

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN
UNIVERSIDAD DEL PAÍS VASCO UPV/EHU**

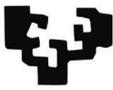
TRABAJO FIN DE MÁSTER

***OPTIMIZACIÓN EN EL DIMENSIONAMIENTO DE
UNA INSTALACIÓN DE MÓDULOS PV PARA EL
AUTOCONSUMO DE UNA COMUNIDAD
ENERGÉTICA LOCAL DE UNA ZONA RURAL***

**Estudiante
Director
Curso académico**

*Reguera, Machín, Adrián
Martín, Escudero, Koldobika
2021/2022*

Bilbao, 23, junio, 2022



Resumen

Las comunidades energéticas locales (CEL) son un nuevo modo de generar, usar y gestionar la energía a nivel local a través de la cooperación de diferentes agentes (ciudadanía, administración local y pymes). Cada vez son más entidades que se acogen a este tipo de comunidades puesto que ofrecen la posibilidad de autogenerar gran parte de la energía que consumen los diferentes sectores a través de instalaciones de energías renovables de una manera limpia y eficiente. Concretamente, La Directiva 2012/27/UE, relativa a la eficiencia energética, indica que los edificios representan el 40 % del consumo de energía final de la Unión Europea, por ello estas comunidades son una gran medida para la reducción del consumo de energía y el uso de energía procedente de fuentes renovables en el sector de la edificación son importantes para reducir la dependencia energética de la Unión Europea y las emisiones de gases de efecto invernadero.

La metodología llevada a cabo en este trabajo se ha establecido en tres grandes bloques con el objetivo principal de optimizar al máximo el porcentaje de autoconsumo de las entidades de forman parte de la comunidad. En primer lugar, se ha diseñado y dimensionado una instalación solar fotovoltaica encargada de la generación de la energía eléctrica necesaria en base al consumo de los miembros para el posterior autoconsumo. En segundo lugar, se han analizado tres medidas que sean capaces de optimizar la propia comunidad o comunidades que se puedan implantar en un futuro. Finalmente, se ha realizado una evaluación económica de la comunidad con las medidas seleccionadas para la comunidad.

Los resultados que se han obtenido en este estudio se pueden diferenciar en resultados energéticos y económicos. Desde el punto de vista energético, el logro más significativo muestra que, a través de un coeficiente de reparto justo y eficiente en la presente comunidad se ha logrado un porcentaje de autoconsumo del 48%, y además se ha llegado a la conclusión que la tecnología eficiente y de buena calidad para comunidades futuras pueden ofrecer un ahorro hasta el 64%. Desde el punto de vista económico, el tiempo de retorno simple (TRS) de la instalación oscila entre 1 y 3 años, sin la implantación de las baterías de almacenamiento eléctrico.

Laburpena

Energia komunitate lokalak (CEL) tokiko energia kudeatzeko, erabiltzeko eta sortzeko era berriari dagokio, agente deberdinen kooperazioaren bitartez (biztanleria, administrazio lokala edota pymes). Geroz eta erakunde gehiago biltzen dira komunitate hauetara, energia berriztagarrien instalazio diseberdinek sortzen duten energia gehiena, modu efiziente eta garbi batean, autokontsumorako zuzentzen dutelako. Zehazki, 2012/27/UE Direktibak, efizientzia energetikoari dagokiona, eraikinek Europar Batasunaren energia finalaren kontsumoaren %40-a adierazten du, eta arrazoi honengatik, komunitate hauek energia kontsumoa gutxitzeko eta edifikazio sektorean iturri berriztagarrietatik datorren energia bultzeko neurri bat da, energiaren menpekotasuna Europar Batasunean eta berotegi-efektuaren gasen igorpenak gutxitzeko.

Lan honetan jarraitu den metodologia hiru bloketan finkatu da, komunitateen parte diren entitateen autokontsumoaren ehunekoak ahalik eta gehien optimizatzeko helburu nagusiarekin. Lehenik eta behin, eguzki-instalazio fotoboltaiko bat diseinatu eta dimentsionatu da, komunitateko kideen autokontsumoan oinarritu dena, ondoren autokontsumorako beharrezkoa den energia elektrikoa sortzeaz arduratuko dena. Bestetik, etorkizunean ezarri daitezkeen komunitate edo komunitateak optimizatzeko gai diren hiru neurri aztertu dira. Azkenik, komunitatearen balorazio ekonomikoa egin da komunitatearentzako aukeratutako neurriekin.



Ikerketa honetan lortutako emaitzak energia eta emaitza ekonomikoetan bereiz daitezke. Energiaren ikuspuntutik, lorpen esanguratsuenak erakusten du, gaur egungo erkidegoan banaketa-koefiziente justu eta eraginkor baten bidez, %48ko autokontsumoaren ehunekoa lortu dela, eta, gainera, ondorioztatu da teknologia eraginkorra dela. Etorkizuneko erkidegoentzako kalitate onekoak %64rainoko aurrezpena eskain dezake. Ekonomiaren ikuspuntutik, instalazioaren itzulera (SRT) 1 eta 3 urte bitartekoa da, biltegiatze elektrikoko bateriarik ezarri gabe.

