



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

TREBALL FI DE GRAU

Grau en Enginyeria de l'Energia

**ESQUEMES DE REPARTICIÓ DE BENEFICIS ENTRE ELS
PARTICIPANTS EN MICROXARXES COOPERATIVES AMB
GENERACIÓ RENOVABLE**



Memòria i Annexos

Autor: Marc Sabaté Rafecas
Director: Maria Helena Martín Cañadas
Convocatòria: Setembre 2020

Resum

L'objectiu principal d'aquest treball és crear un model de programació lineal sencera mixt (en anglès, *MILP: Mixed Integer Linear Programming*) que optimitzi la generació d'energia d'una microxarxa composta per tres edificis amb perfils de consum energètic diferents. Per cada cas s'obtindrà quina és la distribució de potències instal·lades i la distribució de generació d'energia que minimitzen el cost total.

Un cop creat el cas base on els tres edificis produeixen energia de forma independent s'incorporarà la possibilitat de compartir energia tèrmica mitjançant un sistema de canalitzacions. S'estudiaran quatre casos de cooperació diferents, tres casos on els edificis cooperaran per parelles (subcoalicions) i un on cooperaran conjuntament (gran coalició).

Una vegada establerts quins són els costos anuals relatius a la producció d'energia per cada edifici i per cada cas, s'utilitzaran diversos mètodes de repartició de beneficis basats en principis de la teoria de jocs. Per trobar quin dels mètodes de repartició utilitzats és millor es compararan l'estabilitat i l'equitat de cada assignació obtinguda.

Resumen

El objetivo principal de este trabajo es crear un modelo de programación entera mixta lineal (en inglés, *MILP: Mixed Integer Linear Programming*) que optimice la generación de energía de una microred compuesta por tres edificios con perfiles de consumo energético diferentes. Para cada caso se obtendrá cual es la distribución de potencias instaladas y la distribución de la generación de energía que minimizan el coste total

Una vez creado el caso base donde los tres edificios producen energía de forma independiente se incorporará la posibilidad de compartir energía térmica mediante un sistema de canalizaciones. Se estudiarán cuatro posibles esquemas de cooperación, tres donde los edificios cooperaran por parejas (subcoaliciones) y uno donde cooperaran conjuntamente (gran coalición).

Después de establecer cuáles son los costes anuales relativos a la producción de energía para cada edificio y para cada caso, se utilizarán varios métodos de reparto de beneficios basados en principios de la teoría de juegos. Para encontrar cuál de los métodos de reparto utilizados es mejor se compararán la estabilidad y la equidad de cada asignación obtenida.

Abstract

The main objective of this thesis is to create a mixed-integer linear programming (MILP) model that optimizes the energy generation of a microgrid by three different buildings with different consumption profiles. For each scenario the distribution of installed power and power generation that minimizes the total cost will be obtained.

After the base scenario has been defined, where the three buildings will produce their energy independently, the possibility of sharing thermal energy will be included. Four cooperation scenarios will be studied, three scenarios where the participants will cooperate in pairs (subcoalition) and one where all the participants will cooperate together (grand coalition).

Once the annual costs related with the energy production for each case are established, various allocations methods based on game theory will be used. To find out which of the different allocation methods is the best one, the stability and fairness of each allocation will be compared.



Agraïments

Agrair a l'Elena Martín tant per la idea com per tota l'ajuda i suport durant el transcurs de tot el treball.

I a la família i amics pel suport en aquests últims mesos.



Glossari

Boi: Caldera.

CC: *Compression Chiller*. Màquina frigorífica de compressió.

Cap: Capacitat instal·lada de cada tipus de generador.

CHP: *Combined heat and power*. Cogeneració.

kWhc: energia tèrmica en forma de calor.

kWhe: energia elèctrica.

kWhf: energia tèrmica en forma de fred.

PV: *Photovoltaic*. Fotovoltaica.

TSP: *Traveler Salesmen Problem*. Problema del viatger.

Índex

RESUM	I
RESUMEN	II
ABSTRACT	III
AGRAÏMENTS	V
GLOSSARI	VI
1. INTRODUCCIÓ	1
1.1. Objectius del treball	2
1.2. Abast del treball	2
2. MICROXARXES I GENERACIÓ DISTRIBUÏDA	5
3. DEFINICIÓ DEL MODEL	7
3.1. AIMMS.....	8
3.2. Model matemàtic.....	9
3.2.1. Formulació de l'objectiu	15
3.2.2. Restriccions	17
3.2.3. Balanços energètics	18
3.2.4. Cogeneració	19
3.2.5. Generació fotovoltaica	19
3.2.6. Màquina de fred	20
3.2.7. Caldera de gas.....	20
3.2.8. Compra i venda de la xarxa elèctrica	21
3.2.9. Compartició de calor	21
3.3. Assignació d'estalvis i teoria de jocs	22
3.3.1. Estabilitat i equitat de la solució	23
3.4. Mètodes de repartició	25
3.4.1. Shapley Value	25
3.4.2. Nucleolus	26
3.4.3. Solució N-H	26
3.4.4. Mètode del valor DP equivalent	28
4. ANÀLISI DE RESULTATS	29
4.1. Resultats de les produccions energètiques	29

4.1.1.	No compartició.....	29
4.1.2.	Subcoalició 1. Hospital-oficines.	30
4.1.3.	Subcoalició 2. Hospital-apartaments.....	31
4.1.4.	Subcoalició 3. Oficines-apartaments.	33
4.1.5.	Gran coalició.....	35
4.2.	Resultats de les assignacions d'estalvis.....	39
5.	ANÀLISI DE L'IMPACTE AMBIENTAL _____	43
	CONCLUSIONS _____	45
	PRESSUPOST _____	47
	BIBLIOGRAFIA _____	49
	ANNEX A. PERFILS DE CÀRREGA I RADIACIÓ SOLAR _____	53

Índex de figures

Figura 1.1. Cadena d'energia elèctrica. Eficiències i millores potencials [1].....	1
Figura 2.1. Diferència entre generació i demanda (2008) [7].	5
Figura 3.1. Resum esquemàtic dels diferents procediments del problema estudiat [4].....	8
Figura 3.2. Perfil de la càrrega d'energia elèctrica per les tres agrupacions de mesos de l'any de l'hospital [5]. ...	10
Figura 3.3. Perfil de la càrrega d'energia tèrmica per les tres agrupacions de mesos de l'any de l'hospital [5]. ...	11
Figura 3.4. Perfil de la càrrega d'energia elèctrica per les tres agrupacions de mesos de l'any de les oficines[5].	11
Figura 3.5. Perfil de la càrrega d'energia tèrmica per les tres agrupacions de mesos de l'any de les oficines[5].	12
Figura 3.6. Perfil de la càrrega d'energia elèctrica per les tres agrupacions de mesos de l'any dels apartaments [5].	12
Figura 3.7. Perfil de la càrrega d'energia tèrmica per les tres agrupacions de mesos de l'any dels apartaments. [5].	13
Figura 3.8. Perfil de la càrrega de fred durant l'estiu per cada edifici [5].....	13
Figura 3.9. Irradiància solar horària del cas estudiat [16].	18
Figura 3.10. Codi de la restricció del càlcul del valor Shapley del jugador 1.	25
Figura 4.1. Produccions d'electricitat de les oficines en dia d'hivern en la subcoalició 1 i produint individualment.	30
Figura 4.2. Produccions de calor de les oficines en dia d'hivern en la subcoalició 1 i produint individualment. ...	31
Figura 4.3. Produccions de la caldera de l'hospital en dia de tardor/primavera en la subcoalició 1 i produint individualment.	31
Figura 4.4. Produccions d'electricitat dels apartaments en dia d'hivern en la subcoalició 2 i produint individualment.	32
Figura 4.5. Produccions de calor dels apartaments en dia d'hivern en la subcoalició 2 i produint individualment.	33
Figura 4.6. Produccions de la caldera de l'hospital en dia d'hivern en la subcoalició 2 i produint individualment.	33
Figura 4.7. Produccions d'electricitat de les oficines en dia d'hivern en la subcoalició 3 i produint individualment.	34
Figura 4.8. Produccions de calor de les oficines en dia d'hivern en la subcoalició 3 i produint individualment. ...	35
Figura 4.9. Produccions de la caldera dels apartaments en dia d'hivern en la subcoalició 3 i produint individualment.	35
Figura 4.10. Produccions de calor de l'apartament en dia d'hivern de la gran coalició i produint individualment.	37
Figura 4.11. Produccions de calor de l'apartament en dia de tardor/primavera de la gran coalició i produint individualment.	37
Figura 4.12. Produccions de la caldera de l'hospital en dia de tardor/primavera de la gran coalició i produint individualment.	38
Figura 4.13. Electricitat consumida de la xarxa de les oficines i els apartaments en dia de tardor/primavera en la gran coalició i produint individualment.	38



Índex de taules

Taula 3.1. Definició dels sets del model.	9
Taula 3.2. Definició dels paràmetres dels perfils de càrregues [5].	10
Taula 3.3. Definició dels paràmetres generals del model [4] [12].	13
Taula 3.4. Definició de les distàncies entre edificis [4].	14
Taula 3.5. Definició dels paràmetres del model en funció dels models de cogeneració [4] [5] [12].	14
Taula 3.6. Definició de les variables generals del model.	14
Taula 3.7. Definició dels paràmetres relacionats amb els costos dels equipaments [4] [5] [13].	15
Taula 3.8. Definició dels costos de compra d'electricitat a la xarxa [4].	16
Taula 3.9. Definició dels costos de compra de gas [4].	16
Taula 3.10. Definició dels paràmetres de costos de manteniment [13].	16
Taula 3.11. Definició dels preus de venda d'energia a la xarxa elèctrica [4].	17
Taula 3.12. Definició dels paràmetres generals de les restriccions [4] [14] [15].	17
Taula 3.13. Definició dels paràmetres relacionats amb els costos dels equipaments [4].	22
Taula 4.1. Resum de resultats del cas sense compartició.	29
Taula 4.2. Resum de resultats de la subcoalició hospital-oficines.	30
Taula 4.3. Resum de resultats de la subcoalició hospital-apartaments.	32
Taula 4.4. Resum de resultats de la subcoalició oficines-apartaments.	34
Taula 4.5. Resum de resultats de la gran coalició.	36
Taula 4.6. Resum dels costos i estalvis per cada coalició.	39
Taula 4.7. Resum del Nucli de la gran coalició.	39
Taula 4.8. Resum dels resultats del mètodes d'assignació d'estalvis.	40



1. Introducció

En la majoria de sistemes energètics actuals els centres de generació d'energia es troben allunyats dels nuclis de consum, ja siguin zones industrials o residencials. Aquesta generació es duu a terme amb tecnologies de gran potència, ja sigui a partir de combustibles fòssils, com el gas, el carbó o el petroli, de l'energia nuclear o formes de generació renovable com la solar o la hidroelèctrica. Un dels problemes que té aquest model és la gran quantitat d'energia que es perd durant la generació, el transport i la distribució, arribant a percentatges d'entre el 20% i el 25%. [1].

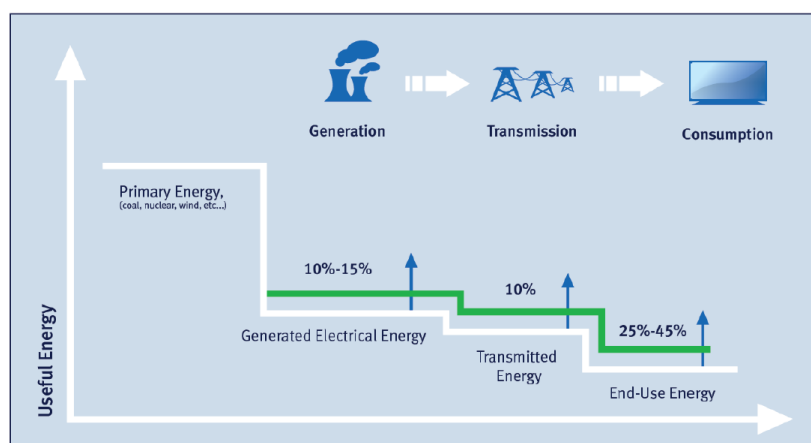


Figura 1.1. Cadena d'energia elèctrica. Eficiències i millores potencials [1].

El resultat d'aquestes ineficiències les acaba pagant el consumidor final, no només pel cost de l'energia, sinó també per altres problemes que es poden derivar d'aquesta centralització de la generació com interrupcions en el servei, baixades de tensió o inestabilitat de la freqüència [2]. Aquests problemes poden ser considerats lleus en el cas d'un consumidor residencial però per grans consumidors, com la indústria o el sector dels serveis, poden representar pèrdues econòmiques importants. Per això cada cop guanya més força el que es coneix com recursos energètics distribuïts.

Els recursos energètics distribuïts són aquelles tecnologies de generació i emmagatzematge petites i modulars. Aquestes tecnologies aporten energia allà on es necessita i normalment es poden trobar connectades a xarxes de baixa o mitja tensió, tot i que també es poden trobar aïllades de la xarxa elèctrica [3].

Tenint en compte aquesta definició un dels tipus d'energia que es podria considerar un recurs energètic distribuït serien les energies renovables. Moltes de les fonts d'energia renovable són modulars i es poden instal·lar a petita escala en indústries, habitatges i entorns metropolitans en general. Les dues formes d'energia renovable més utilitzades en instal·lacions de baixa potència són la fotovoltaica i la tèrmica solar. Aquestes fonts tenen un gran inconvenient i és la dependència de la disponibilitat del

recurs solar, per tant no poden treballar de forma aïllada sense el suport de sistemes d'emmagatzematge.

Un altre d'aquests recursos és la cogeneració. Aquesta tecnologia genera energia elèctrica i tèrmica en un mateix sistema. Una planta de generació tradicional fa arribar als consumidors al voltant del 30% de l'energia que conté el recurs primari utilitzat. En canvi un sistema de cogeneració converteix entre el 15% i el 42% de l'energia primària en electricitat i la majoria de l'energia residual és capturada per generar aigua calenta. En total, més d'un 90% de l'energia primària es destina a cobrir la demanda energètica, sempre que la producció de calor no sigui més alta que la demanda [2].

1.1. Objectius del treball

Tenint en compte els desafiaments que planteja la transició energètica una de les possibles solucions a aquests desafiaments podria ser la cooperació entre microxarxes. Així doncs, es pretén plantejar un model d'optimització dels costos relatius a la generació d'energia com a base d'aquest Treball Final del Grau d'Enginyeria de l'Energia.

Primer s'establiran els recursos energètics distribuïts que s'utilitzaran per cobrir les demandes energètiques i es plantejarà la cooperació entre les diferents microxarxes mitjançant la compartició d'energia. Per tant per aquest treball es poden identificar dos objectius. El primer és establir una estratègia de cooperació que minimitzi els costos del conjunt de les microxarxes. Una vegada complert aquest primer objectiu s'hauran d'assignar els estalvis aconseguits a cada microxarxa d'una forma que sigui justa i que incentivi a les tres microxarxes a participar-hi.

1.2. Abast del treball

L'abast del treball és el de crear un model matemàtic d'optimització de la gestió energètica de diverses microxarxes amb la possibilitat que puguin cooperar entre elles i que estableixi una assignació d'estalvis concreta.

El model creat es basa en els articles de referència [4][5]. En aquests articles utilitzen diversos mètodes fonamentats en la teoria de jocs per establir les assignacions d'estalvis per cada microxarxa participant. El model establert és escalable en quant les potències de les màquines de generació utilitzades, de manera que si s'incorporessin diferents perfils de càrregues als utilitzats, el model seguiria sent útil.

Per crear el model s'ha utilitzat el programari AIMMS (*Advanced Interactive Multidimensional Modeling System*) [6] que és un conjunt d'eines per l'optimització i modelització. Aquest programari és una eina d'anàlisi prescriptiva. L'anàlisi prescriptiva determina de quina manera un procés ha de ser

modificat o ha d'evolucionar perquè s'optimitzi. En el cas del model creat, determina quines potències de cada tecnologia s'han d'instal·lar per l'optimització del cost de la generació energètica.

2. Microxarxes i generació distribuïda

Com s'ha mencionat prèviament en la majoria de sistemes energètics actuals dels països més desenvolupats els centres de generació d'energia es troben lluny dels consumidors. En el cas espanyol existeixen dos grans punts de consum. Les àrees metropolitanes de Madrid i Barcelona. Aquestes àrees no compten amb centrals de generació suficients i han de consumir l'energia en centrals que es troben a centenars de quilòmetres de distància. Aquest fet es pot observar en la figura següent on es mostra la diferència entre generació i demanda en forma de mapa pel cas del territori espanyol.

