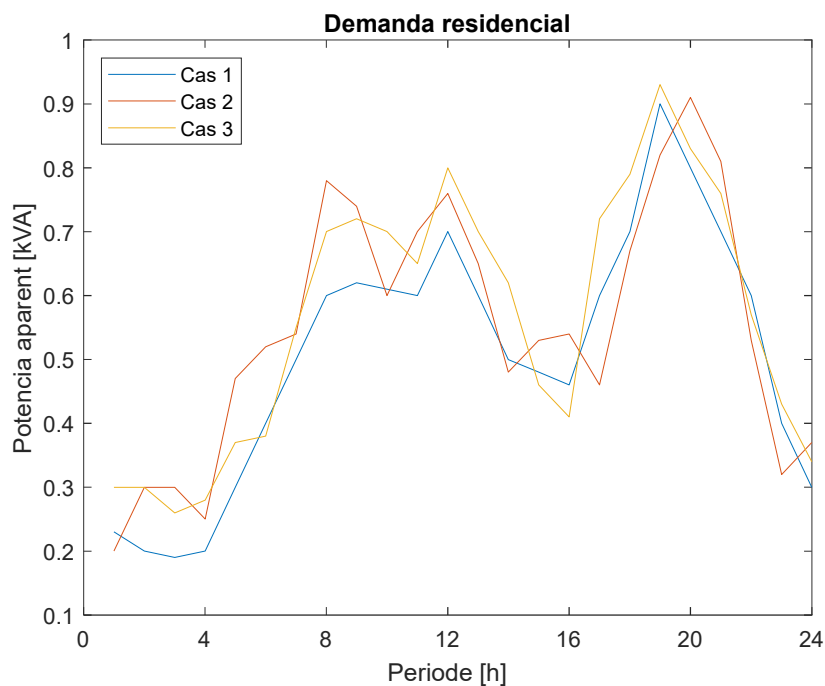


Figura 18. Perfils de demanda residencial creats.

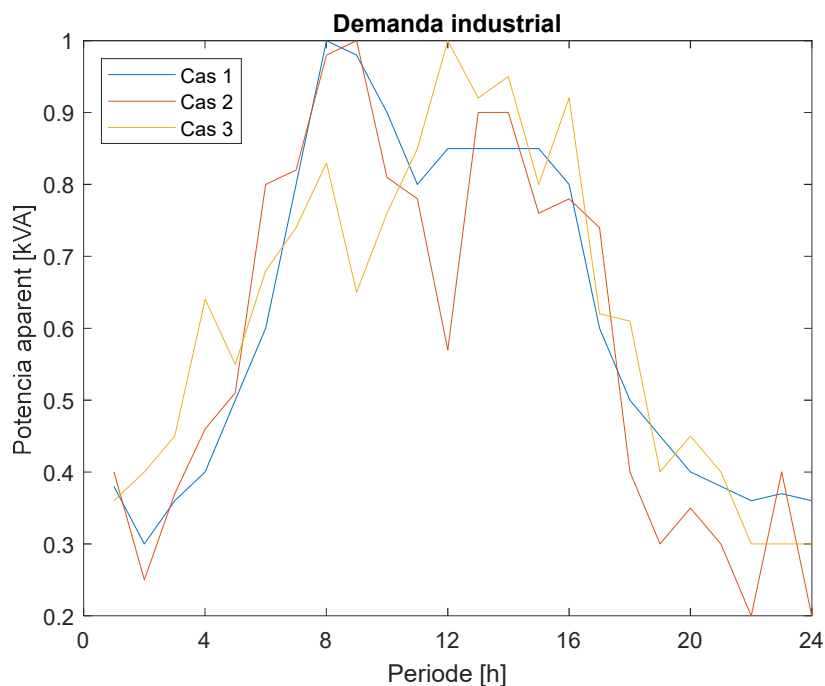


Figura 19. Perfils de demanda industrial creats.

A més, pel fet que les xarxes de distribució reals no disposen de càrregues associades amb percentatges de perfils de consum residencial i industrial iguals s'ha creat nou combinacions diferents amb les quals es realitzaran els càlculs per extreure les demandes dels 32 busos. La taula 20 mostra els percentatges utilitzats per crear cada escenari i el nombre de busos que segueix cada cas.

nº bus	Residencial [%]	Industrial [%]
4	0,3	0,7
6	0,35	0,65
5	0,4	0,6
3	0,45	0,55
4	0,5	0,5
2	0,55	0,45
3	0,6	0,4
4	0,65	0,35
1	0,7	0,3

Taula 20. Percentatges escollits per crear els diferents escenaris de demanda.

Finalment, es multipliquen els resultats obtinguts per cada escenari pels valors de les potències actives i reactives de cada bus donats per l'article del qual s'han extret la resta de dades de la xarxa IEEE33 estudiada. A continuació es mostren els diferents valors donats per l'article.

Bus	Pload [p.u.]	Qload [p.u.]	Bus	Pload [p.u.]	Qload [p.u.]
1	0,00	0,00	18	0,09	0,04
2	0,10	0,06	19	0,09	0,04
3	0,09	0,04	20	0,09	0,04
4	0,12	0,08	21	0,09	0,04

5	0,06	0,03	22	0,09	0,04
6	0,06	0,02	23	0,09	0,05
7	0,20	0,10	24	0,42	0,20
8	0,20	0,10	25	0,42	0,20
9	0,06	0,02	26	0,06	0,03
10	0,06	0,02	27	0,06	0,03
11	0,05	0,03	28	0,06	0,02
12	0,06	0,04	29	0,12	0,07
13	0,06	0,04	30	0,20	0,60
14	0,12	0,08	31	0,15	0,07
15	0,06	0,01	32	0,21	0,10
16	0,06	0,02	33	0,06	0,04
17	0,06	0,02			

Taula 21. Potències actives i reactives de cada node del sistema.

A partir dels percentatges anteriors, els valors de potència activa i reactiva i els sis perfils de consum es formulen les demandes de cada bus del sistema. A continuació es mostren les potències actives i reactives de cada bus utilitzades en els casos d'estudi del treball.

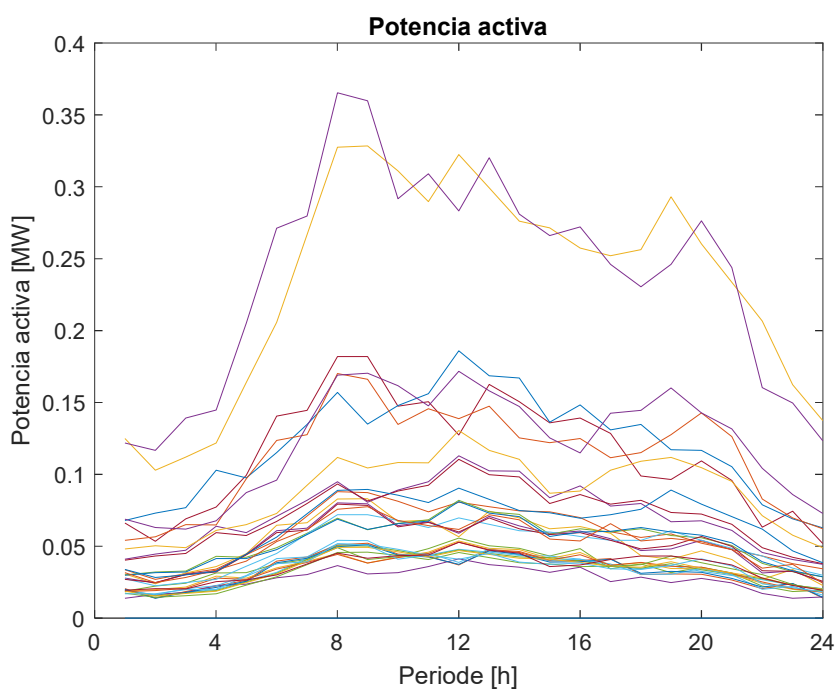


Figura 20. Perfils de demanda activa.

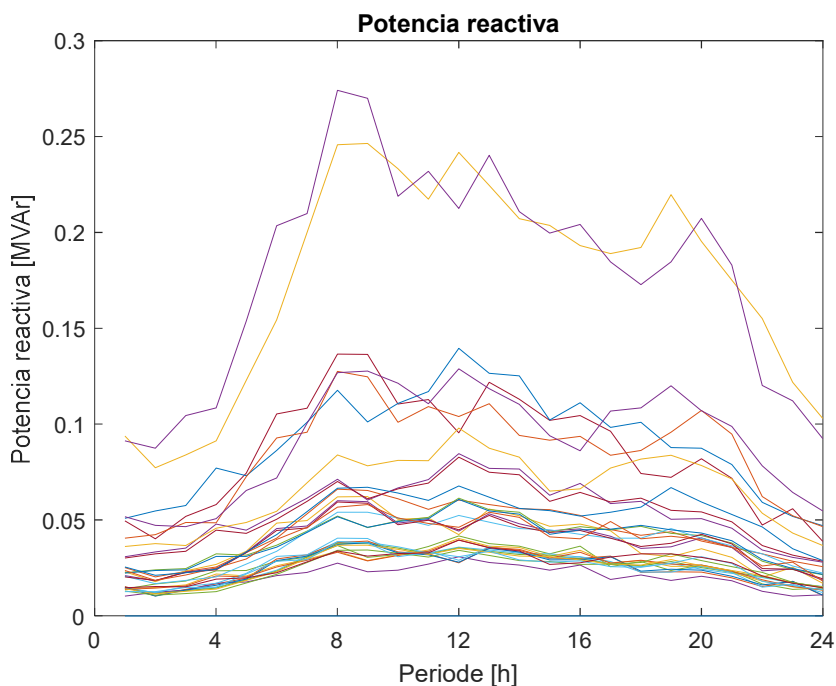


Figura 21. Perfils de demanda reactiva.