Abstract

Local energy communities (LECs) are a new way of generating, using and managing energy at a local level through the cooperation of different agents (citizens, local administration and SMEs). More and more entities are joining this type of communities since they offer the possibility of self-generating a large part of the energy consumed by the different sectors through renewable energy installations in a clean and efficient way. Specifically, Directive 2012/27/EU, regarding energy efficiency, indicates that buildings represent 40% of the final energy consumption of the European Union, therefore these communities are a great measure for the reduction of energy consumption and the use of energy from renewable sources in the building sector are important to reduce the energy dependence of the European Union and greenhouse gas emissions.

The methodology carried out in this work has been established in three main blocks with the main objective of optimizing to the maximum the percentage of self-consumption of the entities that are part of the community. Firstly, a solar photovoltaic installation has been designed and dimensioned to generate the necessary electrical energy based on the consumption of the members for subsequent self-consumption. Secondly, three measures capable of optimizing the community or communities that could be implemented in the future were analyzed. Finally, an economic evaluation of the community has been carried out with the measures selected for the community.

The results obtained in this study can be differentiated into energy and economic results. From the energy point of view, the most significant achievement shows that, through a fair and efficient distribution coefficient in the present community, a self-consumption percentage of 48% has been achieved, and it has also been concluded that efficient and good quality technology for future communities can offer savings of up to 64%. From the economic point of view, the simple payback time (TRS) of the installation ranges between 1 and 3 years, without the implementation of electric storage batteries.

Palabras clave: Instalación solar fotovoltaica, comunidad energética local, coeficiente de reparto, eficiencia energética.



Índice

1	Memoria.....	10
1.1	Introducción	10
1.2	Contexto	11
1.3	Objeto y alcance	13
1.4	Beneficios que aporta el trabajo	14
1.4.1	Beneficio medioambiental	14
1.4.2	Beneficio socioeconómico.....	15
1.5	Análisis del estado del arte.....	16
1.5.1	Introducción	16
1.5.2	Interés de los módulos fotovoltaicos	18
1.5.3	Estado del arte.....	20
1.5.4	Tendencias del mercado	22
1.5.5	Evolución del precio del mercado eléctrico	23
1.5.6	Almacenamiento de la energía fotovoltaica	23
1.6	Descripción de la solución propuesta.....	26
1.6.1	Emplazamiento.....	26
1.6.2	Datos meteorológicos	27
1.6.3	Perfil de la comunidad energética.....	28
1.6.4	Características de la instalación solar fotovoltaica	29
1.6.5	Precio de la electricidad	31
2	Metodología	32
2.1	Descripción de tareas.....	32
2.2	Planificación	34
2.3	Cálculos.....	35
2.3.1	Cálculo de la producción solar de la instalación fotovoltaica.....	35
2.3.2	Cálculo del dimensionamiento de la instalación fotovoltaica.....	39
2.3.3	Cálculo de mejoras para la reducción de la demanda eléctrica	39
2.3.4	Cálculo de coeficientes fijo de reparto	42
2.3.5	Cálculo de la viabilidad de las baterías	46
3	Evaluación económica	54
3.1	Rentabilidad de la comunidad energética.....	54
3.2	Rentabilidad y reparto justo de los beneficios de los participantes.....	56
4	Evaluación medioambiental	58



4.1	Introducción	58
4.2	Cálculo de las emisiones evitadas por el uso de sistemas fotovoltaicos.....	58
5	Conclusiones.....	60
6	Bibliografía	62
7	Anexo 1: Ficha técnica	65
8	Anexo 2: Presupuesto.....	66



Índice de ilustraciones

Ilustración 1: Media mensual concentración de CO2 [2]	11
Ilustración 2. Estructura de una comunidad energética [5]	13
Ilustración 3: Ejemplo de esquema de instalación [36].....	25
Ilustración 4: Ubicación de Guzmán	26
Ilustración 5: Emplazamiento de la instalación	26
Ilustración 6: Cubierta de la instalación fotovoltaica	29
Ilustración 7: Dispositivo de sujeción de los módulos	30
Ilustración 8: Módulo fotovoltaico 455 W.....	30
Ilustración 9. (a) azimut solar y altitud solar. (b) azimut solar y azimut de la superficie [38]	36
Ilustración 10: Inclinación del módulo fotovoltaico	36