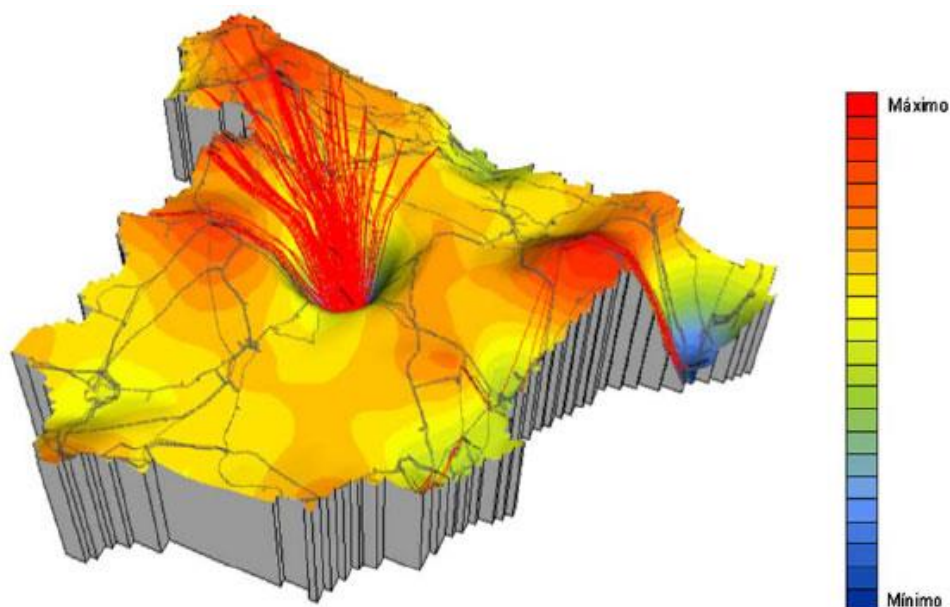


Figura 2.1. Diferència entre generació i demanda (2008) [7].

Aquesta situació es pot modificar amb la utilització dels recursos energètics distribuïts, ja siguin d'origen renovable, com l'energia fotovoltaica o eòlica, o d'origen no renovable. Si es formessin microxarxes en els grans centres metropolitanos i industrials s'aconseguiria reduir de forma substancial les pèrdues d'energia i s'augmentaria l'eficiència del sector energètic.

Si diferents consumidors que tinguessin unes necessitats d'energia elevades, tant d'energia elèctrica com d'energia tèrmica, comptessin amb una petita cogeneració que s'adaptés a les seves necessitats, s'aconseguiria una reducció en la factura energètica i l'edifici seria més independent de la xarxa elèctrica. En certs casos podria ser fins i tot beneficiós que aquests clients compartissin l'energia que generen, sigui elèctrica o tèrmica, per reduir encara més els costos de generació sempre tenint en compte que les distàncies entre els diversos clients haurien de ser petites.

D'aquesta forma cada un d'aquests clients formarien el que s'anomena una microxarxa. Una microxarxa és un conjunt de recursos energètics distribuïts i de càrregues elèctriques que componen una única entitat respecte de la xarxa elèctrica. Aquesta definició ha quedat desfasada perquè actualment es parla de microxarxes avançades o intel·ligents. La diferència és que aquestes noves microxarxes no només generen energia de forma independent de la xarxa, sinó que igualen la generació i la demanda, organitzen els recursos energètics i augmenten la fiabilitat i la resiliència del sistema. Amb aquestes característiques es poden aconseguir metes operacionals com la reducció de costos i la participació en el mercat energètic [8].

La situació prèviament descrita provocaria un nou problema. Els diferents clients necessitarien incentius per tal de cooperar entre ells. En cas que la cooperació fos beneficiosa i s'aconguís un estalvi aquest s'hauria de repartir. Aconseguir una repartició dels estalvis que motivi a tots els clients i que sigui justa és un problema més complex del que pot semblar a priori.

Actualment a l'estat espanyol no existeix una regulació específica per la cooperació entre microxarxes, però sí que des de fa uns anys es permet l'anomenat autoconsum compartit. El Reial Decret RD 244/2019 permet l'autoconsum compartit entre una comunitat de veïns o qualsevol associació de consumidors. Actualment s'està implementant en l'àmbit industrial en el polígon industrial de Can Jardí, situat a Rubí. Aquest projecte implica a set empreses diferents i busca implementar l'autoconsum compartit entre les empreses per tal d'augmentar la sostenibilitat de la principal zona industrial del municipi [9].

3. Definició del model

El model a implementar per la gestió energètica de les microxarxes constarà de 3 edificis participants. Cada un d'aquests edificis haurà de suplir tres tipus de demandes energètiques diferents: elèctrica, calor i fred. Per tal de cobrir aquestes tres demandes cada edifici comptarà amb diferents fonts de producció d'energia. En el cas de l'energia elèctrica aquesta podrà ser generada a partir d'un sistema de cogeneració (CHP) o consumida directament de la xarxa de distribució elèctrica. Per la generació de calor es comptarà amb una caldera de gas natural així com amb la cogeneració prèviament mencionada. Finalment la demanda de fred serà coberta per una màquina frigorífica de compressió.

En el primer escenari d'estudi aquests tres edificis no interactuaran entre ells, per tant totes les demandes energètiques hauran de ser suplertes només amb les fonts disponibles per cada edifici. Pels següents escenaris els edificis compartiran energia en forma de calor a través d'un sistema de canalització. En total s'estudiaran cinc casos: un en el que els edificis treballin de manera independent, tres casos on els tres edificis comparteixin energia per parelles i, per últim, els tres edificis compartint energia de forma conjunta.

Per últim s'estudiarà com es reparteixen els estalvis obtinguts derivats de la compartició d'energia amb l'ajuda de la teoria de jocs. Per analitzar les diferents solucions s'utilitzaran índexs que representin amb valors numèrics si la distribució és justa i si els edificis estarien motivats a formar part de la coalició. En la figura següent es mostra un resum del procés que es segueix per la resolució del problema plantejat.

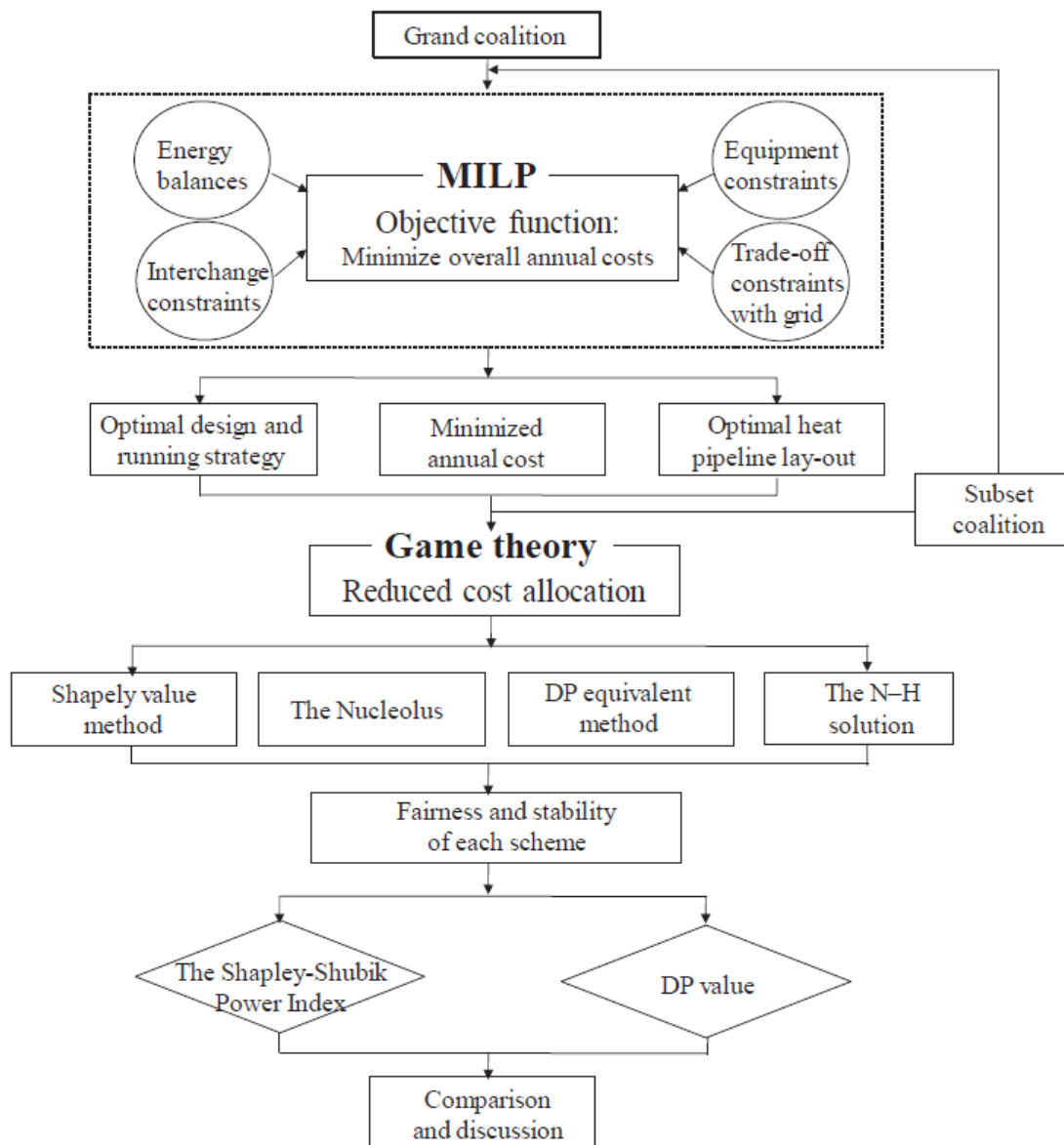


Figura 3.1. Resum esquemàtic dels diferents procediments del problema estudiat [4].

3.1. AIMMS

Per la realització d'aquest treball s'ha utilitzat el programari AIMMS. AIMMS és utilitzat àmpliament en problemes de cadena de subministrament (*Supply Chain*) però també es poden resoldre altres tipus de problemes que es puguin plantejar d'una forma similar. Aquest programari compta amb dos productes principals, un dels quals s'anomena Prescriptive Analytics Platform. Aquest inclou l'anomenat AIMMS Developer, l'eina que s'ha utilitzat pel desenvolupament del model.

Aquest programa permet crear aplicacions en un entorn intuïtiu per desenvolupar models [10]. Les principals característiques d'aquest programa són:

- Entorn robust i integrat de desenvolupament.
- Interfície d'usuari intuïtiva.
- Llenguatge matemàtic de modelització.
- Eines de diagnòstic.
- Gestió de les dades.
- Eines de resolució o *solvers* (CPLEX, CBC, IPOPT...).

Per crear un model d'AIMMS cal tenir en compte com s'estructura el model. Per crear-lo s'han de definir una sèrie de components: conjunts (sets), paràmetres, variables i restriccions. Aquests sets proporcionen al model un mecanisme per agrupar els altres components. Els paràmetres es poden definir com "una quantitat coneguda que denota un valor numèric o un valor de text" i les variables com "una quantitat desconeguda" [11]. Les restriccions són aquelles equacions i inequacions que agrupen diferents paràmetres i variables per tal de formar el programa matemàtic. Així doncs a les variables se'ls hi assignen valors quan un algorisme de resolució (*solver*) troba una solució per aquestes incògnites.

Per tal de passar qualsevol problema de la vida real a un problema vàlid per la modelització amb AIMMS s'han de seguir els següents passos [11]:

- Descriure les dades d'entrada i sortida, sets i índexs.
- Definir el programa matemàtic.
- Especificar els procediments del processament de dades.
- Solucionar el programa matemàtic.
- Mostrar els resultats.

3.2. Model matemàtic

Per la definició d'aquest model s'ha pres diverses referències. Per la part que descriu tot el que té a veure amb la producció i gestió de l'energia la referència principal és l'article [5]. La part que correspon als mètodes de distribució dels estalvis aconseguits es basa en l'article [4]. També s'han utilitzat altres articles per concretar certs paràmetres i restriccions [12][14][15][16][17].

Per definir el conjunt de paràmetres i variables del model és necessari establir els sets dels quals seran funció. Per simplificar el model s'ha tingut en compte un dia tipus per cada mes de l'any.

Taula 3.1. Definició dels sets del model.

Set	Definició	Índex	Valors
Edificis	Edificis participants en la xarxa.	i, j	{Hospital, Oficines, Apartaments}

Mes	Conjunt de mesos de l'any.	m	{1,..12}
Hores	Conjunt d'hores del dia tipus.	h	{1,..24}
Set chp	Tipus de cogeneració.	k	{1...6}

Els perfils de càrregues de cada edifici s'han extret de l'article [5].

En aquest cas les dades pertanyen a tres edificis diferents: un hospital, un edifici d'oficines i un edifici residencial. Per cada edifici existeixen tres càrregues diferents: la càrrega d'energia elèctrica, la de calor i la de fred. Per cada una d'aquestes càrregues es tenen en compte tres tipus de perfils: un per l'estiu, un per l'hivern i un altre per la temporada primavera/tardor. Els mesos d'hivern seran els compresos entre novembre i febrer, els mesos d'estiu són de juny a setembre i els mesos de primavera/tardor seran octubre i del març al maig.

Les dades es poden trobar en l'article prèviament referenciat. Es pot observar que els gràfics mostren l'energia amb unitats de kWh per metre quadrat. En el mateix article es menciona que els tres edificis tenen la mateixa àrea: 20.000 m².

Taula 3.2. Definició dels paràmetres dels perfils de càrregues [5].

Paràmetre	Definició	Valors/Unitats
ELoad	Corba de consum d'energia elèctrica	kWh
HLoad	Corba de consum d'energia tèrmica	kWh
CLoad	Corba de consum de fred	kWh

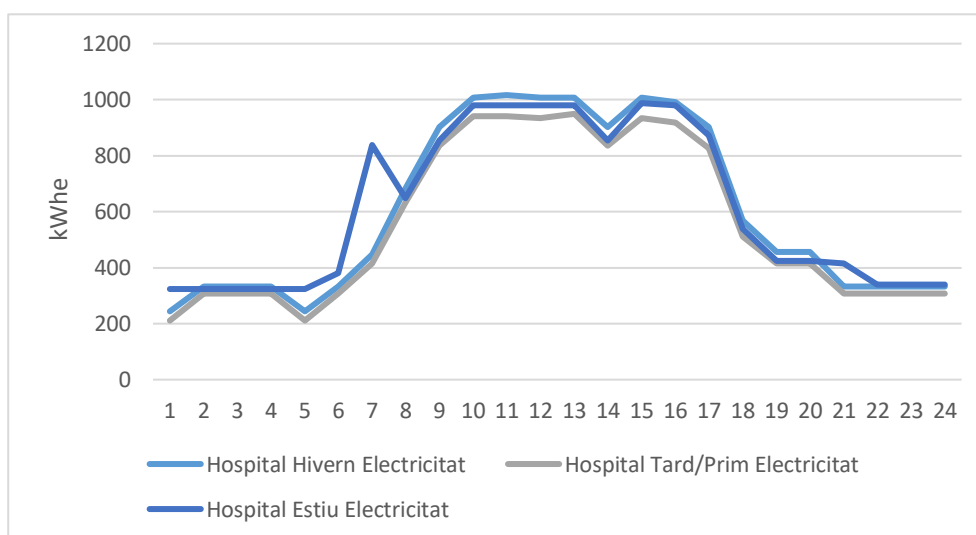


Figura 3.2. Perfil de la càrrega d'energia elèctrica per les tres agrupacions de mesos de l'any de l'hospital. Font: Elaboració pròpia basada en [5].

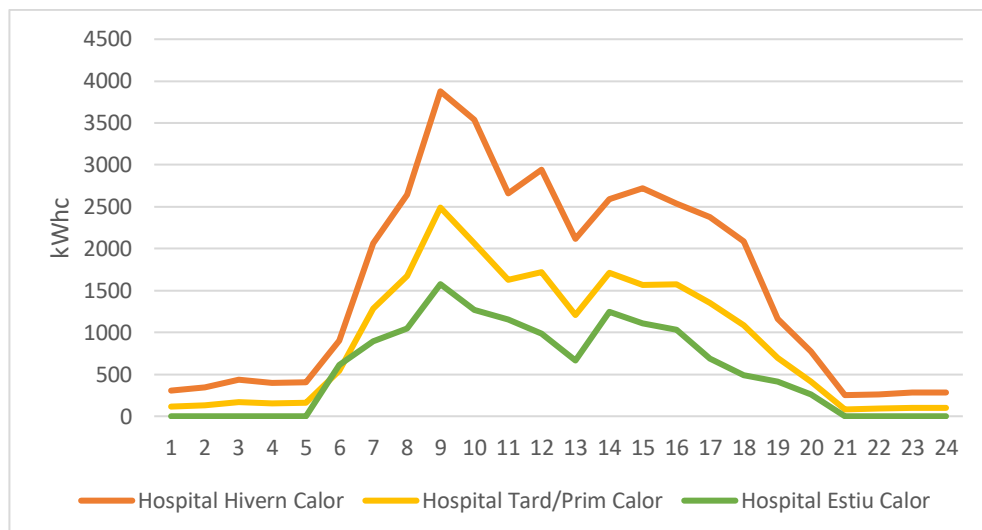


Figura 3.3. Perfil de la càrrega d'energia tèrmica per les tres agrupacions de mesos de l'any de l'hospital. Font: Elaboració pròpia basada en [5].

