



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial

Desenvolupament d'un sistema de gestió òptim MILP
d'energia elèctrica i tèrmica per a llars amb plaques
fotovoltaïques combinats amb sistemes d'aerotèrmia per a
HVAC i ACS

Treball Fi de Màster

Màster Universitari en Enginyeria Industrial

AUTOR/A: Vives Más, Vicent

Tutor/a: Herrero Durá, Juan Manuel

CURS ACADÈMIC: 2023/2024

Agraïments

A la meua família
Al meu tutor
Als meus companys

Resum

Aquest treball se centra en el desenvolupament d'un sistema de gestió d'energia elèctrica i tèrmica per a habitatges unifamiliars utilitzant un sistema d'aerotèrmia combinat amb panels fotovoltaics. En un context en què l'eficiència energètica i la sostenibilitat són crucials, els sistemes d'aerotèrmia basats en bombes de calor permeten augmentar l'energia subministrada extraient-la del medi refrigerant. Aquests tipus d'elements, considerats com a fonts d'energia renovables són cada vegada més utilitzats en habitatges unifamiliars. El sistema es complementa amb sistemes d'emmagatzematge d'energia per a desacoblar la producció de la demanda i minimitzar els costos operatius.

Es proposa el control òptim del sistema mitjançant un control predictiu basat en models (MPC). Per a dur a terme aquest control, és necessari dissenyar un model tecno-econòmic del sistema que, a partir dels punts d'operació dels dispositius, calcule els seus costos operatius. Aquest model, juntament amb perfils realistes de demanda d'energia elèctrica, aigua calenta sanitària (ACS) i calefacció, s'utilitza per a plantejar un problema d'optimització de programació lineal entera mixta (MILP) que minimitze els costos operatius. L'algoritme de control considera la variabilitat de la demanda i la producció d'energia, permetent una gestió eficient dels recursos energètics.

Durant el desenvolupament de l'algoritme de control, s'estudia la influència del període de mostreig en les prestacions del control i s'analitza la necessitat d'implementar un control predictiu de baix nivell basat en models. Addicionalment, s'avalua la viabilitat econòmica del sistema a través de simulacions anuals que consideren diferents escenaris de consum i producció energètica. Els resultats obtinguts demostren l'efectivitat del sistema proposat en la reducció de costos i la millora de l'eficiència energètica dels habitatges.

Paraules clau: sistema de gestió, bomba de calor, control predictiu basat en models (MPC), emmagatzematge d'energia, MILP, Matlab

Resumen

Este trabajo se centra en el desarrollo de un sistema de gestión de energía eléctrica y térmica para viviendas unifamiliares utilizando un sistema de aerotermia combinado con paneles fotovoltaicos. En un contexto donde la eficiencia energética y la sostenibilidad son cruciales, los sistemas de aerotermia basados en bombas de calor permiten aumentar la energía suministrada extrayéndola del medio refrigerante. Estos tipos de elementos, considerados como fuentes de energía renovables son cada vez más utilizados en viviendas unifamiliares. El sistema se complementa con sistemas de almacenamiento de energía para desacoplar la producción de la demanda y minimizar los costos operativos.

Se propone el control óptimo del sistema mediante un control predictivo basado en modelos (MPC). Para llevar a cabo este control, es necesario diseñar un modelo tecno-económico del sistema que, a partir de los puntos de operación de los dispositivos, calcule sus costos operativos. Este modelo, junto con perfiles realistas de demanda de energía eléctrica, agua caliente sanitaria (ACS) y calefacción, se utiliza para plantear un problema de optimización de programación lineal entera mixta (MILP) que minimice los costos operativos. El algoritmo de control considera la variabilidad de la demanda y la producción de energía, permitiendo una gestión eficiente de los recursos energéticos.

Durante el desarrollo del algoritmo de control, se estudia la influencia del período de muestreo en las prestaciones del control y se analiza la necesidad de implementar un control predictivo de bajo nivel basado en modelos. Adicionalmente, se evalúa la viabilidad económica del sistema a través de simulaciones anuales que consideran distintos escenarios de consumo y producción energética. Los resultados obtenidos demuestran la efectividad del sistema propuesto en la reducción de costos y la mejora de la eficiencia energética de las viviendas.

Palabras Clave: sistema de gestión, bomba de calor, control predictivo basado en modelos (MPC), almacenamiento de energía, MILP, Matlab

Abstract

This project focuses on developing an electrical and thermal energy management system for single-family homes using an aerothermal system combined with photovoltaic panels. In a context where energy efficiency and sustainability are crucial, aerothermal systems based on heat pumps allow increasing the energy supplied by extracting it from the refrigerant medium. These types of elements, considered as renewable energy sources, are increasingly used in single-family houses. The system is complemented by energy storage systems to decouple production from demand and minimize operating costs.

The optimal control of the system is proposed through model predictive control (MPC). To implement this control, it is necessary to design a techno-economic model of the system that, based on the operating points of the devices, calculates their operating costs. This model, together with realistic profiles of electrical energy demand, sanitary hot water (DHW), and heating, is used to formulate a mixed-integer linear programming (MILP) optimization problem that minimizes operating costs. The control algorithm considers the variability of demand and energy production, allowing efficient management of energy resources.

During the development of the control algorithm, the influence of the sampling period on control performance is studied, and the need to implement a low-level model predictive control is analyzed. Additionally, the economic feasibility of the system is evaluated through annual simulations that consider different scenarios of consumption and energy production. The results obtained demonstrate the effectiveness of the proposed system in reducing costs and improving the energy efficiency of homes.

Keywords: energy management system, heat pump, model predictive control (MPC), energy storage, MILP, Matlab

Índex

Resum	i
Índex	ix
I Memòria	1
1 Introducció	3
1.1 Objectiu del treball	3
1.2 Abast	4
1.3 Antecedents	5
2 Modelatge del sistema	11
2.1 Descripció del sistema	11
2.2 Modelatge dels components del sistema	13
3 Plantejament del problema	27
3.1 Variables de decisió	27
3.2 Funció objectiu	29
3.3 Restriccions	29
3.4 Plantejament del problema	32
3.5 Resolució. Optimitzadors	32
4 Control Predictiu basat en Models	35
4.1 MPC discretitzat a un minut. Cas de referència	36
4.2 Estudi del període de mostreig $\mathbf{T}_s$	40
4.3 Control de baix nivell bàsic	43
4.4 MPC de baix nivell	49
4.5 Simulació d'any tipus	54

5	Conclusions	57
6	Treballs futurs	59
II	Pressupost	61
7	Pressupost	63
7.1	Introducció	63
7.2	Mà d'obra.	63
7.3	Materials	64
7.4	Unitats d'obra. Preus descomposts	64
7.5	Unitats d'obra. Preus unitaris	66
7.6	Pressupost	66
	Bibliografia	69

Índex de figures

1.1	Esquema del sistema a modelar.	4
2.1	Esquema del sistema.	12
2.2	Representació esquemàtica d'una bomba de calor aïre-aigua. Font: Verhelst et al. 2012	13
2.3	COP de una bomba de calor en funció de la temperatura ambient T_{amb} i la temperatura d'impulsió T_{imp}	15
2.4	Terme de facturació d'energia activa i preu d'energia excedentària de l'autoconsum PVPC 19/06/2023. Font Red Eléctrica España 2024	17
2.5	Perfils de demanda instantània d'energia elèctrica per tipus de dia.	23
2.6	Perfils de demanda instantània d'aigua calenta sanitària per tipus de dia.	24
2.7	Perfils de demanda instantània de calefacció per tipus de dia.	25
4.1	Senyals del sistema dia ÜWB, MPC $T_s = 1$ min.	39
4.2	Cost computacional enfront d'increments de cost d'operació pel dia ÜWB i per períodes de mostreig.	41
4.3	Cost computacional enfront d'increments de cost d'operació per dies tipus i per períodes de mostreig.	42
4.4	Diagrama de flux de control de baix nivell LLC.	44
4.5	Senyals del sistema dia ÜWB, MPC superior $T_s = 20$ min, LLC inferior $T_s = 1$ min. Prediccions perfectes.	46
4.6	Senyals del sistema dia ÜWB, MPC superior $T_s = 20$ min, LLC inferior $T_s = 1$ min. Consum 5 % inferior a les prediccions.	47
4.7	Senyals del sistema dia ÜWB, MPC superior $T_s = 20$ min, LLC inferior $T_s = 1$ min. Consum 5 % superior a les prediccions.	48

4.8	Senyals del sistema dia $\ddot{U}$ WB, MPC superior $T_s = 20$ min, MPC inferior $T_s = 1$ min. Prediccions perfectes.	51
4.9	Senyals del sistema dia $\ddot{U}$ WB, MPC superior $T_s = 20$ min, MPC inferior $T_s = 1$ min. Consum 5 % inferior a les prediccions.	52
4.10	Senyals del sistema dia $\ddot{U}$ WB, MPC superior $T_s = 20$ min, MPC inferior $T_s = 1$ min. Consum 5 % superior a les prediccions.	53
4.11	Evolució dels costos d'operació del sistema per a tots els controls.	55

Índex de taules

2.1	Coeficients del model de la bomba de calor	14
2.2	Nomenclatura dels dies tipus. Font: VDI 2008	22
2.3	Consums mitjans per tipus de demanda i dia en kWh. Font: VDI 2008	22
2.4	Nombre de dies per categoria. Font: VDI 2008	23
4.1	Cost anual total d'operació del sistema per tipus d'estratègia	55
7.1	Quadre de preus de mà d'obra.	63
7.2	Quadre de mà d'obra.	63
7.3	Quadre de materials.	64
7.4	Unitat d'obra núm. 1: Investigació bibliogràfica.	64
7.5	Unitat d'obra núm. 2: Modelatge del sistema.	65
7.6	Unitat d'obra núm. 3: Desenvolupament de l'algorisme de control.	65
7.7	Unitat d'obra núm. 4: Documentació del treball realitzat.	65
7.8	Unitat d'obra núm. 5: Documentació del treball realitzat.	66
7.9	Preus unitaris de les unitats d'obra.	66
7.10	Pressupost.	66

Part I

Memòria

Capítol 1

Introducció

1.1 Objectiu del treball

L'objectiu d'aquest treball consisteix a desenvolupar un algoritme de gestió integral d'energia elèctrica i tèrmica per al seu ús en habitatges unifamiliars, combinant l'energia generada a partir de plaques solars fotovoltaïques, emmagatzematge en bateries i dipòsits d'aigua calenta i un sistema d'aerotèrmia per a satisfer tant la demanda de calefacció, mitjançant sòl radiant, com la d'aigua calenta sanitària (ACS). En el context actual, on l'eficiència energètica i la sostenibilitat són primordials, aquest sistema busca maximitzar l'aprofitament de l'energia renovable. A més a més, el treball es centra a minimitzar els costos d'operació del sistema fent ús del desacoblament entre la producció i la demanda gràcies als sistemes d'emmagatzematge com la bateria o els dipòsits.

Per a aconseguir aquest objectiu, es proposa:

- Desenvolupar un model tecno-econòmic del sistema.
- Determinar perfils de demanda energètica: Identificar i modelar els patrons de consum d'energia elèctrica i tèrmica típics en un habitatge unifamiliar, considerant variacions estacionals i d'ús diari.
- Implementar un control predictiu basat en models (MPC): Dissenyar i aplicar un controlador MPC que optimitze l'ús de l'energia generada i emmagatzemada, així com l'operació del sistema d'aerotèrmia, per a minimitzar costos i maximitzar l'eficiència energètica.

1.2 Abast

Aquesta secció defineix l'abast del treball a fer, així com el nivell de detall que es pretén aconseguir amb cadascun dels objectius.

1.2.1 Modelatge tecno-econòmic del sistema

L'objectiu és definir i modelar el sistema amb el qual se centra aquest treball. Aquest utilitzarà una bomba de calor com a sistema de generació d'energia tèrmica i unes plaques fotovoltaïques com a sistema de generació d'energia elèctrica. A més a més, podrà interactuar amb emmagatzematges tant d'energia elèctrica com tèrmica per a dotar al sistema d'una major flexibilitat en la producció. El sistema podrà connectar-se a la xarxa elèctrica com a font de proveïment d'energia elèctrica. En la figura 1.1 es mostra un esquema del sistema en el qual es basarà el desenvolupament d'aquest treball. El modelatge i la composició del sistema es discutirà amb més detall en el Capítol 2.

A continuació, es procedirà al modelatge tecno-econòmic d'aquest. Tenint en compte l'objectiu d'aquest treball, el modelatge s'enfocarà a desenvolupar un model d'alt nivell que reproduïska el comportament en règim estacionari del sistema, incorporant la dinàmica dels emmagatzematges i les limitacions de la bomba de calor. Aquest model tindrà com a eixida els costos d'operació del sistema. Perquè siga viable el control, el model haurà de tenir un cost computacional baix però sense sacrificar la precisió en els punts d'operació del sistema.

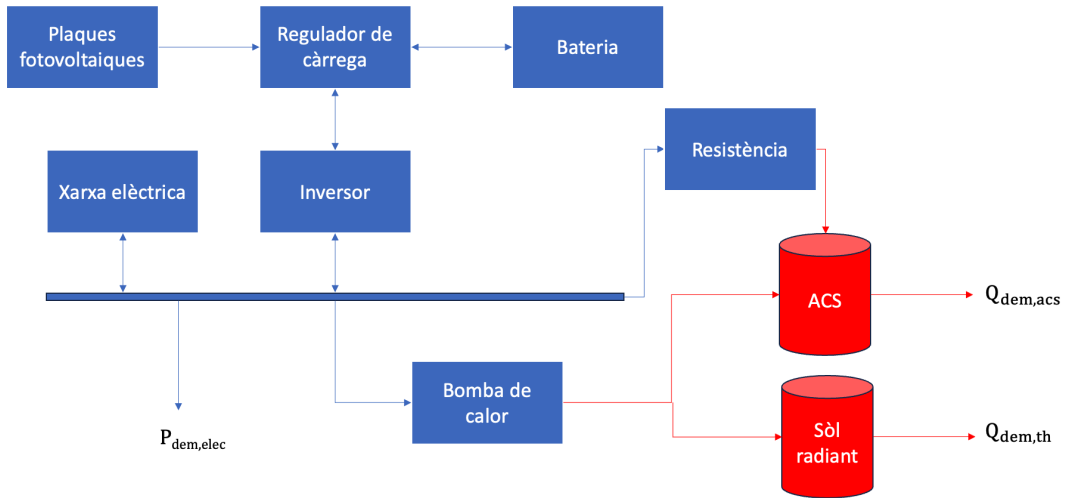


Figura 1.1: Esquema del sistema a modelar.

1.2.2 Perfils de demanda

Per a dissenyar una estratègia de control de qualitat, l'obtenció d'uns perfils de demanda realistes és un pas crucial. La qualitat i la certesa d'aquests perfils determinen l'eficiència i el grau d'aprofitament del sistema. No obstant això, obtenir aquests perfils no és senzill a causa de la influència de diverses àrees de coneixement. D'una banda, els hàbits de consum dels ocupants de l'habitatge són determinants. D'altra banda, factors com la climatologia i les característiques tèrmiques de l'edifici també juguen un paper important. A més, és fonamental obtenir perfils amb la quantitat més gran d'informació possible, la qual cosa implica una alta resolució.

En aquest treball s'utilitzaran els perfils de demanda recomanats per l'associació d'enginyers alemanys, els quals es consideren com a referència per a sistemes com aquest. Aquests perfils estan especificats a l'estàndard VDI-4655. L'avantatge d'utilitzar aquests perfils radica en la seua capacitat per a reproduir diferents situacions de demanda a partir dels seus deu patrons, segons l'estacionalitat, els hàbits de consum en dies festius o laborables, i la meteorologia. A més, tenen una resolució d'un minut, la qual cosa permet simular el comportament del sistema en una escala de temps molt detallada.

1.2.3 Control MPC òptim mitjançant el plantejament d'un problema MILP

El sistema de gestió energètica implementarà un control predictiu basat en models (MPC) sobre el sistema. El principal avantatge del MPC és que fonamenta les decisions de control en la solució d'un problema d'optimització, utilitzant un model que permet fer prediccions sobre el comportament futur del sistema gestionat.

Aquest estudi se centra a examinar l'acompliment d'un control MPC amb horitzó de planificació ajustable, en combinació amb un control MPC de nivell inferior. Tant el MPC superior com inferior empraran un model tecno-econòmic del sistema per a formular un problema d'optimització de programació lineal mixta sencera (MILP) que busca minimitzar els costos operatius. En conseqüència, l'optimitzador requerirà dades sobre els preus d'energia i els perfils de demanda que necessita satisfer. El plantejament del problema MILP es realitza al Capítol 3, mentre que el desenvolupament del MPC es du a terme al Capítol 4.

1.3 Antecedents

A continuació s'exposa la situació actual i el context d'alguns conceptes sobre els quals es desenvolupa aquest treball.

1.3.1 Sistemes alternatius

Caldera i xarxa elèctrica

Les calderes i la connexió a la xarxa elèctrica representen tecnologies madures i de confiança per a la calefacció i el subministrament d'aigua calenta en habitatges unifamiliars. El principal avantatge de les calderes radica en la seua capacitat per a proporcionar calor constant, una característica crucial per a assegurar el confort en les llars.

D'altra banda, la xarxa elèctrica garanteix un subministrament d'energia continu i de confiança, independent de les condicions climàtiques o del moment del dia.

No obstant això, aquestes tecnologies no estan exemptes de desavantatges significatius. Les calderes que utilitzen combustibles fòssils, com el gas o el petroli, són responsables de l'emissió de gasos d'efecte d'hivernacle i altres contaminants que contribueixen al canvi climàtic i la contaminació de l'aire. A més, la dependència de combustibles fòssils per a la generació d'electricitat en la xarxa incrementa la petjada de carboni de les llars connectades a ella.

En termes de costos, encara que la instal·lació inicial de calderes pot ser relativament econòmica, els costos operatius poden ser elevats a causa del preu fluctuant del combustible. De la mateixa manera, les tarifes elèctriques poden ser altes i variar segons l'hora del dia, la qual cosa pot incrementar considerablement les despeses dels habitatges.

Sistema d'aerotèrmia

Els sistemes d'aerotèrmia destaquen per la seua alta eficiència energètica, ja que extrauen calor de l'aire exterior, la qual cosa pot reduir significativament el consum d'energia per a calefacció i aigua calenta. Aquesta característica no sols millora l'eficiència energètica de les llars, sinó que també contribueix a la reducció de les emissions de gasos d'efecte d'hivernacle, posicionant-los com una opció més ecològica en comparació amb les calderes tradicionals de combustibles fòssils. No obstant això, la instal·lació de sistemes d'aerotèrmia pot representar un desafiament econòmic a causa de l'alt cost inicial de les bombes de calor i la infraestructura necessària. A més, l'eficiència d'aquests sistemes pot veure's compromesa en climes extremadament freds, la qual cosa podria requerir la utilització d'un sistema de calefacció suplementari per a mantindre el confort en l'habitatge.

1.3.2 Software

En el desenvolupament d'aquest treball, s'ha utilitzat el programari MATLAB (Matlab 2024), específicament fent ús de la ferramenta YALMIP (Yalmip 2024) i de l'optimitzador Gurobi (Gurobi Optimization 2024). L'elecció d'aquestes eines es fonamenta en la seua capacitat per a manejar problemes d'optimització complexos i el seu ampli ús en la investigació i la indústria.

En primer lloc, MATLAB és un entorn de programació i una plataforma de càlcul numèric àmpliament utilitzada en enginyeria, ciències i matemàtiques. La seua versatilitat i potència ho fan ideal per a una varietat d'aplicacions, des de la simulació i el modelatge fins a la implementació d'algorismes avançats. MATLAB proporciona un conjunt robust d'eines per a l'anàlisi de dades, la visualització i la programació, la qual cosa facilita el desenvolupament i la validació de models matemàtics complexos. En el context d'aquest treball, MATLAB ha sigut utilitzat per a desenvolupar i simular el model tecno-econòmic del sistema de gestió d'energia, permetent avaluar diferents estratègies de control i optimització.

D'altra banda, YALMIP és una ferramenta de MATLAB dissenyada per a modelar i resoldre problemes d'optimització. Aquesta ferramenta es destaca per la seua flexibilitat i facilitat d'ús, permetent als usuaris definir problemes d'optimització de manera intuïtiva utilitzant notació matemàtica familiar. YALMIP suporta una àmplia gamma de problemes d'optimització, incloent-hi programació lineal (LP), programació quadràtica (QP) i programació no lineal (NLP). No obs-

tant això, una de les seues aplicacions més importants és en la formulació i resolució de problemes de programació lineal sencera mixta (MILP). Un dels principals avantatges de YALMIP és la seua capacitat per a integrar-se amb diversos solucionadors d'optimització, la qual cosa permet als usuaris triar el solucionador més adequat per a les seues necessitats específiques. En aquest projecte, YALMIP ha sigut fonamental per a la formulació dels problemes d'optimització, proporcionant una interfície convenient per a definir i manipular les variables, restriccions i funcions objectiu del model.

Gurobi és un dels solucionadors d'optimització més avançats i eficients disponibles en el mercat. S'especialitza a resoldre problemes de programació lineal, programació lineal sencera (ILP) i programació lineal mixta-sencera (MILP), entre altres. Gurobi es caracteritza per la seua rapidesa i precisió, la qual cosa ho fa ideal per a aplicacions on l'eficiència computacional és crítica. Aquest optimitzador utilitza algorismes d'última generació, com el mètode simplex i el mètode de punts interiors, a més de tècniques avançades de ramificació i acotació per a problemes sencers. La integració de Gurobi amb MATLAB a través de YALMIP permet aprofitar la potència d'aquest solucionador dins de l'entorn flexible i accessible de Matlab. En aquest treball, Gurobi ha sigut utilitzat per a resoldre els problemes d'optimització formulats amb YALMIP, garantint solucions òptimes en temps de càlcul raonables.

La combinació de MATLAB, YALMIP i Gurobi ha permés abordar el problema d'optimització del sistema de gestió d'energia de manera efectiva. MATLAB proporciona la plataforma per al desenvolupament del model i la simulació, YALMIP facilita la formulació dels problemes d'optimització i Gurobi assegura que aquests problemes es resolguen de manera ràpida i precisa. Aquesta integració ha permés avaluar diferents escenaris i estratègies de control, optimitzant l'ús de recursos energètics i minimitzant els costos operatius del sistema.

En resum, l'ús de MATLAB, YALMIP i Gurobi ha sigut crucial per al desenvolupament d'aquest treball, proporcionant les eines necessàries per a modelar, simular i optimitzar el sistema de gestió d'energia. L'elecció d'aquestes eines s'ha basat en la seua capacitat per a manejar problemes complexos d'optimització i el seu ampli reconeixement en la comunitat científica i tècnica.