Índice de tablas

Tabla 1: Factor de emisiones de CO ₂ [1].....	15
Tabla 2: Consumo medio por hogar [9].....	17
Tabla 3: Subvenciones del programa de incentivos 4 [21].....	20
Tabla 4: Subvenciones del programa de incentivos 6 [21].....	20
Tabla 5: Temperaturas medias desde 1991-2021 [37].....	27
Tabla 6: Resumen de datos meteorológicos de 1999-2019 [37].....	27
Tabla 7: Tipo de energía por servicio	29
Tabla 8: Características del módulo fotovoltaico	30
Tabla 9: Tipos de tarifa	31
Tabla 10: Diagrama de Gantt.....	34
Tabla 11: Eficiencias de equipos.....	40
Tabla 12: Porcentaje de consumo por servicio [9]	40
Tabla 13: Tipos de mejora	41
Tabla 14: Coeficientes fijos.....	42
Tabla 15: Diferentes hipótesis.....	43
Tabla 16: Resumen de los coeficientes fijos.....	45
Tabla 17: Resultados	45
Tabla 18: Tabla resumen de resultados con el reparto fijo 3.....	46
Tabla 19: Consumo y producción	47
Tabla 20: Características de la batería.....	47
Tabla 21: Resultados	52
Tabla 22: Resultados económicos de la comunidad.....	56
Tabla 23: Factores de emisiones de CO ₂ [40]	58



Índice de gráficas

Gráfica 1: Evolución de la generación renovable y no renovable (%) [4].....	12
Gráfica 2: Consumo energético según servicios, total (a), eléctrico (b) [9].....	16
Gráfica 3 Potencia media consumida por hogar [17]	18
Gráfica 4 Análisis del Payback con distintas inversiones [27].....	21
Gráfica 5 Evolución de la eficiencia de los módulos fotovoltaicos [32].....	22
Gráfica 6 Evolución del coste de la fotovoltaica en tejados [32].....	23
Gráfica 7: Evolución del precio de la electricidad en España [32].....	23
Gráfica 8: Tasa de aumento del COP, en función del volumen del tanque de TES (a) o de la capacidad de energía fotovoltaica (b) [35].....	24
Gráfica 9: Evolución del payback en función de la potencia fotovoltaica y del volumen de almacenamiento térmico [35].....	25
Gráfica 10: Energía solar incidente mensual	28
Gráfica 11: Producción fotovoltaica por mes	31
Gráfica 12: Consumo vs Producción	41
Gráfica 13: Ahorro de energía eléctrica (MWh) por mes	41
Gráfica 14: (a) consumo vs producción en invierno. (b) consumo vs producción en verano.....	47
Gráfica 15: Carga y descarga de la batería	48
Gráfica 16: Ahorro vs Capacidad	49
Gráfica 17: Carga y descarga	50
Gráfica 18: Ahorro vs Capacidad	51
Gráfica 19. Capacidad vs Ahorro	52
Gráfica 20: Balance económico hipótesis 1.....	55
Gráfica 21: Balance económico hipótesis 2.....	56



Lista de acrónimos

ACS	Agua caliente sanitaria
BES	Battery Energy Storage
BT	Baja Tensión
CEL	Comunidad Energética Local
COP	Coefficient of performance
CO ₂	Dióxido de Carbono
CR	Criterio de Reparto
DOD	Profundidad de descarga
GEI	Gases de Efecto Invernadero
IVA	Impuesto sobre el valor añadido
MT	Media Tensión
PB	Payback
PV	Fotovoltaica
ppm	Partes por millón
RD	Real Decreto
ST	Subtarea
T	Tarea
TES	Thermal Energy Storage

1 Memoria

1.1 Introducción

Este documento se centra en el desarrollo y optimización de una comunidad energética formada por once viviendas familiares, un ayuntamiento, un sistema de bombeo de agua, un hotel y una herrería en un pueblo de pocos habitantes llamado Guzmán situado en la comunidad de Burgos. Teniendo en cuenta que el sector residencial supone un notable porcentaje de la demanda eléctrica en España, hace que la posibilidad de acogerse a este tipo de modalidad de autoconsumo sea cada vez más atractiva puesto que ofrecen un ahorro en la factura de la luz como consecuencia de un ahorro energético gracias a la autogeneración de energía eléctrica a través de la instalación fotovoltaica, y que cada vez más establecimientos estudien la viabilidad de unirse a ellas.

Para llevar a cabo este estudio ha sido necesario seguir un orden que permita facilitar llevar a la práctica la presente comunidad energética y ver cuáles son los beneficios que se pueden obtener gracias a un correcto funcionamiento de esta. Un orden que ha empezado por situar en el contexto la definición de una comunidad energética que abarca los objetivos principales para el beneficio tanto social como económico de todos los miembros que forman parte de la comunidad, el estudio de la normativa que se debe respetar para la correcta implantación de la CE. Una vez que se han conocido los diferentes aspectos que engloban a la comunidad, se han realizado una serie de tareas imprescindibles para un funcionamiento eficiente.