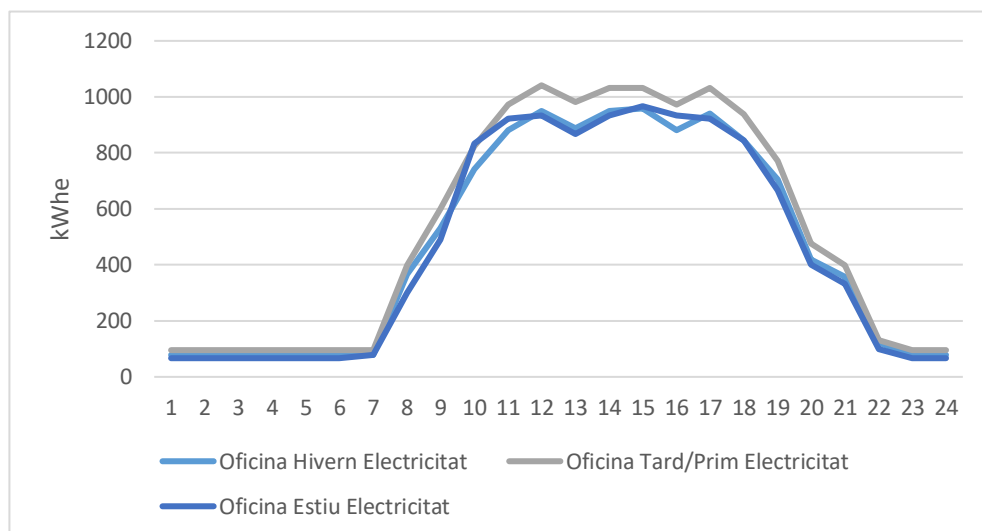


Figura 3.4. Perfil de la càrrega d'energia elèctrica per les tres agrupacions de mesos de l'any de les oficines. Font: Elaboració pròpia basada en [5].

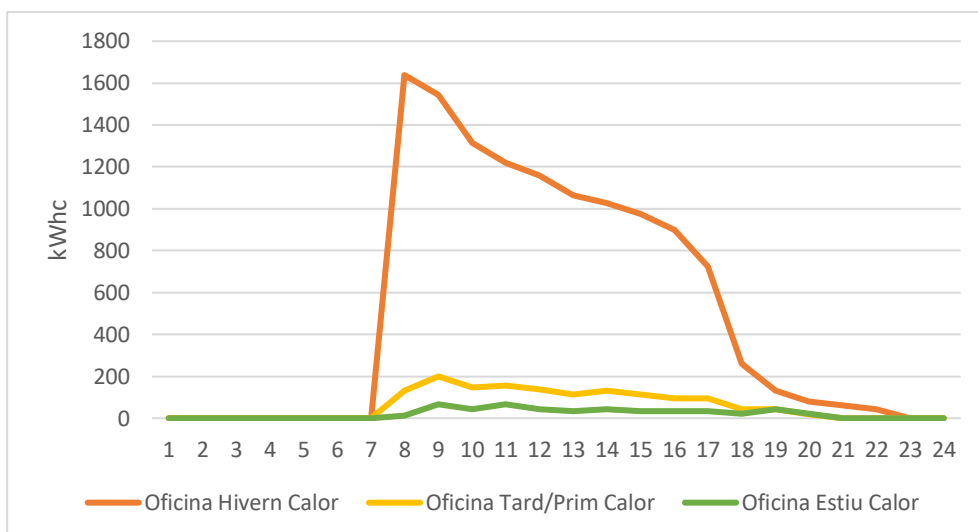


Figura 3.5. Perfil de la càrrega d'energia tèrmica per les tres agrupacions de mesos de l'any de les oficines. Font: Elaboració pròpia basada en [5].

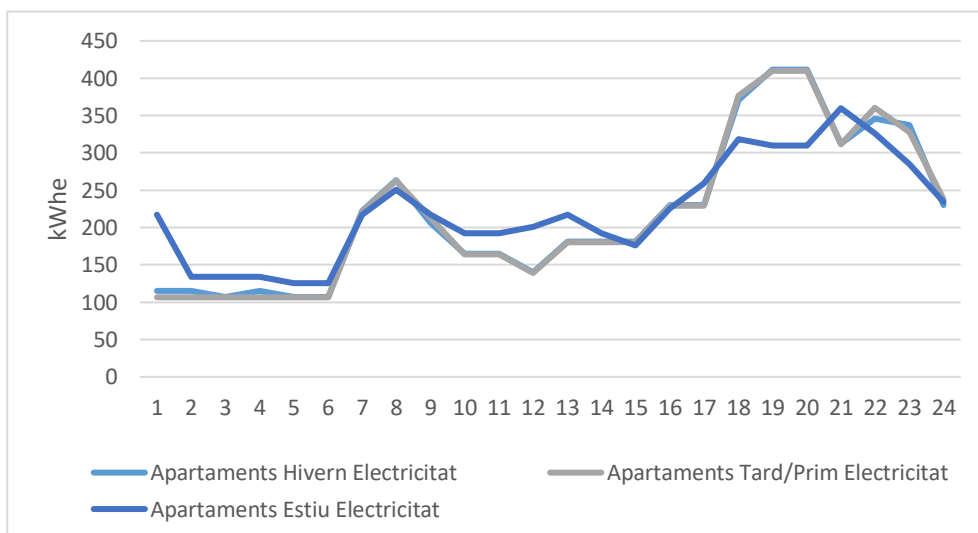


Figura 3.6. Perfil de la càrrega d'energia elèctrica per les tres agrupacions de mesos de l'any dels apartaments. Font: Elaboració pròpia basada en [5].

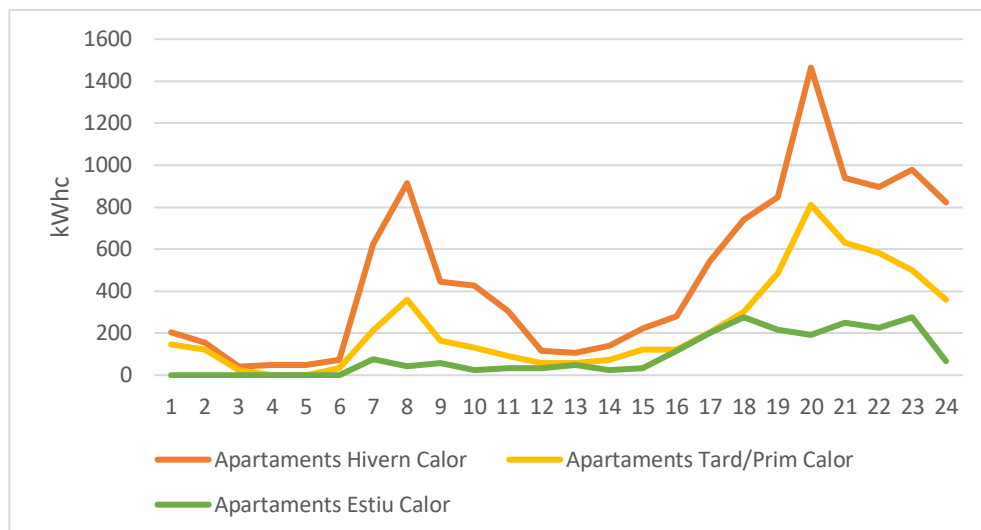


Figura 3.7. Perfil de la càrrega d'energia tèrmica per les tres agrupacions de mesos de l'any dels apartaments.

Font: Elaboració pròpia basada en [5].

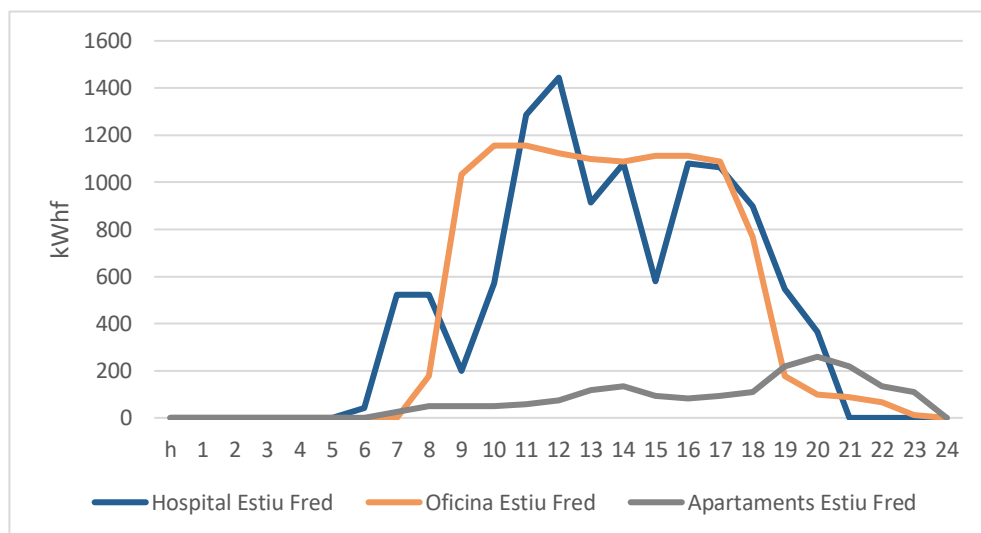


Figura 3.8. Perfil de la càrrega de fred durant l'estiu per cada edifici. Font: Elaboració pròpia basada en [5].

A part dels perfils de càrregues és necessari definir una sèrie de paràmetres i variables generals que seran utilitzats en diverses parts del model. Aquests paràmetres es mostren a la Taula 3.3, Taula 3.4, Taula 3.5, i les variables a la Taula 3.6. Tots els preus així com els costos es mostren en dòlars.

Taula 3.3. Definició dels paràmetres generals del model [4] [12].

Paràmetre	Definició	Valors/Unitats
LifetimeBoi	Vida útil de la caldera.	30 anys
LifetimeCC	Vida útil de la màquina de fred de compressió.	25 anys
LifetimePV	Vida útil de la fotovoltaica.	25 anys
LifetimeCHP	Vida útil de la cogeneració.	20 anys
LifetimePipe	Vida útil de les canalitzacions.	20 anys

InterestRate	Taxa d'interès.	6 %
DiesMes	Nombre de dies de cada mes.	28/30/31 dies
Δt	Increment de temps, pas de càlcul	1 hora

Taula 3.4. Definició de les distàncies entre edificis [4].

Dist(i,j) [m]	1	2	3
1	-	126	210
2	126	-	92
3	210	92	-

Taula 3.5. Definició dels paràmetres del model en funció dels models de cogeneració [4] [5] [12].

Índex chp	Capchp [kW]	UCchp [\$/kW]	γ_k^{chp} [%]	Heat to power ratio
1	100	1900	27,0%	2
2	230	1905,63	33,0%	1,5
3	470	1699,69	34,2%	1,3
4	633	1790	34,5%	1,3
5	1121	1475	36,8%	1,1
6	2000	1348,19	43,7%	0,9

Taula 3.6. Definició de les variables generals del model.

Variable	Definició	Unitat
CostTotal	Cost total (Variable a minimitzar).	\$
CostEquip	Cost equipaments.	\$
CostFuel	Costs combustibles.	\$
CostMain	Costos operacionals.	\$
CostEPur	Costos compra xarxa elèctrica	\$
CostSal	Ingressos per la venda d'energia a la xarxa elèctrica.	\$
CapBoi	Potència de la caldera instal·lada.	kW
CapCC	Potència de la màquina de fred instal·lada.	kW
CapPV	Potència de la fotovoltaica instal·lada.	kWp
AreaPV	Àrea de la fotovoltaica instal·lada.	m ²
Capchp	Capacitat de les cogeneracions disponibles.	kW
ychp	Variable de selecció binària del model de cogeneració.	Adimensional
xpipe	Variable de selecció binària del tram de canalització.	Adimensional
Echp	Energia elèctrica produïda per la cogeneració.	kWh
Epur	Energia elèctrica consumida de la xarxa elèctrica.	kWh
Esa	Energia elèctrica venuda a la xarxa.	kWh
Eccin	Energia elèctrica consumida per la màquina de fred.	kWh
Hboi	Energia calorífica produïda per la caldera.	kWh
Hchp	Energia calorífica produïda per la cogeneració.	kWh
Htra	Energia calorífica compartida.	kWh
Invar	Variable binària de consum d'energia de la xarxa elèctrica.	Adimensional
Outvar	Variable binària de venda d'energia de la xarxa elèctrica.	Adimensional
Ortsp	Variable d'ordre positiva	Adimensional

3.2.1. Formulació de l'objectiu

En un model lineal sencer mixt (*Mixed Integer Linear Program*, MILP) el valor de les variables varia en funció de la funció objectiu, sempre complint les restriccions establertes. En aquest model la funció objectiu a minimitzar és el cost anual associat al consum energètic dels tres edificis. El cost anual es defineix de la següent forma [4].

$$\min\{Cost\ total = \sum_i costEquip(i) + costEPur(i) + costFuel(i) + costMain(i) - CostSal(i)\} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

El cost anual consisteix en la suma del cost anualitzat d'inversió inicial (*costEquip*), el cost anual del consum d'energia elèctrica de la xarxa (*costEPur*), el cost d'adquisició del fuel utilitzat per la cogeneració i la caldera (*costFuel*), el cost anual de manteniment (*costMain*), menys els ingressos que es puguin obtenir injectant l'excés d'energia elèctrica generada a la xarxa (*CostSal*).

El cost anualitzat d'inversió inicial té en compte la potència instal·lada de cada tecnologia de producció d'energia així com el cost de capital unitari. En el cas de la cogeneració i de les canalitzacions per compartir l'energia calorífica s'utilitzen les variables de selecció per determinar quin model de cogeneració s'ha instal·lat i, en el cas de les canalitzacions, per saber si es construeix o no el tram concret. El cost de l'energia fotovoltaica ha estat reduït fins als 1050 \$/kW perquè totes les referències utilitzades eren de 2013 i actualment el cost de capital unitari s'ha vist reduït enormement [13].

Cal destacar que el factor de recuperació del capital associat (*CRF*) a cada tecnologia s'ha introduït en forma de paràmetre i no de variable per evitar que el programa sigui no lineal. Pel càlcul d'aquest paràmetre s'utilitzen els anys de vida útil de cada tecnologia així com la taxa d'interès.

$$CRF = InterestRate \cdot (1 + InterestRate)^{Lifetime} / [(1 + InterestRate)^{Lifetime} - 1] \quad (\text{Eq. 3.2})$$

Taula 3.7. Definició dels paràmetres relacionats amb els costos dels equipaments [4] [5] [13].

Paràmetre	Definició	Valor/Unitat
UCDer	Cost del capital unitari de la caldera.	100 \$/kW
CRF	Factor de recuperació del capital associat a la caldera.	0,072648911
UCPV	Cost del capital unitari de la potència fotovoltaica.	1050 \$/kW
CRFPV	Factor de recuperació del capital associat a la potència fotovoltaica.	0,072648911
UCDerCC	Cost del capital unitari de la màquina de fred.	102 \$/kW
CRFCC	Factor de recuperació del capital associat a la màquina de fred.	0,078226718
CRFchp	Factor de recuperació del capital associat a la cogeneració.	0,08718456
UCPipe	Cost del capital unitari de les canalitzacions.	787 \$/m
CRFPipe	Factor de recuperació del capital associat a les canalitzacions.	0,08718456

$$\begin{aligned}
CostEquip(i) = & UCDer \cdot CapBoi(i) \cdot CRF + UCPV \cdot CapPV(i) \cdot CRFPV + UCDerCC \\
& \cdot Capcc(i) \cdot CRFCC \\
& + \sum_k UCchp(k) \cdot Capchp(k) \cdot CRFchp(k) \cdot ychp(i, k) \\
& + \sum_j Dist_{ij} \cdot UCPipe \cdot CRFPipe \cdot xpipe(i, j)
\end{aligned} \tag{Eq. 3.3}$$

El cost anual del consum d'energia elèctrica des de la xarxa es calcula tenint en compte que el preu de compra varia en funció de l'hora del dia, sent similar a una tarifa amb discriminació horària de dos períodes. Aquest preu es multiplica per l'energia adquirida en aquell instant de temps concret.

Taula 3.8. Definició dels costos de compra d'electricitat a la xarxa [4].

Hora	Eprice (h) [\$/kWh]
00:00 - 7:00	0,072
07:00 - 00:00	0,156

$$CostEpur(i) = \sum_m \sum_h DiesMes(m) \cdot EPur(i, m, h) \cdot EPrice(i, h) \tag{Eq. 3.4}$$

El cost d'adquisició del fuel, utilitzat tant per les cogeneracions com per les calderes, es defineix pel cost del gas natural multiplicat per la producció d'energia tenint en compte els rendiments de cada màquina tèrmica.

Taula 3.9. Definició dels costos de compra de gas [4].

Paràmetres	Definició	Valor/Unitat
Gprice	Preu de compra del gas.	0,057 \$/kWh
η_{Boi}	Eficiència de la caldera.	83 %

$$\begin{aligned}
CostFuel(i) = & \sum_m \sum_h DiesMes(m) \cdot HBoi(i, m, h) \cdot GPrice(i) / \eta_{Boi} \\
& + \sum_k \sum_m \sum_h DiesMes(m) \cdot Echp(i, k, m, h) \cdot GPrice(i) / \gamma_k^{chp}
\end{aligned} \tag{Eq. 3.5}$$

El cost anual de manteniment normalment ve definit per dos costos, un de fix que multiplica per la potència instal·lada de cada tecnologia, i un de variable que multiplica la generació d'energia. Com que les tecnologies que es contemplen en aquest model tenen un cost fix negligible o igual a zero només es té en compte el cost variable excepte en el cas de la generació fotovoltaica [14].

Taula 3.10. Definició dels paràmetres de costos de manteniment [14].