1.3.3 Control Predictiu basat en Models MPC

El Control Predictiu basat en Models (MPC) és una tècnica de control relativament recent que, des del seu origen en els anys setanta, ha experimentat un significatiu desenvolupament tant en la investigació com en la indústria. El control predictiu no es refereix a una llei de control específica, sinó a una filosofia que utilitza un model explícit d'un procés per a calcular les accions de control que minimitzen una funció objectiu. Existeixen diverses maneres d'implementar el control predictiu, però totes comparteixen uns certs elements essencials:

- Utilització d'un model per a predir les eixides futures d'un procés en un període de temps determinat, conegut com a horitzó de predicció.
- Càlcul de les accions de control mitjançant l'optimització d'una funció objectiu.
- Aplicació de l'horitzó mòbil, en el qual la finestra de predicció es desplaça a través del temps mentre el control aplica la primera de les accions de control calculades en cada iteració.

La majoria dels controls predictius difereixen en la manera de plantejar els models a causa del seu ampli rang d'aplicacions. En la indústria, el control predictiu s'ha aplicat amb èxit en diverses àrees com la indústria química, energètica, robòtica, entre altres.

En Fernández Camacho i Bordons 2004 es destaquen els principals avantatges del control predictiu:

- L'estructura del control és intuïtiva i l'ajust és relativament senzill.
- És capaç de controlar una gran varietat de processos, des dels més simples fins als més complexos amb grans retards o comportaments de fase no mínima.
- És fàcilment escalable a sistemes multivariables.
- Introdueix mecanismes de realimentació per a la compensació de pertorbacions mesurables.
- En aplicacions senzilles, es pot obtenir una llei de control explícita.
- És compatible amb el disseny basat en restriccions.
- És extremadament útil quan les referències futures del procés són conegudes, com en les trajectòries de robots.

No obstant això, la fortalesa més gran d'aquest mètode és també la seua major debilitat: el model. Les prestacions d'un control predictiu depenen en gran manera de la qualitat del model utilitzat. Qualsevol predicció realitzada a partir d'un model incorrecte no sols és inútil, sinó que pot causar danys en el procés controlat. Per aquesta raó, és fonamental que el model i les prediccions siguin tan representatius com siga possible de la realitat.

1.3.4 Models MILP

La programació matemàtica lineal sencera mixta (MILP) és una tècnica de programació matemàtica en la qual part o totes les variables de decisió dels problemes plantejats han d'adoptar valors sencers, a vegades binaris. Aquest tipus de programació s'utilitza per a resoldre una gran varietat de problemes pràctics relacionats amb l'enginyeria. A l'equació (1.1) es mostra la definició d'un problema típic MILP.

$$\min_x f^T \cdot x \text{ subjecte a } \begin{cases} x(\text{intcon}) \text{ variables sencers} \\ A \cdot x \leq b \\ A_{eq} \cdot x = b_{eq} \\ lb \leq x \leq ub \end{cases} \quad (1.1)$$

Si bé és cert que els problemes de programació lineal (LP) es resolen amb facilitat i en temps raonables, això no s'aplica als problemes que inclouen variables sencers. En algunes situacions, és més convenient abordar un problema MILP com un LP i després arrodonir la solució contínua a valors sencers. Respecte als algorismes específics per a resoldre problemes MILP, les tècniques més efectives es basen en els algorismes de bifurcació i acotació (Williams 2013).

Els algorismes de bifurcació i acotació resolen inicialment el problema lineal continu. Aquest problema es formula considerant totes les variables del problema MILP com a contínues. Si la

solució obtinguda per a aquest problema LP és sencera, s'adopta com a solució òptima. En cas contrari, s'introdueixen restriccions addicionals que obliguen a una variable, que en el problema MILP hauria de ser sencera, però va resultar contínua en el problema LP, a prendre un valor sencer. Aquesta restricció provoca la divisió de la regió factible en dos, generant dos nous subproblemes. Aquest procés es coneix com a bifurcació.

Seguidament, es resolen els dos subproblemes generats en el pas anterior. Si en un dels casos s'obté una solució sencera, es guarda el valor de la funció objectiu. Si aquest valor millora el valor de la funció objectiu del subproblema amb solució contínua, es finalitza l'exploració i eixe valor es converteix en la cota de la solució òptima sencera. Per contra, si el subproblema amb solució contínua millora el valor objectiu de la solució sencera, es repeteix el procés bifurcant aquest subproblema, i així successivament (Tormos Juan i Lova Ruiz 2003).

Capítol 2

Modelatge del sistema

Com esmenten Beith et al. 2011, el terme tecno-econòmic abasta tots aquells estudis o models que travessen la frontera entre la física i l'economia. Aquest tipus de treballs s'enfoquen a caracteritzar tècnicament un sistema dins de l'àmbit de l'enginyeria, definint paràmetres relacionats amb rendiments, prestacions i temps de vida del sistema. El sistema a modelar se situa en un entorn específic, comportant-se d'acord amb les entrades que rep. D'altra banda, els indicadors es defineixen de manera que se'ls puguin assignar valors econòmics. És en aquest punt on entra en joc l'anàlisi econòmica, proporcionant mètriques com ara el valor actual net, costos d'operació, períodes de retorn, entre altres.

En aquest capítol es presenta el modelat tecno-econòmic del sistema a controlar. Primerament, es descriu el sistema completament, definint tant les interaccions que existeixen entre els diferents elements com els mateixos elements. A continuació, es profunditza en cada element del sistema i el seu modelat físic.

2.1 Descripció del sistema

El sistema del present treball utilitza un sistema d'aerotèrmia basat en una bomba de calor per generar energia tèrmica a partir d'energia elèctrica, que pot estar generada per unes plaques fotovoltaïques o importada de la xarxa elèctrica. Tots dos tipus d'energia s'utilitzen per satisfer les demandes dels usuaris.

En la figura 2.1 es mostra l'esquema del sistema, amb els elements que el formen i els possibles fluxos d'energia entre ells. El bus de color blau representa el flux d'energia elèctrica i el bus de color roig indica l'energia tèrmica.

Les plaques fotovoltaïques generen, depenent de la irradiància solar principalment, energia elèctrica. Aquesta pot tindre diversos usos. En primer lloc, pot emmagatzemar-se a la bateria mitjançant el regulador de càrrega per al seu ús posterior. En segon lloc, pot injectar-se al bus d'energia elèctrica de l'habitatge a través de l'inversor per a ser consumida o exportada a la

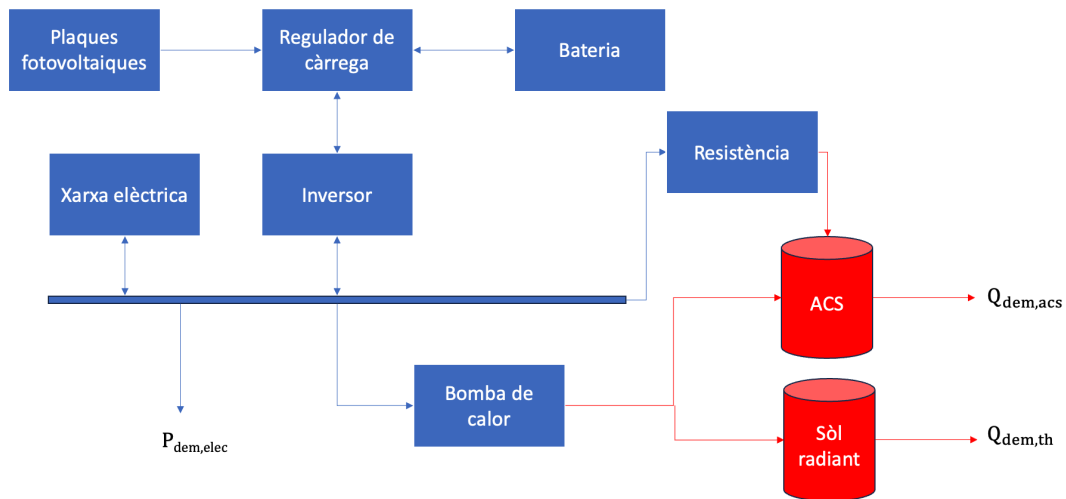


Figura 2.1: Esquema del sistema.

xarxa. Com que el sistema està connectat a la xarxa elèctrica de distribució, es permet tant la compra com la venda d'energia des d'aquesta xarxa.

Pel que fa a l'energia tèrmica dins del sistema, la bomba de calor és l'encarregada de produir-la a partir d'energia elèctrica. S'utilitza per a calfar dos depòsits d'aigua calenta que serveixen com a emmagatzematge del qual els usuaris consumeixen l'energia tèrmica. D'una banda, el depòsit d'aigua calenta sanitària (ACS). D'altra, el depòsit de la calefacció per sòl radiant. A part de la bomba de calor, existeixen unes resistències de suport al depòsit d'aigua calenta sanitària que converteixen energia elèctrica en tèrmica.

En conjunt, els dispositius que conformen el sistema s'empren per a satisfer la demanda energètica dels usuaris. Aquesta demanda pot ser tant d'energia elèctrica com d'energia tèrmica, la qual s'utilitza per a aigua calenta sanitària (ACS) o per a calefacció.

Respecte a la part econòmica del model, aquesta s'integra mitjançant els preus de les fonts d'energia que utilitza el sistema. Els únics indicadors econòmics utilitzats són el preu de l'energia elèctrica comprada i venuda a la xarxa. A partir de les quantitats de cada tipus d'energia consumida i els seus respectius preus, es poden calcular els costos d'operació del sistema. Aquests costos serviran com el principal indicador econòmic per a avaluar les prestacions del sistema i les diferents estratègies de control que s'apliquen sobre ell.

En resum, es té un sistema connectat tant a la xarxa de distribució d'energia elèctrica. Utilitzant aquesta font d'energia, junt amb l'energia solar, s'han de gestionar els dispositius del sistema per a complir amb les restriccions operatives del mateix sistema i subministrar als usuaris l'energia demandada. El control implementat decidirà a cada moment la potència a la qual haurà d'operar cada dispositiu. Tot això es durà a terme amb l'objectiu de minimitzar els costos d'operació del sistema.

2.2 Modelatge dels components del sistema

A continuació es descriu el modelatge de cadascun dels components del sistema desenvolupat. Atés que l'objectiu és utilitzar el model per a dissenyar una estratègia de gestió de l'energia, es busca implementar un model d'alt nivell en el qual la dinàmica modelada resulte en un baix cost computacional. En aquesta mena de models, es dona major importància al punt d'equilibri en el qual s'estabilitza el sistema, és a dir, al règim permanent, que al transitori ocorregut durant l'evolució del sistema fins a aconseguir aquest equilibri. Per aquesta raó, la majoria dels dispositius es representen mitjançant models estàtics, incorporant dinàmica únicament a través de restriccions operatives.

2.2.1 Bomba de calor

La bomba de calor és un dispositiu que extrau calor de l'ambient i el subministra a una temperatura més elevada. L'eficiència d'una bomba de calor es caracteritza pel seu coeficient de rendiment (COP, per les seues sigles en anglés), que és, entre altres coses, funció de la temperatura de la font i de la de subministrament. Com menor siga la diferència entre aquestes dues temperatures, major serà el COP. Per tant, les bombes de calor són ideals per a combinar-les amb sistemes d'emissió de calor a baixa temperatura, com la calefacció per sòl radiant (Verhelst et al. 2012).

Per al sistema proposat, l'aire ambient és utilitzat sense cap mena de preescalfament, en conseqüència, la temperatura ambient influirà directament el COP. Una de les qüestions plantejades en aquest projecte és quan és òptim fer funcionar una bomba de calor tenint en compte la variació diürna de la temperatura ambient. La resposta no és immediata, ja que s'espera que hi haja un equilibri entre el funcionament a hores amb una temperatura més alta (i, per tant, un COP més alt) i el funcionament a hores amb una temperatura ambient més baixa (i, com a resultat, major demanda tèrmica de l'edifici). A més a més, si es tenen en compte els costos energètics, la variació del preu de l'electricitat influirà també en la resposta. És en aquest punt on s'observa la importància que tenen els depòsits i bateries.

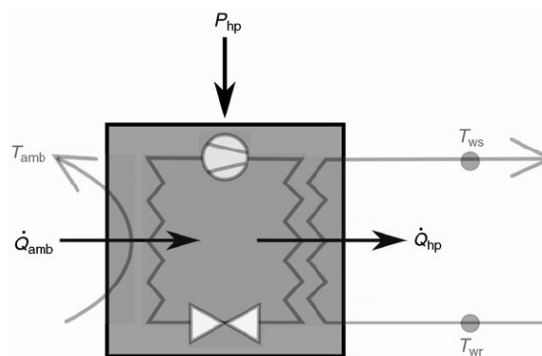


Figura 2.2: Representació esquemàtica d'una bomba de calor aire-aigua. Font: Verhelst et al. 2012

La figura 2.2 ofereix una representació simplificada del funcionament d'una bomba de calor aire-aigua, continuant amb el plantejament de Verhelst et al. 2012. El compressor acciona un cicle termodinàmic que extrau la calor $\dot{Q}_{amb}$ de l'aire ambient pel costat de l'evaporador i subministra

la calor $\dot{Q}_{hp}$ a l'habitatge pel costat del condensador. La primera llei de la termodinàmica estableix la següent relació entre la potència subministrada $\dot{Q}_{hp}$, la potència tèrmica extreta de l'ambient $\dot{Q}_{amb}$ i la potència del compressor P_{hp} :

$$\dot{Q}_{hp} = \dot{Q}_{amb} + P_{hp} \quad (2.1)$$

El coeficient de rendiment de la bomba de calor es defineix com la relació entre la potència tèrmica subministrada $\dot{Q}_{hp}$ i la potència requerida del compressor P_{hp} :

$$COP = \frac{\dot{Q}_{hp}}{P_{hp}} \quad (2.2)$$

La segona llei de la termodinàmica estableix un límit superior per al COP , que es denomina COP_{Carnot} . Aquest límit superior depèn únicament de la temperatura de la font de calor (T_{source}) i de la temperatura del subministrament de calor (T_{supply}), totes dues expressades en graus Kelvin.

$$COP_{Carnot} = \frac{T_{supply}}{T_{source} - T_{supply}} \quad (2.3)$$

El COP d'una bomba de calor real és inferior a causa de les irreversibilitats del compressor, els bescanviadors de calor i la vàlvula d'expansió. Una possibilitat és representar les característiques de la bomba de calor mitjançant ajustos polinòmics basats en dades experimentals. La dependència de la temperatura del COP es descriu mitjançant un ajust quadràtic amb T_{amb} i T_{imp} , com s'indica a l'equació (2.4). Els coeficients, que figuren a la taula 2.1, s'han obtingut a partir de les dades del catàleg d'una bomba de calor aire-aigua residencial (Daikin 2006).

$$\begin{aligned} COP(T_{amb}, T_{imp}) = & COP_0 + \alpha_1 \cdot T_{amb} + \alpha_2 \cdot T_{imp} + \alpha_3 \cdot T_{amb}^2 \\ & + \alpha_4 \cdot T_{imp}^2 + \alpha_5 \cdot T_{imp} \cdot T_{amb} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Substituint l'equació (2.4) a l'equació (2.2) s'obté la següent expressió per a la potència del compressor P_{hp} necessària per a subministrar una determinada potència tèrmica $\dot{Q}_{hp}$ a l'habitatge:

$$P_{hp} = \frac{\dot{Q}_{hp}}{COP(T_{amb}, T_{imp})} \quad (2.5)$$

COP_0	$\alpha_1 (^{\circ}C^{-1})$	$\alpha_2 (^{\circ}C^{-1})$	$\alpha_3 (^{\circ}C^{-2})$	$\alpha_4 (^{\circ}C^{-2})$	$\alpha_5 (^{\circ}C^{-2})$
8,255	0,158	-0,1952	0,0010	0,0015	-0,0023

Taula 2.1: Coeficients del model de la bomba de calor

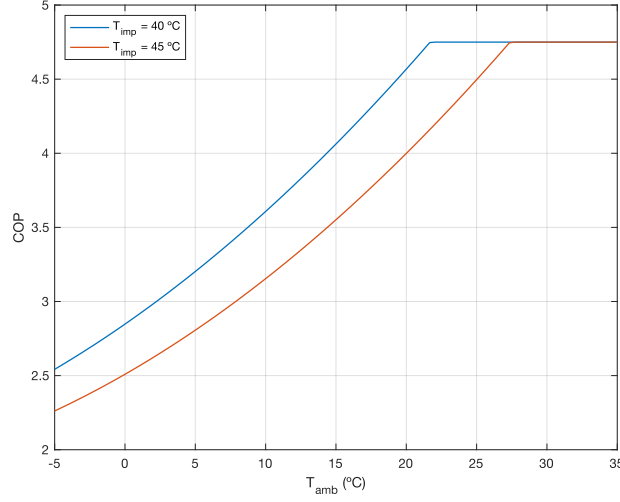


Figura 2.3: COP de una bomba de calor en funció de la temperatura ambient T_{amb} i la temperatura d'impulsió T_{imp} .

2.2.2 Bateria

La bateria és l'element encarregat d'emmagatzemar energia elèctrica dins del sistema proposat. Per una banda, pot fer-se servir com per a emmagatzemar l'excedent d'energia produïda pels panells fotovoltaïcs o bé carregar-se directament amb energia de la xarxa elèctrica. D'altra, pot descarregar-se en qualsevol moment per satisfer la demanda elèctrica de l'habitatge o per transformar l'energia elèctrica en tèrmica mitjançant la bomba de calor o les resistències. L'avantatge de fer servir sistemes d'emmagatzematge d'energia és que permet desacoblar la demanda de la producció amb la finalitat de comprar energia en períodes que és més barata. Els paràmetres que defineixen el comportament de la bateria, com són els límits de potència màxima i mínima o la capacitat d'emmagatzematge, influeixen directament en l'estratègia de gestió de l'energia a aplicar al sistema.

Basant-se en el plantejament de Hidalgo Rodríguez i Myrzik 2017, les equacions (2.6) i (2.7) defineixen el comportament dinàmic de la bateria. El model que es descriu a continuació es tracta d'un model discret que s'executa en cada instant de temps k amb un determinat període de mostreig T_s .

$$SOC_{k+1}^{BAT} = \eta_{sd}^{BAT} \cdot SOC_k^{BAT} + K^{BAT} \cdot \left(\eta_{ch}^{BAT} \cdot P_k^{BAT,ch} - \eta_{dis}^{BAT} \cdot P_k^{BAT,dis} \right) \quad (2.6)$$

$$K^{BAT} = \frac{T_s}{Cap^{BAT}} \cdot 100 \quad (2.7)$$

On:

SOC_{k+1}^{BAT} : Estat de càrrega de la bateria a l'instant $k + 1$ [%].

η_{sd}^{BAT} : Coeficient d'autodescàrrega de la bateria.

SOC_k^{BAT} : Estat de càrrega de la bateria a l'instant k [%].

η_{ch}^{BAT} : Rendiment de càrrega de la bateria.

$P_k^{BAT,ch}$: Potència de càrrega de la bateria a l'instant k [kW].

η_{dis}^{BAT} : Rendiment de descàrrega de la bateria.

$P_k^{BAT,dis}$: Potència de descàrrega de la bateria a l'instant k [kW].

K^{BAT} : Constant de discretització [kW^{-1}].

T_s : Període de discretització [h].

Cap^{BAT} : Capacitat de la bateria [kWh].

La responsabilitat principal del gestor d'energia serà optimitzar l'ús de la capacitat d'emmagatzematge de la bateria operant dins dels límits de l'Estat de Càrrega (*SOC*) establits en l'estratègia de control, assegurant que el *SOC* no descendeixi per davall del 0% ni excedeixi el 100%.

2.2.3 Xarxa elèctrica

La xarxa elèctrica representa la font principal d'energia majoritària per a qualsevol consumidor. Com qualsevol sistema on es genera energia elèctrica, hi ha la possibilitat de treballar de forma aïllada, on el sistema hauria de ser capaç de satisfer tota la demanda amb la generació pròpia. Una altra configuració és connectar-se a la xarxa elèctrica i interactuar amb ella. En aquest cas, el sistema de gestió de l'energia que s'està portant a terme gaudeix de més graus de llibertat. En el moment en què la producció elèctrica per part de les plaques fotovoltaiques juntament amb l'energia aportada per la bateria siga deficitària, es podrà fer ús de la xarxa elèctrica com a sistema auxiliar per cobrir la resta de la demanda. En canvi, si l'energia del sistema és excedentària, es podria exportar a la xarxa elèctrica obtenint un benefici econòmic. De qualsevol manera, sempre que s'instal·la un sistema auxiliar d'energia elèctrica la connexió a la xarxa ha de dimensionar-se de forma que pugui satisfer tota la demanda per ella mateixa.

Per a aquest treball s'ha seleccionat la configuració que el sistema està connectat a la xarxa elèctrica. Pot importar o exportar tota l'energia que necessite en qualsevol moment. Tant l'energia elèctrica importada com exportada tindrà un preu diferent en funció de l'hora a la qual es realitzi la transferència d'energia. S'ha optat per utilitzar el sistema tarifari del "preu voluntari per al xicotet consumidor"(PVPC) a causa de la facilitat d'accés a través de la web i la disponibilitat de dades sobre el cost de l'energia. Un avantatge significatiu del sistema PVPC és que els preus de l'electricitat per a l'endemà es coneixen amb antelació, la qual cosa millora la precisió de les prediccions. El sistema PVPC disposa d'una tarifa quan la potència contractada és menor de 10 kW. A més, disposa d'una compensació simplificada per a l'energia excedentària de l'autoconsum.

A la figura 2.4 es mostra el cost horari de l'energia elèctrica per a la tarifa 2.0 TD i el preu horari que es rep en cas d'abocar energia excedentària d'autoconsum. Per a dur a terme les simulacions s'han obtingut aquests dos preus de manera anual per a l'any 2023.

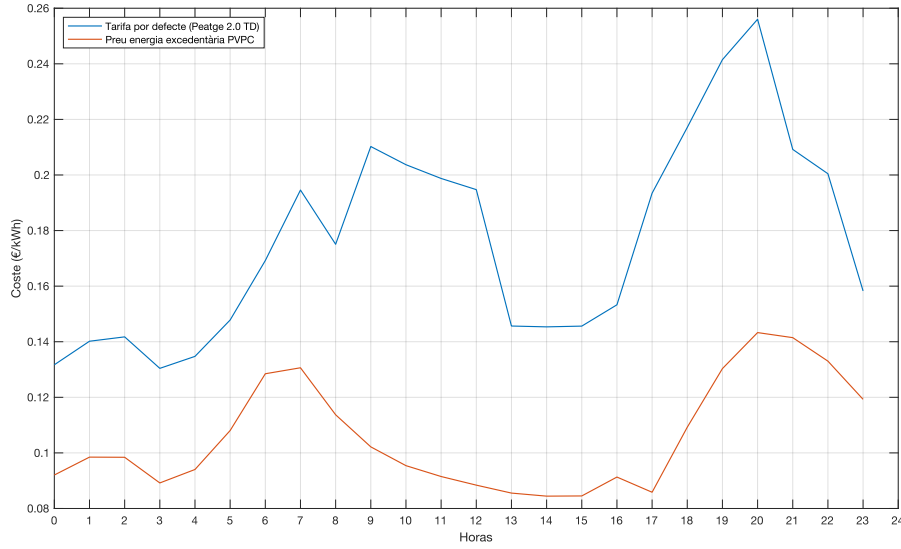


Figura 2.4: Terme de facturació d'energia activa i preu d'energia excidentària de l'autoconsum PVPC 19/06/2023. Font Red Eléctrica España 2024

2.2.4 Depòsit ACS

El depòsit d'aigua calenta sanitària és l'element encarregat d'emmagatzemar energia tèrmica dins del sistema. El depòsit rep l'energia procedent de la bomba de calor o de les resistències per a posteriorment subministrar-la a l'habitatge per a complir la demanda d'aigua calenta sanitària.