En primer lugar, se ha llevado a cabo el diseño y dimensionamiento de la instalación solar fotovoltaica encargada de proporcionar la energía necesaria a cada miembro con el objetivo principal de obtener un autoconsumo que roce el 100%, es decir, que todo lo que genere la instalación sea posteriormente consumida por los diferentes usuarios. En segundo lugar, se han analizado tres medidas de forma que la comunidad energética opere de la forma más eficiente posible y justa para todas las entidades que forman parte de ella; la primera medida se ha basado en el cálculo de coeficientes de reparto fijo, que es lo mismo que el porcentaje de la producción de energía eléctrica atribuida a cada miembro a través de criterios que, con el uso de herramientas matemáticas, que no solo permitan distribuir bien la producción de la presente CE sino facilitar el cálculo de estos coeficientes para comunidades que se puedan crear en el futuro; la segunda medida que se ha investigado trató de un estudio puramente energético en el cual se han calculado los ahorros tanto en calefacción como en ACS debido a la sustitución de una envolvente térmica antigua de los establecimientos por una que ofrece un coeficiente de transferencia de calor U mucho menor, y el cambio de acumuladores eléctricos por una bomba de calor aire-agua (aeroterminia) que ofrece una mayor eficiencia energética; la tercera y última medida se ha estudiado ha sido la rentabilidad que pueden ofrecer las baterías del almacenamiento eléctrico para aumentar el porcentaje de autoconsumo que se encargan de almacenar la energía sobrante cuando la producción es mayor que el consumo de manera que se pueda consumir energía cuando la producción no es suficiente. En tercer lugar, se ha realizado una evaluación económica global de la comunidad con las medidas óptimas y se han calculado

cualquier tipo de beneficio, así como el tiempo necesario para recuperar la inversión inicial. En cuarto lugar, se ha evaluado la comunidad energética desde el punto de vista medioambiental, donde se ha obtenido las emisiones de CO2 evitadas gracias al sistema fotovoltaico. Finalmente, este documento finaliza con unas conclusiones generales obtenidas con los resultados del presente estudio.

1.2 Contexto

El cambio climático constituye una amenaza cada vez mayor para el desarrollo, las iniciativas destinadas a erradicar la pobreza y el bienestar de sus ciudadanos. Las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero (GEI) siguen aumentando, lo que llevará a cabo un aumento de la temperatura a nivel mundial superior a 2 grados centígrados que es el establecido como objetivo por los países con el fin de evitar los efectos más peligrosos del cambio climático [1].

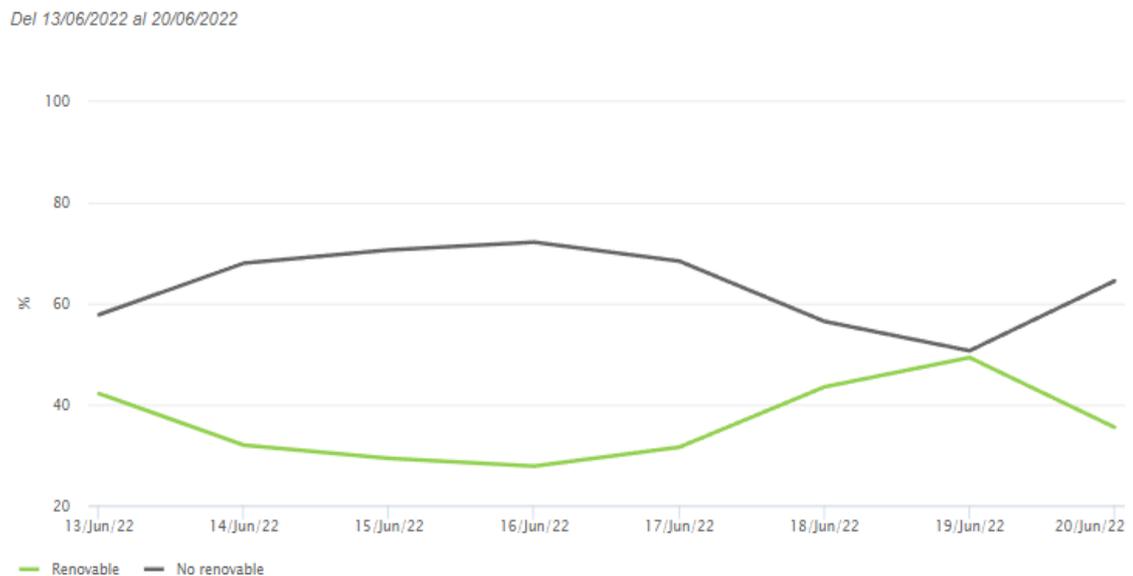
Pese a la reducción de las emisiones de CO2 debido a la crisis sanitaria mundial, su concentración en la atmósfera sigue acumulándose. La asociación Greenpeace ha recopilado y actualizado los datos mensuales de concentración de CO2 en la última década: Greenpeace ha recopilado y actualizado los datos mensuales de concentración de CO2 en la última década:



Ilustración 1: Media mensual concentración de CO2 [2]

En mayo de 2021, se ha alcanzado un máximo histórico acumulado de 417 partes por millón (ppm), una cantidad de CO₂ que no se registraba desde hace tres millones de años. Esta concentración es cada año superior a los anteriores debido fundamentalmente al aumento de las emisiones de CO₂ por las actividades humanas, principalmente la quema de combustibles fósiles para la generación de energía, y a la pérdida de la cubierta vegetal [3].