Paràmetre	Definició	Valor/Unitat
OMFixPV	Cost d'operació fix de la fotovoltaica.	16,7 \$/kW
OMVar	Cost d'operació de la caldera.	0,0027 \$/kWh

OMVarC	Cost d'operació de la cogeneració.	0,004 \$/kWh
OMVarPV	Cost d'operació de la fotovoltaica.	0,02 \$/kWh
OMVarCC	Cost d'operació de la màquina de fred.	0,0015 \$/kWh

$$\begin{aligned}
 CostMain(i) &= OMFixPV \cdot CapPV \\
 &+ \sum_m \sum_h DiesMes(m) \cdot [HBoi(i, m, h) \cdot OMVar + Eccin(i, m, h) \\
 &\cdot OMVarCC + OMVarPV \cdot EPV(i, m, h)] \\
 &+ \sum_k \sum_m \sum_h DiesMes(m) \cdot Echp(i, k, m, h) \cdot y_{i,k}^{chp} \cdot OMVarC(k)
 \end{aligned}
 \tag{Eq. 3.6}$$

Taula 3.11. Definició dels preus de venda d'energia a la xarxa elèctrica [4].

Paràmetre	Definició	Valor/Unitat
ESaPrice	Preu de venda de l'energia injectada a la xarxa elèctrica.	0,06 \$/kWh

Els ingressos obtinguts per injectar l'excés d'energia elèctrica generada es defineixen de la següent forma.

$$CostSal(i) = \sum_m \sum_h DiesMes(m) \cdot ESa(i, m, h) \cdot ESaPrice(i, m, h)
 \tag{Eq. 3.7}$$

S'ha de tenir en compte que aquests ingressos només serien possibles si la injecció d'energia estigués permesa segons la legislació del territori on es trobessin els edificis.

3.2.2. Restriccions

Una vegada definides les equacions de costos així com les múltiples variables que formaran part del model s'han d'establir les restriccions del model que garanteixin que funcioni correctament. La Taula 3.12 defineix els paràmetres que s'utilitzaran en les següents restriccions i que no han estat definides prèviament.

Taula 3.12. Definició dels paràmetres generals de les restriccions [4] [15] [16].

Paràmetre	Definició	Valor/Unitat
AreaMaxPV (i)	Àrea disponible per la generació fotovoltaica.	{2000,2500,1000}
PVEff	Eficiència elèctrica de la fotovoltaica.	12%
RatedCapPV	Ràtio de capacitat instal·lada per m ² .	0,15 kWp/m ²
Radiació PV (i)	Irradiació solar disponible.	kW/m ²
EnergyLossRatio	Pèrdues derivades de la compartició d'energia.	5%
CapCCMax	Capacitat màxima de la màquina de refrigeració.	1000 kW
COPcc	Coeficient d'operativitat de la màquina de refrigeració.	4,73
CapBoiMax	Capacitat màxima de la caldera.	5000 kW
MUpperBound	Límit superior per l'energia.	1500 kWh

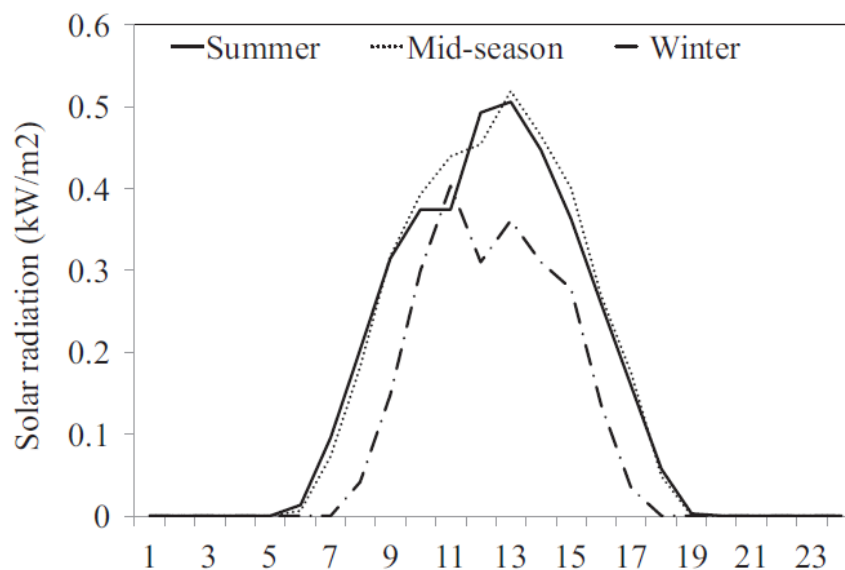


Figura 3.9. Irradiància solar horària del cas estudiat [16].

3.2.3. Balanços energètics

Per tal d'assegurar que la producció d'energia sigui, com a mínim, igual a l'energia consumida a cada node s'han d'establir dos balanços d'energia, un per l'energia elèctrica i un altre per l'energia en forma de calor. En l'equació del balanç elèctric (Eq. 3.8) es mostren a l'esquerra els consums i l'electricitat que es vendria a la xarxa, i a la dreta l'electricitat generada per les fonts.

$$\begin{aligned}
 & ESa(i, m, h) + ELoad(i, m, h) + Eccin(i, m, h) \\
 = & \sum_k E_{chp}(i, k, m, h) + E_{pur}(i, m, h) + EPV(i, m, h)
 \end{aligned} \tag{Eq. 3.8}$$

D'una forma anàloga definim el balanç d'energia calorífica (Eq. 3.9). A la part esquerra de la igualtat s'inclou la càrrega de calor així com l'energia que es transmet del node i al j, essent i el node d'origen. A la dreta s'hi troba l'energia produïda per la cogeneració i la caldera així com l'energia rebuda a través del sistema de compartició.

$$\begin{aligned}
 & HLoad(i, m, h) + \sum_j HTra(i, j, m, h) \\
 = & \sum_k H_{chp}(i, k, m, h) + \sum_j (HTra(j, i, m, h) \cdot (1 - EnergyLossRatio)) \\
 & + HBoi(i, m, h)
 \end{aligned} \tag{Eq. 3.9}$$

3.2.4. Cogeneració

En el cas de les tecnologies de generació s'ha de limitar la producció en funció de la potència instal·lada així com tenir en compte altres càlculs necessaris pel càlcul de les produccions. En el cas de la cogeneració s'ha de limitar la generació d'energia elèctrica en funció de la potència del model escollit. La variable binària y_{chp} és l'encarregada de seleccionar el model escollit per cada edifici. En l'equació (Eq. 3.10) es mostra la limitació de la producció de la cogeneració.

$$\frac{E_{chp}(i, k, m, h)}{\Delta t} \leq cap_{chp}(k) \cdot y_{chp}(i, k) \quad (\text{Eq. 3.10})$$

Una vegada definit tant el límit màxim com el càlcul de la producció d'energia elèctrica de la cogeneració s'ha de calcular l'energia calorífica generada. Per aquest càlcul s'utilitza el paràmetre *HeatPowerRatio*. Aquesta ràtio determina la proporció d'energia calorífica generada per cada unitat d'energia elèctrica en un sistema de cogeneració. En el present model aquesta ràtio es troba en funció de la capacitat de cada model de cogeneració tal com es mostra en la Taula 3.5.

$$H_{chp}(i, k, m, h) = E_{chp}(i, k, m, h) \cdot HeatPowerRatio(k) \quad (\text{Eq. 3.11})$$

Cal tenir en compte que tant el paràmetre *HeatPowerRatio* com les eficiències de les fonts de producció d'energia són paràmetres constants. És a dir, són simplificacions dels casos reals on aquests paràmetres tenen un caràcter no lineal i es calculen en funció del factor de càrrega, el COP estacional o la temperatura ambient. Aquest tipus de simplificacions són usuals i àmpliament acceptades en models com aquest, ja que l'error que introdueix en el model es considera acceptable [12].

Una vegada limitada la producció d'energia elèctrica i la generació de calor de la cogeneració és necessari establir que cada edifici només pot comptar amb un model de cogeneració. Aquesta restricció s'ha decidit incloure perquè s'entén que els edificis tenen un espai limitat i es prefereix optimitzar l'espai destinat a les màquines generadores.

$$\sum_K y_{chp}(i, k) \leq 1 \quad (\text{Eq. 3.12})$$

3.2.5. Generació fotovoltaica

Per determinar la generació fotovoltaica es tindrà en compte l'àrea total de panells fotovoltaics instal·lats en cada edifici, així com la radiació solar i l'eficiència elèctrica de cada panell (Eq. 3.13). Aquesta generació ve limitada per l'àrea màxima disponible en cada edifici (Eq. 3.14). Per últim també es calcula la capacitat total instal·lada en cada edifici (Eq. 3.15), aquesta capacitat s'utilitza en les equacions de costos definides anteriorment.

$$\frac{EPV(i, m, h)}{\Delta t} = AreaPV(i) \cdot RadiacióPV(m, h) \cdot PVEff \quad (\text{Eq. 3.13})$$

$$AreaPV(i) \leq AreaMaxPV(i) \quad (\text{Eq. 3.14})$$

$$CapPV(i) = AreaPV(i) \cdot RatedPV \quad (\text{Eq. 3.15})$$

3.2.6. Màquina de fred

En el cas de la màquina de refrigeració per compressió s'han d'establir límits de producció d'energia similars als de la cogeneració (Eq. 3.17) així com la seva capacitat màxima (Eq. 3.16). En aquest cas també s'ha de definir el càlcul de l'electricitat necessària (*Eccin*) per cobrir la càrrega de fred tenint en compte el COP de la màquina (Eq. 3.18).

$$Capcc(i) \leq CapCCMAX \quad (\text{Eq. 3.16})$$

$$\frac{Eccin(i, m, h)}{\Delta t} \leq Capcc(i) \quad (\text{Eq. 3.17})$$

$$Eccin(i, m, h) = CLoad(i, m, h) / COPcc \quad (\text{Eq. 3.18})$$

Tant en el cas de la màquina de fred com en el de la caldera de gas s'ha decidit establir la potència en funció de la capacitat òptima necessària, en comptes d'establir un rang de potències disponibles com amb la cogeneració. En un cas pràctic això no seria possible però seleccionar quins models concrets s'han d'instal·lar a cada edifici queda fora de l'abast de l'estudi.

3.2.7. Caldera de gas

Les restriccions de la caldera de gas també són definides per dues equacions similars a les de la màquina de refrigeració, una equació que limita la capacitat màxima (Eq. 3.19) i una que limita la producció segons la capacitat idònia (Eq. 3.20).

$$CapBoi(i) \leq CapCalMax \quad (\text{Eq. 3.19})$$

$$\frac{HBoi(i, m, h)}{\Delta t} \leq CapBoi(i) \quad (\text{Eq. 3.20})$$

3.2.8. Compra i venda de la xarxa elèctrica

Per l'adquisició o venda de la xarxa elèctrica cal definir que no es puguin dur les dues accions a terme de forma simultània. Per això es creen les dues variables binàries (*Invar* i *Outvar*), de manera que l'equació (Eq. 3.23) limita la possibilitat que succeeixi. Les equacions número (Eq. 3.21) i (Eq. 3.22) defineixen el límit de la venda i de la compra d'energia elèctrica, sent el paràmetre *MUpperBound* aquest límit.

$$E_{pur}(i, m, h) \leq M_{UpperBound} \cdot Invar(i, m, h) \quad (\text{Eq. 3.21})$$

$$E_{Sa}(i, m, h) \leq M_{UpperBound} \cdot Outvar(i, m, h) \quad (\text{Eq. 3.22})$$

$$Invar(i, m, h) + Outvar(i, m, h) \leq 1 \quad (\text{Eq. 3.23})$$

3.2.9. Compartició de calor

Primerament és necessari acotar que el tram de canalitzacions que es construeixi ($x_{pipe} = 1$) només pugui tenir un sentit, és a dir, que el flux d'energia sempre tingui el mateix origen i destí. L'equació (Eq. 3.24) aconseguen que no es doblin els sentits de les canalitzacions i garanteix que el sentit del flux sigui sempre el mateix.

$$x_{pipe}(i, j) + x_{pipe}(j, i) \leq 1 \quad (\text{Eq. 3.24})$$

També és necessari limitar la quantitat d'energia que es pot compartir en un instant de temps amb la restricció de l'equació (Eq. 3.24).

$$H_{Tra}(i, j, m, h) \leq M_{UpperBound} \cdot x_{pipe}(i, j) \quad (\text{Eq. 3.25})$$

Per últim és necessari assegurar que la calor no circula sense ser consumida en algun dels edificis, creant un circuit per on la calor s'emmagatzemi. Aquesta situació es podria donar quan la demanda de calor fos zero o quan la cogeneració operi a una potència major de la necessària per produir electricitat i injectar-la a la xarxa. La formulació d'aquesta restricció està inspirada en el problema del viatger [17].

El problema clàssic del viatger es defineix de la següent forma: "un venedor ha de visitar un nombre de ciutats seguint l'ordre que minimitzi el cost i el temps". En aquest problema s'utilitzen variables binàries que representen el viatge entre ciutat i ciutat. De forma anàloga la variable binària del model seria x_{pipe} i el que s'hauria de minimitzar és el cost total [17].

$$Ortsp(j) \leq Ortsp(i) + 1 - |i| \cdot (1 - x_{pipe}(i, j)) \quad (\text{Eq. 3.26})$$

En l'equació (Eq. 3.26) $Ortsp(i)$ és una variable positiva que indica l'ordre de visita de cada node, x_{pipe} és la variable de selecció que indica si existeix la compartició entre el node i i j i mentre que $|i|$ indica el nombre total de nodes, en el cas del cas estudiat serien tres nodes. Aquesta equació garanteix que en el model no existiran circuits tancats de canalitzacions perquè per cada tram de canalització existent l'ordre de $Ortsp$ incrementa [18].

3.3. Assignació d'estalvis i teoria de jocs

La teoria de jocs és una eina que s'utilitza per estudiar la presa de decisions quan diverses persones han de cooperar o tenen conflictes entre si. Per poder prendre les decisions es defineix matemàticament la racionalitat de les persones quan es troben en una situació competitiva, on els beneficis depenguin no només de les decisions que prengui cadascú, sinó també de la decisió dels altres participants [19]. En l'argot de teoria de jocs quan diversos participants persegueixen els seus propis objectius el procés de presa de decisions s'anomena joc [4].

L'anàlisi dels jocs cooperatius es centra en dos aspectes: la formació de la coalició i la relació cost/benefici assignat a cadascun dels participants, de forma que cada participant vol aconseguir el màxim benefici i una relació benefici/cost acceptable. En el cas del model descrit cal recalcar que el que es repartirà no serà el benefici econòmic, sinó els estalvis econòmics derivats de la cooperació entre els diversos jugadors.

El Nucli (*core*) en un joc cooperatiu es defineix com "el conjunt d'assignacions de beneficis que no està dominada per cap altre conjunt d'assignacions" [20]. El Nucli proporciona uns límits superiors i inferiors que cada possible assignació dels estalvis ha de complir. Aquests límits també s'anomenen racionalitats.

A la Taula 3.13 es mostren els sets, paràmetres i variables utilitzats en la formulació del model.

Taula 3.13. Definició dels paràmetres relacionats amb els costos dels equipaments [4].

Nomenclatura	Definició
i	Set de jugadors (1,2,3).
N	Gran coalició.
S	Subcoalició de jugadors (1-2,1-3,2-3).
q	Quantitat de punts de la linealització.
x_i	Assignació dels estalvis de cada jugador.
$V(\{i\})$	Estalvi de cada jugador actuant en solitari.
VN	Estalvi de la gran coalició.
$VS(s)$	Estalvi de cada subcoalició.
α_i	Power Index.
FI_α	Índex d'equitat.

$VNI(i)$	Estalvis de la subcoalició que no inclou a i .
G_i	DP Value. Índex de ruptura.
ε	Nucleolus Core.
$W(S)$	Valor de ponderació.
λ	Factor de linealització.
φ	Funció linealitzada de Nash-Harsanyi.
$\hat{\varphi}$	Funció objectiu de Nash-Harsanyi.
μ	Paràmetres de linealització de Nash-Harsanyi.
x_q	Assignació dels estalvis de cada jugador per cada punt q .

La solució del problema ha d'indicar quina és la recompensa per participar-hi, que en el cas del model definit és l'estalvi obtingut. Per fer-ho es defineixen els valors x_i , que representen el benefici obtingut per cada participant del joc. Aquest vector benefici ha de complir amb dues condicions bàsiques anomenades racionalitat individual (Eq. 3.24) i la racionalitat de grup (Eq. 3.25). Si aquestes dues condicions es compleixen, el conjunt de valors x_i passa a anomenar-se imputació. Una imputació és una distribució eficient i racional [4].

La racionalitat individual estableix que cada jugador ha de rebre com a mínim el mateix que rebria actuant de forma individual.

$$x_i \geq V(\{i\}) \quad (\text{Eq. 3.27})$$

La racionalitat de grup condiona que el benefici màxim possible del joc ha de ser igual a la suma dels beneficis de cada jugador.

$$\sum_{i=1}^n x_i = VN \quad (\text{Eq. 3.28})$$

A part de les dues condicions anteriors qualsevol imputació també ha de complir la racionalitat de subcoalició. Per satisfer aquesta racionalitat s'ha de complir que la suma dels beneficis que obtindrien en la gran coalició els participants en una subcoalició s sigui superior o igual a la suma dels beneficis en qualsevol subcoalició de la que puguin formar part.

$$\sum_{i=1}^s x_i \geq VS(s) \quad (\text{Eq. 3.29})$$

3.3.1. Estabilitat i equitat de la solució

Algunes de les possibles assignacions d'estalvis podrien provocar que un dels jugadors decidís no participar en la coalició o fins i tot que es creessin subcoalicions perquè la perceben com a més justa

que una altra assignació. Les racionalitats explicades prèviament només estableixen els límits necessaris perquè el joc es pugui dur a terme però no té en compte si la repartició dels estalvis és estable o justa. Per poder analitzar aquestes dues característiques és necessari fer ús d'índexs que estableixin quin nivell d'equitat i d'estabilitat tenen les reparticions d'estalvis aconseguides.