Bus	S [MVA]	P [MW]	Q [MVar]	Bus	S [MVA]	P [MW]	Q [MVar]
1	0	0	0	18	1,536	1,229	0,921
2	1,738	1,391	1,043	19	1,608	1,286	0,965
3	1,548	1,238	0,929	20	1,509	1,207	0,906
4	2,173	1,738	1,304	21	1,532	1,225	0,919
5	1,079	0,863	0,648	22	1,600	1,280	0,960
6	1,034	0,827	0,620	23	1,550	1,240	0,930
7	3,431	2,745	2,059	24	6,979	5,583	4,187
8	3,605	2,884	2,163	25	7,129	5,703	4,277
9	1,002	0,801	0,601	26	0,988	0,790	0,593
10	1,045	0,836	0,627	27	1,016	0,813	0,609
11	0,805	0,644	0,483	28	1,057	0,846	0,634
12	1,025	0,820	0,615	29	1,957	1,566	1,174
13	1,027	0,821	0,616	30	3,376	2,701	2,026
14	2,153	1,723	1,292	31	2,630	2,104	1,578
15	0,995	0,796	0,597	32	3,660	2,928	2,196
16	1,035	0,828	0,621	33	0,969	0,776	0,582
17	1,015	0,812	0,609				

Taula 22. Potències aparents, actives i reactives de cada node de la xarxa de distribució.

Conseqüentment, el sistema té una demanda energètica de potència activa de 51,045 MW i de 38,284 MVar de potència reactiva, les quals seran subministrades a partir dels dos sistemes de generació interns de la xarxa, els sistemes d'emmagatzematge o per la xarxa de transport.

6. Resultats

En aquest apartat es realitzaran quatre simulacions a partir del programa GAMS creat, variant les dades d'estudi inicials per tal d'obtenir resultats diferents i d'aquesta manera poder comparar-los entre si i determinar si el sistema creat funciona correctament.

Els dos primers casos d'estudi el programa limitarà la producció d'energia a partir del sistema fotovoltaic, forçant d'aquesta manera la utilització de les bombes dièsel i la compra d'energia a l'exterior. En canvi, el tercer cas d'estudi es permet una generació fotovoltaica superior a la pròpia demanda del sistema, originant al programa a trobar noves solucions per tal d'obtenir l'òptim global del problema proposat però tenint en compte sempre que el resultat obtinguts ha de concordar amb un resultat físic realista.

Per últim, es connecta a la xarxa el sistema de bateries exposat als capítols anterior i, d'aquesta manera visualitzar el seu funcionament i com es possible crear nous escenaris a partir d'aquests sistemes d'emmagatzematge.

6.1. Cas d'estudi 1

En aquest primer cas d'estudi, es considera una xarxa de distribució amb una generació fotovoltaica molt inferior a la del dièsel i sense connexió al sistema d'emmagatzematge, el que suposa la desconexió de totes les bateries instal·lades.

La taula 23 mostra les dades de generació d'ambdós sistemes, juntament amb la demanda total.

Generació fotovoltaica [MW]	Generació dièsel [MW]	Demanda [MW]
2,187	39,985	51,045

Taula 23. Dades inicials del primer cas d'estudi.

Conseqüentment, la generació total produïda pel sistema és de 42,172 MW, el que és una mica superior a la demanda total degut que el sistema està programat per tenir en compte les pèrdues energètiques.

Les potències nominals màximes que els sistemes fotovoltaics i dièsel podran generar a cada node instal·lat són els recollits a les taules 24 i 25.

Node	N3	N10	N15	N17	N19	N24	N29
Potència [MW]	0,06	0,03	0,02	0,06	0,04	0,03	0,05

Taula 24. Generació màxima permesa pel sistema fotovoltaic.

Node	N6	N11	N14	N21	N26	N32
Potència [MW]	0,3	0,2	0,49	0,5	0,3	0,11

Taula 25. Generació màxima permesa pel sistema dièsel.

En primer lloc, es mostren les diferents potències generades pel sistema fotovoltaic i el dièsel, ja que d'aquesta manera és possible determinar els períodes de temps amb una generació energètica inferior a la demanda esperada i, conseqüentment el programa considerarà necessari comprar energia de la xarxa elèctrica exterior.

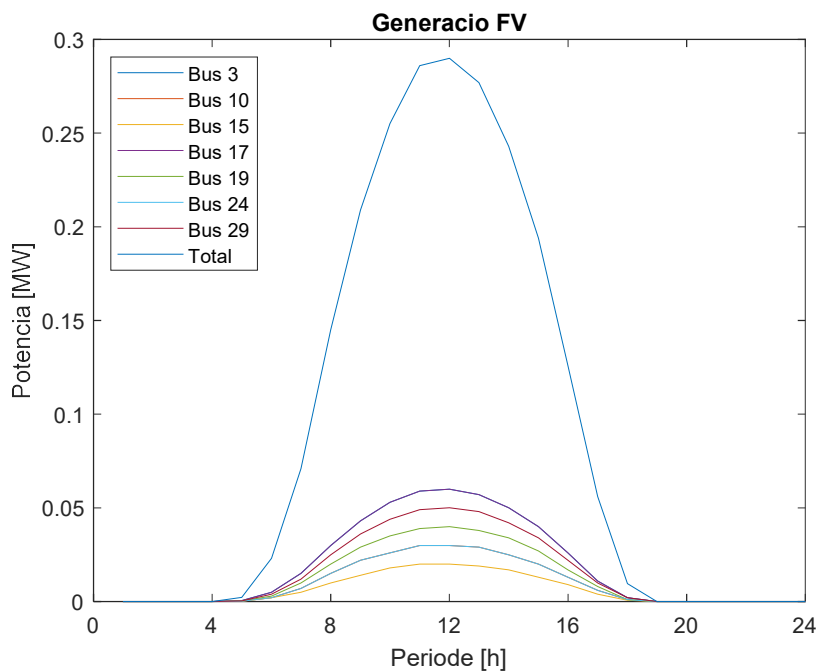


Figura 22. Perfils de generació fotovoltaica del primer cas d'estudi.

La figura del perfil de generació d'energia a partir del sistema fotovoltaic mostra que no donen retalls, és a dir, que el sistema pot generar sempre a la seva màxima capacitat. Això es produeix degut que s'ha prefixat una generació màxima de cada una de les centrals molt baixa en comparació amb les demandes totals de cada node, el que permet que tota l'energia produïda sigui entregada completament a les diferents càrregues del sistema.

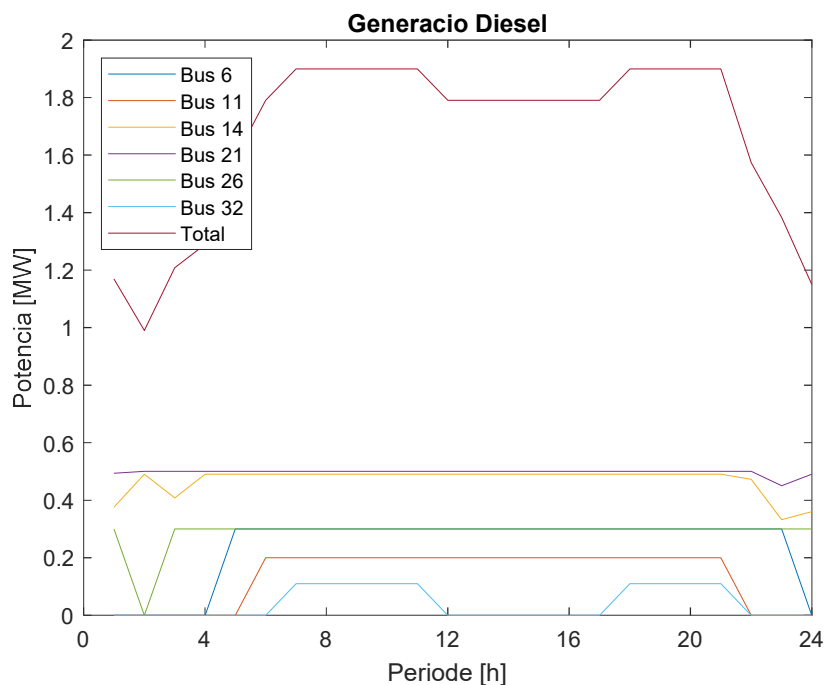


Figura 23. Perfils de generació dièsel del primer cas d'estudi.

Com es pot observar a les gràfiques anteriors, el sistema fotovoltaic aporta una quantitat d'energia bastant inferior a la generada a partir del dièsel. Això es deu a les mateixes restriccions imposades a l'inici del problema, ja que d'altra manera el programa hauria prioritzat la generació a partir de la font fotovoltaica perquè el seu cost de producció és inferior.

Tot i això, és evident que a l'hora d'optimitzar es prioritza la producció a partir del dièsel pel fet que d'aquesta manera es redueixen les pèrdues a causa del transport, ja que les petites centrals dièsel estan ubicades dins del sistema i, en alguns casos al mateix node, reduint d'aquesta manera les pèrdues energètiques. A més, també s'ha de tenir en compte que la producció dièsel resulta més econòmica que la compra d'energia a la xarxa exterior, afavorint la producció dièsel per sobre de la compra.

La gràfica 24 mostra la compra de potència elèctrica a la xarxa elèctrica exterior, la qual com s'ha comentat anteriorment, es dona quan la generació interna és insuficient per abastir les demandes totals de cada node.

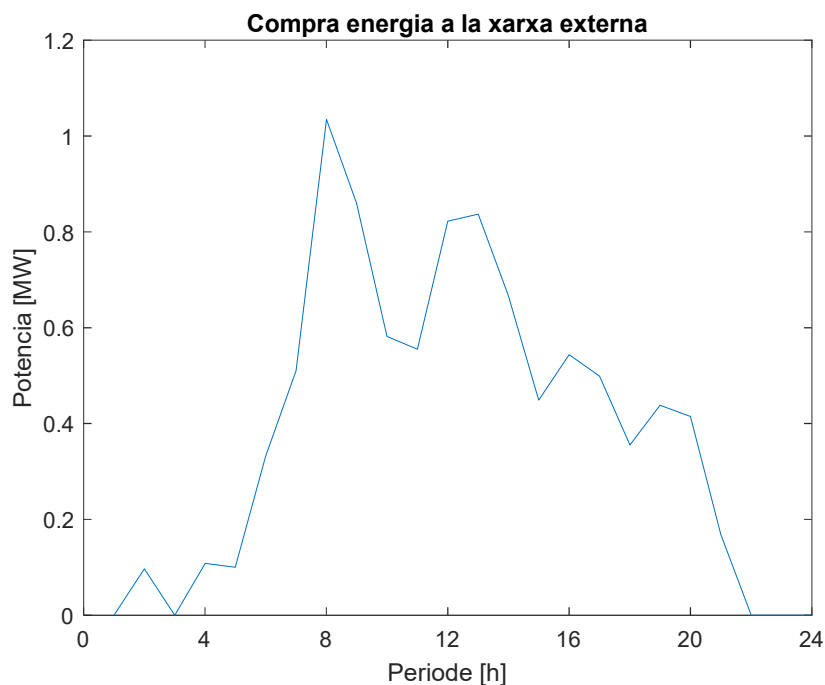


Figura 24. Perfils de compra d'energia del primer cas d'estudi.