Igual que la bateria, el depòsit és un element que té dinàmica dins del sistema. En canvi, no es pot elegir quan descarregar-lo a causa del fet que això depèn de la demanda dels usuaris.

La capacitat energètica del depòsit es calcula segons les equacions (2.8) i (2.9). Depèn de la quantitat d'aigua que té a l'interior i de les temperatures màximes i mínimes d'operació. Aquestes equacions faciliten l'establiment d'una relació entre la capacitat i altres paràmetres de disseny del depòsit.

$$Cap^{ACS} = m \cdot c_p \cdot (T_{max} - T_{min}) \cdot \frac{1}{3600} \quad (2.8)$$

$$m = \rho \cdot V \quad (2.9)$$

On:

Cap^{ACS} : Capacitat d'emmagatzematge d'energia tèrmica al depòsit [kWh].

m : Massa d'aigua continguda a l'interior del depòsit [kg].

c_p : Calor específica de l'aigua [4,18 kJ/kg·K].

T_{max} : Temperatura màxima d'emmagatzematge de l'aigua [328,15 K].

T_{min} : Temperatura mínima d'emmagatzematge de l'aigua [308,15 K].

ρ : densitat de l'aigua [1 kg/l].

En aquest cas, s'estableix la temperatura màxima d'operació a 55 °C, pel fet que és una temperatura típica en dipòsits d'aigua calenta sanitària. Com a temperatura mínima s'estableix 35 °C. Com es pot observar, el rang de temperatures definit és suficient per a cobrir les demandes d'aigua calenta sanitària.

Una vegada s'ha calculat la capacitat energètica del dipòsit, continuant amb el plantejament de Hidalgo Rodríguez i Myrzik 2017, les equacions (2.10) i (2.11) defineixen el comportament dinàmic de l'estat de càrrega del dipòsit. Aquestes equacions simplifiquen en gran manera el comportament d'un dipòsit, ja que no es considera ni l'estratificació tèrmica ni la temperatura d'entrada de l'aigua. Així i tot, tenint en compte que l'objectiu final d'aquest capítol, i, per consegüent, del treball, és obtenir un model tecno-econòmic.

$$SOC_{k+1}^{ACS} = \eta_{sd}^{ACS} \cdot SOC_k^{ACS} + K^{ACS} \cdot \left(\eta_{ch}^{ACS} \cdot Q_k^{ACS,ch} - \eta_{dis}^{ACS} \cdot Q_k^{ACS,dis} \right) \quad (2.10)$$

$$K^{acs} = \frac{T_s}{Cap^{ACS}} \cdot 100 \quad (2.11)$$

On:

SOC_{k+1}^{ACS} : Estat de càrrega del dipòsit a l'instant $k + 1$ [%].

η_{sd}^{ACS} : Coeficient d'autodescàrrega del dipòsit.

SOC_k^{ACS} : Estat de càrrega del dipòsit a l'instant k [%].

η_{ch}^{ACS} : Rendiment de càrrega del dipòsit.

$Q_k^{ACS,ch}$: Potència de càrrega del dipòsit a l'instant k [kW].

η_{dis}^{ACS} : Rendiment de descàrrega del dipòsit.

$Q_k^{ACS,dis}$: Potència de descàrrega del dipòsit a l'instant k [kW].

K^{ACS} : Constant de discretització [kW⁻¹].

T_s : Període de discretització [h].

Cap^{ACS} : Capacitat del dipòsit [kWh].

Atés que en aquest cas l'emmagatzematge es gestiona mitjançant la temperatura d'un fluid, en algunes circumstàncies l'estat de càrrega (SOC) pot descendir per davall del 0 % o superar el 100 % de la capacitat calculada del dipòsit. Aquest fenomen indica que la temperatura dins del dipòsit ha sobrepassat els límits de temperatura predefinitos. En altres paraules, l'aigua estarà més freda de 35 °C o més calenta de 55 °C quan el SOC del dipòsit es trobe fora del rang de 0 % a 100 %.

2.2.5 Inversor

L'inversor és l'element encarregat de convertir el corrent continu procedent tant de les plaques fotovoltaiques i la bateria en corrent altern apta per a establir una connexió amb la xarxa elèctrica. En el cas del sistema modelat en aquest treball no es considera necessari modelar un inversor a causa del fet que s'opera directament amb potències.

2.2.6 Regulador de càrrega

El regulador de càrrega és un dispositiu que té com a funció principal gestionar i regular el procés de càrrega i descàrrega de la bateria per a assegurar el seu òptim funcionament i prolongar la seua vida útil. Dins del sistema d'aquest treball, el regulador de càrrega estaria controlat pel gestor d'energia perquè la bateria optimitzara el seu emmagatzematge. Per tant, no és necessari modelar el regulador de càrrega.

2.2.7 Depòsit calefacció

El depòsit de calefacció, com també el d'aigua calenta sanitària, s'encarrega d'emmagatzemar energia tèrmica dins del sistema. El depòsit rep l'energia procedent de la bomba de calor per a posteriorment subministrar-la a l'habitatge per acomplir la demanda de calefacció.

Igual que la bateria, el depòsit és un element que té dinàmica dins del sistema. En canvi, no es pot elegir quan descarregar-lo pel fet que això depèn de la demanda dels usuaris.

La capacitat energètica del depòsit es calcula segons les equacions (2.12) i (2.13). Depèn de la quantitat d'aigua que té a l'interior i de les temperatures màximes i mínimes d'operació. Aquestes equacions faciliten l'establiment d'una relació entre la capacitat i altres paràmetres de disseny del depòsit.

$$Cap^{TH} = m \cdot c_p \cdot (T_{max} - T_{min}) \cdot \frac{1}{3600} \quad (2.12)$$

$$m = \rho \cdot V \quad (2.13)$$

On:

Cap^{TH} : Capacitat d'emmagatzematge d'energia tèrmica al depòsit [kWh].

m : Massa d'aigua continguda a l'interior del depòsit [kg].

c_p : Calor específica de l'aigua [4,18 kg/kJ K].

T_{max} : Temperatura màxima d'emmagatzematge de l'aigua [313,15 K].

T_{min} : Temperatura mínima d'emmagatzematge de l'aigua [298,15 K].

ρ : densitat de l'aigua [1 kg/l].

En aquest cas, s'estableix la temperatura màxima d'operació a 45 °C, ja que és una temperatura típica en calefaccions del tipus sòl radiant. Com a temperatura mínima s'estableix 35 °C. Com es pot observar, el rang de temperatures definit és suficient per a cobrir les demandes de calefacció.

Una vegada s'ha calculat la capacitat energètica del depòsit, les equacions (2.14) i (2.15) defineixen el comportament dinàmic de l'estat de càrrega del depòsit. Aquestes equacions simplifiquen en gran manera el comportament d'un depòsit, ja que no es considera ni l'estratificació tèrmica la temperatura d'entrada de l'aigua. Així i tot, tenint en compte que l'objectiu final d'aquest capítol, i, per consegüent, del treball, és obtenir un model tecno-econòmic.

$$SOC_{k+1}^{TH} = \eta_{sd}^{TH} \cdot SOC_k^{TH} + K^{TH} \cdot (\eta_{ch}^{TH} \cdot Q_k^{TH,ch} - \eta_{dis}^{TH} \cdot Q_k^{TH,dis}) \quad (2.14)$$

$$K^{TH} = \frac{T_s}{Cap^{TH}} \cdot 100 \quad (2.15)$$

On:

SOC_{k+1}^{TH} : Estat de càrrega del depòsit a l'instant $k + 1$ [%].

η_{sd}^{TH} : Coeficient d'autodescàrrega del depòsit.

SOC_k^{TH} : Estat de càrrega del depòsit a l'instant k [%].

η_{ch}^{TH} : Rendiment de càrrega del depòsit.

$Q_k^{TH,ch}$: Potència de càrrega del depòsit a l'instant k [kW].

η_{dis}^{TH} : Rendiment de descàrrega del depòsit.

$Q_k^{TH,dis}$: Potència de descàrrega del depòsit a l'instant k [kW].

K^{TH} : Constant de discretització [kW⁻¹].

T_s : Període de discretització [h].

Cap^{TH} : Capacitat del depòsit [kWh].

2.2.8 Resistències

Les resistències són un element auxiliar que tenen els sistemes basats en aerotèrmia per a convertir energia elèctrica en tèrmica i utilitzar-la per escalfar el depòsit ACS.

$$Q_k^R = \frac{\eta_R}{100} \cdot P_k^R \quad (2.16)$$

On:

Q_k^R : Potència tèrmica emprada a calfar el depòsit d'aigua calenta sanitària en l'instant k [kW].

η_R : Eficiència de les resistències [%].

P_k^R : Potència elèctrica consumida per les resistències en l'instant k [kW].

2.2.9 Plaques fotovoltaiques

Les plaques fotovoltaiques són les encarregades de generar energia elèctrica dins del sistema a partir de la radiació solar. Continuant amb el plantejament de Dehghan et al. 2021, la potència que generen està descrita per les equacions (2.17) i (2.18).

Les plaques fotovoltaiques produeixen una potència elèctrica que depèn de la irradiància solar i la temperatura a la qual està el mòdul. Per a simplificar el modelatge, es suposa que el mòdul fotovoltaiac està a una temperatura igual a la temperatura ambient. Les dades d'irradiància i temperatura estan extretes de National Renewable Energy Laboratory 2024.

$$P_k^{pv} = n_{pv} \cdot \frac{\eta_{pv}}{100} \cdot A \cdot irr_k \cdot F_k^{pmp} \quad (2.17)$$

$$F_k^{pmp} = 1 + \frac{T_k - T_{ref}}{TkPmp/100} \quad (2.18)$$

On:

P_k^{pv} : Potència elèctrica de producció solar a l'instant k [kWh].

n_{pv} : Nombre de plaques fotovoltaiques instal·lades [10].

η_{pv} : Eficiència del mòdul fotovoltaiac [20,1 %].

A : Àrea efectiva d'un mòdul fotovoltaiac [2,5276 m²].

irr_k : Irradiància solar a l'instant k [W/m²].

F_k^{pmp} : Factor de correcció per temperatura del mòdul fotovoltaiac.

T_k : Temperatura ambient a l'instant k [°C].

T_{ref} : Temperatura de referència per al factor de correcció [25 °C].

$TkPmp$: Coeficient de temperatura de potència màxima del mòdul fotovoltaiac [-0,35 %/°C]

2.2.10 Demandes

L'objectiu final del sistema proposat és generar energia elèctrica i tèrmica amb la finalitat de satisfer la demanda energètica dels usuaris. Per a poder realitzar un disseny i control òptims del sistema, és fonamental conèixer amb el nivell més gran de detall possible les característiques de la demanda a la qual serà sotmés.

En canvi, la disponibilitat d'aquestes dades relativa a les demandes d'habitatges unifamiliars és ben bé escassa. La manera més habitual d'aconseguir els perfils de les demandes és mitjançant mesuraments experimentals en instal·lacions reals. No obstant això, aquesta forma de treballar limita en gran quantitat l'abast de l'estudi perquè els resultats es limiten a l'escenari de mesurament. Una altra possibilitat resideix en simular i predir els perfils de demanda a partir del modelatge de l'edifici en el qual es pretén instal·lar el sistema i la zona climàtica. Actualment, existeixen diversos programes informàtics que realitzen aquestes funcions. Les ferramentes més senzilles solen generar perfils amb una resolució d'una hora, la qual cosa redueix la capacitat d'anàlisi dels resultats a causa d'aquest efecte del filtratge dels perfils.

Un altre enfocament per a calcular perfils de demanda consisteix a aplicar les metodologies de càlcul proposades per les normatives de diferents països. Entre aquestes normatives es troben el Codi Tècnic de l'Edificació (CTE) a Espanya, aplicat per Romero Rodríguez et al. 2016 mitjançant la ferramenta LIDER; l'estàndard alemany VDI-4655, emprat en Hidalgo Rodríguez i Myrzik 2017.

Finalment, després d'analitzar les diferents possibilitats per a obtenir perfils de demanda realistes i amb una resolució elevada, s'ha decidit utilitzar l'estàndard VDI-4655 proposat per l'Associació d'Enginyers Alemanys. Aquest estàndard arreplega perfils de referència per a l'ús de sistemes com el modelatge en residències unifamiliars i multifamiliars. El VDI-4655 proporciona perfils de demanda d'energia elèctrica, calefacció i aigua calenta sanitària, amb un període de mostreig de $T_s = 1$ min, classificats en deu dies tipus segons l'època de l'any i les condicions meteorològiques.

A la taula 2.2 es recullen els dies tipus i la nomenclatura amb la qual es refereix a cadascun d'ells.

Estació	W: Laborable		S: Festiu	
	H: Solejat	B: Nuvolós	H: Solejat	B: Nuvolós
Ü: Primavera/Tardor	ÜWH	ÜWB	ÜSH	ÜSB
S: Estiu	SWX		SSX	
W: Hivern	WWH	WWB	WSH	WSB

Taula 2.2: Nomenclatura dels dies tipus. Font: VDI 2008

A més, aquesta guia permet generar perfils de demanda personalitzats per a edificis en funció de factors com la seua superfície, el nombre d'ocupants i la zona climàtica. A partir d'aquests paràmetres, es poden derivar factors de correcció per a estimar el consum diari aplicant-los als patrons de cada dia típic. Aquests patrons es van obtenir a partir de mesuraments experimentals de la demanda energètica de cinc residències unifamiliars situades en tres llocs diferents. La taula 2.3 proporciona el valor mitjà de la demanda energètica segons el dia típic.

Demanda	ÜWH	ÜWB	ÜSH	ÜSB	SWX	SSX	WWH	WWB	WSH	WSB
Elèctrica	13,68	14,65	15,94	17,13	12,54	13,49	14,68	15,67	16,36	18,01
Calefacció	27,40	32,96	28,80	29,82	0	0	63,21	60,82	59,03	54,88
ACS	3,61	3,91	5,65	5,89	3,25	4,89	4,57	4,34	7,67	6,07

Taula 2.3: Consums mitjans per tipus de demanda i dia en kWh. Font: VDI 2008

La taula 2.4 recull el nombre de dies corresponents a cada dia tipus. Aquestes dades són útils per a realitzar una anàlisi dels costos de funcionament anuals del sistema.

En la figura 2.5 es mostra els perfils de demanda d'energia elèctrica classificats pel tipus de dia. Es representa la corba de demanda instantània. De la mateix manera ocorre a les figures 2.6 i 2.7 amb les demandes d'aigua calenta sanitària i calefacció, respectivament.

Any	ÜWH	ÜWB	ÜSH	ÜSB	SWX	SSX	WWH	WWB	WSH	WSB
Núm. dies	27	91	8	18	104	19	23	57	2	16

Taula 2.4: Nombre de dies per categoria. Font: VDI 2008

Quant a la demanda elèctrica, s'observa que els perfils presenten una gran variabilitat al llarg del dia. Per tant, és necessari utilitzar períodes de mostreig baixos, ja que els períodes de mostreig més alts actuen com a filtres, ocultant els pics de consum. Entre els tres tipus de demanda, l'elèctrica és la que més varia al llarg del dia.

En referència a la demanda d'aigua calenta, es caracteritza per valors punta molt més elevats. No obstant això, el caràcter intermitent d'aquesta demanda fa que el consum acumulat al final del dia siga molt baix. Demandes tan elevades durant períodes curts solen penalitzar als sistemes dissenyats amb poca capacitat de resposta.

Quant a la demanda de calefacció, representa el major consum acumulat dels tres tipus, excepte a l'estiu, quan no hi ha demanda. Aquesta corba de demanda és contínua al llarg del temps.

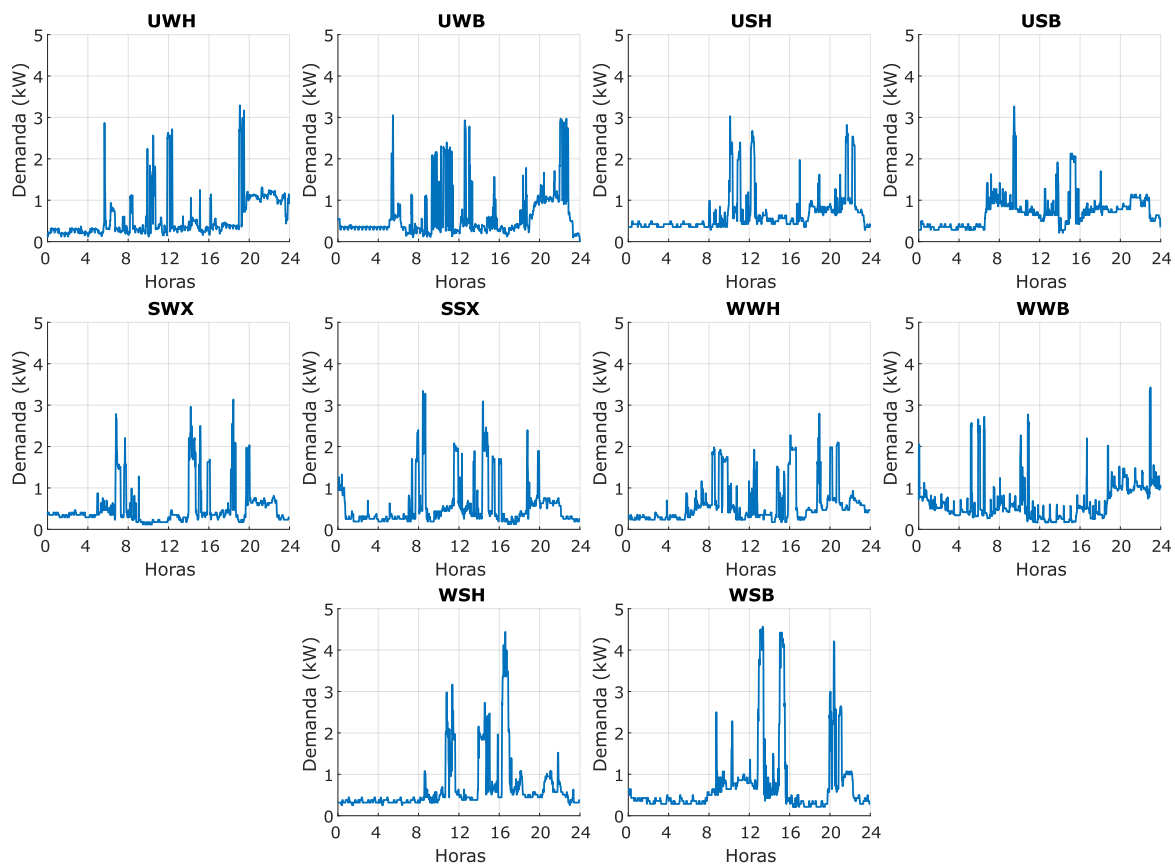


Figura 2.5: Perfils de demanda instantània d'energia elèctrica per tipus de dia.

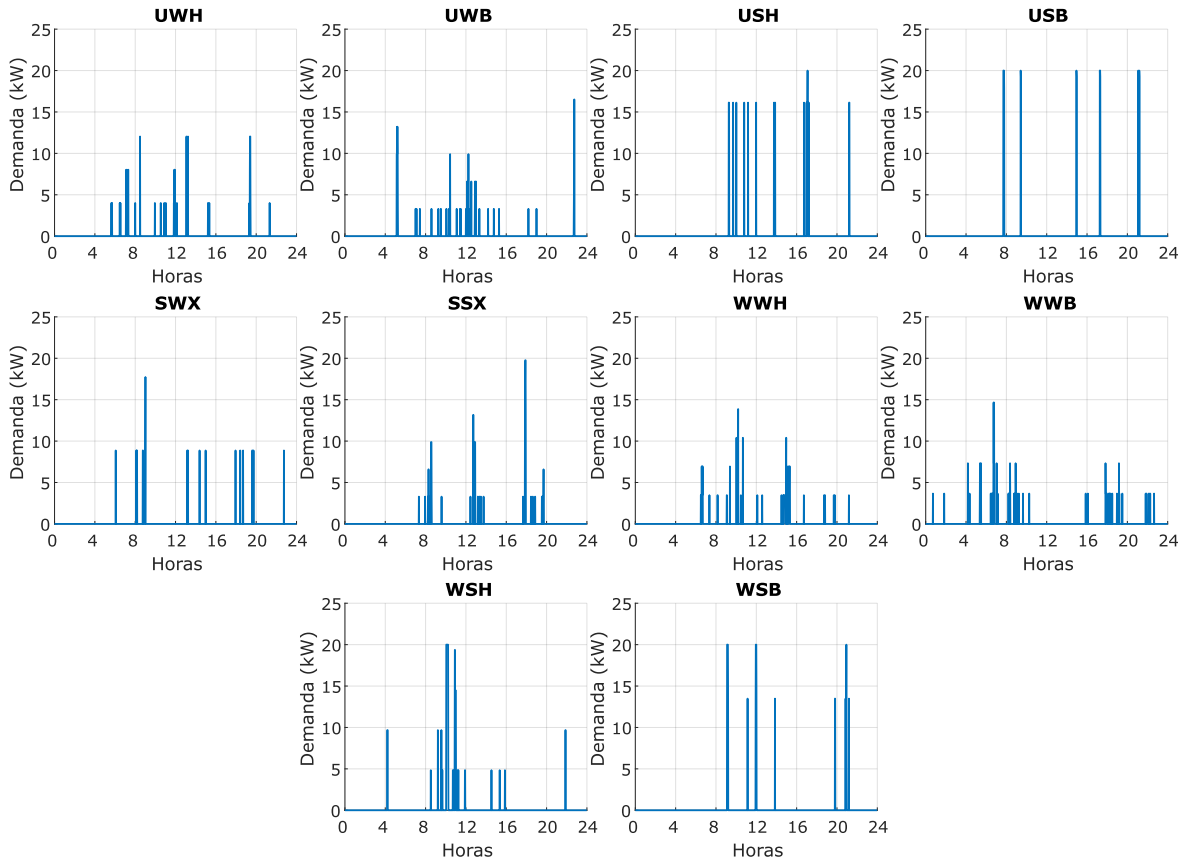


Figura 2.6: Perfils de demanda instantània d'aigua calenta sanitària per tipus de dia.