En la actualidad, el consumo de energía tanto eléctrica como térmica en el sector residencial en España constituye un porcentaje importante sobre el consumo energético total. Este consumo lleva asociado consigo mismo una serie de emisiones de gases contaminantes que tienen un efecto perjudicial en el cambio climático, y esto es debido principalmente porque actualmente una cantidad considerable de esa energía consumida se ha generado a partir de energía no renovable, que en su gran mayoría se basa en la quema de combustibles fósiles como se puede observar en la Gráfica 1, puesto que al ser quemados liberan a la atmósfera dichos gases.



Gráfica 1: Evolución de la generación renovable y no renovable (%) [4]

Es por ello, que en el RD 23/2020 se introduce por primera vez la definición de comunidades de energías renovables en España que favorecen el autoconsumo colectivo, y se conocen como entidades jurídicas basadas en la participación abierta y voluntaria, autónomas y efectivamente controladas por socios o miembros que están situados en las proximidades de los proyectos de energías renovables que sean propiedad de dichas entidades jurídicas y que estas hayan desarrollado, cuyos socios o miembros sean personas físicas, pymes o autoridades locales, incluidos los municipios y cuya finalidad primordial sea proporcionar beneficios medioambientales, económicos o sociales a sus socios o miembros o a las zonas locales donde operan, en lugar de ganancias financieras.

En España solo hay 33 comunidades energéticas, mientras que en otros países europeos este número es notablemente superior, siendo Alemania el líder con 1750, seguida de Dinamarca 700. Estos datos dan lugar a que la tendencia en España sea de un rápido crecimiento de estas

comunidades energéticas, ya que el potencial de radiación solar es bastante mayor al de los países que se sitúan por delante en la lista, y por lo tanto un mayor aprovechamiento de esta fuente de energía. Otro aspecto que se suma a la anterior, y que tiene una mayor importancia, es la evolución del precio de las instalaciones fotovoltaicas ya que éstas han sufrido una reducción bastante notable en su precio final como se puede observar en la Gráfica 6.

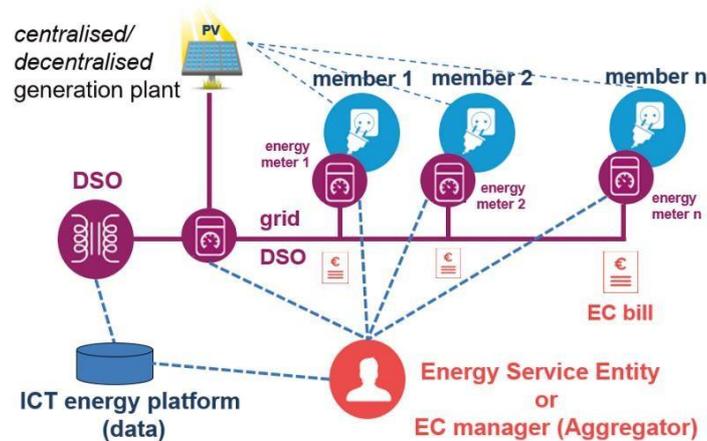


Ilustración 2. Estructura de una comunidad energética [5]

1.3 Objeto y alcance

El objeto del presente trabajo es la optimización de una comunidad energética renovable, es decir, que el consumo de energía eléctrica se adecue con la producción de energía solar fotovoltaica para que el autoconsumo energético tenga el mayor porcentaje posible, lo que conlleva importar menos energía de la red, para los hogares y establecimientos de unos vecinos de un pueblo de Burgos, Guzmán.

El alcance del documento se divide en una serie de objetivos que irán ordenados por orden de importancia, y se podrán diferenciar entre objetivos principales, y objetivos secundarios. Los objetivos principales son:

- **Diseño y dimensionamiento de una instalación fotovoltaica** para la creación de una comunidad energética.
- **Cálculo de unos coeficientes de reparto fijo**, que se define como el porcentaje de la producción solar fotovoltaica que se le atribuirá a cada miembro de la comunidad para que se consiga el mayor autoconsumo posible, y que la distribución sea justa entre los participantes.
- **Análisis de medidas potenciales de ahorro** energético, económico y medioambiental.

Los objetivos secundarios son las tareas que se han llevado a cabo para lograr el cumplimiento de las metas principales de este trabajo. Estas tareas son:



- **Recolecta de los datos de consumo** energético hora a hora a lo largo de un año de cada participante de la comunidad energética.
- **Estimar** los criterios que se deben tener en cuenta para el cálculo de los repartos de **coeficientes fijos**
- **Cálculo en Excel de la implementación de baterías** de almacenamiento eléctrico en algunos miembros de la comunidad.
- **Investigación** sobre estudios realizados en la rehabilitación de envolventes de edificios antiguos, el perfil de consumo en la provincia de Burgos y posibles medidas para implementar en las comunidades energéticas en un futuro cercano.