Per últim, es mostren els perfils produïts a partir de la generació interna d'energia al sistema i la compra d'energia a la xarxa exterior juntament amb el perfil general de demanda del sistema estudiat.

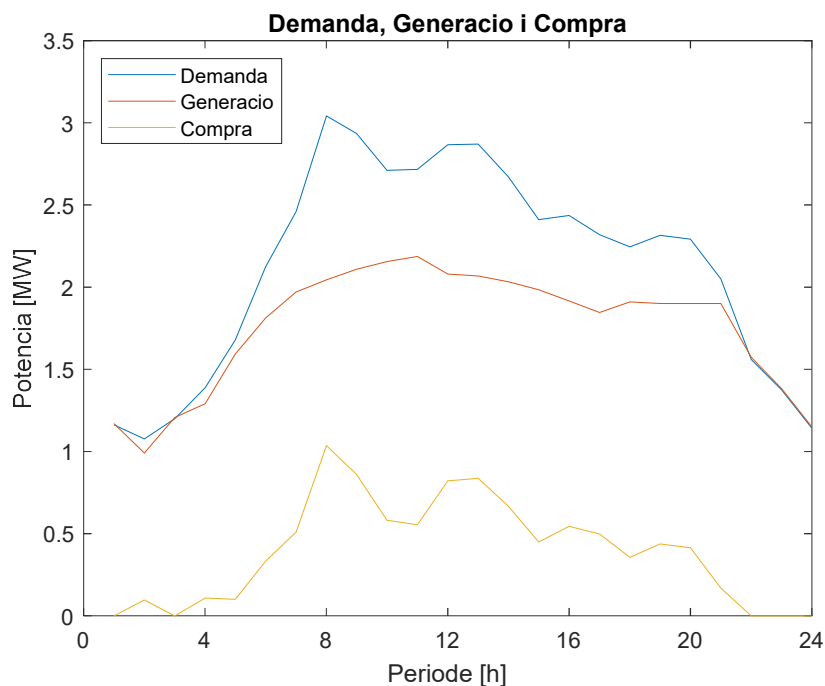


Figura 25. Perfils de generació interna, compra i demanda total del primer cas d'estudi.

S'observa de la figura anterior que la major part de l'energia utilitzada per abastir les diferents càrregues connectades al sistema es dona a partir dels sistemes de producció interns, especialment a partir del dièsel, tal com s'ha comentat anteriorment, comprant energia de la xarxa externa només quan aquesta generació és inferior a la demanda del sistema i les seves pèrdues.

Aquesta compra d'energia es dona pel fet que a les dades inicials es fixa una producció màxima del sistema dièsel i, consegüentment, quan aquesta juntament amb la producció solar són inferiors a la demanda dels nodes el sistema necessita comprar energia de l'exterior.

Com s'ha comprovat anteriorment, el sistema dièsel opera a la seva màxima capacitat gairebé durant tots els períodes de temps, suprimint la possibilitat de generar més energia a partir d'aquest sistema.

Evidentment, aquesta particularitat sumada al fet de la baixa producció d'energia fotovoltaica obliga al sistema a comprar energia, el que es dona en moments de màxima demanda energètica, tal com es mostra a l'última gràfica presentada.

Per últim, es mostren els valors característics obtinguts de la primera simulació estudiada.

Costos d'operació [€]	Vmax [V]	Vmin [V]	I _{max} [A]	I _{min} [A]
218,312	1,006	0,967	1,905	0,017

Taula 26. Resultats finals del primer cas d'estudi.

Els punts de màxim voltatge i intensitat es donen als nodes amb generació interna més elevats, degut que les demandes totals del sistema són similars durant el mateix període de temps. Aquest fenomen es produeix pel fet que en aquests punts particulars, el sistema ha de suportar un flux energètic superior, ja que no només és necessari abastir les càrregues connectades al node en qüestió, sinó que també es produeix un transport energètic quan

aquesta demanda és inferior a la generació total. En canvi, els voltatges i intensitats mínims es donen als nodes sense generació interna el que afavoreix un flux energètic inferior.

6.2. Cas d'estudi 2

El segon cas d'estudi manté els valors màxims de generació dièsel, però augmenta els fotovoltàics sense aconseguir una generació superior a la mateixa demanda del sistema. Com en el cas anterior, en primer lloc, es presenten les dades inicials del problema a estudiar.

Generació fotovoltaica [MW]	Generació dièsel [MW]	Demanda [MW]
16,564	32,317	51,045

Taula 27. Dades inicials del segon cas d'estudi.

Node	N3	N10	N15	N17	N19	N24	N29
Potència [MW]	0,1	0,4	0,2	0,4	0,4	0,3	0,4

Taula 28. Generació màxima permesa pel sistema fotovoltaic.

Node	N6	N11	N14	N21	N26	N32
Potència [MW]	0,3	0,2	0,49	0,5	0,3	0,11

Taula 29. Generació màxima permesa pel sistema dièsel.

A partir d'aquestes dades inicials el sistema calcula el resultat més òptim minimitzant la funció objectiu, obtenint finalment els resultats mostrats a les figures 26, 27, 28 i 29.

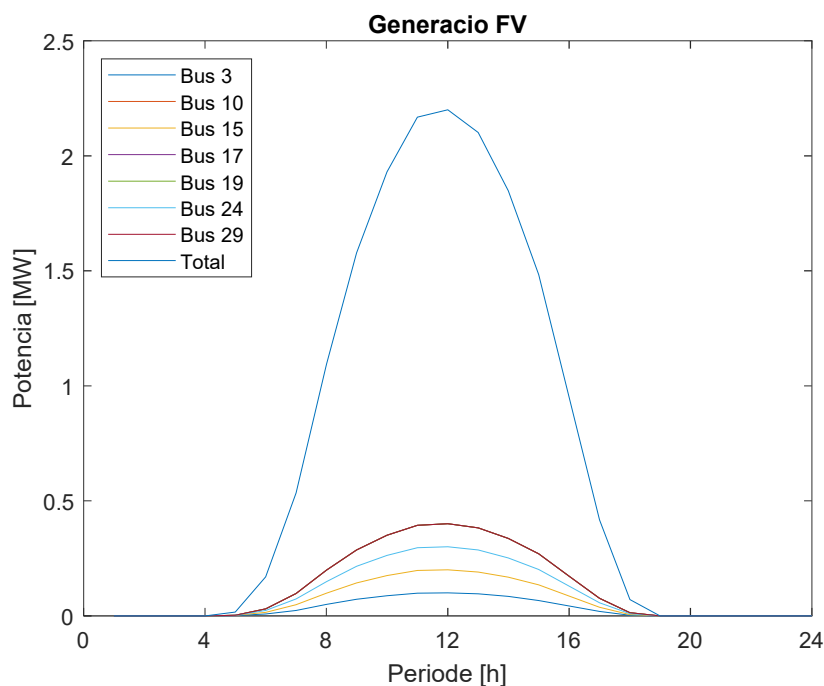


Figura 26. Perfils de generació fotovoltaica del segon cas d'estudi.

Aquesta primera gràfica mostra els valors de producció solar de cada node del sistema en funció del període, i s'observa com aquesta no és retallada, sinó que genera la màxima energia per cada instant de temps.

En canvi, la figura 27 mostra l'evolució de la generació dièsel i es mostra com aquesta en alguns punts deixa de generar energia per tal de no sobrecarregar el sistema, ja que d'altra manera la generació seria superior a la demanda i, perquè les bateries són inexistentes en aquest cas, el

sistema no podria suportar aquest excedent energètic. A més, pel fet que el sistema fotovoltaic té uns costos de generació inferiors als del sistema dièsel, el programa prioritza la producció a partir dels sistemes solars i, conseqüentment atura la generació dièsel, donant prioritat als sistemes renovables.

Tot i això, la producció dièsel adopta uns valors de generació bastant constants excepte entre les 11:00 i les 14:00 h, on es produeix talls en la seva generació. Aquestes parades en els generadors dièsel es donen perquè en aquest període es produeix el pic de màxima generació del sistema fotovoltaic el que obliga a les bombes dièsel a disminuir la seva producció per tal de mantenir el valor de la demanda per sobre del de la producció i d'aquesta manera evitar sobrecàrregues al sistema estudiat.

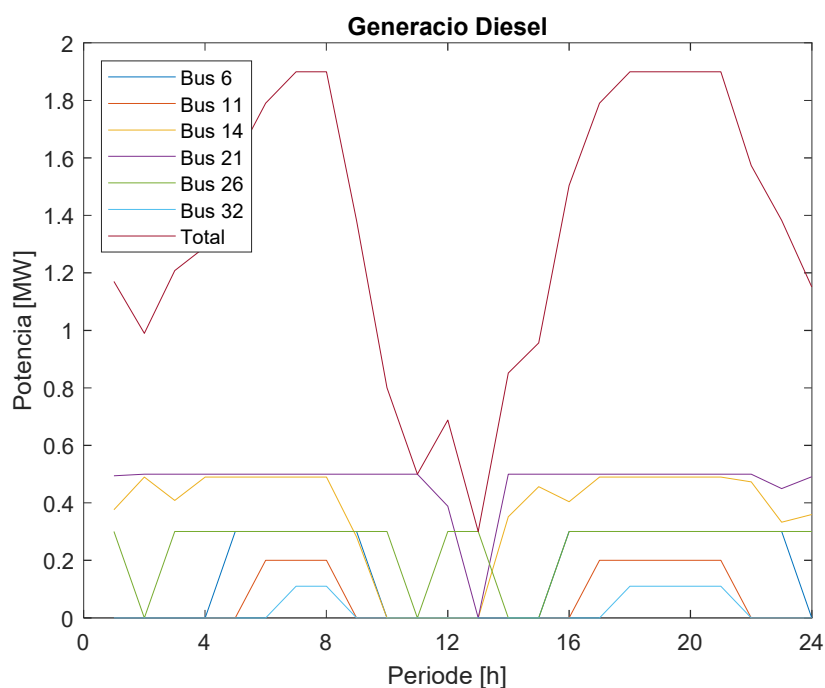


Figura 27. Perfils de generació dièsel del segon cas d'estudi.