Una solució serà estable quan els jugadors prefereixin aquesta solució davant d'altres. Perquè un jugador prefereixi la solució, aquesta li haurà d'atorgar el màxim estalvi possible. Per tant una mesura de l'estabilitat d'una solució és quants jugadors prefereixen aquesta solució. El *Shapley-Shubik Power Index* és un índex que permet comparar els guanys de cada jugador en la gran coalició amb els possibles guanys si aquesta coalició no existís [20].

$$\alpha_i = \frac{x_i - V(\{i\})}{\sum_i^n (x_i - V(\{i\}))}; \sum_i^n \alpha_i = 1 \quad (\text{Eq. 3.30})$$

Aquest índex pot ser utilitzat per calcular l'estabilitat de la solució. Si la distribució entre els diferents índexs per cada jugador és similar, llavors la coalició és estable. A partir d'aquests índexs es pot calcular el coeficient de variació (FI_α) que és el quocient de la desviació estàndard i la mitjana dels *Power Index* de cada jugador. Com més gran sigui aquest coeficient de variació, que actua com a índex d'estabilitat, més inestable serà la solució [20].

$$FI_\alpha = \frac{\sigma_\alpha}{\bar{\alpha}} \quad (\text{Eq. 3.31})$$

Un altre índex per valorar les solucions de cada mètode de repartició de beneficis ha de ser un que valori si la solució és propensa a la disrupció de la gran coalició. Aquest índex ha de mesurar quant perden els jugadors si un d'ells decideix no participar-hi. L'índex utilitzat s'anomena DP i va ser introduït per Gately el 1974 [4].

$$G_i = \frac{VN - VNI(i)}{x_i} - 1 \quad (\text{Eq. 3.32})$$

G_i mesura la pèrdua si un dels membres de la gran coalició decideix no participar. Si el valor és negatiu, reflecteix l'entusiasme per la solució estudiada. Si el valor és positiu i gran el jugador i és una amenaça perquè podria trencar la coalició [20].

Les equacions (Eq. 3.30), (Eq. 3.31), i (Eq. 3.32) no s'han inclòs en el model amb AIMMS perquè algunes d'aquestes equacions el programa les detecta com a no linealitats i llavors passa a utilitzar un *solver* no lineal. Els càlculs d'aquests índexs s'han realitzat posteriorment, un cop el model troba l'assignació d'estalvis de cada mètode.

3.4. Mètodes de repartició

A continuació es defineixen els mètodes de repartició utilitzats i s'exposa la formulació per cada un. Com que AIMMS no permet optimitzar més d'una variable simultàniament, s'ha creat un altre model i una nova funció objectiu per dos dels mètodes, sempre tenint en compte els resultats obtinguts en el model prèviament plantejat. En el cas del mètode del valor Shapley no ha estat necessari perquè no requereix de l'optimització de cap variable.

3.4.1. Shapley Value

El valor Shapley és un mètode de repartició basat en trobar un valor mitjà ponderat per cada jugador tenint en compte les diferents contribucions en cada una de les coalicions i seqüències possibles. Per aquest càlcul s'assigna la mateixa ponderació a la formació de cada una de les coalicions de la mateixa mida [20]. L'equació (Eq. 3.33) defineix el paràmetre de ponderació que representa el percentatge de benefici marginal que hauria de ser assignat a cada jugador [4].

$$W(|S|) = \frac{(|S| - 1)! (n - |S|)!}{n!} \quad \text{(Eq. 3.33)}$$

Un cop calculat $W(|S|)$ ja es pot procedir a definir el càlcul del valor Shapley per cada jugador. L'equació (Eq. 3.34) mostra el càlcul per un joc amb n -jugadors, sent $|S|$ el número de participants en cada coalició. Per últim cal igualar el valor Shapley a l'assignació d'estalvis de cada edifici, com mostra l'equació (Eq. 3.35). D'aquesta manera també es compliran les racionalitats prèviament descrites.

$$ShapleyValue(i) = \sum_{\substack{S \in N \\ i \in S}} W(|S|) \cdot [VS(s) - VS(s - \{i\})] \quad \text{(Eq. 3.34)}$$

$$x(i) \equiv ShapleyValue(i) \quad \text{(Eq. 3.35)}$$

A continuació es mostra la integració de l'equació (Eq. 3.34) en la programació de AIMMS. En el codi es troba definit el càlcul del valor Shapley per un cas de tres jugadors com el del model. Com s'observa en la figura s'han definit dos paràmetres per el valor $W(|S|)$ perquè té valors diferents en funció de si és una subcoalició o una altra coalició.

$$ShapleyValue(1) = Win * V(1) + Ws * [VS(1) - V(2) + VS(2) - V(3)] + Win * [VN - VS(3)]$$

Figura 3.10. Codi de la restricció del càlcul del valor Shapley del jugador 1.

3.4.2. Nucleolus

El Nucleolus és un punt de la solució que sempre existeix i que minimitza la insatisfacció de la subcoalició més insatisfeta, és a dir, de la subcoalició que tingui més beneficis i no es pugui dur a terme per l'existència de la gran coalició. Per trobar aquest punt s'ha de definir el nucli ε . Aquest nucli representa el conjunt de solucions que fa que, si els jugadors rebessin una quantitat de diners ε , es trobessin dins del nucli del joc. Si es minimitza el valor de ε , s'aconsegueix trobar el nucli més petit (*least core*) on tots els jugadors formen part de la coalició. Per trobar aquest nucli s'han de satisfer les equacions que es mostren a continuació [20].

$$V(i) - \sum_{i=1}^i x_i \leq \varepsilon \quad (\text{Eq. 3.36})$$

$$VS(s) - \sum_{i=1}^s x_i \leq \varepsilon \quad (\text{Eq. 3.37})$$

$$VN - \sum_{i=1}^i x_i \leq \varepsilon \quad (\text{Eq. 3.38})$$

$$\min \varepsilon \quad (\text{Eq. 3.39})$$

3.4.3. Solució N-H

La solució del mètode de Nash-Harsanyi (N-H) maximitza el producte de la diferència entre els estalvis de cada jugador de la gran coalició i els estalvis de l'escenari on no es coopera. Aquest mètode de repartició ha d'estar subjecte a les racionalitats expressades en les equacions (Eq. 3.27), (Eq. 3.28) i (Eq. 3.29) [21], de manera que la solució també formi part del nucli.

$$\max \varphi = \prod_{i \in N} (x(i) - V(i)) \quad (\text{Eq. 3.40})$$

Aquesta solució pot provocar que la repartició sigui injusta si la utilitat de cada jugador és molt diferent, és a dir, si un jugador aporta molt més que un altre [20].

La nova funció objectiu de l'equació (Eq. 3.40) és no lineal. Donat que el model plantejat ha de ser un MILP aquesta equació ha de ser linealitzada per poder ser resolta. Per linealitzar la funció objectiu aquesta passarà a ser definida com una suma de funcions que només involucri una variable. Aquesta nova funció ve definida per x_q i utilitza un cert nombre d'interval·ls sent m el nombre total i q el nombre de punts de la linealització. Aquest nombre de punts s'ha establert a 9.999. També és necessari definir

la variable que seleccioni quin punt q és el que maximitza la funció objectiu, sent $\lambda(i, q)$ el factor de linealització [19]. Aquesta variable pot tenir un valor d'entre 0 i 1 tal com descriuen les equacions (Eq. 3.41) i (Eq. 3.42).

$$\sum_{q=1}^m \lambda(i, q) = 1 \quad (\text{Eq. 3.41})$$

$$\lambda(i, q) \geq 0 \quad (\text{Eq. 3.42})$$

Coneixent el límit inferior de $x(i)$, sent aquest $v(i)$, l'equació no lineal (Eq. 3.40) es pot reescriure com una diferència logarítmica, com es mostra a l'equació (Eq. 3.43).

$$\ln \varphi = \sum_i \ln(x(i) - V(i)) \quad (\text{Eq. 3.43})$$

L'equació anterior es pot reescriure canviant $x(i)$ per $x_q(i)$, sent aquest un paràmetre que conté els possibles valors de $x(i)$ per cada punt q tenint en compte que el valor mínim sigui zero i el valor màxim VN .

$$\ln \varphi = \sum_i \ln(x_q(i) - V(i)) \quad (\text{Eq. 3.44})$$

La funció objectiu es pot convertir en l'equació (Eq. 3.46) on $\mu(i, q)$ és un paràmetre que conté els valors de l'equació (Eq. 3.44). D'aquesta forma aconseguim que l'equació sigui lineal i convexa.

$$\ln \varphi \equiv \hat{\varphi} \quad (\text{Eq. 3.45})$$

$$\max \hat{\varphi} = \sum_i \sum_{q=1}^m \mu(i, q) \cdot \lambda(i, q) \quad (\text{Eq. 3.46})$$

La nova funció objectiu també haurà de complir les racionalitats del nucli definides en les equacions (Eq. 3.27), (Eq. 3.28) i (Eq. 3.29) però reescrites adaptant-les al factor de linealització i a x_q . Les racionalitats individual, de grup i de subcoalició es troben definides a les equacions (Eq. 3.47), (Eq. 3.48) i (Eq. 3.49) respectivament.

$$\sum_{q=1}^m x_q(i, q) \cdot \lambda(i, q) \geq V(\{i\}) \quad (\text{Eq. 3.47})$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{q=1}^m x_q(i, q) \cdot \lambda(i, q) = VN \quad (\text{Eq. 3.48})$$

$$\sum_{i=1}^s \sum_{q=1}^m x_q(i, q) \cdot \lambda(i, q) \geq VS(s) \quad (\text{Eq. 3.49})$$

3.4.4. Mètode del valor DP equivalent

Per aquest mètode d'assignació s'utilitza el valor DP creat per *Gately* definit a l'(Eq. 3.32. Aquest mètode es basa a igualar l'índex G_i , aconseguint així que la possible disrupció de la coalició sigui la mateixa per tots els participants del joc [4]. La condició a complir es mostra a continuació.

$$G_1 = G_2 = G_3 \quad (\text{Eq. 3.50})$$

Aquesta igualtat es pot desenvolupar de la següent forma.

$$\frac{VN - VNI(1)}{x_1} - 1 = \frac{VN - VNI(2)}{x_2} - 1 = \frac{VN - VNI(3)}{x_3} - 1 \quad (\text{Eq. 3.51})$$

Si separem aquesta equació en dues igualtats diferents i substituïnt els valors de $VNI(i)$ pels valors corresponents de $VS(s)$ quedaria com es mostren en les equacions (Eq. 3.52) i (Eq. 3.53).

$$\frac{VN - VS(2 - 3)}{x_1} - 1 = \frac{VN - S(1 - 3)}{x_2} - 1 \quad (\text{Eq. 3.52})$$

$$\frac{VN - VS(2 - 3)}{x_1} - 1 = \frac{VN - VS(1 - 2)}{x_3} - 1 \quad (\text{Eq. 3.53})$$

Aquestes igualtats són no lineals perquè les variables x_i es troben dividint. Tenint en compte que els 1 que resten a banda i banda es poden eliminar, es pot linealitzar l'expressió multiplicant en creu cada una de les igualtats. Les expressions que en resulten serien les següents.

$$x_1 \cdot [VN \cdot VS(1 - 3)] = x_2 \cdot [VN \cdot VS(2 - 3)] \quad (\text{Eq. 3.54})$$

$$x_1 \cdot [VN \cdot VS(1 - 2)] = x_3 \cdot [VN \cdot VS(2 - 3)] \quad (\text{Eq. 3.55})$$

4. Anàlisi de resultats

Un cop definit el model matemàtic d'optimització de la xarxa energètica que inclou els tres edificis es procedeix a realitzar una anàlisi dels resultats obtinguts. Aquesta anàlisi estarà dividida en dues parts.

En la primera es mostraran els costos relacionats amb les produccions energètiques obtingudes en cada cas plantejat. En total s'analitzaran cinc casos diferents, el primer cas on els edificis treballen de forma independent, tres casos pertanyents a cada subcoalició possible i per últim el cas on tots els edificis cooperen entre ells, també anomenat gran coalició. En la segona part s'analitzaran les reparticions obtingudes amb els diferents mètodes d'assignació de beneficis. Tant per la primera com per la segona part el *solver* utilitzat per resoldre el model ha estat el CPLEX 12.8.

4.1. Resultats de les produccions energètiques

4.1.1. No compartició

En aquest escenari cada edifici produeix l'energia necessària per cobrir la demanda sense cap mena de compartició entre uns i altres. En la Taula 4.1 es mostra un resum dels costos de cada edifici així com les capacitats de les màquines de generació utilitzades.

Taula 4.1. Resum de resultats del cas sense compartició.

Edifici	Cost total (\$)	Cap.CHP (kW)	CapBoi (kW)	Cap CC (kW)	CapPV (kWp)
Hospital	1282312,48	1121	2644,95	305,28	-
Oficines	804875,76	100	1438,34	244,30	375
Apartaments	414431,71	230	1120,02	54,84	150

Tal com era d'esperar l'hospital conforma més d'un 50% del cost total d'aquest cas. Això és a causa de l'alt nivell de consum prèviament mostrat en l'apartat corresponent. També es pot observar que la capacitat de la cogeneració escollida en l'edifici d'apartaments és major que en el d'oficines. Això és conseqüència de la compatibilitat dels perfils de consum d'electricitat i calor amb la cogeneració. És important destacar que mentre les oficines i els apartaments compten amb generació renovable l'hospital no, això és a causa de la gran capacitat de la cogeneració i la seva relació cost-capacitat.

Aquest cas és l'únic on es mostren les capacitats de les màquines de refrigeració, ja que la compartició de calor no afecta la producció de fred i en tots els casos posteriors seran iguals. En aquest primer cas el cost total arriba als 2,50 milions de dòlars.

4.1.2. Subcoalicó 1. Hospital-oficines.

En el cas d'aquesta subcoalicó el sentit de l'energia compartida serà de les oficines a l'hospital. A causa de la compartició d'energia tèrmica la capacitat de la cogeneració de l'edifici d'oficines s'incrementa arribant als 470 kW instal·lats. El volum total d'energia compartida en aquest cas és de 30,10 MWh anuals.

Taula 4.2. Resum de resultats de la subcoalicó hospital-oficines.

Edifici	Cost total (\$)	Cap. CHP (kW)	CapBoi (kW)	CapPV (kWp)
Hospital	1218204,42	1121	2410,64	-
Oficines	838185,96	470	1178,13	375

L'estalvi obtingut deriva de l'augment de la producció de la cogeneració de l'edifici d'oficines. En augmentar la capacitat de producció de la cogeneració també s'aconsegueix reduir la quantitat d'energia consumida procedent de la xarxa elèctrica. Aquests dos fets ocorren durant tot l'any però especialment en els mesos d'hivern, tal com es mostra en la **Figura 4.1** *Produccions d'electricitat de les oficines en dia d'hivern en la subcoalicó 1 i produint individualment.*

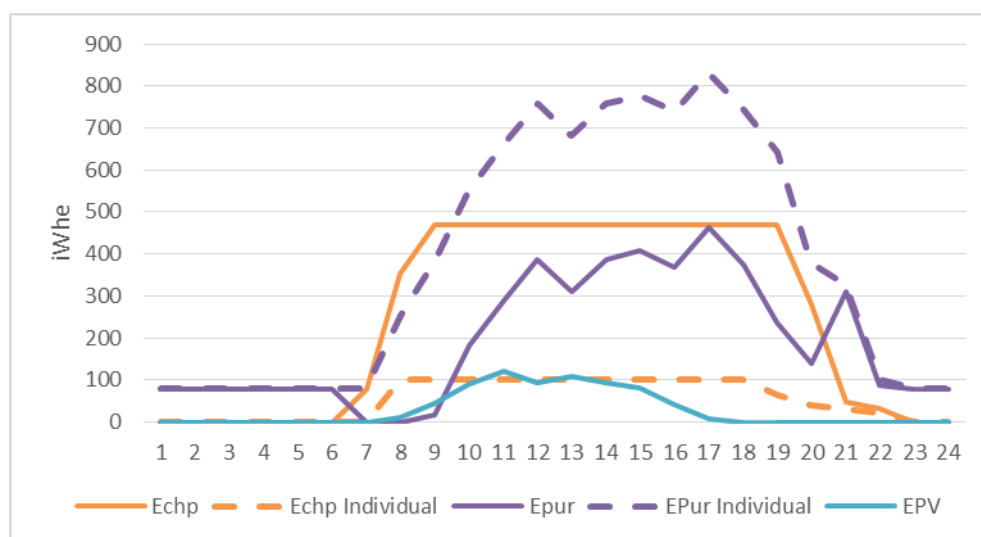


Figura 4.1. Produccions d'electricitat de les oficines en dia d'hivern en la subcoalicó 1 i produint individualment.

Elaboració pròpia.

A conseqüència d'aquest augment en la producció succeeixen dos canvis. Per una banda quan s'augmenta la producció d'electricitat també s'augmenta la producció de calor de la cogeneració. Una part d'aquesta energia tèrmica es destinarà a cobrir part de la càrrega tèrmica del mateix edifici d'oficines, amb això s'aconsegueix reduir la potència de la caldera instal·lada i la seva producció. Aquests canvis es mostren en el següent gràfic, concretament pels dies d'hivern.