En resum, aquest capítol ha establert un model tecno-econòmic simplificat i d'alt nivell per a un sistema de generació fotovoltaica amb bomba de calor, dissenyat específicament per a ser implementat en el desenvolupament d'estratègies de gestió energètica. S'ha descrit el comportament estacionari dels components del sistema, incorporant dinàmiques en els sistemes d'emmagatzematge i aplicant restriccions operatives en uns certs casos. Per tant, el propòsit principal no ha sigut reproduir detalladament l'evolució temporal del sistema, sinó més aviat preveure el punt d'operació en el qual el sistema s'estabilitza. El següent pas consistirà a desenvolupar un sistema de control que integre el model tecno-econòmic amb les previsions de demanda energètica per a optimitzar l'ús de l'energia.

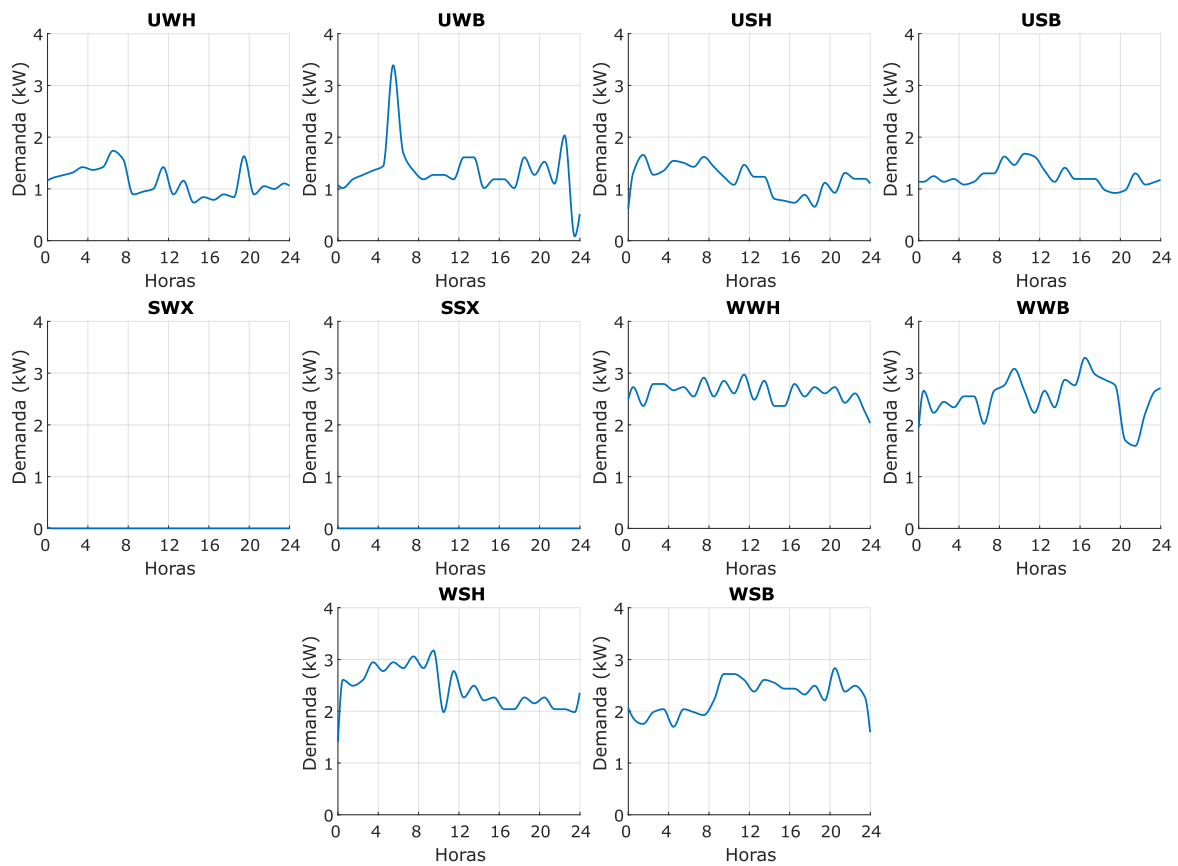


Figura 2.7: Perfils de demanda instantània de calefacció per tipus de dia.

Plantejament del problema

La programació matemàtica és una tècnica d'optimització que permet resoldre problemes de presa de decisions complexos i de molt diversa índole. Concretament, com afirmen Tormos Juan i Lova Ruiz 2003 és la tècnica més utilitzada. Dins del camp de la programació matemàtica es troba la programació lineal (LP), que tracta de resoldre problemes d'optimització mitjançant la definició de models lineals. Malgrat tractar-se d'una simplificació de la realitat, la facilitat i la rapidesa a l'hora de resoldre aquest tipus de problemes provoquen que siga una de les ferramentes més utilitzades.

L'objectiu del modelatge realitzat en el capítol anterior és que el model siga capaç de satisfer la demanda dels usuaris amb el menor cost d'operació possible. Per a això, en aquest capítol s'utilitza el model tecno-econòmic per a plantejar un problema d'optimització amb un enfocament de programació lineal entera mixta (MILP), a causa de la utilització de variables de decisió binàries.

3.1 Variables de decisió

Les variables de decisió del problema es corresponen amb les potències a les quals ha d'operar cada dispositiu. A més, s'afegen una sèrie de variables binàries relacionades amb l'operació d'alguns elements del sistema. De manera paral·lela, totes aquestes variables de decisió han de definir-se en cada instant de la simulació a realitzar. Com que es disposa de perfils de demanda diaris amb un període de mostreig d'un minut, es planteja en una primera iteració problemes amb un horitzó amb una longitud d'un dia i un pas de simulació d'un minut ($T_s = 1$ min). El nombre de variables de decisió llavors es multiplica pel nombre de minuts continguts en un dia, és a dir, 1440 min.

L'equació (3.1) defineix el vector x amb les variables de decisió del problema.

$$x = \left[P_1^{red,c}, \dots, P_N^{red,c}, P_1^{red,v}, \dots, P_N^{red,v}, Y_1^{red}, \dots, Y_N^{red}, P_1^{bat,c}, \dots, P_N^{bat,c}, P_1^{bat,d}, \dots, P_N^{bat,d}, \dots, Y_1^{bat}, \dots, Y_N^{bat}, P_1^{res}, \dots, P_N^{res}, Q_1^{acs}, \dots, Q_N^{acs}, Q_1^{th}, \dots, Q_N^{th}, Y_1^{acs,th}, \dots, Y_N^{acs,th}, \dots, P_1^{bc}, \dots, P_k^{bc}, Y_1^{bc}, \dots, Y_k^{bc}, Y_1^{start,bc}, \dots, Y_k^{start,bc} \right]^T \quad (3.1)$$

On:

$P_k^{red,c}$: Potència elèctrica importada de la xarxa elèctrica a l'instant k [kW].

$P_k^{red,v}$: Potència elèctrica exportada a la xarxa elèctrica a l'instant k [kW].

Y_k^{red} : Variable binària de compra (1) i venda (0) d'energia a la xarxa elèctrica a l'instant k .

$P_k^{bat,c}$: Potència elèctrica de càrrega de la bateria a l'instant k [kW].

$P_k^{bat,d}$: Potència elèctrica de descàrrega de la bateria a l'instant k [kW].

Y_k^{bat} : Variable binària de càrrega (1) i descàrrega (0) de la bateria a l'instant k .

P_k^{res} : Potència elèctrica demandada per la resistència a l'instant k [kW].

Q_k^{acs} : Potència tèrmica proporcionada al depòsit ACS a l'instant k [kW].

Q_k^{th} : Potència tèrmica proporcionada al depòsit TH a l'instant k [kW].

$Y_k^{acs,th}$: Variable binària de bomba de calor injectant a ACS (1) i TH (0) a l'instant k .

P_k^{bc} : Potència elèctrica consumida per la bomba de calor a l'instant k [kW].

Y_k^{bc} : Variable binària de bomba de calor encesa (1) i apagada (0) a l'instant k .

$Y_k^{start,bc}$: Variable binària d'arrancada de bomba calor a l'instant k .

k : instant de simulació $\in [1, \dots, T]$.

La variable Y_k^{bat} té com a funció impedir que la bateria es descarregue i es carregue simultàniament a partir de les accions del controlador. De la mateixa manera, la variable Y_k^{red} impedeix que el controlador aplique accions de compra i de venda de la xarxa elèctrica en el mateix instant. Amb la variable Y_k^{acs} el controlador decidirà si la potència tèrmica que genera la bomba de calor injecta al depòsit d'aigua calenta sanitària o de calefacció. D'altra banda, amb les variables Y_k^{bc} i $Y_k^{start,bc}$ es controlarà els instants en els quals la bomba de calor està encesa i quan es realitza una arrancada, respectivament.

L'equació (3.2) recull els límits inferior i superior de les variables de decisió del problema MILP.

$$\begin{aligned}
0 &\leq P_k^{red,c} \leq P_{max}^{red,c}, & 0 &\leq P_k^{red,v} \leq P_{max}^{red,v}, \\
0 &\leq P_k^{bat,c} \leq P_{max}^{bat,c}, & 0 &\leq P_k^{bat,d} \leq P_{max}^{bat,d}, \\
0 &\leq Y_k^{bat} \leq 1, & 0 &\leq Y_k^{red} \leq 1, \\
P_{min}^{res} &\leq P_k^{res} \leq P_{max}^{res}, & P_{min}^{bc} &\leq P_k^{bc} \leq P_{max}^{bc}, \\
0 &\leq Q_k^{acs} \leq Q_{max}^{acs}, & 0 &\leq Q_k^{th} \leq Q_{max}^{th}, \\
0 &\leq Y_k^{acs,th} \leq 1, & 0 &\leq Y_k^{bat} \leq 1, \\
0 &\leq Y_k^{start,bc} \leq 1, & \forall k &\in [1, \dots, T].
\end{aligned} \tag{3.2}$$

On $P_{max}^{red,c} = 7 \text{ kW}$, $P_{max}^{red,v} = 7 \text{ kW}$, $P_{max}^{bat,c} = 5 \text{ kW}$, $P_{max}^{bat,d} = 5 \text{ kW}$, $P_{min}^{res} = 0 \text{ kW}$, $P_{max}^{res} = 2 \text{ kW}$, $P_{min}^{bc} = 0,5 \text{ kW}$, $P_{max}^{bc} = 5 \text{ kW}$, $Q_{max}^{acs} = 15 \text{ kW}$ i $Q_{max}^{th} = 15 \text{ kW}$.

3.2 Funció objectiu

La funció objectiu a minimitzar en el problema MILP correspon amb els costos d'operació del sistema. L'equació (3.3) calcula els costos d'operació a partir del cost de l'energia importada de la xarxa elèctrica, el cost de l'energia exportada a la xarxa elèctrica i el cost de les arrancades de la bomba de calor.

$$J = \sum_{k=1}^T \left(c_k^{red,c} \cdot P_k^{red,c} - c_k^{red,v} \cdot P_k^{red,v} \right) \cdot T_s + \sum_{k=1}^T c_{start} \cdot Y_k^{start,bc} \tag{3.3}$$

El preu horari de l'electricitat tant per a l'exportació i la importació corresponen amb el que s'ha explicat a la subsecció 2.2.3.

3.3 Restriccions

Aquesta secció descriu les restriccions que afecten cada element aplicades al problema MILP estudiat.

3.3.1 Restriccions associades a la bomba de calor

La bomba de calor és l'element que més restriccions presenta a causa de la complexitat del seu funcionament. En primer lloc, la potència màxima i mínima que pot demandar la bomba de calor està controlada per la variable binària Y_k^{bc} . Així, es té un control dels instants en els quals la bomba de calor està encesa i apagada. Amb les equacions (3.4) i (3.5) es relaciona el punt d'operació mínim i màxim de la bomba de calor amb la variable d'encesa de manera que, si la bomba de calor està apagada, no està consumint potència, però si està encesa, la potència està restringida a eixe punt.

$$P_{min}^{bc} \cdot Y_k^{bc} \leq P_k^{bc} \quad (3.4)$$

$$P_k^{bc} \leq P_{max}^{bc} \cdot Y_k^{bc} \quad (3.5)$$

Per a relacionar la potència tèrmica que entrega la bomba de calor per la impulsio amb la potència elèctrica que consumeix, ja s'ha mencionat a la subsecció 2.2.1 la relació que existeix. La bomba de calor pot entregar la potència tèrmica al depòsit d'aigua calenta sanitària o al de calefacció. La variable binària $Y_k^{acs,th}$ indica a quin depòsit s'està entregant aquesta potència. Les equacions (3.6) i (3.7) controlen que la potència s'estiga entregant a un depòsit o a l'altre, però mai als dos simultàniament. Per tant, com que Q_k^{acs} i Q_k^{th} no seran majors que zero a la vegada en cap instant, amb l'equació (3.8) és suficient per a obtenir la potència elèctrica a partir de la potència tèrmica mitjançant el COP . Així s'aconsegueix reduir el nombre de restriccions que componen el problema.

$$Q_k^{acs} \leq Q_{max}^{acs} \cdot Y_k^{acs,th} \quad (3.6)$$

$$Q_k^{th} \leq Q_{max}^{th} \cdot (1 - Y_k^{acs,th}) \quad (3.7)$$

$$P_k^{bc} = \frac{Q_k^{acs}}{COP(T_k^{amb}, T_{imp,acs})} + \frac{Q_k^{th}}{COP(T_k^{amb}, T_{imp,th})} \quad (3.8)$$

D'altra banda, per a contemplar les arrancades de la bomba de calor es té la variable $Y_k^{start,bc}$ es tenen les equacions (3.9), (3.10) i (3.11). Amb aquestes s'aconsegueix que l'instant en què la bomba de calor arranca la variable binària passe a u, amb la finalitat de comptabilitzar les arrancades a la funció objectiu.

$$Y_k^{start,bc} \leq Y_k^{bc} \quad (3.9)$$

$$Y_k^{start,bc} + Y_{k-1}^{bc} \leq 1 \quad (3.10)$$

$$Y_k^{bc} - Y_k^{start,bc} - Y_{k-1}^{bc} \leq 0 \quad (3.11)$$

3.3.2 Restriccions associades a la bateria

A la bateria és necessari tenir en compte dos tipus de restriccions. El primer és el que s'encarrega d'impedir una càrrega i descàrrega simultània de la bateria mitjançant la variable binària Y_k^{bat} . Com s'ha mencionat anteriorment, quan aquesta variable es troba en un nivell alt (1), està permesa la càrrega de la bateria i bloquejada la seua descàrrega. Per contra, quan la variable es troba en un nivell baix (0), està bloquejada la càrrega i s'habilita la descàrrega. Aquest comportament s'aconsegueix amb les desigualtats de les equacions (3.12) i (3.13). El segon tipus

és l'encarregat de limitar els estats de càrrega de la bateria al llarg de l'horitzó d'operació. Això s'aconsegueix amb l'equació (3.14).

$$P_k^{bat,c} \leq P_{max}^{bat,c} \cdot Y_k^{bat} \quad (3.12)$$

$$P_k^{bat,d} \leq P_{max}^{bat,d} \cdot (1 - Y_k^{bat}) \quad (3.13)$$

$$SOC_{min}^{bat} \leq SOC_k^{bat} \leq SOC_{max}^{bat} \quad (3.14)$$

3.3.3 Restriccions associades als dipòsits

El dipòsit té una formulació molt semblant a la bateria pel fet que ambdós són elements encarregats d'emmagatzemar energia. Les equacions (3.15) i (3.16) defineixen els valors màxims i mínims de l'estat de càrrega del dipòsit ACS i TH, respectivament.

$$SOC_{min}^{acs} \leq SOC_k^{acs} \leq SOC_{max}^{acs} \quad (3.15)$$

$$SOC_{min}^{th} \leq SOC_k^{th} \leq SOC_{max}^{th} \quad (3.16)$$

3.3.4 Restriccions associades a la xarxa elèctrica

Per la configuració que s'ha adoptat sobre la xarxa elèctrica, que ja s'ha comentat a la subsecció 2.2.3, és possible comprar i vendre energia elèctrica. Per tant, s'ha d'assegurar que aquestes accions no es donen simultàniament. Com ja s'ha fet amb restriccions d'altres elements, amb la variable binària Y_k^{red} es limita les accions mencionades amb les equacions (3.17) i (3.18).

$$P_k^{red,c} \leq P_{max}^{red,c} \cdot Y_k^{red} \quad (3.17)$$

$$P_k^{red,v} \leq P_{max}^{red,v} \cdot (1 - Y_k^{red}) \quad (3.18)$$

3.3.5 Balanç elèctric

Aquesta restricció formula el balanç elèctric en cada instant i manté l'equilibri entre la producció i la demanda d'energia elèctrica.

$$P_k^{red,c} - P_k^{red,v} + P_k^{bat,d} - P_k^{bat,c} - P_k^{bc} - P_k^{res} = -P_k^{solar} + P_k^{dem,elec} \quad (3.19)$$

3.4 Plantejament del problema

Una vegada definides les variables de decisió, la funció objectiu i les restriccions, es procedeix a la formulació del problema MILP. Aquesta formulació s'adhereix a l'estructura esbossada en l'equació (3.20), com es va discutir en la subsecció 1.3.4.

$$\min_x f^T \cdot x \text{ subjecte a } \begin{cases} x(\text{intcon}) \text{ variables senceres} \\ A \cdot x \leq b \\ A_{eq} \cdot x = b_{eq} \\ lb \leq x \leq ub \end{cases} \quad (3.20)$$

La formulació del problema MILP inclou la definició de variables de decisió, la funció objectiu i un conjunt de restriccions. Les variables de decisió corresponen a les potències d'operació dels dispositius del sistema en cada interval de temps. La funció objectiu es defineix com la minimització dels costos operatius, incloent-hi el cost de l'electricitat importada i exportada i el cost d'arrancada de la bomba de calor.

Les restriccions del problema es divideixen en diverses categories: balanç d'energia, límits operatius dels dispositius i restriccions d'emmagatzematge. Aquestes restriccions asseguren que el sistema opere de manera segura i eficient, respectant les capacitats i límits de cada component. En particular, el balanç d'energia garanteix que l'energia produïda i emmagatzemada siga suficient per a satisfer la demanda en cada interval de temps.

3.5 Resolució. Optimitzadors

Per a la resolució del problema MILP plantejat, s'ha utilitzat una combinació d'eines robustes i reconegudes en l'àmbit de l'enginyeria: MATLAB (Matlab 2024), YALMIP (Yalmip 2024) i Gurobi (Gurobi Optimization 2024). Aquestes eines permeten formular i resoldre problemes d'optimització complexos de manera eficient i precisa.

En aquest treball, MATLAB ha sigut utilitzat per a desenvolupar el model tecno-econòmic del sistema de gestió d'energia, permetent simular i analitzar diferents escenaris d'operació. D'altra banda, YALMIP permet definir problemes de programació lineal, quadràtica i no lineal, incloent aquells amb variables senceres i binàries, la qual cosa és essencial per a problemes MILP. La capacitat de YALMIP per a integrar diferents solucionadors d'optimització, com Gurobi, ho converteix en una eina poderosa per a la formulació de problemes complexos de gestió energètica. En el context d'aquest treball, YALMIP ha sigut utilitzat per a modelar el problema MILP, proporcionant una interfície intuïtiva per a definir i manipular les variables, restriccions i funcions objectiu del model. Finalment, Gurobi ha sigut configurat per a resoldre els problemes d'optimització formulats, assegurant que el sistema de gestió d'energia opere de manera eficient i econòmica.

La combinació de MATLAB, YALMIP i Gurobi proporciona una plataforma robusta per a la resolució del problema MILP. Aquesta configuració permet no sols la formulació eficient del problema sinó també la seua resolució en un temps raonable, la qual cosa és crític per a aplicacions

en temps real. Aquesta integració ha permès avaluar diferents escenaris i estratègies de control, optimitzant l'ús de recursos energètics i minimitzant els costos operatius del sistema.