La gràfica 28 mostra els períodes de temps on el sistema necessita comprar energia externa per tal de satisfer les demandes totals de cada node, les quals es donen principalment a les 5:00, on els sistemes fotovoltaics no entreguen pràcticament cap energia i els dièsel ja operen al seu nivell de màxima potència. A més, també es determina que la compra d'energia es dona principalment als períodes de temps sense producció fotovoltaica, el que indica que el sistema estudiat és pràcticament independent de la xarxa externa durant el dia, tot i que és necessari augmentar la producció a la nit per tal de satisfer les demandes.

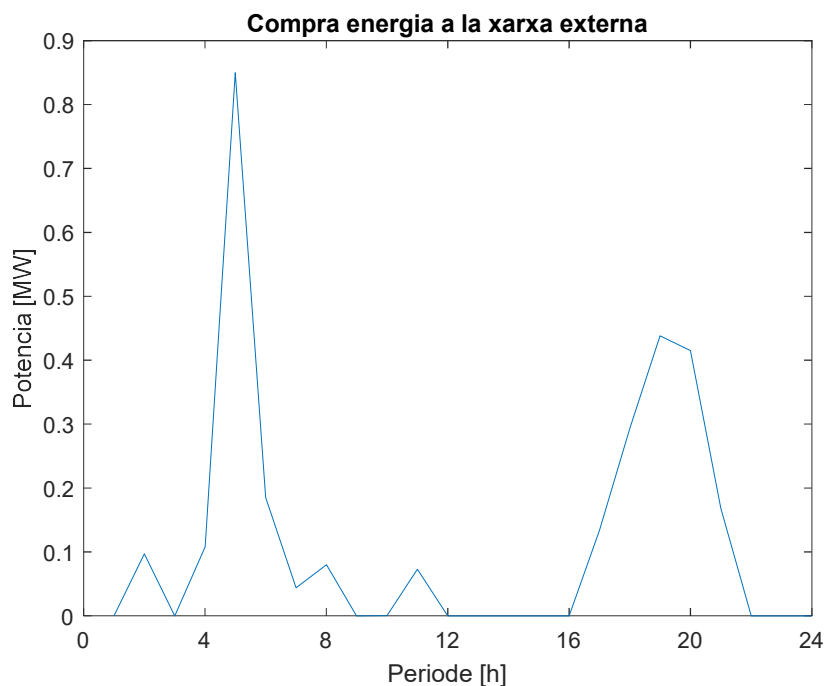


Figura 28. Perfils de compra d'energia del segon cas d'estudi.

L'última figura mostra com s'ha comentat que el sistema és bastant autosuficient, sobretot durant els períodes amb generació fotovoltaica. Això indica que el nou sistema creat aprofita al màxim l'energia solar, sense retallar-la el que suposa un cost de producció d'aquest sistema igual a 0. A més, el sistema dièsel és capaç d'aportar gairebé tota l'energia necessària per ajudar al sistema solar a subministrar la demanda esperada per cada node. En conseqüència, es determina que la col·locació d'una potència solar superior comportaria retallades en aquesta, ja que en aquest cas d'estudi tots els nodes fotovoltaics ja generen a la seva màxima potència i no és necessari generar o comprar gran quantitat d'energia per acabar de subministrar la totalitat de la demanda. Tot i això, seria possible augmentar una mica la producció de les bombes dièsel per tal d'aconseguir un sistema independent de la xarxa elèctrica exterior, tot i que en aquest cas d'estudi no s'ha volgut sobredimensionar tant les bombes dièsel per tal d'observar la instrucció d'energia exterior.

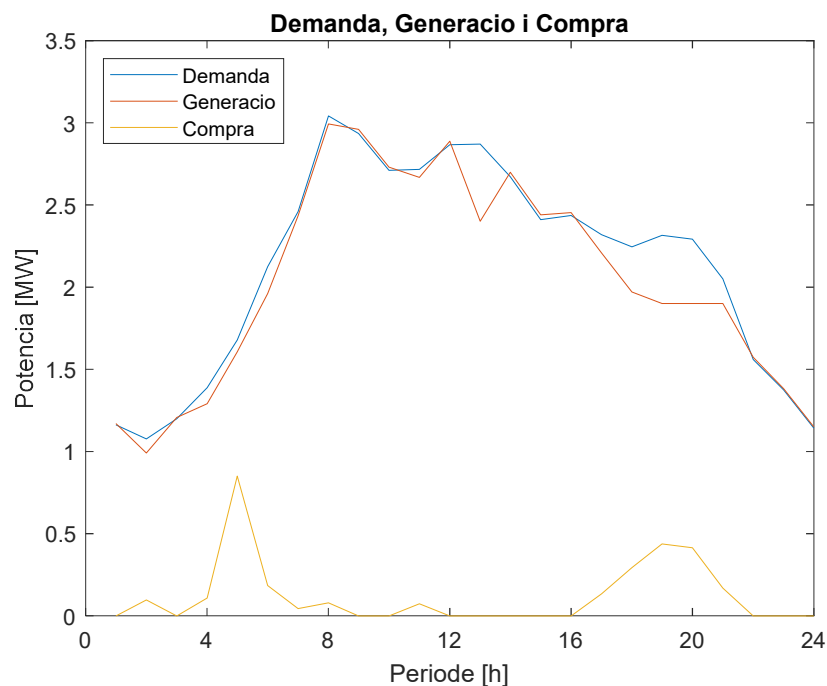


Figura 29. Perfils de generació interna, compra i demanda total del segon cas d'estudi.

Finalment, la taula dóna els valors finals obtinguts de la segona simulació realitzada:

Costos d'operació [€]	Vmax [V]	Vmin [V]	Imax [A]	Imin [A]
178,421	1,016	0,962	1,82	0,012

Taula 30. Resultats finals del segon cas d'estudi.

S'observa que el valor Objectiu és inferior al donat en el cas anterior, degut que el sistema ha sigut capaç de produir més energia a partir de la generació fotovoltaica, aconseguint uns costos totals inferiors, ja que aquest tipus de sistema no comporten cap cost associat a no ser que es produeixi un retall en la seva producció, el que no succeeix en aquest cas d'estudi.

Els valors de voltatge i intensitat mínims i màxims han variat, però no de manera considerable i, com en el cas anterior, els valors màxims es donen als nodes amb una generació superior a la seva demanda i els mínims quan el node només compte amb càrregues connectades.

A més, els costos totals d'operació del nou sistema creta són inferiors als trobats per l'apartat anterior, el que mostra que l'augment de la potència fotovoltaica permet reduir els costos totals.

6.3. Cas d'estudi 3

El tercer cas d'estudi contemplarà una generació dièsel complementada amb fotovoltaica, però al contrari que en el cas anterior, la generació solar serà superior a la mateixa demanda, forçant al programa a retallar la producció, ja que no és possible un flux de potència bidireccional. Com en el cas anterior, el sistema de bateries roman desconnectat.

Generació fotovoltaica [kW]	Generació dièsel [kW]	Demanda [kW]
20,963	32,806	51,045

Taula 31. Dades inicials del tercer cas d'estudi.

Com mostra la taula anterior, la xarxa interna serà capaç de produir 62,769 MW, el que supera el valor de la demanda total esperada pel sistema. Això forçarà al programa a retallar la producció fotovoltaica degut que el sistema no compte amb un sistema d'emmagatzematge on sigui possible guardar aquests excedents energètics.

A continuació es mostren els valors de potència màxima fixats per aquest tercer cas d'estudi.

Node	N3	N10	N15	N17	N19	N24	N29
Potència [MW]	0,5	0,5	0,5	0,6	0,4	0,3	0,5

Taula 32. Generació màxima permesa pel sistema fotovoltaic.

Node	N6	N11	N14	N21	N26	N32
Potència [MW]	0,3	0,2	0,49	0,5	0,3	0,11

Taula 33. Generació màxima permesa pel sistema dièsel.

La primera figura mostra que es produeix retalls en la producció fotovoltaica perquè la demanda en aquests períodes de temps era inferior a la producció, el que generava excedents energètics i, pel fet que aquest cas d'estudi no contempla la possibilitat d'inserir energia a la xarxa elèctrica general, el programa atura part de la producció solar per tal de no generar excedents. Tot i això, no tots els busos sofreixen aturades parcials en els seus sistemes solars, ja que alguns d'ells generen una quantitat d'energia igual o inferior a la demandada.

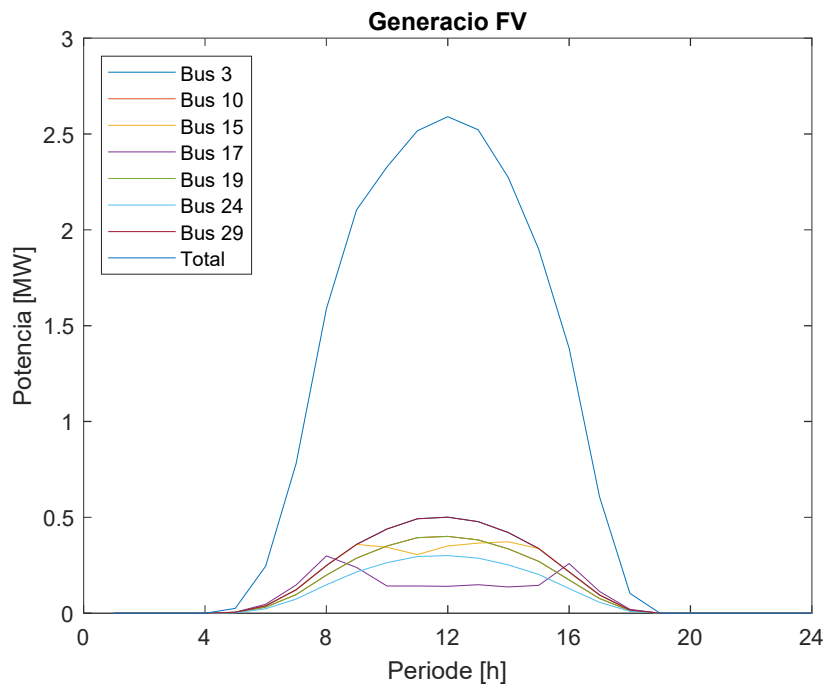


Figura 30. Perfils de generació fotovoltaica del tercer cas d'estudi.

La figura 31 mostra la producció energètica aportada per les bombes dièsel connectades al sistema estudiat.com en els dos casos anteriors, el programa manté gairebé estable la producció de les bombes amb una potència màxima superior, connectat les més reduïdes només quan la demanda augmenta i el sistema fotovoltaic i els generadors dièsel més grans no poden generar una quantitat d'energia igual a aquesta.