1.4 Beneficios que aporta el trabajo

Las comunidades energéticas suponen un importante cambio en el proceso de transición energética en todo el mundo, puesto que fomentan sobre todo el ahorro energético y contribuyen al desarrollo de la generación distribuida, a reducir enormemente la dependencia energética y cumplir los objetivos energéticos y medioambientales fijados para reducir el impacto medioambiental. En resumen, los beneficios que aportan las comunidades energéticas son:

1.4.1 Beneficio medioambiental

La implantación de una comunidad energética supone al usuario que forma parte de ella, que una gran cantidad de energía que consumirán es generada a partir de una tecnología limpia y bien desarrollada, por lo que dejan de importar esa cantidad de energía de la red, donde una parte importante de esa energía proviene de la quema de combustibles fósiles que llevan asociadas una emisión de gases contaminantes muy perjudiciales para el medioambiente.

En la siguiente tabla se puede observar esa gran diferencia de emisiones que solo tiene en cuenta la generación de energía, es decir, cuando la instalación solar fotovoltaica ya está fabricada y puesta en marcha.

Tabla 1: Factor de emisiones de CO₂ [1]

Technology	Emission CO ₂ Factors	
	Central Terminals t.CO ₂ /MWh	Point of Consumption t.CO ₂ /MWh
Coal and hard coal	0,993	1,098
Brown coal	0,896	0,991
Black coal	0,965	1,067
Imported coal	0,905	1,001
Nuclear	0	0
Hydroelectric, wind, photovoltaic	0	0
Biomass	0	0
Combined cycle	0,353	0,390
Natural Gas	0,504	0,557
Otto engine cogeneration (60% REE)	0,336	0,356
Gas turbine cogeneration (62% REE)	0,325	0,344
Combined cycle cogeneration (67%REE)	0,301	0,318
Fuel	0,689	0,762
Marine auxiliary power system	0,626	0,699

Cabe destacar, que como se ha comentado anteriormente, la energía solar fotovoltaica en el proceso de generación de energía eléctrica no lleva asociado emisiones de GEI, pero si se tiene en cuenta que antes de la puesta en marcha de la instalación, se llevan a cabo una serie de procesos que, si pueden ser perjudiciales para el medioambiente, pero que se llegan amortizar gracias al ahorro de emisiones durante su vida útil en el periodo de generación de energía.

1.4.2 Beneficio socioeconómico

A parte de los beneficios medioambientales, se suman a estos unos beneficios socioeconómicos que indican las ventajas sociales y económicas que afectan tanto directamente como indirectamente debido a la puesta en marcha, y una vez funcionando las comunidades energéticas, es decir, los beneficios irán otorgados directamente a los propios miembros de la comunidad como a aquellos agentes externos que intervengan en ella.

1. **Reducción de costes y de la dependencia energética** debido a que se deja de importar una gran cantidad de energía de la red, que tenía un coste económico porque se consume la energía renovable seleccionada por la comunidad, en este caso energía solar fotovoltaica, además que es una tecnología bien conocida y que da mucha fiabilidad.
2. Facilitación de **integración de energías renovables** en el sistema a través de la gestión de la demanda
3. Se fomenta la **creación de empleo** y se estimula el desarrollo de negocios locales relacionados directa o indirectamente con el sector de las renovables.
4. Se añade un valor adicional a nivel local, ofreciendo la posibilidad de promover **nuevas inversiones en la comunidad**.

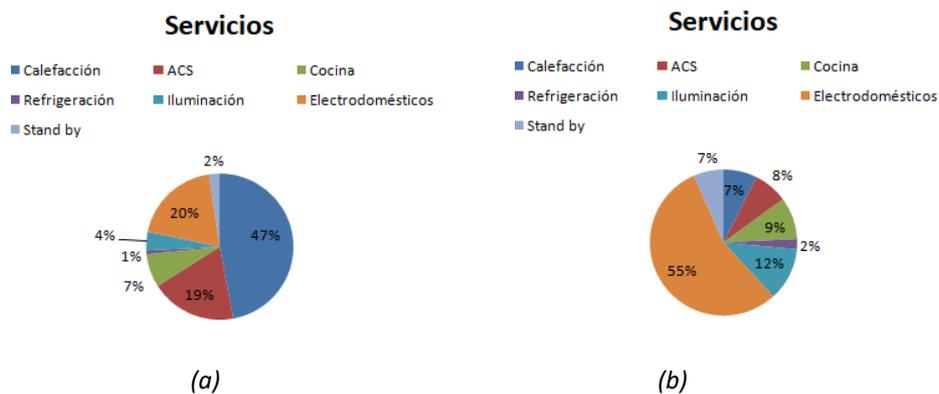
5. Gran **mejora de las condiciones de vida** en las zonas urbanas y rurales.
6. Mayor **cohesión social**.
7. **Bajo tiempo de retorno** de la inversión debido a la subida del precio de la electricidad y combustible.