A continuació es mostra un exemple de codi de MATLAB per a la resolució del problema plantejat fins al moment. En primer lloc es defineixen les variables de decisió. La ferramenta YALMIP permet incloure tant les variables reals (**sdpvar**) com les binàries (**binvar**). En segon lloc, s'especifiquen els límits superiors i inferiors de les variables i les restriccions associades a cada element que s'han exposat a la secció 3.3. Tot seguit es formula la funció objectiu definida a la secció 3.2. Per últim, es configuren les opcions de l'optimitzador utilitzat (Gurobi) i es resol el problema plantejat.

```

1      %% Definició de variables de decisió
2
3      Predc      = sdpvar(hp,1); % Potència comprada a la xarxa elèctrica
4      Predv      = sdpvar(hp,1); % Potència venuda a la xarxa elèctrica
5      Y_red      = binvar(hp,1); % Compra (1) o ven (0) a la xarxa elèctrica
6      Pbatc      = sdpvar(hp,1); % Potència càrrega bateria
7      Pbatd      = sdpvar(hp,1); % Potència descàrrega bateria
8      Y_bat_cd    = binvar(hp,1); % Càrrega (1) o descàrrega (0) de la bateria
9      Pres       = sdpvar(hp,1); % Potència elèctrica resistència
10     Y_res       = binvar(hp,1); % Resistència encesa (1) o apagada (0)
11     Qacs        = sdpvar(hp,1); % Potència tèrmica acs
12     Qth         = sdpvar(hp,1); % Potència tèrmica th
13     Y_bc_acs_th = binvar(hp,1); % Bomba calor mode acs (1) o th (0)
14     Y_bc        = binvar(hp,1); % Bomba de calor encesa (1) o apagada (0)
15     Y_start_bc  = binvar(hp,1); % Arrancades bomba calor
16     SOC_bat     = sdpvar(hp+1,1); % SOC bateria
17     SOC_th      = sdpvar(hp+1,1); % SOC depòsit th
18     SOC_acs     = sdpvar(hp+1,1); % SOC depòsit acs
19     Pbc         = sdpvar(hp,1); % Potència elèctrica bomba calor
20
21     %% Restriccions
22
23     cons = [SOC_bat(1) == ini.SOC_bat];
24     cons = [cons, SOC_th(1) == ini.SOC_th];
25     cons = [cons, SOC_acs(1) == ini.SOC_acs];
26     cons = [cons, Y_start_bc(1) <= 1 - ini.bc];
27     cons = [cons, Y_bc(1) - Y_start_bc(1) <= ini.bc];
28     cons = [cons, -Y_bc + Y_start_bc <= 0];
29     cons = [cons, Y_bc(1:hp-1) + Y_start_bc(2:hp) <= 1];
30     cons = [cons, Y_bc(2:hp) - Y_bc(1:hp-1) - Y_start_bc(2:hp) <= 0];
31     cons = [cons, Pbatc <= param_bat.Pbatc_max.*Y_bat_cd];
32     cons = [cons, Pbatc >= param_bat.Pbatc_min.*Y_bat_cd];
33     cons = [cons, Pbatd <= param_bat.Pbatd_max.*(1-Y_bat_cd)];
34     cons = [cons, Pbatd >= param_bat.Pbatd_min.*(1-Y_bat_cd)];
35     cons = [cons, Qacs <= param_acs.Qacs_max.*Y_bc_acs_th];
36     cons = [cons, Qacs >= param_acs.Qacs_min.*Y_bc_acs_th];
37     cons = [cons, Qth <= param_th.Qth_max.*(1-Y_bc_acs_th)];
38     cons = [cons, Qth >= param_th.Qth_min.*(1-Y_bc_acs_th)];
39     cons = [cons, Predc <= param_grid.Predc_max.*Y_red];
40     cons = [cons, Predc >= param_grid.Predc_min.*Y_red];
41     cons = [cons, Predv <= param_grid.Predv_max.*(1-Y_red)];

```

```
42 cons = [cons, Predv >= param_grid.Predv_min.*(1-Y_red)];
43 cons = [cons, Pres <= param_acs.Pres_max.*Y_res];
44 cons = [cons, Pres >= param_acs.Pres_min.*Y_res];
45 cons = [cons, Pbc >= param_bc.Pbc_min.*Y_bc];
46 cons = [cons, Pbc <= param_bc.Pbc_max.*Y_bc];
47 cons = [cons, Pbc(1:hp) == bc(T_ext(1:hp),Timp_acs,Timp_th, Qacs(1:hp), ...
48 Qth(1:hp),param_bc)];
49 cons = [cons, SOC_bat(2:hp+1) == param_bat.rend_p.*SOC_bat(1:hp) ...
50 + T_s*param_bat.K.*(param_bat.rend_c.*Pbatc(1:hp) ...
51 - param_bat.rend_d.*Pbatd(1:hp))];
52 cons = [cons, SOC_th(2:hp+1) == rend_p_th.*SOC_th(1:hp) ...
53 + T_s*param_th.K.*(param_th.rend_c.*Qth(1:hp) ...
54 - param_th.rend_d.*Q_dem_th(1:hp))];
55 cons = [cons, SOC_acs(2:hp+1) == rend_p_acs.*SOC_acs(1:hp) ...
56 + T_s*param_acs.K.*(param_acs.rend_c.*(Qacs(1:hp)+rend_res.*Pres(1:hp)) ...
57 - param_acs.rend_d.*Q_dem_acs(1:hp))];
58 cons = [cons, param_bat.SOC_min <= SOC_bat, SOC_bat <= param_bat.SOC_max];
59 cons = [cons, param_acs.SOC_min <= SOC_acs, SOC_acs <= param_acs.SOC_max];
60 cons = [cons, param_th.SOC_min <= SOC_th, SOC_th <= param_th.SOC_max];
61 cons = [cons, Predc(1:hp) - Predv(1:hp) + Pbatd(1:hp) - Pbatc(1:hp) ...
62 - Pres(1:hp) - Pbc(1:hp) == - Psolar(1:hp) + P_dem_elec(1:hp)];
63 cons = [cons, SOC_bat(hp+1) == ini.SOC_bat];
64 cons = [cons, SOC_th(hp+1) == ini.SOC_th];
65 cons = [cons, SOC_acs(hp+1) == ini.SOC_acs];
66
67 %% Funció Objectiu
68
69 CostVariable = T_s.*(cvGridC*Predc - cvGridV * Predv);
70 CostStart = Csbcb*Y_start_bc;
71
72 Objectiu = CostVariable + CostStart;
73
74 %% Opcions de l'optimitzador
75
76 options = sdpsettings('solver','gurobi','verbose',1);
77
78 %% Resolució del problema
79
80 sol = optimize(cons, Objectiu, options);
```

Control Predictiu basat en Models

El control predictiu basat en models, conegut com a MPC per les seues sigles en anglés, és una estratègia de control que es basa en l'optimització en temps real. Aquest tipus de controlador incorpora un model dinàmic del sistema que utilitza per a realitzar prediccions. A partir de les entrades actuals del sistema, calcula com evolucionarà el mateix en un horitzó de predicció específic. Després, l'optimitzador utilitza aquest model i les seues prediccions per a plantejar un problema d'optimització. L'objectiu és determinar les entrades òptimes que s'han d'aplicar al procés real per a aconseguir el comportament desitjat del sistema. L'optimització es realitza d'acord amb els criteris definits en la funció de cost de l'optimitzador.

Existeixen dues configuracions principals per al MPC:

- Control en bucle obert: en aquesta configuració el control s'aplica en bucle obert durant tot l'horitzó de predicció. Aquesta optimització es duu a terme una única vegada després d'observar l'estat del sistema. Una vegada calculades les accions de control, s'apliquen d'acord amb l'horitzó definit prèviament. En aquest cas, no es realitza una nova optimització ni es mesura l'estat real del sistema fins que l'horitzó de predicció ha transcorregut completament. Fer ús d'aquesta configuració indueix a errors de predicció i modelatge més sovint, ja que la retroalimentació sols es produeix entre horitzons de predicció.
- Control amb horitzó mòbil: en aquest cas l'optimització es realitza en cada període de mostreig i sols s'aplica la primera de les accions de control calculades. Amb aquesta estratègia, es verifica l'estat del sistema, s'optimitza, s'apliquen les accions de control i es desplaça l'horitzó de predicció un període, creant un horitzó mòbil. El principal avantatge d'aquesta configuració és que el bucle de control es tanca amb una freqüència major, la qual cosa fa el control més robust enfront d'errors de predicció.

En el funcionament bàsic d'un control predictiu basat en models (MPC), dos paràmetres clau influeixen en el seu rendiment: el període de mostreig i l'horitzó de predicció. Un període de mostreig més curt permet mesurar les eixides del sistema amb major freqüència i respondre millor a les variacions en la demanda, augmentant així els graus de llibertat del control. D'altra banda, un horitzó de predicció més llarg proporciona a l'optimitzador més informació a llarg

termini, millorant potencialment la presa de decisions. No obstant això, les prediccions a molt llarg termini poden estar subjectes a major incertesa i, combinades amb períodes de mostreig baixos, poden generar problemes d'optimització complexos i costosos en termes computacionals. Per això, és crucial trobar un equilibri entre aquests dos paràmetres per a evitar càrregues computacionals inabastables i mantindre la viabilitat del control en temps real.

El MPC és una eina molt atractiva per a la gestió de microxarxes gràcies a una sèrie de característiques que presenta. Com que el MPC està basat en prediccions, resulta especialment útil per a sistemes que depenen en gran manera de prediccions de demanda i de producció d'energia amb fonts renovables.

En aquest capítol s'implementa, en primer lloc, un MPC amb la configuració de bucle obert. A continuació es realitza un breu estudi sobre el període de mostreig analitzant les prestacions del control. També s'afegeix l'horitzó mòbil amb un control de baix nivell, d'ara en avant LLC, basat en regles. A més, es substitueix aquest LLC per un MPC de baix nivell per millorar les prestacions del control.

4.1 MPC discretitzat a un minut. Cas de referència

A partir de la informació disponible, l'escenari ideal i de referència proposat implica un controlador MPC amb un horitzó de predicció d'un dia i un període de mostreig d'un minut ($h_p = 1440 \text{ min}$, $T_s = 1 \text{ min}$). La justificació de la selecció d'aquests paràmetres resideix en les característiques dels perfils de demanda disponibles, que s'ajusten a aquestes especificacions, i en els perfils horaris dels costos d'electricitat, que es coneixen amb un dia d'antelació per a les 24 hores següents. Ha de tindre's en compte que la longitud de l'horitzó de predicció és un factor crític que influeix en el rendiment del control implementat i va més enllà de l'abast d'aquest treball.

Quant als perfils de demanda, totes les proves i simulacions posteriors es realitzen per a cadascun dels dies típics definits per la norma VDI-4655. No obstant això, a causa de les limitacions d'extensió del document, en aquest informe només es presenten els senyals temporals corresponents a un dels dies típics. En concret, el dia seleccionat és ÜWB. Aquest dia representa un dia ennuvolat entre setmana durant una de les estacions de transició, siga primavera o tardor (vegeu-se la taula 2.2).

A més, per a garantir que les solucions produïdes pel MPC siguin econòmicament comparables en els diferents escenaris, s'imposen tres restriccions d'igualtat. Aquestes restriccions eviten variacions en l'estat de càrrega entre els instants inicial i final de l'horitzó de predicció, tal com es formula en l'equació 4.1. L'objectiu d'aquestes restriccions és evitar conflictes a l'hora d'avaluar econòmicament els estats de càrrega dels sistemes d'emmagatzematge, en particular per a la bateria. Això es deu a les fluctuacions horàries dels preus de l'electricitat, que fan impossible determinar amb precisió el valor residual.

$$\begin{aligned} SOC_1^{bat} &= SOC_p^{bat} \\ SOC_1^{acs} &= SOC_p^{acs} \\ SOC_1^{th} &= SOC_p^{th} \end{aligned} \tag{4.1}$$

Per a garantir que les accions de control inicials no es vegen influïdes per un nivell d'emmagatzematge nul, els valors inicials de l'estat de càrrega de la bateria i dels dipòsits es fixen en el 50 %. Aquests valors s'han seleccionat arbitràriament. Aquesta decisió pretén reproduir l'escenari en el qual el sistema de control podria activar-se en qualsevol moment, amb diferents nivells de càrrega ja presents.

La figura 4.1 presenta els gràfics que il·lustren les accions de control derivades pel MPC després de l'optimització del problema MILP, juntament amb els perfils de demanda elèctrica i tèrmica aplicats al sistema, i l'evolució de l'estat de càrrega tant de la bateria com dels acumuladors. Tots els gràfics d'aquesta naturalesa s'estructuren de la mateixa manera, on:

1. En la primera gràfica es representa el perfil de la demanda elèctrica instantània aplicada al sistema i la potència solar instantània produïda pel sistema.
2. En la segona gràfica es mostra en l'eix de l'esquerra la potència intercanviada amb la xarxa elèctrica, que correspon amb el senyal $P_k^{red} = P_k^{red,c} - P_k^{red,v}$, amb $k \in [1 \dots p]$. Quan el senyal és positiu implica que s'està comprant energia a la xarxa i quan és negativa que s'està venent. En l'eix de la dreta es mostra el perfil de preus horari tant de compra com de venda. Cal destacar com els períodes de la tarifa aplicada influeixen directament en les accions de compra d'electricitat a la xarxa.
3. En la tercera gràfica es representa en l'eix de l'esquerra l'evolució de l'estat de càrrega de la bateria. En l'eix de la dreta es mostra la potència de la bateria, que es correspon amb el senyal $P_k^{bat} = P_k^{bat,c} - P_k^{bat,d}$, amb $k \in [1 \dots p]$. Quan el senyal és positiu implica que la bateria s'està carregant i quan és negativa que s'està descarregant.
4. En la quarta gràfica es representa la potència elèctrica consumida per la bomba de calor i la potència tèrmica que produeix per als acumuladors.
5. En la quinta gràfica es representen les demandes tèrmiques instantànies: d'aigua calenta sanitària i de calefacció.
6. En la sexta gràfica es representa en l'eix de l'esquerra l'evolució de l'estat de càrrega del dipòsit d'aigua calenta sanitària. En l'eix de la dreta es mostra la potència tèrmica d'entrada al dipòsit: provinent de la bomba de calor Q_k^{acs} i de les resistències Q_k^{res} .
7. Per últim, en la setèima gràfica es representa en l'eix de l'esquerra l'evolució de l'estat de càrrega del dipòsit de calefacció. En l'eix de la dreta es mostra la potència tèrmica d'entrada al dipòsit provinent de la bomba de calor Q_k^{th} .

Tenint en compte l'evolució dels senyals del cas plantejat s'observa que:

- Durant les primeres hores del dia, des de les 0h fins a les 7h el sistema compra de la xarxa l'energia, fent servir també l'energia de la bateria perquè preveu carregar-la en moments en què hi haja un excedent d'energia o siga més barata importar-la de la xarxa.
- A partir de les 7h, amb l'increment de la irradiància solar, la generació fotovoltàica comença a augmentar i el sistema passa a utilitzar principalment aquesta energia per satisfer la demanda elèctrica de la casa, com es pot observar en la figura 4.1. En aquest moment, també es comença a carregar la bateria amb l'excedent d'energia generada, sempre que hi ha prou irradiància.

- Cap a les hores centrals del dia, aproximadament entre les 12h i les 16h, l'energia generada pels panells solars és màxima, permetent no només subministrar a la demanda elèctrica i tèrmica de la vivenda, sinó també carregar la bateria al màxim i, en alguns casos, exportar l'excedent a la xarxa elèctrica, tal com es reflecteix en la figura 4.1.
- Després de les 17h, a mesura que la generació fotovoltaïca disminueix, el sistema comença a descarregar la bateria per continuar alimentant les demandes. Aquesta estratègia permet retardar la necessitat de comprar energia de la xarxa fins a les últimes hores del dia.
- Finalment, quant al període de mostreig, atès que les demandes s'apliquen cada minut i les accions de control també es decideixen cada minut, s'observa que els senyals de potència imiten la forma dels perfils de demanda. Això és especialment evident en el cas de la demanda elèctrica, tant amb la bateria com amb la xarxa elèctrica. Això també es deu al fet que en el modelatge de la bateria i la xarxa no s'han definit dinàmiques que impliquen punts de funcionament òptims. Un altre aspecte relacionat és que el senyal de la bomba de calor mostra un comportament bastant variable, passant de valors màxims a valors mínims en molt poc temps. Aquesta variabilitat també és conseqüència del període de mostreig, ja que el controlador pot prendre nombroses decisions en poc temps, i la solució a aquesta mena de problemes sol trobar-se en els límits de les restriccions. Per a mitigar aquest fenomen, es poden afegir restriccions a la variació de les accions de control, o es pot refinar més el model de bomba de calor per a incitar al controlador a estabilitzar-se en punts de funcionament més favorables.

El valor de la funció objectiu després de realitzar l'optimització és 0,7735 €.

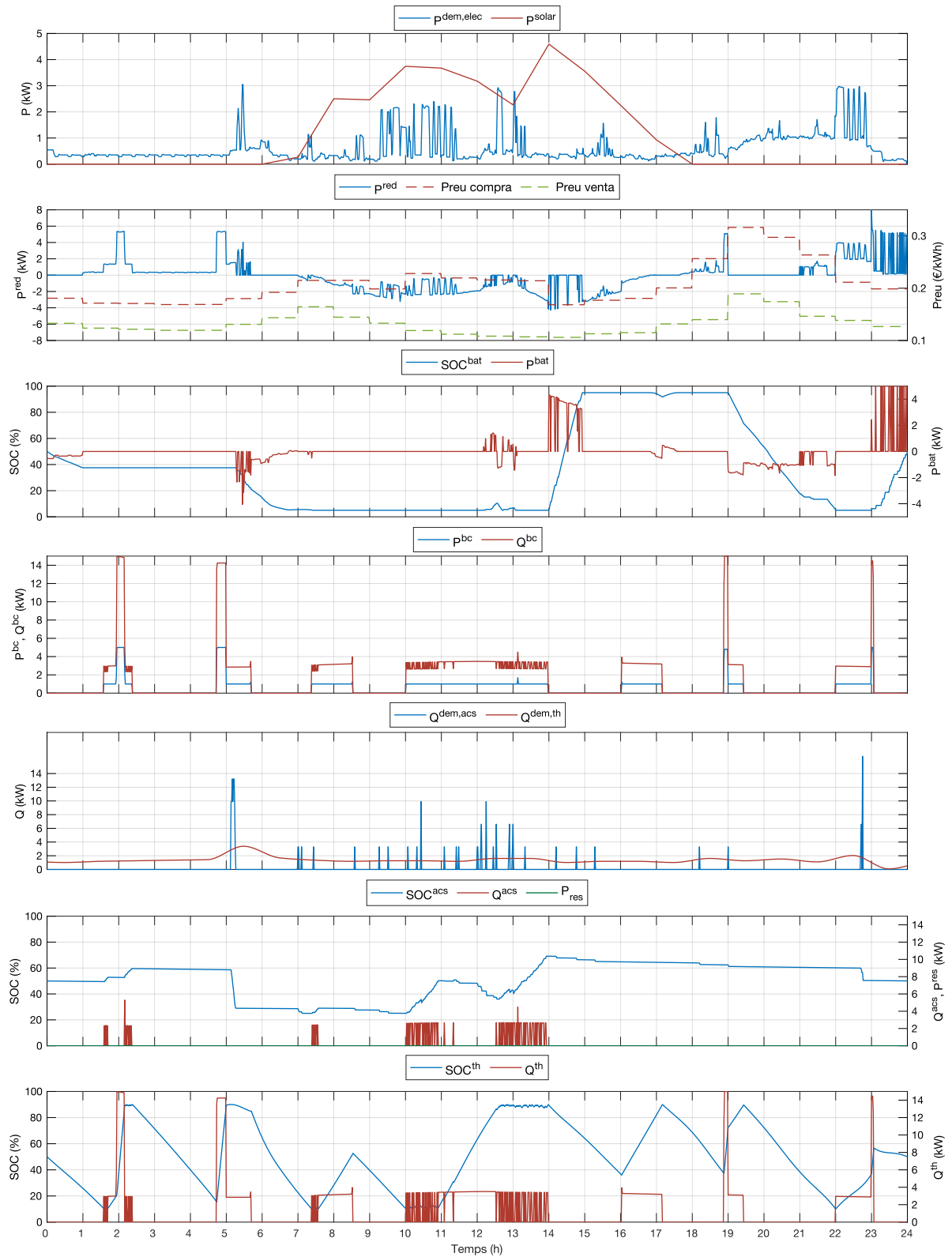


Figura 4.1: Senyals del sistema dia ÜWB, MPC $T_s = 1$ min.

4.2 Estudi del període de mostreig T_s

Fins ara s'ha posat de manifest la complexitat de resoldre problemes de programació lineal d'enters mixtos a gran escala. Els considerables recursos necessaris per a resoldre aquests problemes en un termini raonable fan inviable la seua aplicació pràctica en escenaris de control. Per a reduir la complexitat del problema d'optimització que ha de resoldre el MPC, s'augmenta el període de mostreig per a discretitzar el model tecno-econòmic del sistema, mantenint un horitzó de predicció de 24 hores. Aquest enfocament permet al controlador manejar la mateixa informació a llarg termini, però provoca una pèrdua d'informació entre períodes, ja que les decisions del MPC s'apliquen a intervals més espaiats.

Després dels resultats obtinguts en la secció anterior, es considera realitzar un estudi del període del mostreig amb la intenció de reduir la complexitat del problema de programació lineal d'enters mixtos que s'ha de resoldre.

La selecció del període de mostreig perquè el MPC determine les accions de control requereix una anàlisi. En primer lloc, augmentar el període de mostreig mantenint l'horitzó de predicció redueix les dimensions del problema d'optimització i, en conseqüència, el cost computacional. En segon lloc, a mesura que augmenta el període de mostreig, el controlador perd informació per a la presa de decisions, la qual cosa probablement degrada el valor de la funció objectiu. Per tant, l'objectiu és triar un període de mostreig que reduïska prou la complexitat del problema per a permetre la seua aplicació en temps real sense comprometre significativament el rendiment econòmic del sistema.

Per a seleccionar el període de mostreig adequat per al MPC, es proposa un estudi amb diversos períodes de mostreig. Atés que els perfils de preus de l'electricitat procedents de la xarxa són horaris, el conjunt de períodes de mostreig possibles es limita als divisors de 60, com es detalla en l'equació 4.2.

$$t_s \in \mathbb{N} = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 19, 12, 15, 20, 30, 60\} \text{ min} \quad (4.2)$$

A més, per a avaluar el rendiment de cada període de discretització en el MPC es calcula la variació percentual del cost operatiu ($C.O.$) en relació amb el MPC amb un període de mostreig d'un minut, com es detalla en l'equació 4.3.

$$\Delta C.O. (\%) = \frac{C.O. (T_s = t_s) - C.O. (T_s = 1 \text{ min})}{C.O. (T_s = 1 \text{ min})} \quad (4.3)$$

L'estudi realitzat sobre el període de mostreig T_s ha demostrat un impacte significatiu en la complexitat computacional del sistema i en els costos d'operació. Com es pot observar en la figura 4.2, a mesura que incrementem el període de mostreig, el cost computacional disminueix considerablement, la qual cosa resulta en una millora en l'eficiència de la resolució de problemes MILP. No obstant això, aquesta reducció en la complexitat també ve acompanyada d'un augment moderat en els costos d'operació del sistema.

A partir dels resultats obtinguts, s'evidencia que l'elecció d'un període de mostreig més llarg pot ser beneficiosa en termes de temps de càlcul, permetent l'aplicació del controlador MPC en temps real. No obstant això, aquest increment del període de mostreig provoca una pèrdua

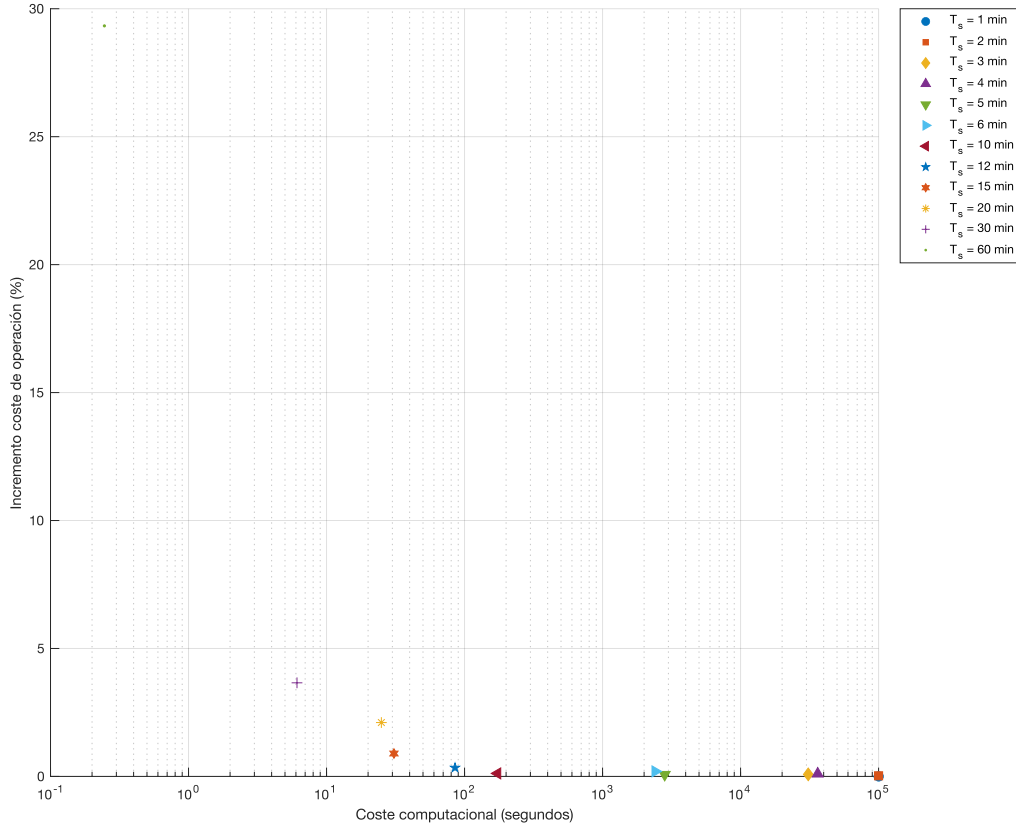


Figura 4.2: Cost computacional enfront d'increments de cost d'operaci3n pel dia ÜWB i per períodes de mostreig.

d'informaci3n en la presa de decisions del controlador, la qual cosa es tradueix en un increment en els costos d'operaci3n. És crucial, per tant, trobar un equilibri entre la reducci3n de la complexitat computacional i el manteniment d'un rendiment econ3mic acceptable del sistema.