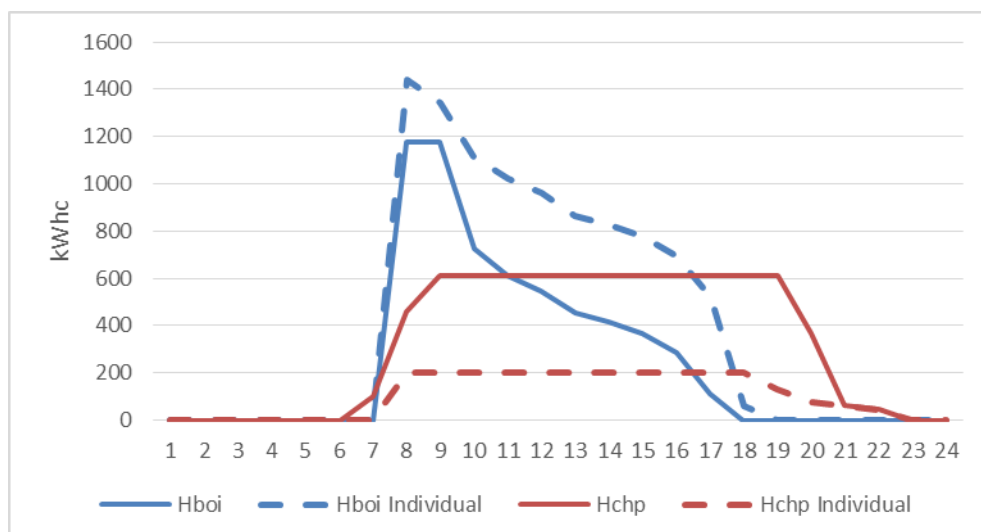


Figura 4.2. Produccions de calor de les oficines en dia d'hivern en la subcoalició 1 i produint individualment. Elaboració pròpia.

Per altra banda una part d'aquesta energia tèrmica que produeix la cogeneració de l'edifici d'oficines és transportada cap a l'hospital. Aquest fet provoca un descens de la producció i potència de la caldera de gas, tal com es mostra en el següent gràfic. Aquest descens en el cas dels mesos de tardor i primavera representa una reducció del 47,41% respecte al cas d'operació individual.

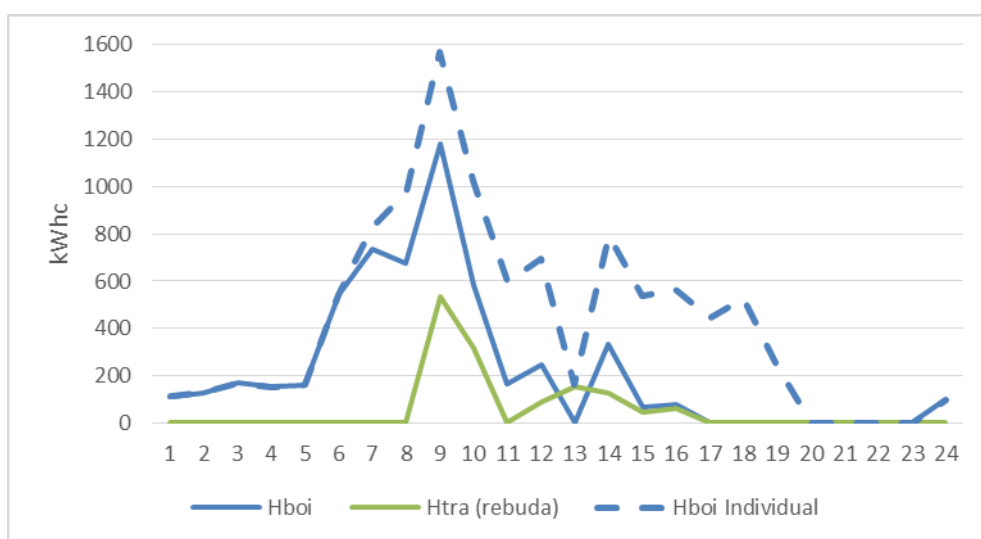


Figura 4.3. Produccions de la caldera de l'hospital en dia de tardor/primavera en la subcoalició 1 i produint individualment. Elaboració pròpia.

4.1.3. Subcoalició 2. Hospital-apartaments.

En aquesta subcoalició l'hospital torna a ser el receptor de l'energia compartida. Tot i això la capacitat de la cogeneració dels apartaments no varia, però sí que augmenta la producció tant d'electricitat com

de calor. En aquest, el volum d'energia compartida és més baix que en la primera subcoalició, sent només de 19,44 MWh anuals.

Taula 4.3. Resum de resultats de la subcoalició hospital-apartaments.

Edifici	Cost total (\$)	Cap. CHP (kW)	CapBoi (kW)	CapPV (kWp)
Hospital	1235310,91	1121	1675,40	-
Apartaments	455016,90	230	1120,02	-

En aquesta subcoalició es pot apreciar com la compartició d'energia entre els apartaments i l'hospital té un nou resultat en la potència de fotovoltaica instal·lada, sent inexistent en el cas dels apartaments. Això és perquè és més beneficiós optimitzar la producció de la cogeneració i deixar fora del mix energètic la fotovoltaica sempre que es pugui utilitzar l'excedent d'energia tèrmica produït.

En aquesta segona subcoalició es poden observar uns resultats similars pel que fa a la reducció dels costos aconseguits, però en aquest cas no s'hi troba cap augment en les capacitats de les cogeneracions. Això és a causa que no surt a compte incrementar la potència de la cogeneració de l'edifici d'apartaments perquè el cost d'instal·lació de la potència de 470 kW és massa elevat. Per això el que sí que augmentarà serà la producció d'electricitat i calor de la cogeneració, optimitzant la seva operació s'obtindrà una reducció de l'energia comprada a la xarxa elèctrica i s'anul·larà completament la generació fotovoltaica tal com mostra el gràfic de la Figura 4.4.

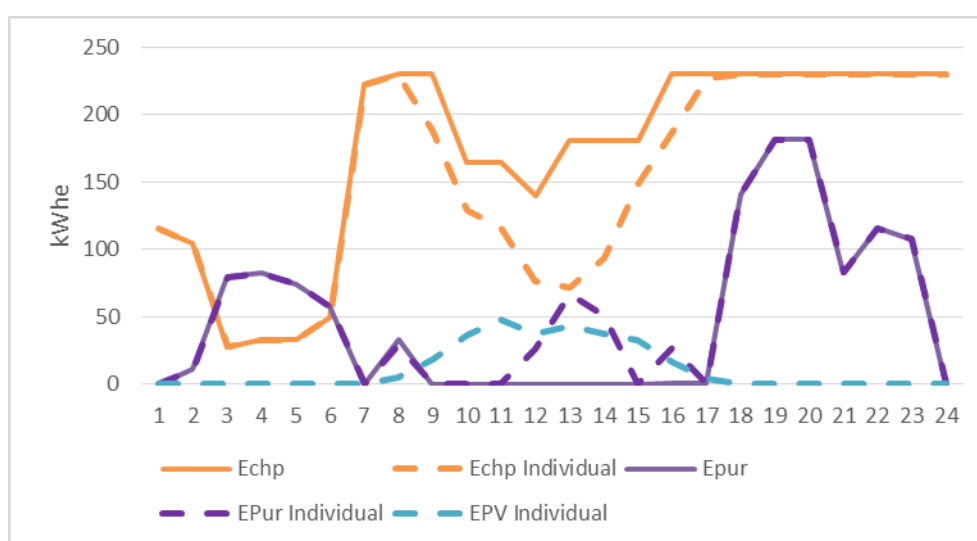


Figura 4.4. Produccions d'electricitat dels apartaments en dia d'hivern en la subcoalició 2 i produint individualment. Elaboració pròpia.

Com que la producció d'electricitat de la cogeneració augmenta també ho farà la de calor però, en aquest cas, això no causarà una disminució de la potència instal·lada de la caldera. Com s'observa en el gràfic de la Figura 4.5 el que succeeix és que també s'incrementa la producció de calor de la caldera.

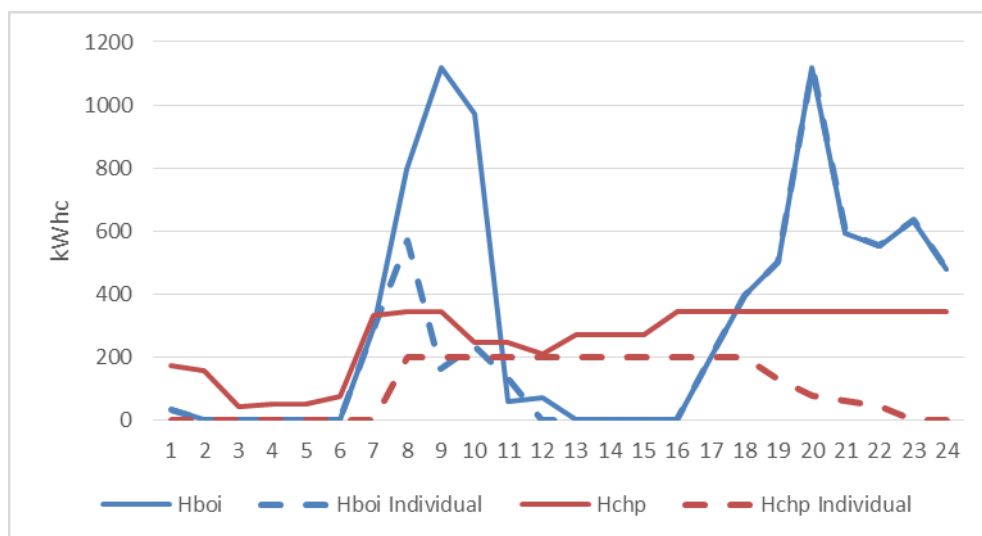


Figura 4.5. Produccions de calor dels apartaments en dia d'hivern en la subcoalicció 2 i produint individualment. Elaboració pròpia.

Aquest augment en la producció de calor serà destinat a l'hospital tal com es mostra en la Figura 4.6. Aquesta aportació permetrà reduir la producció de la caldera de l'hospital durant tots els mesos de l'any. En el cas dels mesos d'hivern aquesta reducció representarà un 10,2% en comparació al cas d'operació individual.

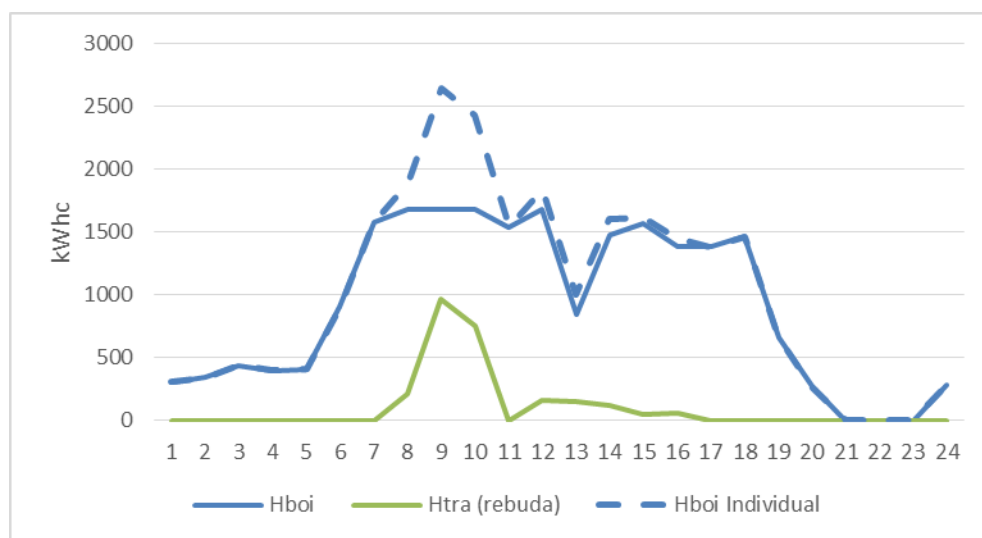


Figura 4.6. Produccions de la caldera de l'hospital en dia d'hivern en la subcoalicció 2 i produint individualment. Elaboració pròpia.

4.1.4. Subcoalicció 3. Oficines-apartaments.

En aquesta darrera subcoalicció el sentit de la compartició és de les oficines als apartaments. Així doncs la cogeneració de les oficines incrementa la seva potència però sense arribar a la de la subcoalicció 1, sent en aquest cas de 230 kW. El volum d'energia compartida és el més petit de les tres subcoaliccions,

amb un valor de 10,66 MWh. Tenint en compte els costos de la subcoalició 2 i 3 es pot observar com una major quantitat d'energia compartida no implica una reducció dels costos més gran. Aquesta reducció té una relació més directa amb les potències de les màquines elèctriques i tèrmiques instal·lades.

Taula 4.4. Resum de resultats de la subcoalició oficines-apartaments.

Edifici	Cost total (\$)	Cap. CHP (kW)	Cap. Caldera (kW)	CapPV (kWp)
Oficines	819518,22	230	1293,34	375
Apartaments	388497,89	230	568,58	150

En aquesta tercera subcoalició es torna a observar un increment en la potència de la cogeneració d'aquell edifici que comparteix part de l'energia que produeix. Els resultats d'aquest apartat tenen certa semblança amb els de la primera subcoalició però sense arribar a representar un estalvi tan gran. Com es mostra en el gràfic de la Figura 4.7 l'increment de la producció de la cogeneració provoca un descens en la quantitat d'energia consumida de la xarxa.

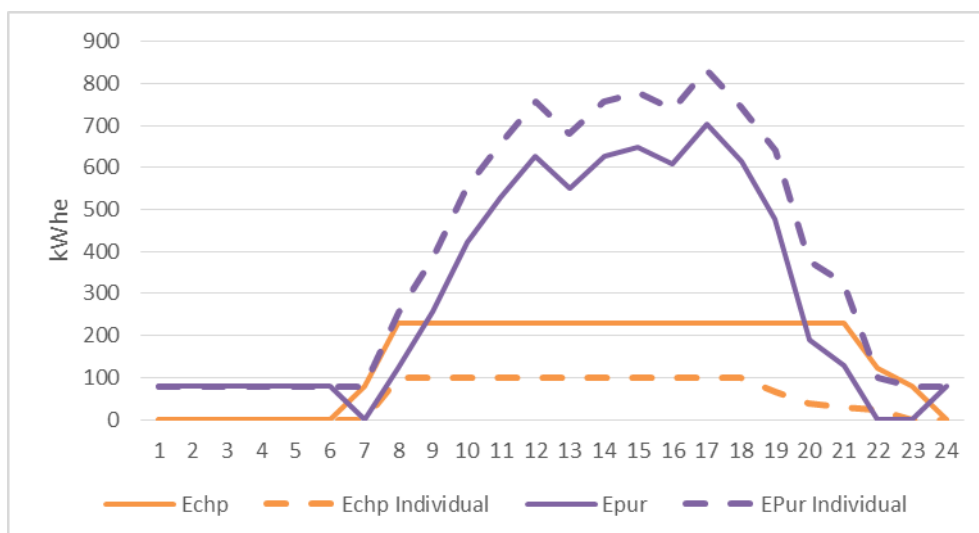


Figura 4.7. Produccions d'electricitat de les oficines en dia d'hivern en la subcoalició 3 i produint individualment.
Elaboració pròpia.

Tal com ha ocorregut en els altres casos aquest increment de la potència de la cogeneració dona com a resultat una reducció de la producció de calor de la caldera. Aquestes produccions es mostren en la figura següent.

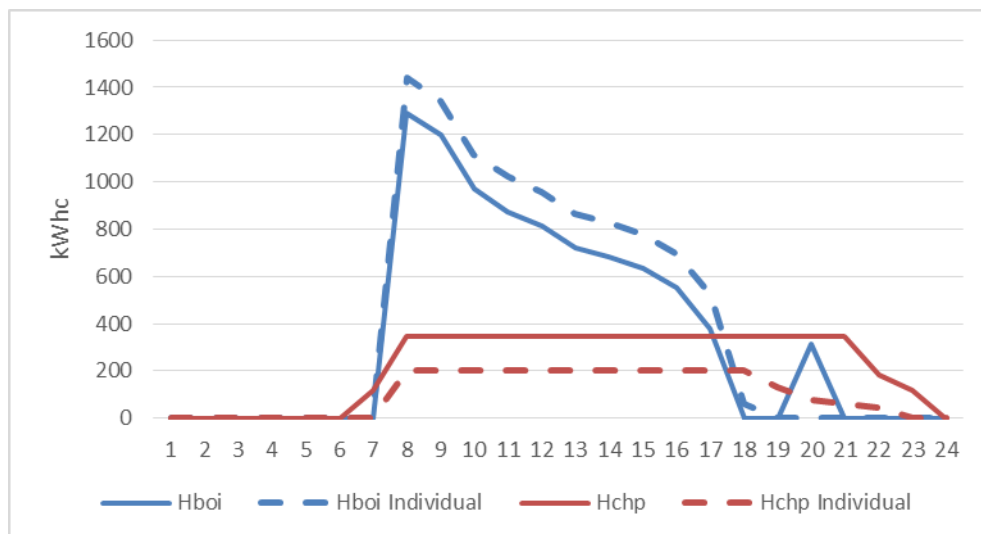


Figura 4.8. Produccions de calor de les oficines en dia d'hivern en la subcoalició 3 i produint individualment. Elaboració pròpia.

Per últim es mostra la variació de les produccions de la caldera dels apartaments, que són l'edifici que es beneficia de la compartició. Aquestes variacions només es donen durant els mesos d'hivern, tardor i primavera, ja que durant l'estiu s'aconsegueix cobrir la demanda tèrmica sense la necessitat de la caldera. En el cas que es mostra en la Figura 4.9, que pertany a un dia tipus d'hivern, la reducció de la producció representa un 24,7%.