1.5 Análisis del estado del arte

1.5.1 Introducción

El sector residencial constituye un sector clave para la red energética actual y la red eléctrica de la Unión Europea. El consumo de energía en este sector representa el 29% del consumo total. En España, este porcentaje es un poco menor, situándose en el 25%. Esta cifra y la tendencia para seguir aumentando se deben principalmente al incremento del número de hogares, así como de los electrodomésticos y el confort que proporcionan [7]. El consumo de electricidad en los hogares de la Unión Europea también ha aumentado un 2% anual en los últimos 10 años, a pesar de que se ha producido un gran avance en la eficiencia energética de los electrodomésticos y la luz. Esto se debe al creciente número de tecnologías de la información y la comunicación (TIC) y de instalaciones y aparatos electrónicos. El sector doméstico en los países de la Unión Europea está sometido a un alto impacto de consumo durante los periodos de máxima demanda a lo largo del día. Esto puede provocar saturaciones en la red eléctrica con el consiguiente aumento de la generación y de los costes de inversión para el refuerzo de la red [8].

El consumo energético total en el sector residencial en España se divide principalmente en los siguientes servicios: calefacción, ACS, refrigeración, cocina, iluminación, electrodomésticos y stand by. En la Gráfica 2, se podrá observar el peso de cada uno, según las estadísticas, de los servicios en el consumo total.



Gráfica 2: Consumo energético según servicios, total (a), eléctrico (b) [9].

Pero si ahora el enfoque es desde el punto de vista del consumo eléctrico, es totalmente diferente ya que conocer el consumo eléctrico de los diferentes electrodomésticos, es vital para

realizar una buena previsión de consumo [10], incrementar el uso de equipos más eficiente para reducir el consumo de forma importante [11]. Basándose en modelos, se estima que el ahorro potencial en el consumo de electricidad en el sector residencial puede alcanzar un 48% mediante la aplicación de las tecnologías existentes y la mejora de los hábitos de ahorro energético [12], que será una de las medidas más importantes a considerar en este trabajo. La calefacción y el agua caliente sanitaria también afecta a la hora de realizar una media de consumo eléctrico en España, debido a que la obtención de estos servicios puede ser por trabajo eléctrico o por otra fuente de energía distinta como puede ser la energía solar o geotermia, por lo que presenta una gran variedad de alternativas a la hora de realizar una instalación.

Como se ha comentado anteriormente, la determinación de los perfiles de consumo eléctrico en el sector doméstico es una tarea muy complicada debido a la variabilidad del consumidor [13]. Es por ello, que existen diferentes métodos que se basan en la modelización del consumo energético en el sector residencial, siendo el modelo que se llama Bottom-up [14] el elegido para poder determinar el perfil de los usuarios en estudio. Bottom-up se basa en la extrapolación del consumo energético estimado de cada hogar o de los aparatos de uso final a nivel regional o nacional [15, 16].

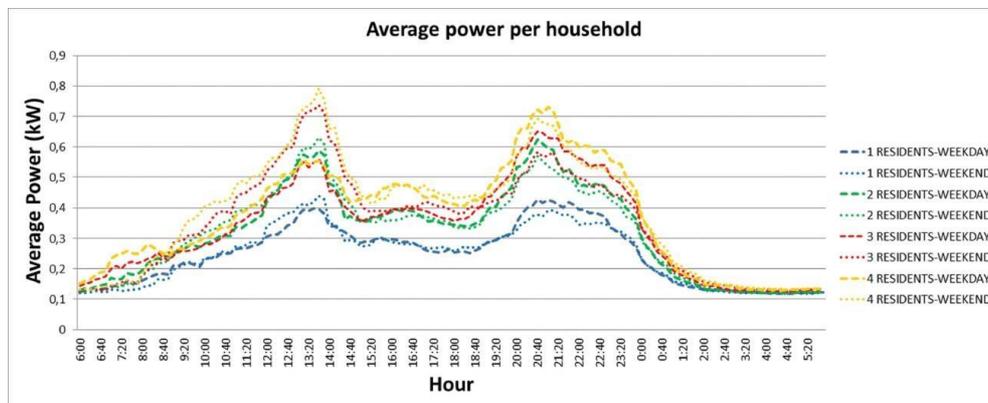
En la Tabla 2, cabe destacar que el porcentaje de calefacción y ACS que se cubre con energía eléctrica disminuye, ya que normalmente en España, estos servicios se suelen cubrir con instalaciones que utilizan como combustible gas natural o fuel olio. También otro apunte bastante importante es que el servicio que consume mayor cantidad de energía eléctrica es el de los electrodomésticos, por lo que es bastante importante tenerlos en cuenta a la hora de calcular cuál será el consumo eléctrico de una vivienda.

Una vez obtenido los datos estadísticos sobre el consumo energético y el consumo eléctrico total en el sector residencial, será de gran interés obtener los datos de consumo medio de cada hogar en España.