En aquest cas també s'observa com aquests sistemes sofreixen reduccions a la seva producció en el període amb una generació fotovoltaica més gran.

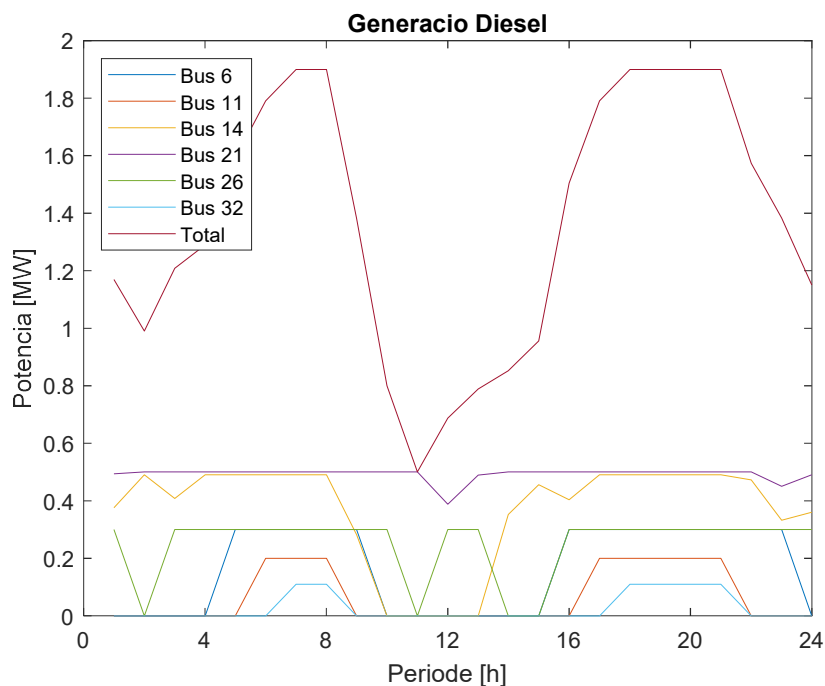


Figura 31. Perfils de generació dièsel del tercer cas d'estudi.

Aquesta figura mostra la quantitat d'energia comprada a la xarxa elèctrica exterior per tal de subministrar la totalitat de les demandes de cada node. Com en els casos anteriors, el programa només opta per aquesta opció quan la generació interna no és suficient per abastir les càrregues connectades i, per tant, gairebé no es compra energia en els períodes de temps amb una producció solar elevada.

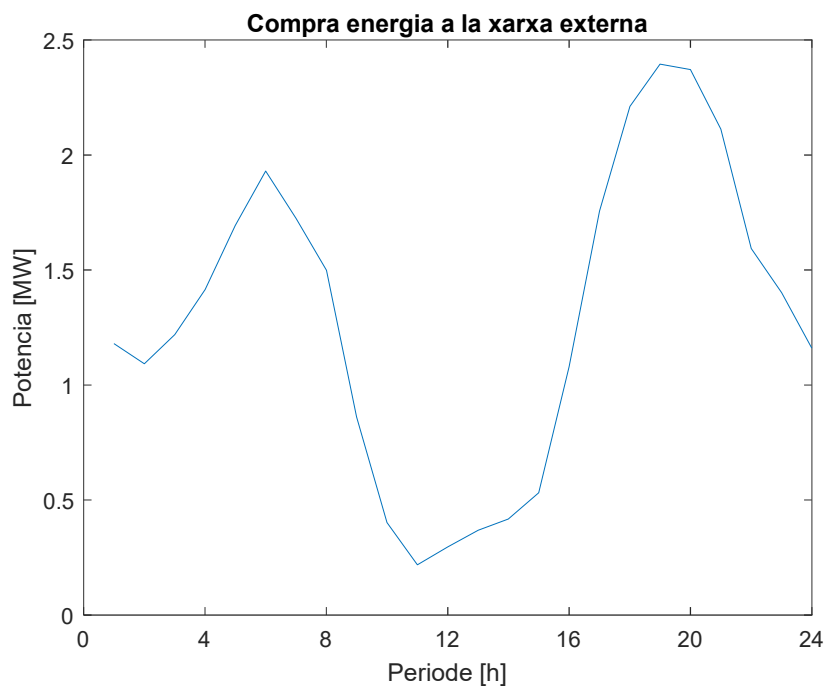


Figura 32. Perfils de compra d'energia del tercer cas d'estudi.

L'última gràfica mostra que el sistema creat aconsegueix generar quantitats d'energia superiors als obtinguts en el cas anterior, el que ha sigut possible gràcies a augmentar la potència màxima fotovoltaica.

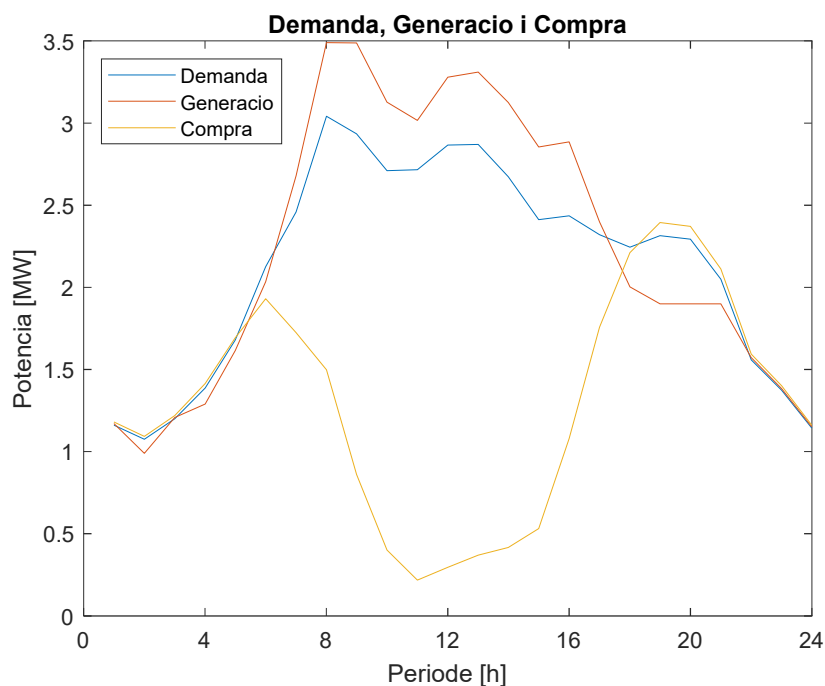


Figura 33. Perfils de generació interna, compra i demanda total del tercer cas d'estudi.

Tot i això, s'ha de tenir en compte que la solució donada pel programa retorna una solució que només és òptima quan s'aplica la relaxació vista al capítol 4.2, pel fet que el balanç de potència obtingut no compleix amb les equacions no relaxades en alguns períodes de temps, el que obliga a tractar tot el problema a partir de les equacions relaxades per obtenir una solució. Això es produeix degut que alguns busos no compleixin el balanç de potència esperat és a causa de la sobreproducció d'energia fotovoltaica.

Cal destacar que el programa està pensat per minimitzar els costos de producció i les pèrdues energètiques el que implica que si el programa no es trobés relaxat senzillament retallaria els excedents fotovoltaics quan la seva producció fos superior a la demanda total del sistema. En aquest cas, però el programa troba una nova solució a causa de la implementació de la relaxació de segon ordre introduïda a les equacions principals.

En conseqüència en aquest cas d'estudi el programa, per tal de continuar minimitzant els costos de producció, no retalla els excedents fotovoltaics sinó que augmenta el corrent del sistema per tal de dissipar els excedents en forma de pèrdues energètiques, el que és més econòmic que pagar la taxa associada al retall de la producció solar. Tot i això, aquesta solució no és vàlida perquè no és possible augmentar indefinidament la intensitat del sistema i, conseqüentment és necessari trobar una altra solució a aquest problema.

Per aquest motiu es crea una nova funció objectiu orientada a determinar l'òptim global del problema quan aquest sigui factible sense augmentar el corrent del sistema i, conseqüentment és necessari que es compleixin les equacions relaxades vistes en els capítols anteriors.

Tot i això, el nou programa creat mantindrà les mateixes equacions que l'anterior, i per tal de seguir buscant els valors que minimitzin els costos d'operació, l'antiga funció objectiu es converteix en una restricció més del nou problema, i per tant, és necessari crear una nova funció objectiu, la qual busca reduir les pèrdues energètiques degut que és l'única que aconseguirà determinar l'òptim global del problema per a cada cas d'estudi sense donar error.

$$Fobj = \sum_{n=0}^{33} \sum_{t=0}^{24} [r_n \cdot l_{nm_t}]; \forall n \in N^{GD}, \forall t \in T \quad (\text{Eq. 6.1})$$

A més, per tal de seguir l'evolució de la resolució del nou problema es fixa un paràmetre ρ que finalment mostrarà els valors mínims adoptats per satisfer la relaxació del problema.

$$\rho = \sum_{n=0}^{33} \sum_{t=0}^{24} [Y_{n_t} \cdot a_g + P g_{n_t}^{GD} \cdot b_g] + \sum_{n=0}^{33} \sum_{t=0}^{24} [(d^{pv} \cdot g_t^{pv} - P g_{n_t}^{pv}) \cdot \delta]; \forall n \in N^D, \forall n \in N^{FV}, \forall t \in T \quad (\text{Eq. 6.2})$$

Aplicant aquestes modificacions s'aconsegueix crear un nou programa que retalla la potència fotovoltaica quan es generen excedents energètics en comptes d'augmentar la intensitat del sistema elèctric com succeïa anteriorment, obtenint un resultat molt semblant al no exacte però amb valors d'intensitat i potència realistes.

Tot i això, el programa mostra un excedent energètic elevat durant les hores de màxima producció a partir de la generació fotovoltaica, el que genera unes pèrdues energètiques elevades durant aquestes hores, però pel fet que el programa vol minimitzar els costos d'operació considera millor produir aquesta dissipació energètica en comptes de retallar més fotovoltaica. No obstant això, des del punt de vista de l'operador de la xarxa, el sistema no és eficient i a més, introdueix diverses problemàtiques degudes a la sobreesaturació de les línies. Per consegüent, per tal d'evitar aquest problema es pot considerar la possibilitat d'introduir un sistema de bateries, la qual cosa permetria aconseguir un nou sistema menys saturat i a més, s'aconseguiran uns costos d'operació totals inferiors.

Per últim, es mostren els valors característics obtinguts a partir de la simulació.