Amb base en aquests resultats, un valor de T_s de 15 o 20 minuts podria representar un compromís adequat entre l'eficiència computacional i els costos operatius, cosa que permet una viabilitat en la implementaci3n pràctica del sistema MPC.

Aquest enfocament redueix en certa manera la capacitat de resposta del sistema i provoca una pèrdua d'informaci3n a curt termini entre períodes. Els perfils de demanda utilitzats pel MPC són ara senyals fets una mitjana que conserven el consum acumulat al final del dia. En els gràfics corresponents als perfils de demanda es mostren els perfils mostrejats a intervals d'un minut, que representen els perfils reals del procés, i els perfils filtrats utilitzats pel model MPC. És evident que el filtratge dels perfils provoca la pèrdua dels pics de consum que es produeixen entre intervals de control, la qual cosa també repercuteix en la resta de senyals del sistema. No obstant això, s'observa que el consum acumulat dels perfils de demanda coincideix per a tots dos períodes de mostreig, la qual cosa garanteix que la informaci3n a llarg termini rebuda pel controlador continua sent coherent.

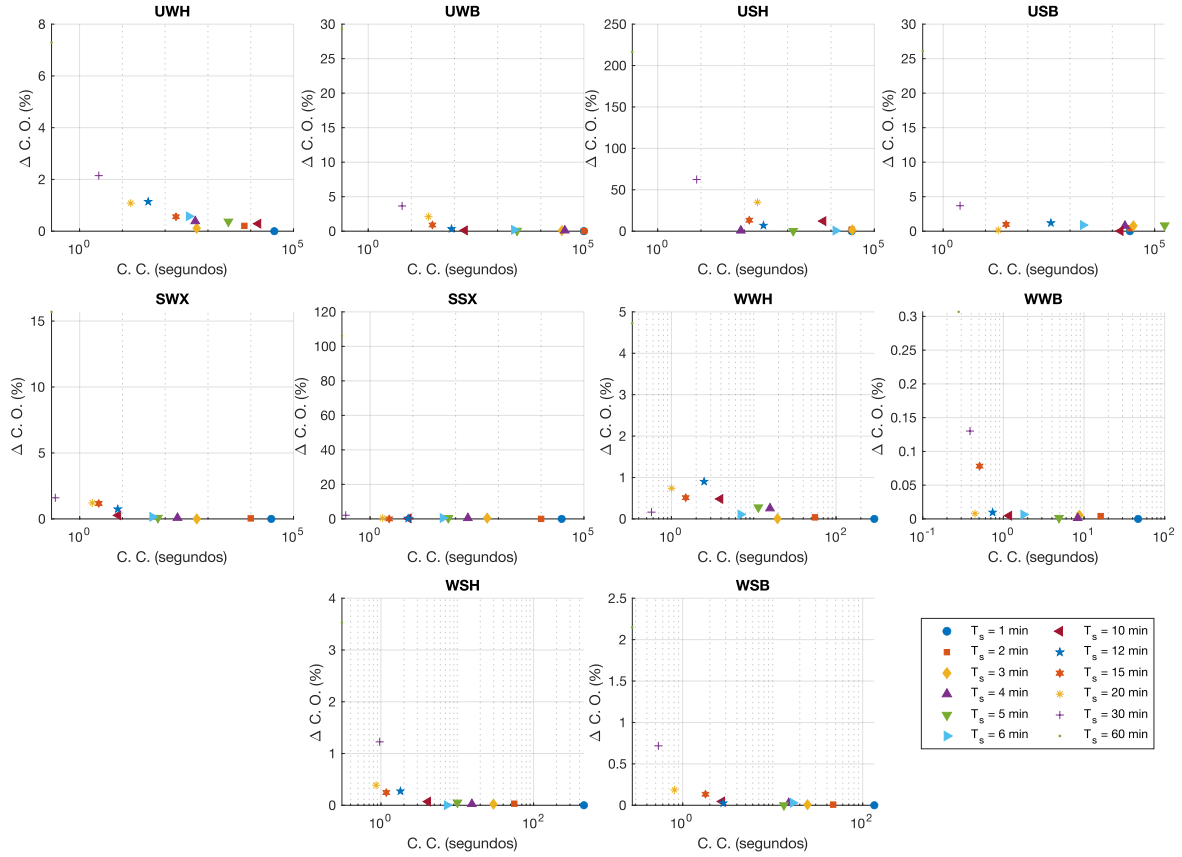


Figura 4.3: Cost computacional enfront d'incrementos de cost d'operació per dies típics i per períodes de mostreig.

El fet que el MPC aplique accions de control cada vint minuts no implica que la demanda del sistema siga també cada vint minuts. Basant-se en la informació disponible, se suposa que la demanda aplicada a un sistema real correspondria als perfils de demanda minut a minut, encara que la demanda real pot variar cada pocs segons. Aquesta discrepància entre les accions de control proporcionades pel MPC i els senyals en temps real del sistema, que s'apliquen minut a minut, fa necessària la implementació d'un sistema de control de nivell inferior. Aquest sistema de control de nivell inferior ajustarà les accions proporcionades pel MPC perquè coincidisquen amb els perfils de demanda reals.

4.2.1 Horitzó mòbil

Després d'haver realitzat un estudi del període de mostreig, es proposa la tècnica de l'horitzó mòbil amb l'objectiu de millorar la robustesa del MPC. Aquesta tècnica augmenta la freqüència de les optimitzacions en cada instant de control. Durant cada període de mostreig, el MPC mesura les eixides del sistema, realitza l'optimització corresponent i aplica la primera acció de control recentment calculada. Posteriorment, desplaça l'horitzó un període de mostreig, incorporant nova informació a la predicció, i repeteix el procés. El principal avantatge de l'enfocament d'horitzó mòbil és que augmenta el nombre de vegades que es tanca el bucle i es mesura l'estat del sistema. A més, permet incorporar mecanismes de correcció de les prediccions a mesura que

avança l'horitzó mòbil. Arrel d'utilitzar un període de mostreig major a un minut, és necessari fer servir un control de baix nivell que siga capaç d'esmenar les carències del MPC. A més, el control de baix nivell rep noves ordres en cada període, la qual cosa millora la capacitat de resposta global del sistema i redueix el poder de decisió d'aquest controlador secundari.

Atés que l'optimització es realitza ara en cada instant de control, no pot garantir-se que la restricció d'igualtat del SOC en els instants inicial i final de la primera optimització produïska els mateixos resultats que l'aplicació de la mateixa restricció en l'última optimització del dia. Per tant, s'estableix una nova metodologia per a comparar diferents escenaris independentment del SOC final i sense utilitzar les restriccions de l'equació 4.1. Aquesta metodologia consisteix en evaluar la variació d'energia a la bateria i als acumuladors considerant que l'energia s'obté a partir de la xarxa elèctrica a un preu igual a la mitja del perfil horari. Per als acumuladors es considerarà que la bomba de calor treballa amb un *COP* igual a la mitjana diària.

Un altre aspecte important és que, com les optimitzacions es realitzen successivament, el MPC ha de replantejar el problema d'optimització en cada instant de control basant-se en l'estat actual del sistema. Aquest aspecte és crític per a les restriccions operatives de la bomba de calor, on l'optimitzador necessita informació sobre la bomba de calor si ha estat funcionant o apagada per a formular el problema MILP amb els estats inicials apropiats i assegurar que es compleixen les restriccions en les diferents optimitzacions.

4.3 Control de baix nivell bàsic

La primera solució triada per a esmenar les deficiències d'un MPC amb períodes de mostreig superiors a un minut és un control de baix nivell basat en regles, d'ara endavant denominat LLC. L'objectiu d'aquest control és aplicar les directives òptimes del MPC minut a minut, garantint el compliment de les restriccions operatives del sistema. Pot haver-hi casos en els quals, entre dos intervals de control MPC donats, els perfils de demanda presenten pics significatius que l'optimitzador no detecte a causa del filtratge de les demandes. Si els nivells d'estat de càrrega de la bateria i dels acumuladors estan prop dels seus límits operatius, aquests pics de demanda reals poden fer que el sistema supere aquests límits, augmentant el risc que l'optimitzador no trobe una solució viable en el següent interval de control. Per tant, el LLC ha de garantir, en la mesura que siga possible, que aquests límits no se sobrepassen en cap moment.

En primer lloc, es proposa una estratègia de control directa, en la qual les discrepàncies entre les demandes reals i les accions de control del MPC són compensades per la xarxa elèctrica en última instància. L'inconvenient de dependre directament d'aquestes fonts d'energia primària, que poden considerar-se il·limitades, és el seu cost econòmic associat. Aquesta dependència pot deteriorar els índexs econòmics, especialment si l'electricitat es compra durant les hores punta. A més, compensar aquestes discrepàncies amb la xarxa elèctrica pot fer necessari un augment de la potència contractada pel fet que els pics superen el límit de 8 kW definit en el model.

La figura 4.4 mostra un diagrama de flux del LLC. Aquest control de nivell inferior executa els següents passos cada minut:

1. Rep les accions de control calculades pel MPC del nivell superior.

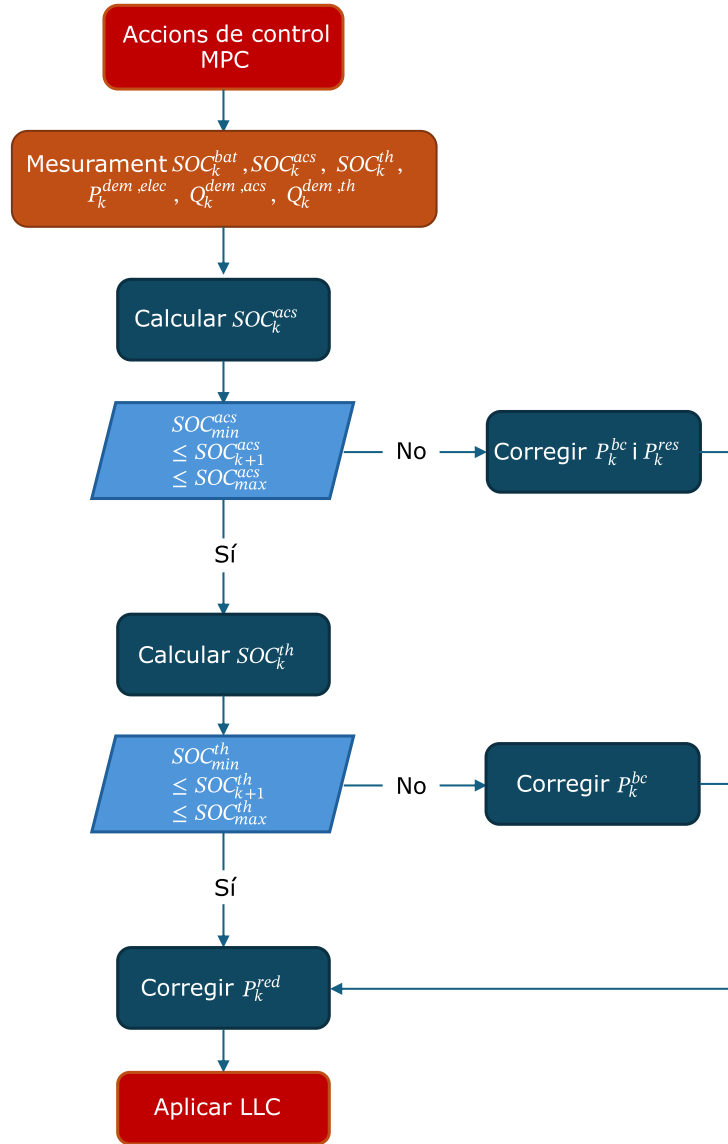


Figura 4.4: Diagrama de flux de control de baix nivell LLC.

2. Realitza mesuraments de les eixides i variables d'estat del sistema, en concret els SOC de les unitats d'emmagatzematge i les demandes elèctriques i tèrmiques reals.
3. Calcula prèviament l'estat de càrrega de l'acumulador d'aigua calenta sanitària per a l'instant següent en funció de la demanda tèrmica real. En aquest control es dóna prioritat a satisfer la demanda d'aigua calenta sanitària front a la de calefacció.
4. Comprova si el SOC_k^{acs} calculat està dins dels límits operatius:
 - En cas afirmatiu, no es modifiquen les variables que afecten l'acumulador d'aigua calenta sanitària.
 - En cas negatiu, es corregeix la desviació mitjançant la bomba de calor o la resistència. Si se supera el SOC màxim, s'apaga la resistència en cas d'estar encesa i es limita la

bomba de calor a la seua potència mínima. Si el SOC obtingut és inferior al SOC mínim, s'augmenta la potència de la bomba de calor a la seua potència màxima i s'encén la resistència amb la finalitat d'augmentar al màxim el SOC .

5. En el cas que el depòsit d'ACS no necessite cap acció, es calcula l'estat de càrrega de l'acumulador de calefacció per a l'instant següent en funció de la demanda tèrmica real.
6. Comprova si el SOC_k^{th} calculat està dins dels límits operatius:
 - En cas afirmatiu, no es modifiquen les variables que afecten l'acumulador de calefacció.
 - En cas negatiu, es corregeix la desviació mitjançant la bomba de calor. Si se supera el SOC màxim, es limita la bomba de calor a la seua potència mínima. Si el SOC obtingut és inferior al SOC mínim, s'augmenta la potència de la bomba de calor a la seua potència màxima amb la finalitat d'augmentar al màxim el SOC .
7. Una vegada abordat l'aspecte tèrmic, es corregeix l'aspecte elèctric. Les desviacions entre períodes causades per la demanda real són absorbides per la xarxa elèctrica. Si la demanda real és major en eixe moment, s'importa més electricitat per a equilibrar la càrrega elèctrica. Al revés, si la demanda és menor, s'importa menys energia.
8. Finalment, les accions de control són aplicades pel LLC.

La figura 4.5 mostra el resultat d'aplicar el LLC a l'escenari MPC amb $T_s = 20$ min amb prediccions perfectes. D'acord amb el disseny del LLC, els senyals on apareixen diferències respecte als comandos del MPC són els senyals de la xarxa elèctrica i de la caldera.

Respecte a la xarxa elèctrica, s'observa que s'ha traslladat el soroll característic dels pics del perfil de demanda real, que havia desaparegut a causa del filtrat. Aquest filtrat també s'observa en la demanda d'aigua calenta sanitària.

Una vegada triada la configuració que s'utilitzarà en el MPC, és hora de provar el seu rendiment en condicions més adverses. En aquest punt, s'introdueixen errors en les prediccions de demanda que rep el controlador per a avaluar la seua robustesa enfront d'aquestes incerteses.

Els errors de predicció poden introduir-se en el model de diverses maneres. Una opció és intercanviar els perfils de demanda de dos dies típics diferents. Un enfocament més conservador consisteix a utilitzar els intervals de consum acumulat d'un dia típic per a escalar els perfils i diferenciar les prediccions de les demandes reals aplicades en el procés. Per a simplificar la realització de l'estudi de robustesa, es decideix introduir errors de predicció escalant els perfils de demanda. Aquest mètode permet la inserció controlada d'errors de predicció. El MPC rebrà com a prediccions els perfils de demanda del dia corresponent, mentre que el procés real aplicarà demandes amb un consum superior o inferior (5%).

Les figures 4.6 i 4.7 mostren el resultat d'aplicar el LLC a l'escenari MPC amb $T_s = 20$ min amb un consum 5 % inferior i 5 % superior a les prediccions del dia, respectivament.

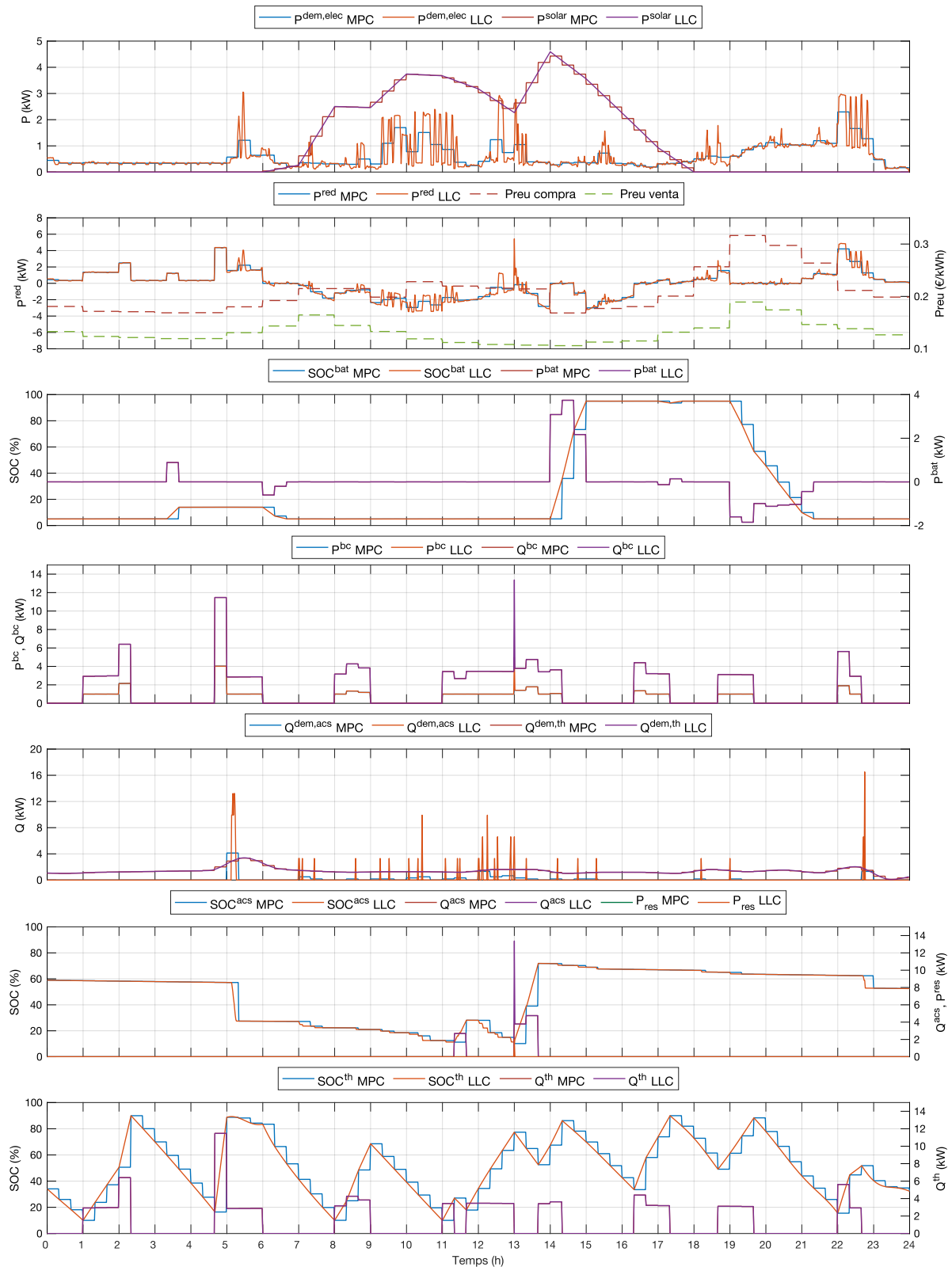


Figura 4.5: Senyals del sistema dia ÜWB, MPC superior $T_s = 20$ min, LLC inferior $T_s = 1$ min. Prediccions perfectes.

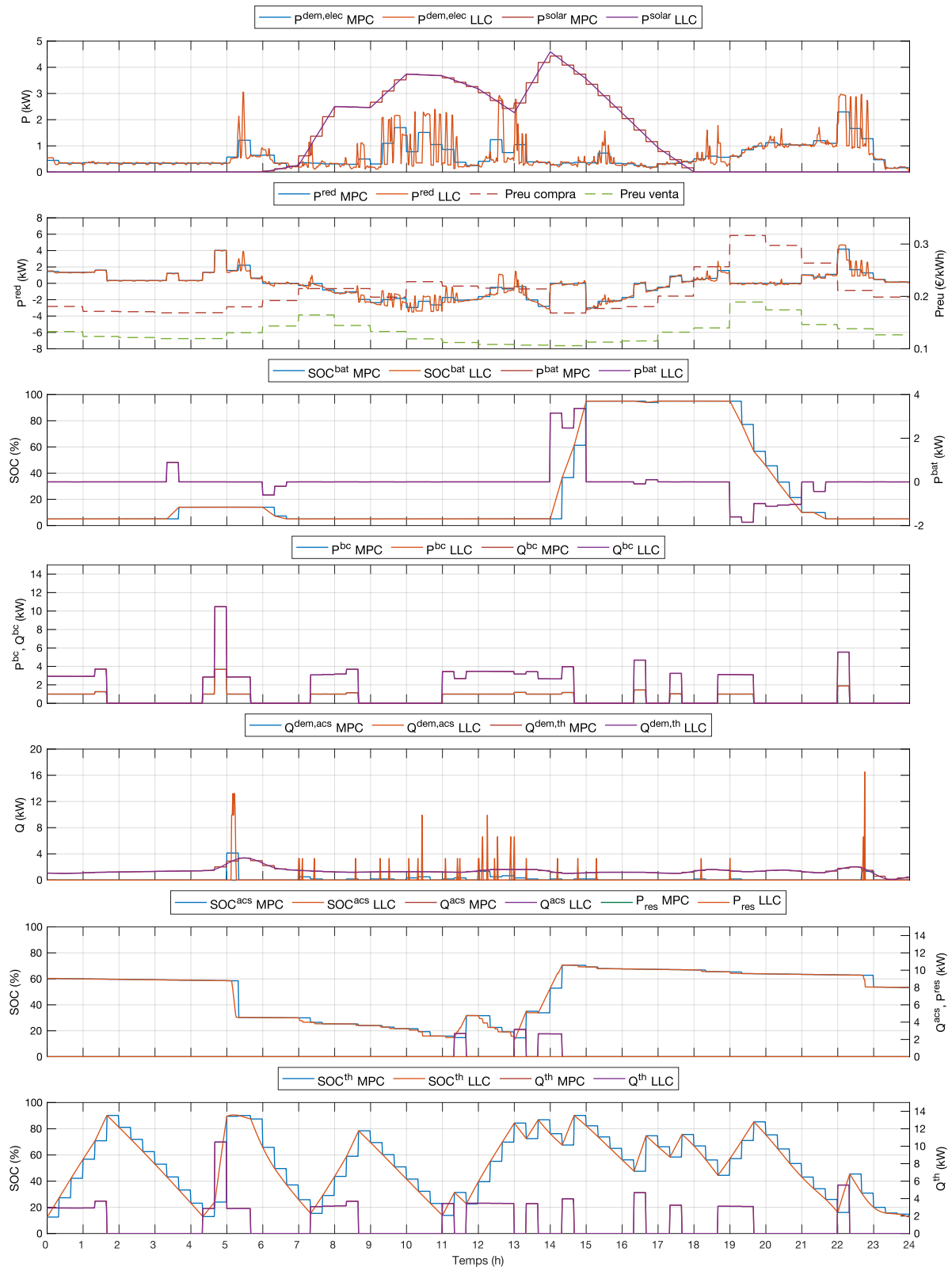


Figura 4.6: Senyals del sistema dia ÜWB, MPC superior $T_s = 20$ min, LLC inferior $T_s = 1$ min. Consum 5% inferior a les prediccions.