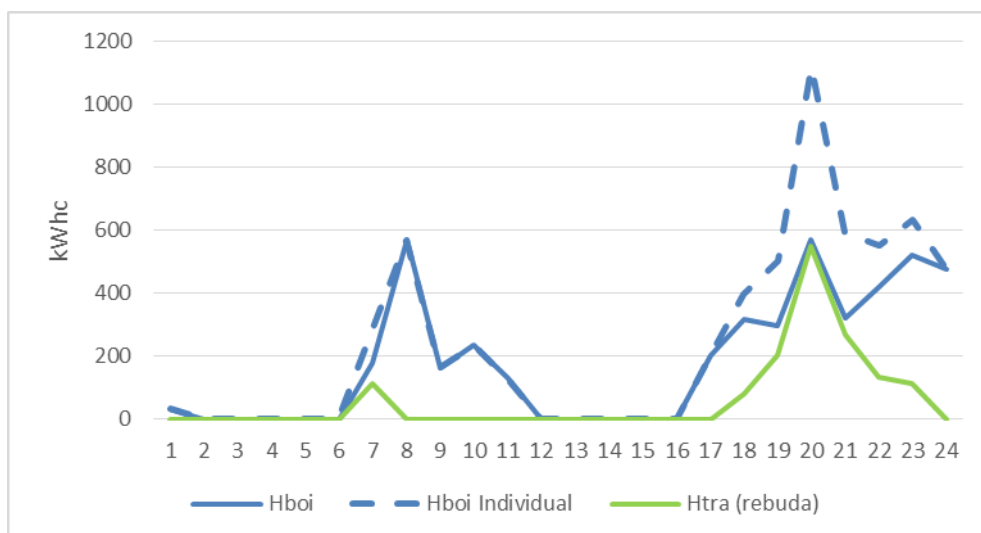


Figura 4.9. Produccions de la caldera dels apartaments en dia d'hivern en la subcoalició 3 i produint individualment. Elaboració pròpia.

4.1.5. Gran coalició

Per últim a la Taula 4.5 es mostren els resultats de la gran coalició.

Taula 4.5. Resum de resultats de la gran coalició.

Edifici	Cost total (\$)	Cap. CHP (kW)	Cap. Caldera (kW)	CapPV (kWp)
Hospital	1208651,81	1121	2112,76	-
Oficines	840806,28	470	1027,34	375
Apartaments	406368,21	230	568,58	-

Els costos totals que apareixen en la taula prèvia s'han modificat, ja que en l'equació (Eq. 3.3) s'imputen els costos d'instal·lació de les canalitzacions a l'edifici que produeix l'energia que es comparteix. S'ha decidit assignar els costos de les canalitzacions a l'edifici que més es beneficia, és a dir al que rep l'energia.

Com es pot observar en aquest cas l'edifici d'oficines té un cost més alt que generant la seva pròpia energia. Aquest fet haurà de ser compensat a través de la repartició d'estalvis. Clarament es pot observar com la compartició d'energia sempre beneficia a l'edifici que té un major consum energètic. Un altre canvi rellevant es troba en la capacitat de les calderes instal·lades, sent la capacitat més baixa de tots els casos. Per altra banda la cogeneració de l'edifici d'oficines compta amb la capacitat instal·lada més alta de tots els escenaris. En aquest últim cas el cost total és el més baix de tots, amb un valor de 2,45 milions de dòlars, això representa una diferència amb el cas 1 d'un 1,83 %.

En la gran coalició la compartició d'energia es duu a terme entre l'edifici d'apartaments i l'hospital i entre les oficines i el d'apartaments, sent els primers els que produeixen i els segons els que consumeixen respectivament. La quantitat total d'energia que s'arriba a compartir entre els edificis és de 81,71 MWh.

Aquests estalvis provenen de la reducció de les potències de les calderes de gas i de l'optimització de les produccions de les cogeneracions. Com ja es mostra en els casos de les subcoalicions, quan els edificis comparteixen energia s'aconsegueix reduir la capacitat de les calderes. En els següents gràfics es mostren les diferències en les produccions de calor de les calderes i les cogeneracions en el cas de l'apartament i de l'hospital.

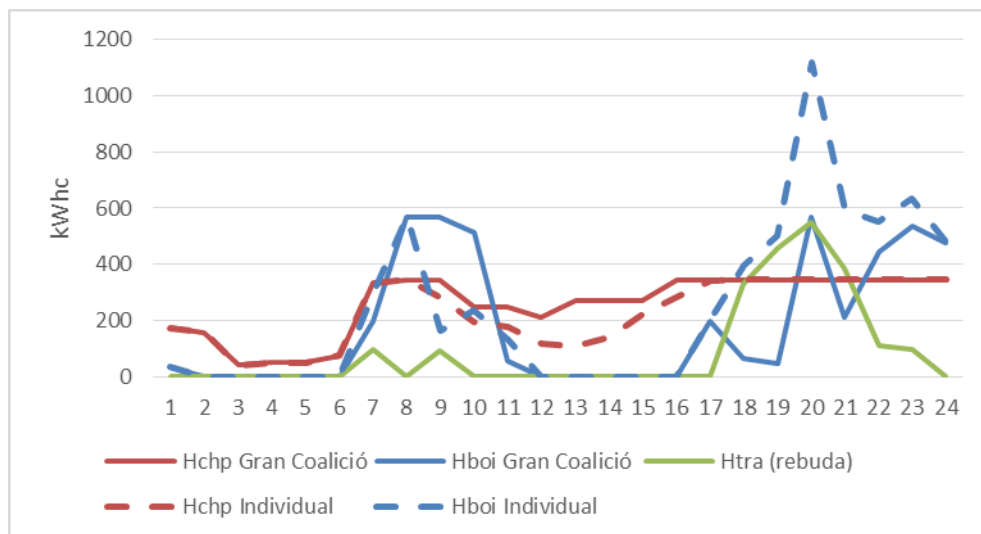


Figura 4.10. Produccions de calor de l'apartament en dia d'hivern de la gran coalició i produint individualment. *Elaboració pròpia.*

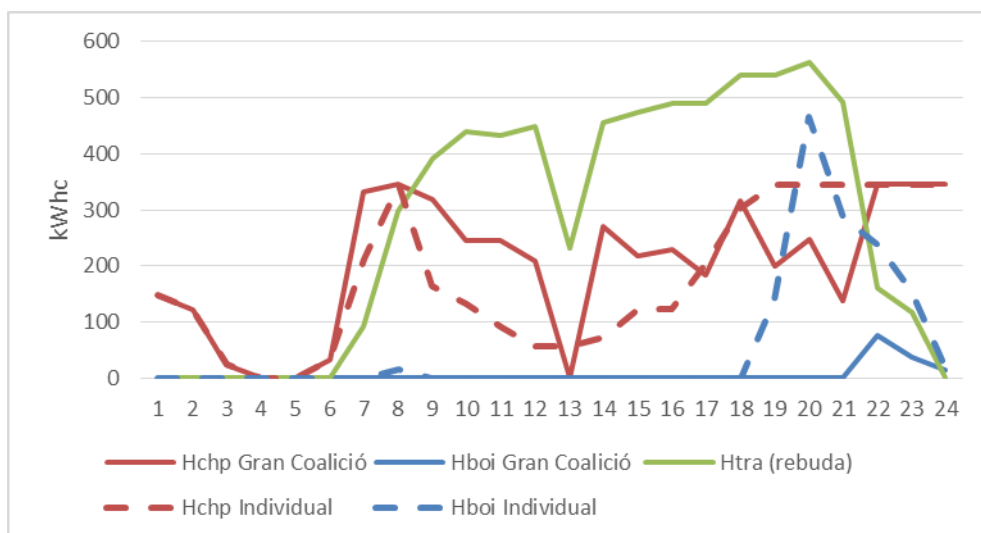


Figura 4.11. Produccions de calor de l'apartament en dia de tardor/primavera de la gran coalició i produint individualment. *Elaboració pròpia.*

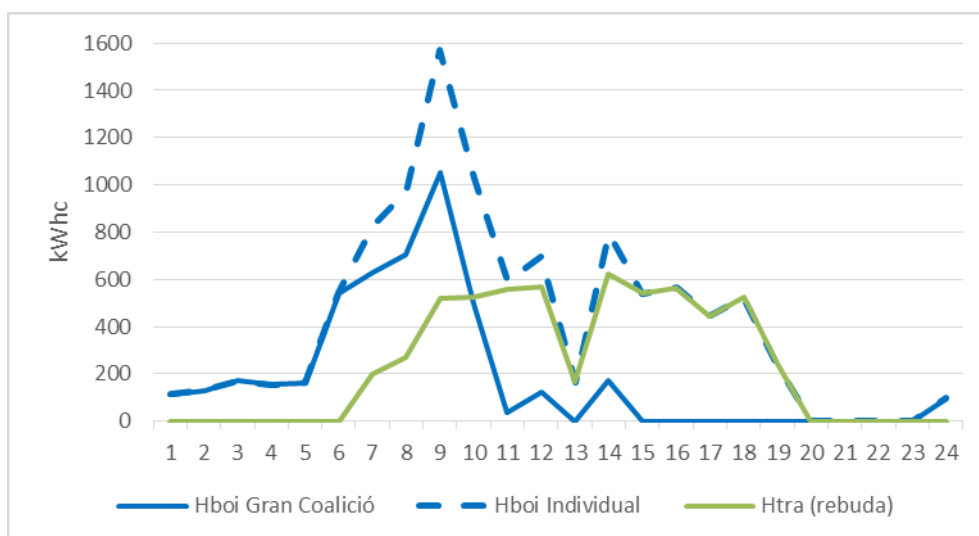


Figura 4.12. Produccions de la caldera de l'hospital en dia de tardor/primavera de la gran coalició i produint individualment. Elaboració pròpia.

Les diferències en les produccions exposades prèviament també creen variacions en l'energia que es consumeix de la xarxa. En el cas de l'hospital no s'hi troben canvis però en els dos altres edificis sí, especialment durant els mesos de tardor i primavera, tal com es mostra en la Figura 4.13. Si es compara l'energia obtinguda de la xarxa en gran coalició amb el cas d'operació individual, s'obté una reducció del 23,10%, equivalent a 157.000 \$.

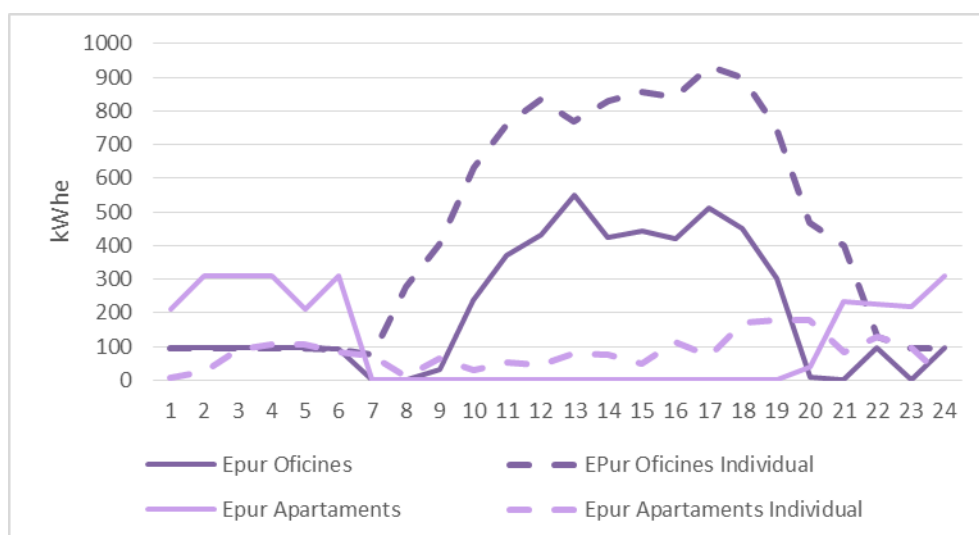


Figura 4.13. Electricitat consumida de la xarxa de les oficines i els apartaments en dia de tardor/primavera en la gran coalició i produint individualment. Elaboració pròpia.

Una vegada trobats els mínims costos per cada una de les coalicions possibles es calcula quins són els estalvis aconseguits en cada cas. En les equacions (Eq. 4.1), (Eq. 4.2) i (Eq. 4.3) es mostren els càlculs

d'aquests estalvis. En el cas de $V(i)$ només es tenen en compte els resultats positius que representen els estalvis de l'edifici i en comparació al cost del mateix edifici en la gran coalició. En la Taula 4.6 es mostren els resultats i s'associen els costos a cada paràmetre corresponent. Aquests paràmetres han estat utilitzats pel càlcul de les reparticions d'estalvis tal com s'exposa en l'apartat 3.3.

$$V(i) = Ct_{GranCoalició}(i) - Ct(i) \quad (\text{Eq. 4.1})$$

$$VS(s) = \sum_{i \in S} Ct(i) - Ct(s) \quad (\text{Eq. 4.2})$$

$$VN = \sum_{i=1}^n Ct(i) - CostTotal_{GranCoalició} \quad (\text{Eq. 4.3})$$

Taula 4.6. Resum dels costos i estalvis per cada coalició.

Cas	Coalició	Paràmetre	Cost anual (Ct)	Estalvi anual
Sols	1	$V(1)$	1282312,48	0
	2	$V(2)$	804875,76	29618,01
	3	$V(3)$	414431,71	0
Subcoalició	1-2	$VS(1) \equiv VNI(3)$	2056390,38	30797,86
	1-3	$VS(2) \equiv VNI(2)$	1690327,81	6416,39
	2-3	$VS(3) \equiv VNI(1)$	1208016,11	11291,36
Gran Coalició	1-2-3	VN	2455826,29	45793,66

Tot seguit es procedeix a establir quines són les condicions que limiten el Nucli de les solucions. La taula següent mostra tant el límit superior com l'inferior de les assignacions d'estalvis que conformen el Nucli per cada edifici.

Taula 4.7. Resum del Nucli de la gran coalició.

Jugador	Límit inferior (\$)	Límit superior (\$)
1	0	45793,66
2	29618,01	45793,66
3	0	45793,66

4.2. Resultats de les assignacions d'estalvis

A continuació es mostra la taula que resumeix els resultats dels quatre mètodes d'assignació d'estalvis utilitzats.

Taula 4.8. Resum dels resultats del mètodes d'assignació d'estalvis.

Cas	Edifici	x_i	α_i	G_i	FI_α
Shapley Value	1	12766,81	0,79	1,70	0,987
	2	30013,30	0,02	0,31	
	3	3013,56	0,19	3,98	
Nucleolus	1	16175,65	1,00	1,13	1,414
	2	29618,01	0,00	0,33	
	3	0	0	-	
N-H Linealitzat	1	5390,45	0,33	5,40	0,0004
	1	35012,75	0,33	0,12	
	2	5390,45	0,33	1,78	
DP equivalent	1	17777,55	1,1	0,94	2,075
	2	20289,42	-0,58	0,94	
	3	7726,69	0,48	0,94	

El mètode del valor Shapley obté els índexs de ruptura més baixos, per tant aquesta assignació és la més estable de totes. Per altra banda, l'índex d'equitat és relativament alt si es compara amb l'obtingut pel mètode de Nash-Harsanyi. Tot i això l'índex d'equitat no és excessivament alt, així doncs es considera una solució òptima.

El mètode del Nucleolus és la solució més desfavorable de totes. Tot i que compleix amb el seu objectiu d'afavorir aquella subcoalició que més estalvis aporta de les tres possibles, per fer-ho cal assignar un estalvi nul a l'edifici d'apartaments. Tal com s'observa el *Fairness Index* d'aquestes assignacions és fins i tot superior a 1, representant això una solució clarament injusta.

Si s'observen els valors de l'índex de ruptura G_i , s'arriba a la conclusió que aquesta assignació provoca que l'edifici d'apartaments no vulgui formar part de la coalició i per tant el potencial estalvi es veuria reduït al de la subcoalició entre l'hospital i les oficines. Cal tenir en compte que aquest mètode sempre donarà com a resultats una situació similar, a no ser que les subcoalicions tinguin uns potencials estalvis semblants.

Els *Power Index* d'aquest mètode mostren una gran diferència perquè l'assignació per l'edifici 2 és igual a l'estalvi que tindria si operés de forma independent. En conseqüència d'aquest fet, i tal com mostra el *Power Index*, l'edifici 1 seria el gran beneficiat d'aquesta assignació.

En el cas del mètode de Nash-Harsanyi la solució millora en tant que l'índex d'equitat es veu pràcticament reduït a zero, fet que representa que la distribució dels estalvis és molt justa. Tot i això com que l'hospital rep poc en comparació als alts costos que té, l'índex de ruptura és relativament alt. En aquest cas l'edifici d'apartaments sí que rep una petita part dels estalvis generats i el seu índex de ruptura passa a ser acceptable. Els resultats d'aquest mètode poden ser catalogats com els més equitatius i es consideren una solució òptima.

Per últim el mètode del DP equivalent dona uns resultats fora del Nucli. L'assignació que rep l'edifici 2 fa que el cost en la gran coalició sigui més alt que el cost quan genera energia individualment. Per tant l'edifici d'oficines mai formaria part de la gran coalició i la solució obtinguda per aquest mètode es pot considerar no adequada pel cas estudiat.