Costos d'operació [€]	Vmax [V]	Vmin [V]	Imax [A]	Imin [A]
156,984	1,02	0,971	1,91	0,021

Taula 34. Resultats finals del tercer cas d'estudi.

Tal com mostra la taula anterior, el nou sistema creat permet fer funcionar la xarxa a partir d'uns costos d'operació inferiors als vistos a l'apartat anterior, el que succeeix perquè el sistema és capaç de generar més electricitat a partir del sistema fotovoltaic, el qual no té associat cap cost de producció. També cal comentar que, com en els dos casos anteriors, el sistema experimenta un gradient de voltatge i corrent entre els diferents nodes del sistema els quals varien en funció de l'energia que circula per cada part del sistema elèctric.

6.4. Cas d'estudi 4

Per l'últim cas d'estudi es connecta el sistema complet de bateries per tal de simular el comportament de la xarxa del cas anterior, però amb el suport d'un sistema d'emmagatzematge i, conseqüentment es manté gairebé estable la generació d'ambdós sistemes, tot i que s'augmenta la producció fotovoltaica per tal de visualitzar millor el funcionament del sistema d'emmagatzematge.

Com en els casos anteriors, en primer lloc, es mostren els valors inicials col·locats al programa.

Generació fotovoltaica [kW]	Generació dièsel [kW]	Demanda [kW]
33,123	11,234	51,045

Taula 35. Dades inicials del segon cas d'estudi.

Conseqüentment, la generació total del sistema intern és igual a 52,319 kW, superant la demanda total de les càrregues connectades. Com en el cas anterior, el sistema haurà de retallar la producció d'energia sempre que la producció sigui superior a la demanda i el sistema d'emmagatzematge connectat estigui a la seva màxima capacitat.

A continuació es mostren els valors de potència màxima fixats per aquest últim cas d'estudi.

Node	N3	N10	N15	N17	N19	N24	N29
Potència [MW]	0,7	0,6	0,7	0,6	0,6	0,5	0,7

Taula 36. Generació màxima permesa pel sistema fotovoltaic.

Node	N6	N11	N14	N21	N26	N32
Potència [MW]	0,3	0,2	0,49	0,5	0,3	0,11

Taula 37. Generació màxima permesa pel sistema dièsel.

La primera gràfica mostra l'evolució de la generació fotovoltaica al llarg del dia.

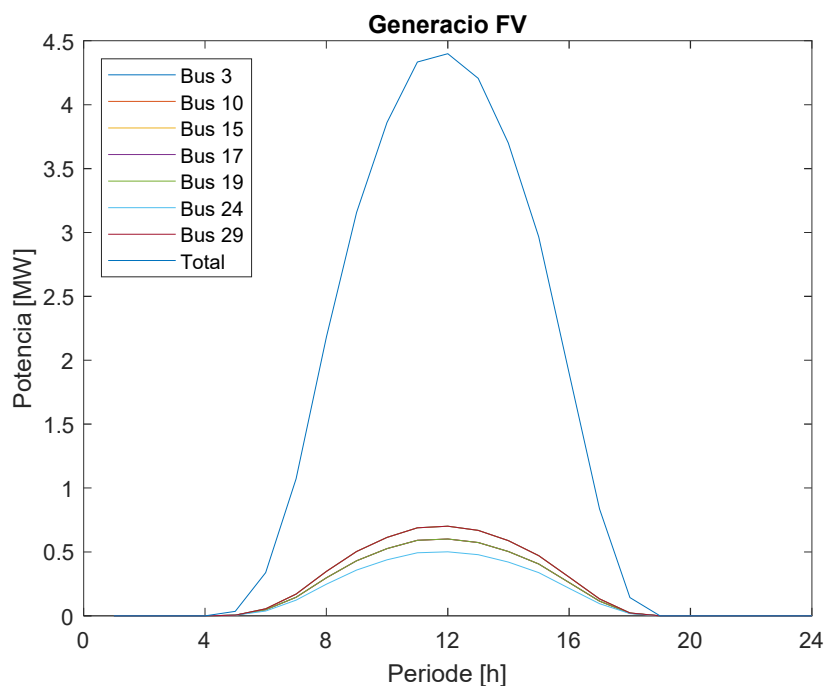


Figura 34. Perfils de generació fotovoltaica del quart cas d'estudi.

En aquest cas, tal com mostra la figura anterior el sistema no retalla generació fotovoltaica degut que els excedents produïts s'emmagatzemen a les bateries instal·lades als diferents nodes, el que permet crear un sistema més econòmic degut que, al permetre generar la quantitat màxima d'energia fotovoltaica no es necessari aplicar la taxa corresponent. A més a més, no es necessari comprar energia a la xarxa externa ni generar-la a partir de les bombes dièsel, les quals comporten un cost associat no només a la compra de combustible, sinó també pel que fa a les emissions de CO₂ generades.

La figura 35 mostra l'estat de càrrega del sistema de bateries instal·lat, el que permet observar que aquest es carrega durant les hores amb una producció solar major, degut que l'energia generada per aquest sistema és superior a la demanda total momentània del sistema i, degut que retallar els excedents comporta el pagament d'una taxa econòmica, el sistema emmagatzema els excedents per tal d'utilitzar-los a als períodes amb una producció solar inferior o nul·la. S'ha de tenir en compte que si el soc inicial fos superior al contemplat per aquest cas d'estudi, el sistema no compraria una quantitat d'energia tan gran a la xarxa, ja que prioritzaria subministrar la xarxa a partir de l'energia de les bateries.

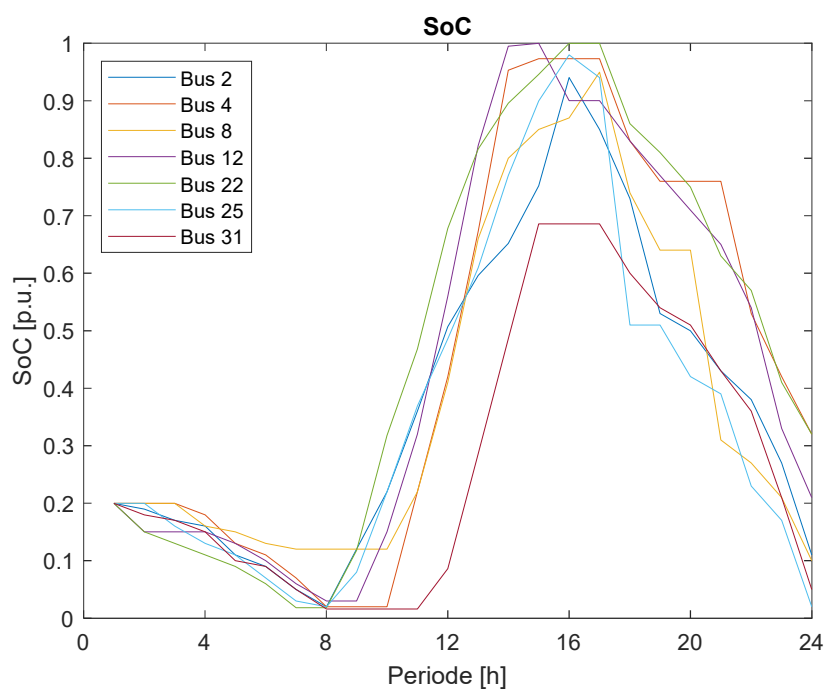


Figura 35. Perfils del SoC del sistema d'emmagatzematge del quart cas d'estudi.

La figura 36 mostra els diferents perfils de cada bomba dièsel col·locada a la xarxa de distribució, els quals romanen gairebé tots apagats durant les hores de màxima producció solar, el que es produeix pel fet que s'ha col·locat unes potències de generació fotovoltaiques prou grans com per poder produir l'energia necessària durant el període de temps comprès entre les 12 del matí i les 2 de la tarda. Això

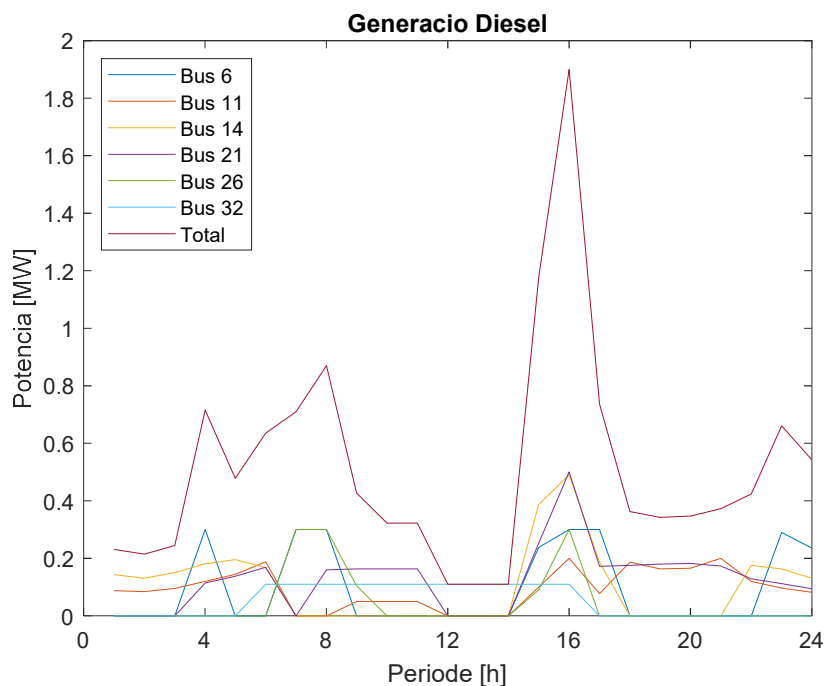


Figura 36. Perfils de generació dièsel del quart cas d'estudi.

La gràfica 37 presentada mostra la compra d'energia a la xarxa elèctrica exterior durant el dia estudiat. Es possible observar com aquesta adopta valors igual a zero des de les 9 del matí fins a les 3 de la tarda, el que succeeix degut que durant aquest període de temps el sistema fotovoltaic i dièsel és capaç d'abastir la totalitat de la demanda del sistema i, en conseqüència no es necessari comprar energia de la xarxa exterior. També es possible observar que la compra d'energia externa és considerablement inferior a la vista en el cas anterior el que es possible gràcies a la connexió del sistema de bateries, el qual permet no només eliminar el retall de fotovoltaica, sinó també alimentar les diferents càrregues connectades sense necessitat de generar o comprar electricitat.