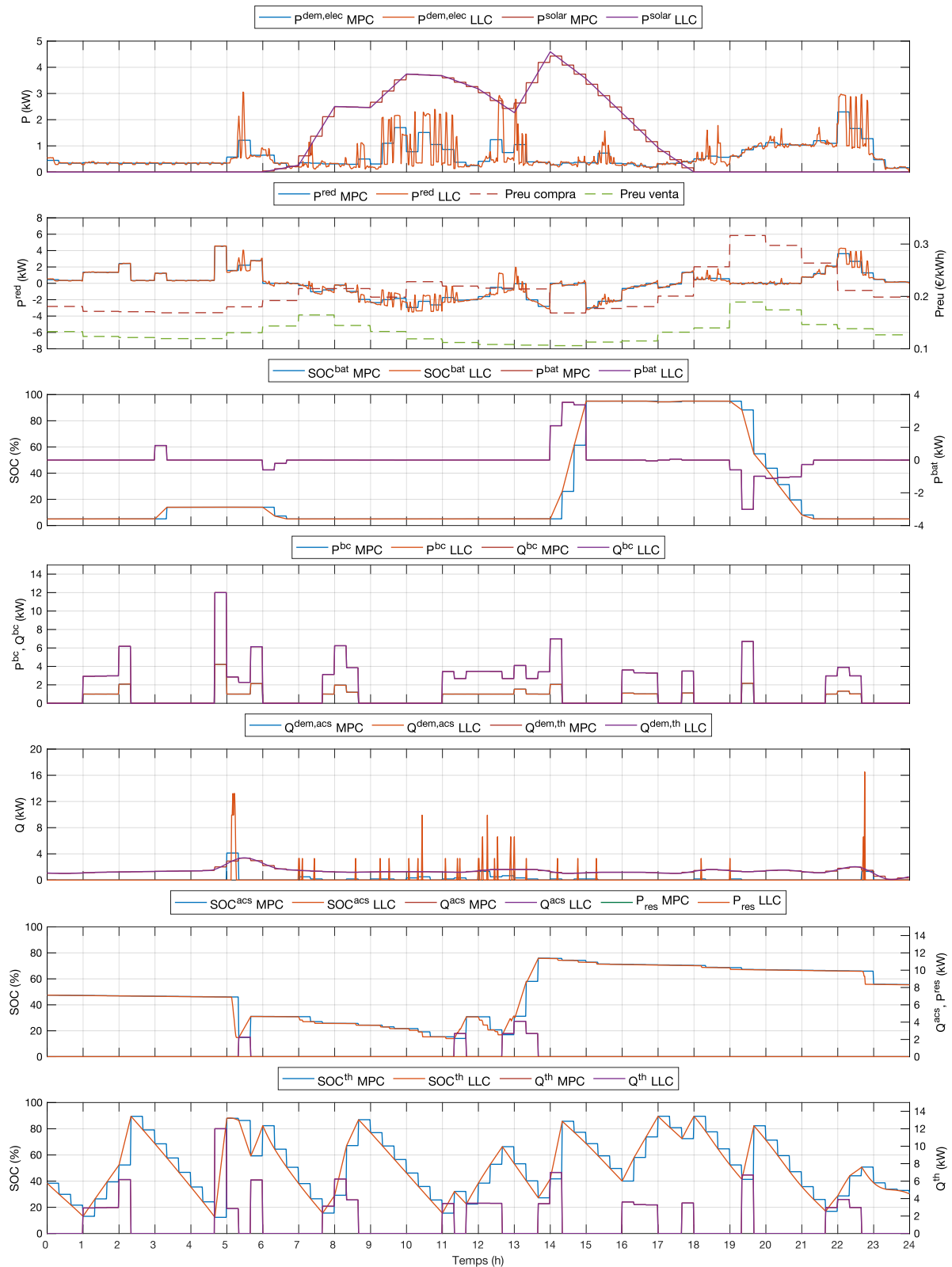


Figura 4.7: Senyals del sistema dia ÜWB, MPC superior $T_s = 20$ min, LLC inferior $T_s = 1$ min. Consum 5% superior a les prediccions.

4.4 MPC de baix nivell

En aquest punt es proposa una manera diferent per al control de baix nivell i que consisteix en un MPC. Aquest tindrà un període de mostreig $T_s = 1$ min i horitzó de predicció d'una hora. La finalitat d'aquest controlador és tractar de millorar les accions del MPC superior, que estan donades cada 20 min, ajustant-les amb els pics de demandes tant elèctriques com tèrmiques. A més, la intenció és que siga el més paregut possible al cas de referència amb $T_s = 1$ min i horitzó de predicció de 24 hores.

Com ja s'ha mencionat al començament d'aquest capítol, el control predictiu basat en models és un tipus de controlador que es basa en les prediccions per obtenir els senyals del sistema dins de l'horitzó de predicció. El període de mostreig i l'horitzó de predicció en un MPC de baix nivell són paràmetres crucials que determinen el seu rendiment i eficàcia. En aquest cas, s'ha establert un període de mostreig d'1 minut, la qual cosa és adequat per a captar variacions ràpides en les demandes elèctriques i tèrmiques. Aquest període de mostreig permet que el controlador ajusti les seues decisions amb alta freqüència, assegurant que les variacions en la demanda es manegen de manera oportuna.

L'horitzó de predicció d'una hora proporciona al controlador una visió suficient del futur pròxim per a fer ajustos efectius en temps real. No obstant això, aquest horitzó és considerablement més curt que l'utilitzat en el MPC de nivell superior, que es basa en un horitzó de predicció de 24 hores. Aquest enfocament a curt termini permet una major adaptabilitat, especialment en la correcció de desviacions que puguen sorgir entre les prediccions del MPC superior i la demanda real observada.

Aquest controlador de baix nivell resulta més complex i té un cost computacional major degut a que contempla més situacions i té més graus de llibertat que el control de baix nivell basat en regles LLC. A diferència d'aquest, el MPC de baix nivell no sols segueix directrius predefinides sinó que constantment optimitza les accions basant-se en les prediccions actualitzades de la demanda. Aquest enfocament és particularment beneficiós en escenaris on les condicions d'operació poden variar ràpidament i de manera imprevisible. La capacitat del MPC per a considerar múltiples escenaris i realitzar ajustos en temps real ho fa més robust enfront d'incerteses i errors en les prediccions de demanda.

A més, el cost computacional associat amb el MPC de baix nivell és major que el del LLC a causa de la necessitat de resoldre un problema d'optimització en cada interval de temps. No obstant això, aquest cost addicional es justifica per la millora en el rendiment del sistema, ja que el MPC pot minimitzar els costos operatius i mantindre les restriccions del sistema més efectivament que un controlador basat en regles simples.

De la mateixa manera que a la secció 4.3, es proposen diversos escenaris de prediccions per a comprovar la robustesa del MPC de baix nivell. Els resultats mostren que el MPC de baix nivell és capaç d'adaptar-se a variacions en la demanda del 5 % per damunt o per davall de les prediccions inicials, mantenint el sistema dins dels seus límits operatius. Aquest nivell d'adaptabilitat és crucial en entorns on les condicions de demanda poden ser volàtils.

Per a garantir que el sistema funcione de manera eficient fins i tot en situacions adverses, el MPC de baix nivell ajusta les accions del MPC superior, assegurant que les desviacions de la demanda no comprometen l'estabilitat del sistema. Aquest ajust constant és fonamental per a

evitar sobrecàrregues o utilitzacions per baix de la capacitat del sistema, que podrien resultar en costos addicionals o en un rendiment subòptim.

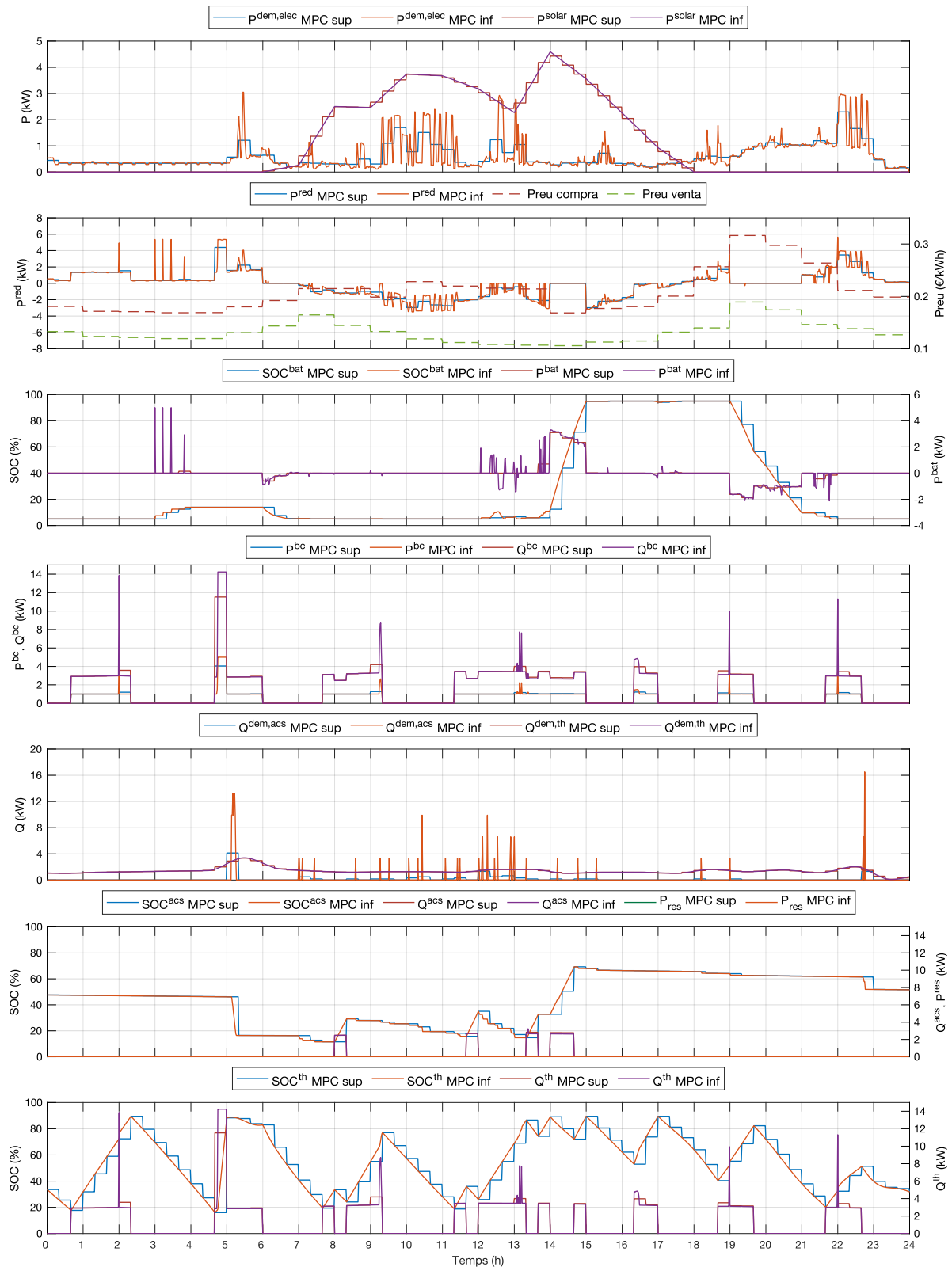


Figura 4.8: Senyals del sistema dia ÜWB, MPC superior $T_s = 20$ min, MPC inferior $T_s = 1$ min. Prediccions perfectes.

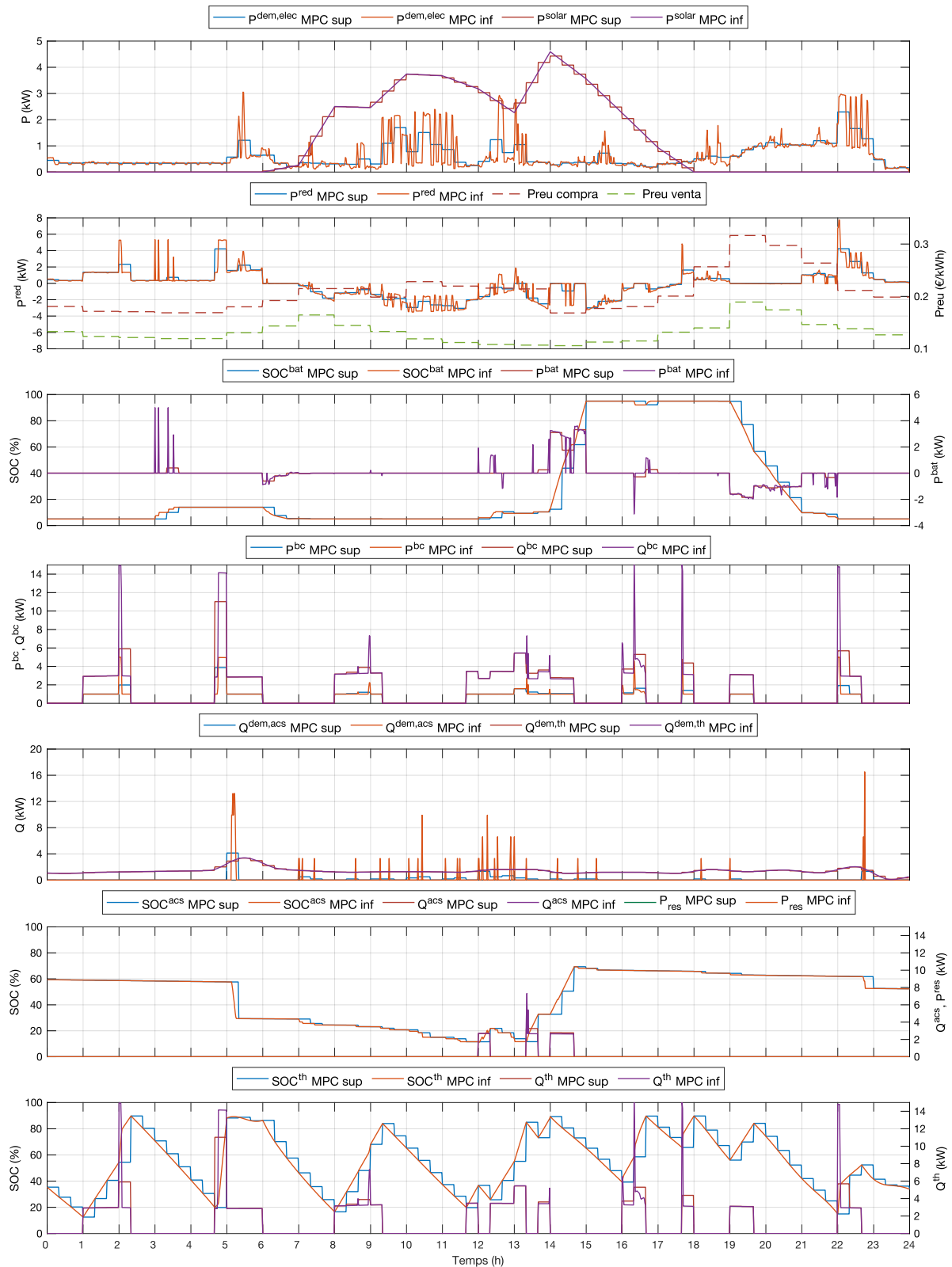


Figura 4.9: Senyals del sistema dia ÜWB, MPC superior $T_s = 20$ min, MPC inferior $T_s = 1$ min. Consum 5% inferior a les prediccions.

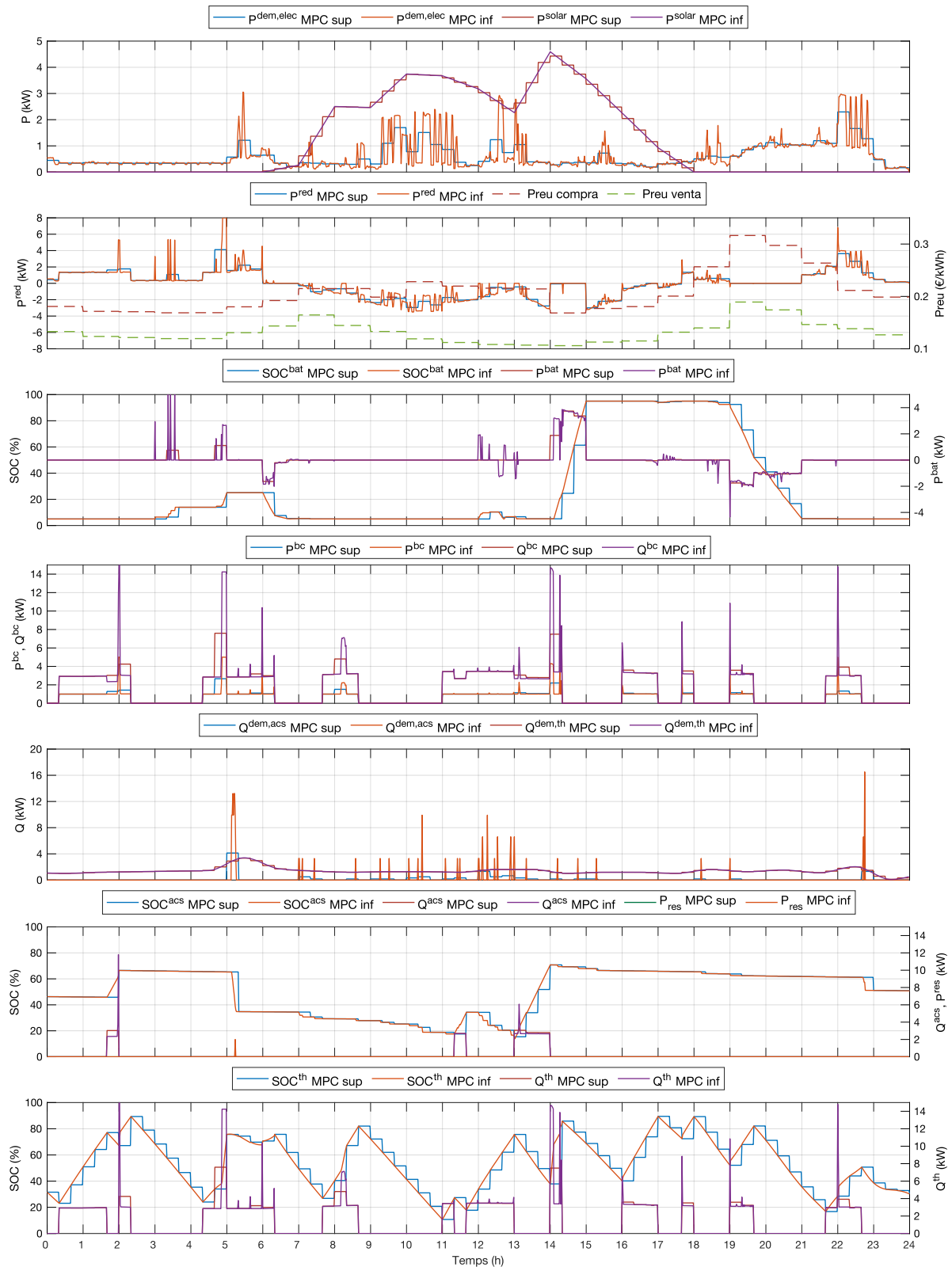


Figura 4.10: Senyals del sistema dia ÜWB, MPC superior $T_s = 20$ min, MPC inferior $T_s = 1$ min. Consum 5 % superior a les prediccions.

4.5 Simulació d'any tipus

Per a finalitzar aquest capítol es planteja el càlcul dels costos d'operació anuals del sistema estudiat a partir de la definició de l'any descrita a la subsecció 2.2.10. La manera d'obtenir els costos d'operació és la descrita a la secció 3.2, sense tenir en compte la diferència entre la càrrega dels emmagatzematges al principi i al final del dia.

Per a aprofitar al màxim la tècnica de l'horitzó mòbil, la simulació de cada dia depèn de les previsions del dia següent. D'aquesta manera s'otorguen més graus de llibertat al controlador amb l'objectiu de reduir al màxim els costos d'operació.

Es proposen els següents escenaris:

- Control del sistema basat en regles sencilles sense ús de cap control òptim MPC, d'ara en avant RS.
- Control MPC del sistema amb horitzó mòbil, $T_s = 20$ min i control de baix nivell LLC amb prediccions perfectes, d'ara en avant MPC/LLC PP.
- Control MPC del sistema amb horitzó mòbil, $T_s = 20$ min i control de baix nivell LLC amb consum 5 % superior a les prediccions, d'ara en avant MPC/LLC PI.
- Control MPC del sistema amb horitzó mòbil, $T_s = 20$ min i control de baix nivell LLC amb consum 5 % inferior a les prediccions, d'ara en avant MPC/LLC PS.
- Control MPC del sistema amb horitzó mòbil, $T_s = 20$ min i control de baix nivell MPC amb prediccions perfectes, d'ara en avant MPC/MPC PP.
- Control MPC del sistema amb horitzó mòbil, $T_s = 20$ min i control de baix nivell MPC amb consum 5 % superior a les prediccions, d'ara en avant MPC/MPC PI.
- Control MPC del sistema amb horitzó mòbil, $T_s = 20$ min i control de baix nivell MPC amb consum 5 % inferior a les prediccions, d'ara en avant MPC/MPC PS.