5. Anàlisi de l'impacte ambiental

Tenint en compte que la realització d'aquest treball només implica la programació d'un model amb un programa informàtic es podria considerar que l'impacte ambiental del projecte és pràcticament nul. Si es pretengués fer una anàlisi de la implementació del model en un cas real s'haurien de considerar quines emissions específiques tenen cada una de les fonts energètiques que s'utilitza.

Si només es té en compte el propi treball dut a terme per la realització d'aquest treball les emissions provindrien del consum elèctric de l'ordinador. Aquest consum es pot aproximar al voltant dels 180 W de mitjana per un ordinador portàtil. Considerant que a aquest treball s'han dedicat 600 hores aproximadament, s'obté un consum total de 108 kWh.

A continuació es mostra el càlcul de les emissions de CO₂ derivades de la realització d'aquest treball [21].

$$108 \text{ kWh} \cdot \frac{1 \text{ MWh}}{1000 \text{ kWh}} \cdot \frac{0,27 \text{ tCO}_2}{1 \text{ MWh}} \cdot \frac{1000 \text{ kgCO}_2}{1 \text{ tCO}_2} = 29,16 \text{ kgCO}_2 \quad \text{(Eq. 5.1)}$$

Conclusions

Una vegada analitzats els resultats obtinguts es procedeix a comentar les conclusions a les quals s'ha arribat durant el transcurs d'aquest treball.

Tot i que tres de les quatre solucions es troben dins del Nucli, cal destacar que els mètodes emprats no tenen per què donar solucions dins del Nucli del joc. En especial tant el mètode del Nucleolus com el del valor Shapley podrien arribar a donar solucions que no es trobessin dins del conjunt de solucions del Nucli. Aquesta situació es podria donar si el valor $V(i)$ de l'edifici d'oficines fossin encara més alts o si alguna de les subcoalicions aportés més estalvis que la gran coalició. En aquests casos s'hauria de replantejar la compartició d'energia, ampliant-la també a l'energia elèctrica, buscant altres formes de cooperar entre els diferents participants del joc o descartant la gran coalició com a resultat òptim.

Un dels indicadors de la facilitat per implementar qualsevol mètode d'assignació d'estalvis és el marge que existeix entre els límits superiors i inferiors del Nucli. Com més gran sigui el marge més solucions es trobaran dins del Nucli i, com a conseqüència, les solucions trobades tindran més marge per aconseguir resultats més òptims, on els índexs de ruptura i d'equitat siguin millors.

Tenint en compte els resultats obtinguts no podem concloure que la compartició d'energia sigui sempre beneficiosa. Això dependrà de les circumstàncies de cada edifici participant en el joc. Un fet a estudiar seria trobar en quines circumstàncies els perfils de càrregues de diversos edificis són compatibles amb la cooperació energètica. En el cas estudiat es pot concloure que la compartició seria beneficiosa, sigui formant la gran coalició o la subcoalició entre l'hospital i les oficines, que són les dues coalicions amb un percentatge d'estalvis aconseguits més alt.

És important destacar que la forma amb la que es defineix el model de produccions energètiques afecta directament a com s'aconsegueixen els estalvis. En el cas del model escollit el que determina principalment aquests estalvis és la gestió de les produccions de les calderes i de les cogeneracions. Una possible opció que es va descartar era la d'incloure la compartició d'energia elèctrica entre els edificis però els resultats centralitzaven en excés la producció i un dels edificis monopolitzava la producció d'energia tèrmica. Això provocava que els costos d'aquest edifici es disparessin, fent inviable l'assignació d'estalvis de forma equitativa. Per aquest fet es va descartar aquesta opció.

En el transcurs de l'anàlisi de les solucions obtingudes es pot observar com, en tots els casos on els edificis cooperen, es crea una menor dependència de la xarxa elèctrica, ja disminuïda de per si per la producció fotovoltaica. Aquest fet, que no només suposa una reducció en els costos, pot ser especialment rellevant en entorns on la qualitat o la fiabilitat de la xarxa elèctrica no sigui del tot idònia.

La cooperació energètica podria ser doblament beneficiosa en entorns rurals o en territoris que tinguin un dèficit d'infraestructures.

Pressupost

Com que aquest projecte no representa cap instal·lació física sinó que es basa en la programació d'un model matemàtic tots els costos associats a la seva realització provenen del treball d'enginyeria dut a terme.

En la taula següent es mostra el pressupost del programari utilitzat així com de les hores de feina destinades. Tot i que la llicència d'AMMS utilitzada per aquest treball és una gratuïta destinada a l'ús acadèmic s'ha tingut en compte el seu cost normal.

	Preu unitari	Quantitat	Cost adquisició	Mesos d'ús	Cost Real
Llicència d'AIMMS	800 €	1	800 €	4	200 €
Ordinador	450 €	1	450 €	4	113 €
Microsoft Windows 10 Pro	259 €	1	259 €	4	65 €
Microsoft 365 Empresa Estàndar	10,50€/mes	1	42 €	-	42 €
Costos d'enginyeria	12€/h	600	7.200 €	-	7.200 €
Fibra òptica	25 €	1	25 €	-	25 €
Electricitat	0,119893 €/kWh	108	12,95 €	-	12,95 €
Total					7.657 €

Bibliografia

1. Piqué, R. i Ballester E. Electricidad, electrónica de potencia y sostenibilidad. *Tecnica Industrial* [en línia]. Desembre 2010, no. 290, p. 30-37. ISSN 2172-6957 [Consulta: 14 de setembre 2020]. Disponible a: <http://www.tecnicaindustrial.es/TIFrontal/sumario.aspx?id=75>.
2. Doukelis, A. i Kakaras, E. The Integration of Micro-CHP and Biofuels for Decentralized CHP Applications. A: Grammelis, P. *Solid Biofuels for Energy. A Lower Greengouse gas Alternative* [en línia]. London: Springer. 2011. ISBN 978-1-84996-393-0. https://doi.org/10.1007/978-1-84996-393-0_8.
3. National Renewable Energy Laboratory. Using Distributed Energy Resources. *A How-To Guide for Federal Facility Managers* [en línia]. U.S. Department of Energy. Maig de 2002. DOE/GO-102002-1520. Disponible a: <https://www.nrel.gov/docs/fy02osti/31570.pdf>.
4. Wu, Q. et al. Benefit allocation for distributed energy network participants applying game theory based solutions. A: *Energy*. Elsevier Ltd, 2016. Volum 119, 15 de Juny de 2017, p. 384-391. ISSN 0360-5442. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.12.088>.
5. Wu, Q. et al. Profit allocation analysis among the distributed energy network participants based on Game-theory. A: *Energy*. Elsevier Ltd, 2016. Volum 118, 1 de gener de 2017, p. 783-794. ISSN 0360-5442. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.10.117>.
6. AIMMS. *Prescriptive Analytics* [en línia]. [Consulta: 8 d'agost]. Disponible a: <https://www.aimms.com/prescriptive-analytics/>.
7. Pique, R. i Ballester, E. Generación descentralizada de energía eléctrica. Concepto micro-red inteligente. Universitat Politècnica de Catalunya. 2018.
8. Cheng, Z., Duan, J. i Chow, M.-Y. To Centralize or to Distribute: That is the question. A: *IEEE Industrial Electronics Magazine*. 2018, Vol. March. ISSN 1932-4529.
9. El Periódico. 2020. Rubí coordina el primer proyecto de todo el Estado de autoconsumo compartido de energía en un polígono. *El Periódico* [en línia]. 29 de juliol. Disponible en: <https://www.elperiodico.com/es/rubi/20200729/rubi-coordina-el-primer-proyecto-de-todo-el-estado-de-autoconsumo-compartido-de-energia-en-un-poli-gono-8057946> [Consulta: 24 d'agost].
10. AIMMS Documentation. Developer & Deployment Platform [en línia]. [Consulta: 8 d'agost]. Disponible a: <https://documentation.aimms.com/platform/platform-intro.html>.

11. Roelofs, M. i Bisschop, J. *AIMMS. The Language Reference* [en línia]. 2019. AIMMS B.V.. 2019. ISBN 978-0-557-06379-6. Disponible a: https://download.aimms.com/aimms/download/manuals/AIMMS3_LRB.pdf.
12. Wu, Q. et al. Multi-objective optimization of a distributed energy network integrated with heating interchange. A: *Energy*. Elsevier Ltd, 2016. Volum 109, 15 d'agost del 2016, p. 353-364. ISSN: 0360-5442. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.04.112>.
13. International Energy Agency. *Capital costs of utility-scale solar PV in selected emerging economies* [en línia]. IEA, Paris. [Consulta: 3 de juny]. Disponible a: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/capital-costs-of-utility-scale-solar-pv-in-selected-emerging-economies>.
14. Yang, Y. et al. Optimal design of distributed energy resource systems coupled with energy distribution networks. A: *Energy*. Elsevier Ltd, 2015. Volum 85, 1 de juny de 2015, p. 433-448. ISSN 0360-5442. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.03.101>.
15. Akbari, K. et al. Optimal design of distributed energy system in a neighborhood under uncertainty. A: *Energy*. Elsevier Ltd, 2016. Volum 116, 1 de desembre de 2016, p. 567-582. ISSN 0360-5442. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.09.083>.
16. Wu, Q. et al. Modeling and optimization of distributed energy supply network with power and hot water interchanges. A: *Applied Thermal Engineering*. Elsevier Ltd, 2016. Volum 94, 5 de febrer de 2016, p. 635-643. ISSN 1359-4311. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.10.157>.
17. Liu, S. et al. A TSP-based MILP Model for Medium-Term Planning of Single-Stage Continuous Multiproduct Plants. A: *Ind. Eng. Chem.* American Chemical Society, 2008. Volum 47, núm. 20. p 7733-7743. <https://doi.org/10.1021/ie800646q>.
18. Mehleri, E. et al. A mathematical programming approach for optimal design of distributed energy systems at the neighbourhood level. A: *Energy*. Elsevier Ltd, 2012. Volum 44, agost de 2012, p. 96-104. ISSN 0360-5442. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.02.009>.
19. Zhang, D. et al. Fair electricity transfer price and unit capacity selection for microgrids. A: *Energy Economics*. Elsevier B.V., 2012. Volum 36, març de 2013, p. 581-593. ISSN 0140-9883. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2012.11.005>.
20. Dinar, A i Howitt, R, E. Mechanisms for Allocation of Environmental Control Cost: Empirical Tests of Acceptability and Stability. *Journal of Environmental Management*, 1997. Volum 49, febrer de 1997, p. 183-203. ISSN 0301-4797. <https://doi.org/10.1006/jema.1995.0088>

21. Secretaría General del Departamento de Planificación y Estudios. Factores de conversión energía final – Energía primaria y Factores de emisión de CO₂ [en línia]. 2010. IDAE, 2011. [Consulta: 22 de setembre]. Disponible a:

[https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_Factores_de_Conversion_Energia_y_CO2_\(2010\)_931cce1e.pdf](https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_Factores_de_Conversion_Energia_y_CO2_(2010)_931cce1e.pdf).



Annex A. Perfils de càrrega i radiació solar

A continuació es mostren els perfils de càrrega de cada edifici per cada dia tipus de cada temporada de l'any en kWh.

h	Hospital									Oficina						Apartaments							
	Hivern			Tard/Prim			Estiu			Hivern		Tard/Prim		Estiu		Hivern		Tard/Prim		Estiu			
	Elec.	Calor		Elec.	Calor	Fred	Elec.	Calor	Fred	Elec.	Calor	Elec.	Calor	Fred	Elec.	Calor	Elec.	Calor	Elec.	Calor	Fred		
1	243,90	308,94		210,95	113,59		323,65	0,00	0,00	78,43	0,00	95,44	0,00	66,67	0,00	0,00	115,23	205,76	106,56	147,54	217,57	0,00	0,00
2	333,33	341,46		308,32	129,82		323,65	0,00	0,00	78,43	0,00	95,44	0,00	66,67	0,00	0,00	115,23	156,38	106,56	122,95	133,89	0,00	0,00
3	333,33	439,02		308,32	170,39		323,65	0,00	0,00	78,43	0,00	95,44	0,00	66,67	0,00	0,00	107,00	41,15	106,56	24,59	133,89	0,00	0,00
4	333,33	398,37		308,32	154,16		323,65	0,00	0,00	78,43	0,00	95,44	0,00	66,67	0,00	0,00	115,23	49,38	106,56	0,00	133,89	0,00	0,00
5	243,90	406,50		210,95	162,27		323,65	0,00	0,00	78,43	0,00	95,44	0,00	66,67	0,00	0,00	107,00	49,38	106,56	0,00	125,52	0,00	0,00
6	333,33	902,44		308,32	543,61		381,74	614,11	41,49	78,43	0,00	95,44	0,00	66,67	0,00	0,00	107,00	74,07	106,56	32,79	125,52	0,00	0,00
7	447,15	2065,04		413,79	1281,95		838,17	896,27	522,82	78,43	0,00	95,44	0,00	77,78	0,00	0,00	222,22	625,51	221,31	213,11	217,57	75,31	25,10
8	682,93	2642,28		632,86	1671,40		647,30	1045,64	522,82	366,01	1638,34	399,13	130,15	300,00	11,11	177,78	263,37	913,58	262,30	360,66	251,05	41,84	50,21
9	902,44	3878,05		835,70	2490,87		854,77	1576,76	199,17	531,59	1542,48	598,70	199,57	488,89	66,67	1033,33	205,76	444,44	213,11	163,93	217,57	58,58	50,21
10	1008,13	3536,59		941,18	2060,85		979,25	1269,71	572,61	740,74	1315,90	824,30	147,51	833,33	44,44	1155,56	164,61	427,98	163,93	131,15	192,47	25,10	50,21
11	1016,26	2658,54		941,18	1630,83		979,25	1153,53	1286,31	880,17	1220,04	971,80	156,18	922,22	66,67	1155,56	164,61	304,53	163,93	90,16	192,47	33,47	58,58
12	1008,13	2943,09		933,06	1720,08		979,25	987,55	1443,98	949,89	1159,04	1041,21	138,83	933,33	44,44	1122,22	139,92	115,23	139,34	57,38	200,84	33,47	75,31
13	1008,13	2113,82		949,29	1208,92		979,25	663,90	912,86	888,89	1063,18	980,48	112,80	866,67	33,33	1100,00	181,07	107,00	180,33	57,38	217,57	50,21	117,15
14	902,44	2593,50		835,70	1711,97		854,77	1244,81	1078,84	949,89	1028,32	1032,54	130,15	933,33	44,44	1088,89	181,07	139,92	180,33	73,77	192,47	25,10	133,89
15	1008,13	2723,58		933,06	1565,92		987,55	1112,03	580,91	958,61	976,03	1032,54	112,80	966,67	33,33	1111,11	181,07	222,22	180,33	122,95	175,73	33,47	92,05
16	991,87	2536,59		916,84	1574,04		979,25	1029,05	1078,84	880,17	897,60	971,80	95,44	933,33	33,33	1111,11	230,45	279,84	229,51	122,95	225,94	117,15	83,68
17	902,44	2373,98		827,59	1354,97		871,37	688,80	1062,24	941,18	723,31	1032,54	95,44	922,22	33,33	1088,89	230,45	543,21	229,51	204,92	259,41	200,84	92,05
18	569,11	2089,43		511,16	1087,22		539,42	489,63	896,27	845,32	261,44	937,09	43,38	844,44	22,22	766,67	370,37	740,74	377,05	303,28	317,99	276,15	108,79
19	455,28	1162,60		413,79	697,77		423,24	414,94	547,72	705,88	130,72	772,23	43,38	666,67	44,44	177,78	411,52	847,74	409,84	483,61	309,62	217,57	217,57
20	455,28	772,36		413,79	413,79		423,24	257,26	365,15	418,30	78,43	477,22	17,35	400,00	22,22	100,00	411,52	1465,02	409,84	811,48	309,62	192,47	259,41
21	333,33	252,03		308,32	81,14		414,94	0,00	0,00	357,30	61,00	399,13	0,00	333,33	0,00	88,89	312,76	938,27	311,48	631,15	359,83	251,05	217,57
22	333,33	260,16		308,32	89,25		340,25	0,00	0,00	122,00	43,57	130,15	0,00	100,00	0,00	66,67	345,68	897,12	360,66	581,97	326,36	225,94	133,89
23	333,33	284,55		308,32	97,36		340,25	0,00	0,00	78,43	0,00	95,44	0,00	66,67	0,00	11,11	337,45	979,42	327,87	500,00	284,52	276,15	108,79
24	333,33	284,55		308,32	97,36		340,25	0,00	0,00	78,43	0,00	95,44	0,00	66,67	0,00	0,00	230,45	823,05	237,70	360,66	234,31	66,95	0,00
Total	14512,20	37967,48		13387,42	22109,53		14771,78	13443,98	11112,03	11241,83	12139,43	12459,87	1422,99	11055,56	500,00	11355,56	5251,03	11390,95	5237,70	5598,36	5355,65	2200,84	1874,48

Radiació solar (Wh/m²)

Hora	Hivern	Tard/prim	Estiu
5	0,00	0,00	0,00
6	0,00	7,36	14,71
7	0,00	72,50	95,62
8	43,08	185,99	203,85
9	148,16	318,39	316,29
10	299,47	392,99	374,08
11	402,45	440,28	375,13
12	311,03	456,04	493,87
13	358,32	518,04	505,43
14	309,98	463,40	445,53
15	274,26	400,35	361,47
16	135,55	266,90	259,54
17	34,68	174,43	158,67
18	0,00	49,39	57,79
19	0,00	0,00	0,00