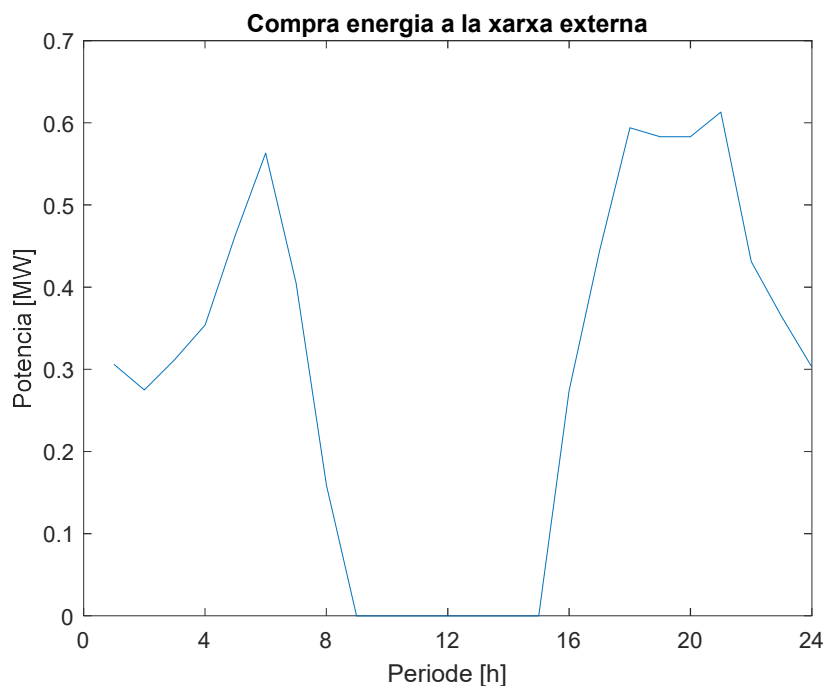


Figura 37. Perfils de compra d'energia del quart cas d'estudi.

Per últim, es mostren els diferents perfils de la demanda total del sistema, la generació i la compra d'energia a la xarxa elèctrica exterior. Com en el cas anterior, el sistema fotovoltaic genera més energia que la que és capaç de gastar o emmagatzemar al sistema de bateries, el que es tradueix en pèrdues energètiques, les quals s'observen entre les vuit del matí i les dues de la tarda. Evidentment, s'ha de tenir en compte que pel fet que el programa ha calculat aquesta última solució a partir de la funció objectiu mostrada al cas d'estudi tres, es possible garantir que el resultat obtingut és prou òptim i no permet unes intensitats de línia incoherents.

Una possible manera de millorar la solució donada passaria per augmentar la capacitat de les bateries o augmentar el nombre total dins del sistema, aconseguint d'aquesta manera un sistema pràcticament autosuficient i amb unes generacions de CO₂ reduïdes.

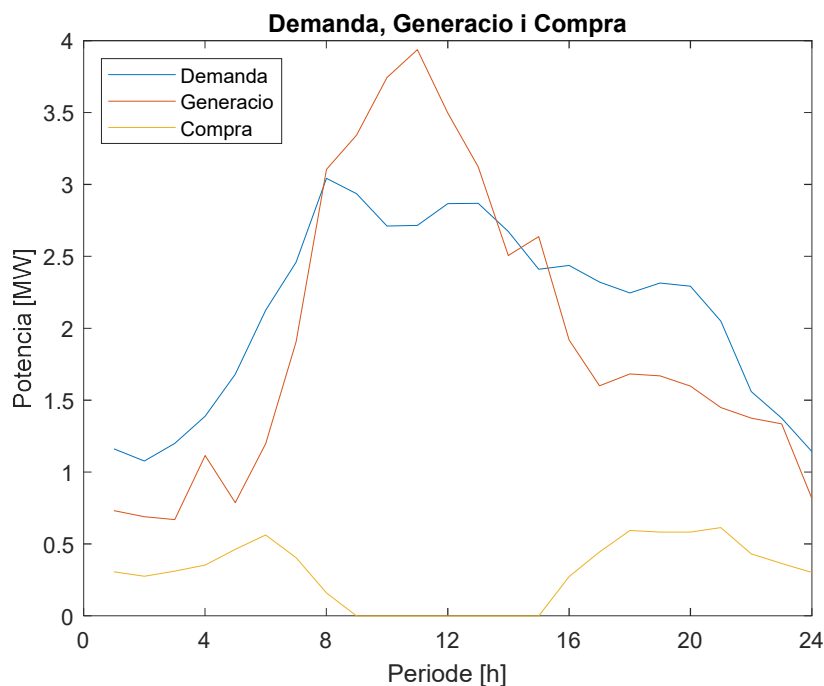


Figura 38. Perfils de generació interna, compra i demanda total del quart cas d'estudi.

Per acabar l'últim cas d'estudi, es presenten els resultats característics de la simulació realitzada.

Costos d'operació [€]	Vmax [V]	Vmin [V]	I _{max} [A]	I _{min} [A]
102,452	1,09	0,97	8,91	0,321

Taula 38. Resultats finals del tercer cas d'estudi.

Com en els casos anteriors, els valors més grans obtinguts tan pel que fa al voltatge com a la intensitat es donen als nodes amb generació o sistema de bateries i, en canvi, els de més petits es troben als nodes que només contempen càrregues aplicades. A més, el valor objectiu final mostra que el nou sistema creat és més econòmic que l'anterior, el que succeeix perquè no és necessari comprar o generar a partir de les bombes dièsel una quantitat d'energia tan gran, el que permet reduir els costos en aquest aspecte. També s'ha de tenir en compte que en aquests cas no és necessari pagar les taxes associades al retall de generació fotovoltaica, ja que en aquest cas els excedents produïts són emmagatzemats o considerats com a pèrdues energètiques, el que tot i no ser gaire eficient, permet obtenir uns costos totals inferiors.

A partir de les diferents simulacions realitzades es possible comprovar que el sistema prioritza la generació fotovoltaica per sobre de la resta, utilitzat com a segona opció les bombes dièsel si el preu de compra d'energia a la xarxa exterior és superior als costos associats a les bombes de la xarxa interna. D'aquesta manera s'ha pogut obtenir diversos costos d'operació els quals disminueixen amb l'aparició del sistema de bateries, el que es possible degut que aquests són carregats a partir del sistema fotovoltaic i, en conseqüència la seva generació no comporta costos associats.

Les simulacions també han permès mostrar les diverses pèrdues energètiques produïdes a la xarxa interna, les quals es redueixen dràsticament si no hi ha excedents energètics, el que es pot evitar disminuint la producció energètica o instal·lant bateries amb capacitats superiors.

7. Anàlisi de l'Impacte ambiental

L'impacte ambiental produït per cada projecte és actualment un procés important a tenir en compte a causa dels diferents problemes ambientals donats arreu del món. En aquest, però, en tractar-se d'una simulació no implementada realment, el projecte elaborat no ha produït un impacte ambiental gaire gran, ja que està limitat al consum de potència elèctrica per alimentar l'ordinador utilitzat per a programar i solucionar els diferents casos d'estudi, la connexió a internet per buscar la informació necessària i l'enlluernament de l'espai de treball.

Tot i això, tal com s'ha mostrat a l'apartat de les conclusions, la implementació d'aquest tipus de noves xarxes de distribució redueixen considerablement les emissions de CO₂, afavorint la reducció dels problemes originats a causa del canvi climàtic. Això s'aconsegueix gràcies a dos factors principals. En primer lloc, es troben els avantatges de la generació distribuïda, les quals assoleixen crear noves xarxes de distribució amb una reducció de les pèrdues energètiques generals, ja que la producció i generació es troben a curtes distàncies entre si, cosa que permet al sistema eliminar part de les pèrdues donades al transport d'aquesta energia. Això també permet reduir la generació total sense necessitat de comptar amb demandes inferiors a les inicials, el que ajuda a reduir les despeses econòmiques requerides pel manteniment de les instal·lacions i a la compra de combustible.

En segon lloc, si la xarxa està operada a partir de sistemes de generació renovable, permet obtenir un mix energètic amb considerables reduccions de gasos d'efecte hivernacle, el qual s'afavoreix si s'introdueixen sistemes d'emmagatzematge i es dimensiona el sistema fotovoltaic per no només produir l'energia per abastir les càrregues en el moment de màxima producció sinó també per generar excedents i d'aquesta manera emmagatzemar-los i utilitzar-los posteriorment. Evidentment, aquest tipus de solucions van estretament lligades amb els costos econòmics associats i les diferents limitacions de terreny, el que impedeix molts cops realitzar la instal·lació més eficient.

Dit això es evident que la implementació d'aquest tipus de xarxes impliquen un elevat impacte ambiental el qual pot ser beneficiós pel medi ambient si els sistemes de generació utilitzats es decanten cap a les renovables i són aquests les principals fonts d'abastiment de les demandes energètiques de cada un dels nodes.

Conclusions

El treball realitzat estudia el funcionament d'una xarxa de distribució operada a partir de dos tipus de generació diferents i sistemes d'emmagatzematge. En aquest cas, les petites centrals s'han col·locat de manera que es crea una xarxa distribuïda per tal de fer-la més robusta davant de possibles talls elèctrics o fallades que impediessin el correcte subministrament de les càrregues aplicades del sistema.

S'ha de tenir en compte que el per aconseguir un sistema més autosuficient s'incorpora al mix energètic bombes dièsel per tal de no dependre de les condicions climàtiques externes, ja que d'altra manera seria impossible garantir un mínim subministrament energètic, pel fet que el segon sistema de generació és fotovoltaic. Així i tot, s'ha de tenir en compte que aquests segon model de generació no comporta un preu de compra de combustible associat ni cap taxa imposada per l'emissió de gasos d'efecte hivernacle el que la fa més atractiva econòmicament i mediambientalment.

Dit i això, és evident que el mix energètic del sistema varia en funció de les condicions meteorològiques i, conseqüentment és diferent per cada dia de l'any. Això comporta que per a dies d'hivern els generadors dièsel produiran més energia que les petites centrals solars i, conseqüentment, el mix energètic aconseguït serà completament diferent per a un dia d'estiu. Per tal d'intentar estabilitzar una mica aquest mix energètic anual i fer-lo més renovable es podria instal·lar petits aerogeneradors, ja que la producció d'energia eòlica creix a l'hivern i decreix a l'estiu, obtenint una corba de generació elèctrica gairebé inversa a l'obtinguda a partir de sistemes fotovoltaics. Tot i això, s'ha de tenir en compte que la col·locació d'aquests dispositius requereix una gran quantitat de terreny i, conseqüentment només és viable a ubicacions amb densitats de poblacions baixes. Per tant, no podrien ser aplicades en aquest cas d'estudi, ja que les demandes i ubicacions agafades es donen a ciutats.