Els resultats d'aquestes simulacions permeten una comparació directa entre les estratègies de control. Un de les troballes més significatives és la capacitat del MPC per a ajustar les seues decisions en temps real, reduint significativament els costos operatius en comparació amb el control basat en regles simples. Específicament, l'escenari MPC/MPC PP va mostrar la major eficiència, minimitzant els costos d'operació en aprofitar la capacitat del MPC per a optimitzar contínuament les accions del sistema, fins i tot enfront de demandes fluctuants.

No obstant això, quan s'introdueixen errors en les prediccions (escenaris PI i PS), els costos d'operació augmenten lleugerament, la qual cosa ressalta la importància de la precisió en les prediccions per a l'èxit del MPC. Malgrat això, els escenaris que utilitzen MPC per a tots dos nivells de control (MPC/MPC) continuen superant en rendiment a l'enfocament basat en regles simples, demostrant la robustesa del MPC enfront d'incerteses en la demanda.

A la figura 4.11 es pot observar l'evolució dels costos anuals acumulats d'operació del sistema fent servir els diferents tipus de control mencionats amb anterioritat.

L'anàlisi de la figura mostra que el control inferior basat en MPC millora el cost acumulat i total en comparació amb el basat en regles (LLC). D'aquesta manera, el control MPC inferior demostra una millor gestió dels recursos energètics i una reducció significativa dels costos d'operació.

La combinació dels dos MPC aprofita el millor de cada estratègia, assegurant que el sistema siga capaç d'anticipar-se a la demanda mentre respon ràpidament als canvis puntuals, resultant en una gestió energètica òptima durant tot l'any.

A la taula 4.1 es poden observar els costos anuals totals d'operació del sistema per a cadascuna de les estratègies simulades.

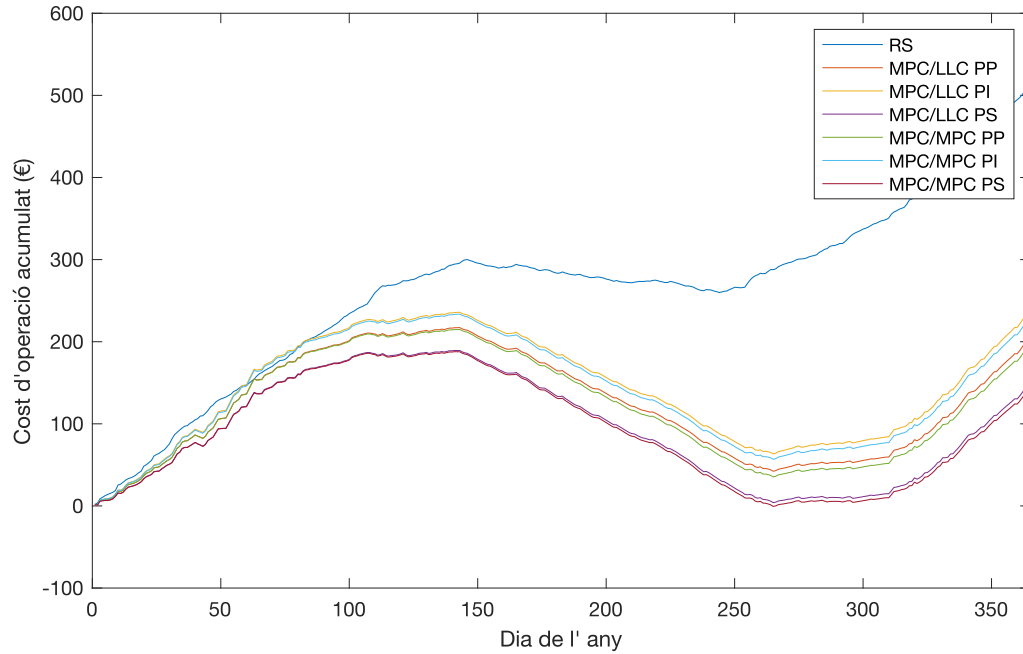


Figura 4.11: Evolució dels costos d'operació del sistema per a tots els controls.

Estratègia	Cost
RS	511,08 €
MPC/LLC PP	203,33 €
MPC/LLC PI	236,38 €
MPC/LLC PS	147,11 €
MPC/MPC PP	194,21 €
MPC/MPC PI	227,22 €
MPC/MPC PS	140,79 €

Taula 4.1: Cost anual total d'operació del sistema per tipus d'estratègia

Capítol 5

Conclusions

En este capítol es presenten les conclusions derivades de la realització d'este treball. S'avalua si s'han aconseguit els objectius establits en el Capítol 1 del present document i s'exposen altres reflexions que l'autor ha considerat pertinents.

Inicialment, es va establir com a objectiu el desenvolupament d'un algorisme per a la gestió combinada d'energia elèctrica i tèrmica en vivendes unifamiliars. D'acord amb les directrius plantejades en este treball, es conclou que:

1. S'ha desenvolupat un model tecno-econòmic per a sistema basat en plaques fotovoltaïques, bomba de calor i emmagatzematge amb les següents característiques distintives:
 - S'han emprat perfils de demanda d'alta resolució, corresponents a l'estàndard alemany VDI-4655.
 - El model desenvolupat és d'alt nivell, similar als models utilitzats en les capes de gestió. A partir dels punts d'operació de cada subsistema, el model proporciona informació econòmica sobre els costos operatius del sistema.
 - Quant a la dinàmica modelada, esta és mínima, limitant-se als emmagatzematges.
 - El model és capaç de predir el règim permanent dels diferents subsistemes que componen el sistema, amb un ajust adequat dels seus paràmetres.
2. S'ha plantejat un problema d'optimització MILP utilitzant el model tecno-econòmic del sistema, destacant-se els següents aspectes:
 - S'ha formulat i resolt un problema d'optimització mitjançant programació lineal mixta-sencera (MILP), que ha permès gestionar de manera eficient els recursos energètics de l'habitatge. Aquest problema es va plantejar amb l'objectiu de minimitzar els costos operatius del sistema, considerant tant la variabilitat en la demanda com en la producció d'energia.

- La implementació d'un MPC per al control a nivell superior i un MPC/LLC per al control a nivell inferior ha permès una gestió més dinàmica i precisa de l'energia, ajustant les decisions de control en temps real per a respondre a les fluctuacions en la demanda.

Durant el desenvolupament del treball, s'han identificat diverses àrees que destaquen pel seu potencial impacte en el rendiment del sistema:

1. Robustesa del control predictiu:

- Els resultats obtinguts demostren que el sistema de control predictiu és robust enfront d'errors en les prediccions de demanda. Encara que es van introduir variacions del 5 % per damunt i per davall de les prediccions inicials, el MPC va ser capaç d'adaptar-se i mantindre els costos operatius baix control, la qual cosa subratlla la capacitat del sistema per a gestionar incerteses en la demanda.
- La comparació entre diferents configuracions del control (MPC/MPC vs. MPC/LLC) ha revelat que l'ús de MPC tant en el nivell superior com en l'inferior ofereix la millor optimització de costos, especialment en escenaris amb prediccions perfectes. No obstant això, la combinació de MPC en el nivell superior i LLC en el nivell inferior continua sent una alternativa eficient en termes de cost computacional.

2. Impacte del període de mostreig:

- L'estudi del període de mostreig ha mostrat que reduir el temps entre decisions de control (T_s) millora la capacitat del sistema per a seguir de prop les variacions en la demanda. Tanmateix, això també incrementa el cost computacional. Per tant, existeix un balanç necessari entre la precisió del control i els recursos computacionals disponibles, suggerint que futures investigacions haurien d'enfocar-se a optimitzar aquest balanç.

3. Perspectives de millora contínua:

- Encara que el sistema ha demostrat ser eficaç en la seua configuració actual, existeixen oportunitats per a la seua millora. La inclusió de noves fonts de dades, com a prediccions meteorològiques més precises o la integració amb sistemes de gestió de demanda més sofisticats, podria millorar encara més l'eficiència energètica i reduir els costos operatius.
- A més, explorar l'ús d'algorismes de *machine learning* per a millorar les prediccions de demanda podria ser una via prometedora per a augmentar la precisió del control predictiu, permetent una resposta encara més adaptativa i proactiva del sistema.

En resum, el treball ha aconseguit complir amb els objectius plantejats, desenvolupant un sistema de gestió d'energia que no sols optimitza els costos operatius, sinó que també proporciona un marc robust i adaptable per a la gestió de recursos energètics en habitatges unifamiliars. La metodologia i els resultats obtinguts obrin la porta a futures investigacions i desenvolupaments que podrien portar a una major sostenibilitat i eficiència en l'ús d'energies renovables a nivell domèstic.

Capítol 6

Treballs futurs

Aquest treball ha posat les bases per al desenvolupament d'un sistema de gestió d'energia eficient per a habitatges unifamiliars, basat en la combinació de plaques fotovoltaïques i sistemes d'aerotèrmia. No obstant això, encara hi ha moltes àrees per a explorar i millorar. En aquest capítol, es proposen diverses línies de treball futures que podrien millorar l'eficàcia i la robustesa del sistema desenvolupat.

Una de les àrees més prometedores per a treballs futurs és la millora del control predictiu basat en models (MPC). Tot i que el MPC actual utilitza prediccions de la demanda i l'oferta energètica basades en perfils estàndard, el desenvolupament de models de predicció més precisos, que incorporen tècniques d'intel·ligència artificial com l'aprenentatge automàtic, podria millorar significativament el rendiment del sistema. Aquests models podrien aprendre dels patrons històrics de consum i de la meteorologia en temps real, ajustant les prediccions de manera dinàmica i millorant l'eficiència operativa del sistema.

A més, es podria investigar l'ús d'horitzons de predicció més llargs combinats amb tècniques d'optimització en temps real per equilibrar la necessitat de respostes ràpides amb la precisió de les prediccions a llarg termini. Això implicaria desenvolupar algoritmes d'optimització híbrids que combinen MPC amb tècniques heurístiques o evolutives per a millorar la capacitat del sistema per a gestionar situacions complexes i incertes.

Una altra àrea d'interés és la integració del sistema amb tecnologies de gestió de la demanda. Aquesta integració permetria al sistema no només respondre de manera eficient a les variacions en la generació i demanda energètica, sinó també participar activament en la reducció de càrrega durant els períodes de punta, contribuint a la flexibilitat i estabilitat de la xarxa elèctrica.

Es podrien desenvolupar protocols de comunicació amb la xarxa elèctrica per permetre que el sistema responga automàticament a senyals de preu de l'energia o a requisits de reducció de consum. Això no només augmentaria la rendibilitat del sistema per als propietaris de les llars, sinó que també milloraria la sostenibilitat general del sistema elèctric.

Un altre treball futur amb gran potencial és la implementació del sistema de gestió d'energia en temps real en una plataforma embeguda. Fins ara, el sistema s'ha desenvolupat i simulat en

un entorn de programari d'alt nivell com Matlab, utilitzant tècniques d'optimització robustes però computacionalment intensives. Per portar aquest sistema a un entorn operatiu real, seria necessari adaptar i optimitzar els algorismes perquè funcionen eficientment en un maquinari amb recursos limitats, com ara microcontroladors o sistemes de processament embeguts.

Aquesta implementació implicaria la selecció d'una plataforma de maquinari adequada, com ara Raspberry Pi, Arduino, o altres plataformes embegudes més especialitzades que puguin gestionar les tasques de control predictiu en temps real. A més, caldria realitzar optimitzacions del codi per reduir el temps de càlcul i l'ús de memòria, mantenint al mateix temps la precisió i l'eficàcia del control predictiu.

Aquest treball també inclouria la integració amb els sensors i actuadors necessaris per a la monitorització i control dels diferents components del sistema, com ara les plaques fotovoltaiques, la bomba de calor, i les bateries. A més, la implementació en temps real permetria provar i validar el sistema en condicions reals, identificant possibles millores addicionals que podrien no haver estat evidents en l'entorn de simulació.

La implementació en una plataforma embeguda obriria la porta a l'ús pràctic del sistema en habitatges reals, permetent que la tecnologia desenvolupada en aquest projecte es convertís en una solució comercial viable per a la gestió eficient de l'energia en llars.

En resum, hi ha un ampli ventall d'oportunitats per millorar i expandir el sistema de gestió energètica desenvolupat en aquest treball. La investigació en aquestes àrees no només contribuirà a l'eficiència i sostenibilitat del sistema, sinó que també podrà donar resposta a les noves necessitats i reptes del sector energètic en un futur pròxim.

Part II

Pressupost

Capítol 7

Pressupost

7.1 Introducció

El pressupost d'aquest treball es planteja com el càlcul del cost del desenvolupament del sistema de gestió de l'energia. L'autor d'aquest treball es considera com un enginyer industrial.

7.2 Mà d'obra

Per a elaborar aquest treball s'ha necessitat un enginyer industrial i un Dr. En la taula 7.1 es recullen els salaris bruts anuals i els salaris bruts per hora.

Treballador	Salari brut anual	Salari brut per hora
Enginyer Industrial	45 000 €	25,57 €
Dr. Enginyer Industrial	65 000 €	36,93 €

Taula 7.1: Quadre de preus de mà d'obra.

En la taula 7.2 es mostra el quadre de mà d'obra del pressupos on es recull la dedicació horària de cadascun dels treballadors.

Codi	Unitat	Descripció	Rendiment	Preu	Import
MO. 1	h.	Enginyer Industrial	390	25,57	9971,59
MO. 2	h.	Dr. Enginyer Industrial	15	36,93	553,98
				Total	10 525,57 €

Taula 7.2: Quadre de mà d'obra.

7.3 Materials

Per a dur a terme aquest treball s'han fet servir principalment equips informàtics. Aquests estan considerats en el projecte amb un període d'amortització de quatre anys. A la tabla 7.3 es recull els materials utilitzats amb els seus respectius costos.

Codi	Unitat	Descripció	Rendiment	Preu	Import
MT. 1	h.	PC Apple Mac Mini M2	655	0,14	91,70
MT. 2	h.	MATLAB	550	0,28	154,00
MT. 3	u.	Perfils de demanda VDI-4655	1	137,10	137,10
				Total	382,80 €

Taula 7.3: Quadre de materials.

Com s'evidencia, l'ús d'equips informàtics supera el compromís horari de l'Enginyer Industrial. Esta discrepància sorgix perquè les hores registrades inclouen també temps dedicat a simulacions i resolució de problemes d'optimització. Durant estes activitats, l'enginyer estava ocupat en tasques alternatives.

7.4 Unitats d'obra. Preus descompostos

A continuació es mostren les unitats d'obra amb els preus descompostos que s'han fet servir per a l'elaboració d'aquest treball.

Núm Ordre	Descripció de la unitat d'obra			
U.O.1	U. INVESTIGACIÓ BIBLIOGRÀFICA			
	Investigació bibliogràfica sobre sistemes de gestió d'energia basats en plaques fotovoltaiques, models tecno-econòmics, optimització de problemes MILP, control predictiu basats en models i obtenció de perfils de demanda.			
	COSTOS DIRECTES			
Rendiment	Descripció	Preu (€)	Import (€)	
25	h. Enginyer Industrial	25,57	639,20	
25	h. PC Apple Mac Mini M2	0,14	3,50	
	2% Costos directes complementaris		12,85	
TOTAL PREU UNITAT D'OBRA			655,56 €	

Taula 7.4: Unitat d'obra núm. 1: Investigació bibliogràfica.

Núm Ordre	Descripció de la unitat d'obra		
U.O.2	U. MODELATGE DEL SISTEMA		
	Modelatge dels diferents elements que componen el sistema i plantejament del problema MILP		
COSTOS DIRECTES			
Rendiment	Descripció	Preu (€)	Import (€)
120	h. Enginyer Industrial	25,57	3068,18
300	h. PC Apple Mac Mini M2	0,14	42,00
300	h. MATLAB	0,28	84,00
1	u. Perfils de demanda VDI-4655	137,10	137,10
	2 % Costos directes complementaris		66,63
TOTAL PREU UNITAT D'OBRA			3397,91 €

Taula 7.5: Unitat d'obra núm. 2: Modelatge del sistema.

Núm Ordre	Descripció de la unitat d'obra		
U.O.3	U. DESENVOLUPAMENT DE L'ALGORISME DE CONTROL		
	Desenvolupament de l'algorisme de control que governa el sistema. Inclou el desenvolupament del MPC tant d'alt nivell com baix, anàlisi de la influència del període de mostreig, implementació de l'horitzó mòbil i anàlisi de robustesa.		
COSTOS DIRECTES			
Rendiment	Descripció	Preu (€)	Import (€)
150	h. Enginyer Industrial	25,57	3835,23
250	h. PC Apple Mac Mini M2	0,14	35,00
250	h. MATLAB	0,28	70,00
	2% Costos directes complementaris		78,80
TOTAL PREU UNITAT D'OBRA			4019,03 €

Taula 7.6: Unitat d'obra núm. 3: Desenvolupament de l'algorisme de control.

Núm Ordre	Descripció de la unitat d'obra		
U.O.4	U. DOCUMENTACIÓ DEL TREBALL REALITZAT		
	Documentació de tot el procés de desenvolupament del sistema de gestió d'energia, desde el modelatge fins l'obtenció de resultats.		
COSTOS DIRECTES			
Rendiment	Descripció	Preu (€)	Import (€)
80	h. Enginyer Industrial	25,57	383,52
80	h. PC Apple Mac Mini M2	0,14	11,20
	2 % Costos directes complementaris		41,13
TOTAL PREU UNITAT D'OBRA			2097,79 €

Taula 7.7: Unitat d'obra núm. 4: Documentació del treball realitzat.

Núm Ordre	Descripció de la unitat d'obra		
U.O.5	U. REUNIONS SEMANALS DE SEGUIMENT DEL TREBALL		
	Reunions setmanals de seguiment amb el tutor per orientar i corregir el treball.		
COSTOS DIRECTES			
Rendiment	Descripció	Preu (€)	Import (€)
15	h. Enginyer Industrial	25,57	383,52
15	h. Dr. Enginyer Industrial	36,93	553,98
	2 % Costos directes complementaris		18,75
TOTAL PREU UNITAT D'OBRA			956,25 €

Taula 7.8: Unitat d'obra núm. 5: Documentació del treball realitzat.

7.5 Unitats d'obra. Preus unitaris

A continuació es mostren les unitats d'obra amb els preus unitaris.

U.O.1	U. INVESTIGACIÓ BIBLIOGRÀFICA	655,56 €
U.O.2	U. MODELATGE DEL SISTEMA	3397,91 €
U.O.3	U. DESENVOLUPAMENT DE L'ALGORISME DE CONTROL	4019,03 €
U.O.4	U. DOCUMENTACIÓ DEL TREBALL REALITZAT	2097,79 €
U.O.5	U. REUNIONS SEMANALS DE SEGUIMENT DEL TREBALL	956,25 €

Taula 7.9: Preus unitaris de les unitats d'obra.

7.6 Pressupost

Investigació bibliogràfica	655,56 €
Modelatge del sistema	3397,91 €
Desenvolupament de l'algorisme de control	4019,03 €
Documentació del treball realitzat	2097,79 €
Reunions setmanals de seguiment del treball	956,25 €
Pressupost d'execució material	11 126,54 €
Gastos generals (13 %)	1446,45 €
Benefici industrial (6 %)	667,59 €
Pressupost d'execució per contracta	13 240,58 €
I.V.A. (21 %)	2780,52 €
Pressupost base de licitació	16 021,10 €

Taula 7.10: Pressupost.

El present pressupost base de licitació puja a l'expressada quantitat de:

SETZE MIL VINT-I-Ú EUROS AMB DEU CÈNTIMS

A València, a 15 de Juliol de 2024.

Bibliografia

- Beith, Robert et al. (2011). “Small and Micro Combined Heat and Power (CHP) Systems: Advanced Design, Performance, Materials and Applications”. A: ed. de Robert Beith. Woodhead Publishing Series in Energy. Oxford: Woodhead Publishing, pàg. xiii-xvi. ISBN: 978-1-84569-795-2. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-1-84569-795-2.50027-1> (v. la pàg. 11).
- Daikin (2006). *Technical Data: ERYQ005-007A / EKHBH007A / EKHBX007A / EKSWW150-300 / EEDE06-9*. Daikin Europe N.V. Zandvoordestraat 300, B - 8400 Ostend, Belgium (v. la pàg. 14).
- Dehghan, Maziar et al. (2021). “Techno-economic perspectives of the temperature management of photovoltaic (PV) power plants: A case-study in Iran”. A: *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 45, pàg. 101133. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101133> (v. la pàg. 21).
- Fernández Camacho, Eduardo i C. Bordons (2004). *Model predictive control*. 2nd ed. Advanced textbooks in control and signal processing. London [etc: Springer. ISBN: 1852336943 (v. la pàg. 8).
- Gurobi Optimization (16 de juny de 2024). *Gurobi Optimizer*. URL: <https://www.gurobi.com> (v. les pàg. 6, 32).
- Hidalgo Rodríguez, Diego I. i Johanna M.A. Myrzik (2017). “Economic Model Predictive Control for Optimal Operation of Home Microgrid with Photovoltaic-Combined Heat and Power Storage Systems”. A: *IFAC-PapersOnLine* 50.1. 20th IFAC World Congress, pàg. 10027-10032. ISSN: 2405-8963. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.2039> (v. les pàg. 15, 18, 22).
- Matlab (16 de juny de 2024). *MATLAB: Matemáticas. Gráficas. Programación*. URL: <https://es.mathworks.com/products/matlab.html> (v. les pàg. 6, 32).
- National Renewable Energy Laboratory (6 de juny de 2024). *National Solar Radiation Database*. URL: <https://nsrdb.nrel.gov> (v. la pàg. 21).

Red Eléctrica España (16 de juny de 2024). URL: `{https://www.esios.ree.es/es/analisis}` (v. la pàg. 17).

Romero Rodríguez, Laura et al. (2016). “Analysis of the economic feasibility and reduction of a building’s energy consumption and emissions when integrating hybrid solar thermal/PV/micro-CHP systems”. A: *Applied Energy* 165, pàg. 828-838. DOI: `https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.080` (v. la pàg. 22).

Tormos Juan, Pilar i Antonio Lova Ruiz (2003). *Investigación operativa para ingenieros*. Valencia: Editorial UPV. ISBN: 978-84-9705-430-0 (v. les pàg. 9, 27).

VDI (2008). *VDI-4655: Reference Load Profiles of Single-Family and Multi-Family Houses for the Use of CHP Systems*. Directriz. VDI Asociación de Ingenieros Alemanes. Dusseldorf (v. les pàg. 22, 23).

Verhelst, Clara et al. (2012). “Multi-objective optimal control of an air-to-water heat pump for residential heating”. A: *Building Simulation* 5.3, pàg. 281-291. DOI: `10.1007/s12273-012-0061-z` (v. la pàg. 13).

Williams, H. P. (2013). *Model building in mathematical programming*. 5th ed. Chichester [etc: John Wiley & Sons. ISBN: 1-299-18870-2 (v. la pàg. 8).

Yalmip (16 de juny de 2024). *A toolbox for modeling and optimization in MATLAB*. URL: `{https://yalmip.github.io}` (v. les pàg. 6, 32).