Un altre aspecte a tenir en compte és el fet que el sistema de bateries permet crear un sistema més robust davant de possibles fallades en el subministrament energètic, ja que en les típiques xarxes de distribució quan un node amb algun tipus de sistema de generació havia de ser desconnectat a causa d'alguna fallada en el seu funcionament, la resta de busos aigües avall quedaven desconnectats del sistema, sense possibilitat de poder abastir les demandes de les diferents càrregues connectades a no ser que aquestes disposessin d'altres dispositius energètics d'emergència. En aquest cas, al tenir bateries aquestes poden abastir les demandes dels busos desconnectats, actuant d'aquesta manera com a generadors d'emergència fins que l'avaria sigui solucionada. A més, el fet de comptar amb una xarxa de generació distribuïda també fomenta un sistema flexible i robust davant d'aquestes possibles aturades d'emergència.

També es podria tenir en compte altres gasos d'efecte hivernacle per tal d'aconseguir un sistema que afavorís més les renovables, ja que en aquest cas d'estudi només s'ha considerat les emissions de CO₂, depreciant la resta de gasos contaminants.

Treballs futurs

L'estudi realitzat del sistema exposat ha estat realitzat seguint unes directrius generals i, consegüentment podria ser més acurat per tal d'obtenir resultats més personalitzats a cada xarxa de distribució estudiada i aconseguir d'aquesta manera estudis més exhaustius d'aquestes.

Un dels possibles canvis a implementar seria la utilització prèvia per determinar les ubicacions més adients per cada un dels tipus de centrals i sistemes d'emmagatzematge proposats, ja que d'aquesta manera seria possible no només reduir les pèrdues energètiques, sinó també les econòmiques perquè si fos possible aquesta reducció en les pèrdues elèctriques el sistema no necessitaria generar aquest excedent, reduint d'aquesta manera els costos de compra d'energia a la xarxa de transport, els costos de compra del combustible fòssil i l'estalvi en el manteniment de la resta de components del sistema.

Un altre projecte de futur d'aquest treball seria la implementació d'una optimització estocàstica al problema original per tal de contemplar una solució òptima global on s'assumeixi la possibilitat de comptar amb la demanda energètica superior a l'esperada i d'obtenir perfils de generació per part dels sistemes fotovoltaics diferents dels previstos inicialment. Una altra manera d'implementar aquesta millora mantenint el programa d'optimització creat seria introduint un nou set el qual faria referència als diferents possibles escenaris els quals estarien modelats a partir de la distribució d'error de probabilitat de cada un d'ells. A continuació es faria dependre tots els diferents escenaris contemplats per cada una de les restriccions prèviament implementades al programa i, finalment reescriuria la funció objectiu perquè depengués únicament de l'escenari més probable. Aquestes modificacions crearien un nou programa el qual asseguraria el compliment de totes les restriccions per cada un dels escenaris plantejats, tot i que només calcularia la funció objectiu en funció d'aquell més probable.

Evidentment, la primera forma de càlcul donaria amb un resultat final més acurat en funció dels escenaris introduïts al programa, tot i que el segon permet obtenir una solució òptima global en un període de temps més curt i sense necessitat d'un software tan potent.

També es podria complementar el sistema d'equacions actuals per tal d'incloure la capacitat de la línia del sistema elèctric general i, consegüentment poder estudiar el comportament de xarxes de distribució soterrades, les quals són més utilitzades degut que la seva utilització es dona a les ciutats.

Per últim, també seria interessant permetre un flux de potència bidireccional, ja que d'aquesta manera seria possible vendre els excedents d'energia produïda a la xarxa de distribució a la de transport, aconseguint un sistema més viable econòmicament. A més, s'ha de tenir en compte que el mix energètic i les restriccions creades en aquest sistema fomenta la utilització de generadors operats a partir d'energia renovable cosa que permetria assolir una generació amb menys producció de gasos d'efecte hivernacle i dependent de la compra de combustibles fòssils a l'exterior del territori.

Pressupost

En aquest apartat es mostrarà el pressupost necessari per dur a terme el projecte realitzat. S'ha de tenir en compte que les diferents simulacions realitzades poden calcular-se a partir de programes diferents dels utilitzats obtenint d'aquesta manera solucions econòmiques diferents.

En primer lloc, s'ha de calcular els costos totals de la utilització dels diferents softwares i hardwares, els quals es mostren a la taula 39:

Producte	Preu [€]
Microsoft Office	69
Gams	320
Matlab	250
Lenovo Yoga	1199
Total	1838

Taula 39. Costos del Hardware i Softwares utilitzats.

En aquest cas, degut que els programes utilitzats s'han desenvolupat dins de l'entorn de la universitat, els preus donats estan subjectes a les condicions d'estudiants i, conseqüentment són més econòmics que les llicències anuals per usuaris particulars. Tots els preus mostrats a la taula anterior s'han obtingut a les diferents pàgines oficials de cada marca i, per tant, poden variar en funció de la data de consulta.

Descripció del treball	Hores [h]	Preu per hora [€/h]	Preu final [€]
Recerca i investigació	120	45	5400
Redacció	130	45	5850
Creació i simulació	210	45	9450
Total			20700

Taula 40. Hores i els costos totals associats a la realització del projecte.

Finalment, per tal de trobar el valor total del treball realitzat es sumen els dos conceptes anteriors i s'aplica un 9% associats als diferents costos d'implementació i un 21% referit al I.V.A..

Producte	Preu [€]
Softwares i Hardwares	1838
Treball realitzat	20700
Costos d'operació	2.028,42
Subtotal	24.566,42
I.V.A.	5.158,95
Total	29.725,37

Taula 41. Costos totals del projecte.

Aquest pressupost és vàlid per una duració de sis mesos després de la data de signatura.

Núria Franco Emiliano, 12-01-2022

Bibliografia

- [1] Thomas Basso, "IEEE 1547 and 2030 standards for distributed energy resources interconnection and interoperability with electricity grid," National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, Tech. Rep., 2014.
- [2] "IEEE standard for interconnecting distributed resources with electric power systems," IEEE Std 1547-2003, pp. 1–28, 2003.
- [3] András Mezősi, László Szabó, Sándor Szabó, "Cost-efficiency benchmarking of European renewable electricity supportschemes", ELSEVIER, 2018.
- [4] Bissan Ghaddar, Jakub Marecek, Martin Mevissen, "Optimal Power Flow as a Polynomial Optimization Problem", IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, 2016.
- [5] David G. Luenberger, Yinyu Ye, "Linear and Nonlinear Programming", Springer, 2008.
- [6] Eric Luis Barroso Cavalcante, Eliseu Lucena Neto, Denilson José Ribeiro Sodré, "Static Limit Analysis of Reinforced Soil Structures by a Simple Finite Element and Second-Order Cone Programming", 2017.
- [7] Meera P.S., S. Hemamalini, "Optimal Siting of Distributed Generators in a Distribution Network using Artificial Immune System", International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE), 2017.
- [8] M. P. Selvan, Shanti Swarup, "Object-oriented power system analysis", Indian Institute of Science, 2004.
- [9] Masoud Farivar, Steven H. Low, "Branch Flow Model: Relaxations and Convexification", IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, 2013.
- [10] SWECO, "Study on the effective integration of Distributed Energy Resources for providing flexibility to the electricity system", European Commission, 2015.
- [11] Official Journal of the European Union, "COMMISSION REGULATION (EU) 2016/631", 2016.
- [12] Marco Stecca, Laura Ramirez Elizondo, Thiago Batista Soeiro, Pavol Bauer, Peter Palensky, "A Comprehensive Review of the Integration of Battery Energy Storage Systems Into Distribution Networks", IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, 2020.
- [13] Guishi Wang, Georgios Konstantinou, Christopher D. Townsend, Member, Josep Pou, Senior Member, Sergio Vazquez, Senior Member, Georgios D. Demetriades, Member, Vassilios Georgios Agelidis, Fellow, "A Review of Power Electronics for Grid Connection of Utility-Scale Battery Energy Storage Systems", IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, 2016.
- [14] Mostafa Nick, Rachid Cherkaoui, Jean-Yves Le Boudec, Mario Paolone, "An Exact Convex Formulation of the Optimal Power Flow in Radial Distribution Networks Including Transverse Components", IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, 2018.
- [15] Official Journal of the European Union, "REGULATION (EU) 2019/943 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL", 2019.
- [16] Official Journal of the European Union, "Directrices sobre ayudas estatales en materia de protección del medio ambiente y energía 2014-2020", 2020.

- [17] Official Journal of the European Union, “REGLAMENTO (UE) 2019/943 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 5 de junio de 2019 relativo al mercado interior de la electricidad”, 2019.
- [18] Mesut E. Baran, Felix F. Wu, “Network reconfiguration in Distribution Systems for los reduction and load balancing”, IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, 1989.
- [19] Red Electrica Española, “Término de facturación de energia activa del PVPC”, 2020.
- [20] Red Electrica Española, “EMISIONES Y FACTOR DE EMISIÓN DE CO2 EQ. DE LA GENERACIÓN ”, 2020.
- [21] Red Electrica Española, “Demanda y Generación ”, 2020.
- [22] ISO, “Sustainable development goals”, 2015.
- [23] Till M.Bachmann, “Considering environmental costs of greenhouse gas emissions for setting a CO2 tax: A review”, Science of the Total Environment, 2020.
- [24] PVGIS, Solar Radiation, 2020.
- [25] Seon-Ju Ahn, Soon-Ryul Nam, Joon-Ho Choi, and Seung-II Moon, “Power Scheduling of Distributed Generators for Economic and Stable Operation of a Microgrid”, IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, 2013.
- [26] Seon-Ju Ahn, “Power Scheduling of Distributed Generators for Economic and Stable Operation of a Microgrid”, 2013
- [27] Josep-Andreu Vidal-Clos, Eduard Bullich-Massagué, Mònica Aragüés-Peñalba, Guillem Vinyals-Canal, Cristian Chillón-Antón, Eduardo Prieto-Araujo and Oriol Gomis-Bellmunt and Samuel Galceran-Arellano, “Optimal Operation of Isolated Microgrids Considering Frequency Constraints”, Applaied Sciences, 2019.