Tabla 2: Consumo medio por hogar [9].

kWh/hogar	Zona Climática			
	Atlántico Norte	Continental	Mediterránea	España
Pisos	7.306	9.796	6.128	7.544
Unifamiliares	14.987	19.653	13.239	15.513
España	9.293	12.636	8.363	9.922

En esta tabla se puede observar cual es el consumo medio anual de energía total por cada hogar, diferenciando los tipos de inmuebles en pisos y viviendas unifamiliares, y también por la zona en la que te encuentres en España. Dependiendo de la zona de estudio esta tabla permite obtener una idea sobre cuanto será según las estadísticas el consumo energético de cada hogar.



Gráfica 3 Potencia media consumida por hogar [17]

Este gráfico muestra la potencia media horaria en España del consumo total de electricidad, dependiendo del número de persona que habitan en la casa, y si es un día entre semana o el fin de semana. Se pueden observar en todos los casos la existencia de dos picos en los que el consumo de electricidad es mayor y corresponden con la hora de la comida, y el otro en torno a la hora de la cena. Se observa que hay una diferencia importante entre las casas de 1 miembro y las de 4 miembros. En cuanto al consumo, apenas hay diferencias entre el fin de semana y los días laborables, aunque sigue un patrón diferente. Los fines de semana se consume más electricidad por la mañana, ya que no es día laborable; sin embargo, por la tarde se consume más entre semana. Se muestra una información que a lo largo del proyecto puede servir de gran ayuda puesto que se podrá realizar una comparación gracias a la obtención de datos reales de consumo.

1.5.2 Interés de los módulos fotovoltaicos

1.5.2.1 Normativa estatal

Para poder justificar la implementación de la tecnología fotovoltaica como fuente de suministro para cubrir la demanda energética, se expondrán a continuación una serie de ventajas que presentan desde el punto de vista técnico, administrativo y económico.

Para ello, se hará referencia a la ley 24/2013 [18], de 26 de diciembre, que define el autoconsumo como el consumo por parte de uno o varios consumidores de energía eléctrica proveniente de instalaciones de producción próximas a las de consumo y asociadas a los mismos. A su vez, existe la posibilidad de acogerse a dos modalidades diferentes de autoconsumo, y que serán interesantes tener en cuenta en este estudio, que son: la modalidad de suministro con autoconsumo sin excedentes, que impide la inyección de energía excedentaria a la red; y la modalidad de suministro con autoconsumo con excedentes, que permite inyectar energía excedentaria en las redes.

Unas de las ventajas que presenta esta ley es que las instalaciones de producción no superiores a 100 kW de potencia asociadas a modalidades de suministro con autoconsumo con excedentes estarán exentas de la obligación de inscripción en el registro administrativo de instalaciones de

producción de energía eléctrica. Otra ventaja a tener en cuenta es que la energía autoconsumida de origen renovable, cogeneración o residuos estará exenta de todo tipo de cargos y peajes.

Pero años más tardes, el RD 244/2019, de 5 de abril lanza una de las ventajas más atractivas para poder instalar dicha tecnología, y es que divide en dos la modalidad de suministro con autoconsumo con excedentes: modalidad con excedentes acogida a compensación, aunque para poder acogerse a esta modalidad es necesario cumplir una serie de condiciones impuestas por este Real Decreto; y modalidad con excedentes no acogida a compensación, que son los que no cumplen con alguno de los requisitos para pertenecer a la modalidad con excedentes acogida a compensación o que voluntariamente opten por no acogerse a dicha modalidad [19].

Hasta abril de 2019, el despliegue de instalaciones de autoconsumo se vio seriamente obstaculizado en España. La inicial y prolongada falta de legislación dio lugar a un esquema regulatorio que desincentivaba el autoconsumo al establecer condiciones muy restrictivas y económicamente perjudiciales para dichas instalaciones, al contrario de lo que ocurría en varios otros países [20]. Finalmente, la reciente promulgación del Real Decreto 244/2019 ha establecido un marco normativo que permite el despliegue de instalaciones fotovoltaicas domésticas sobre cubierta en el país. La nueva legislación elimina el tristemente famoso "Impuesto al Sol", es decir, el impuesto que grava la generación fotovoltaica que se consume localmente de forma instantánea.

Además, el RD 244 permite que consumidores cercanos compartan una misma instalación. Las instalaciones compartidas deben cumplir alguna de las siguientes condiciones: los consumidores deben estar conectados a la misma red de baja tensión (aguas abajo del transformador de MT/BT), la distancia entre las propiedades de los consumidores debe ser inferior a 500 m, o sus números de registro deben compartir los 14 dígitos iniciales. Los consumidores de una instalación compartida deben seleccionar unos coeficientes de reparto fijos en el tiempo, que determinan cómo se distribuye la generación fotovoltaica entre ellos. Como comentario final, la legislación actual establece que, para cualquier tipo de instalación de autoconsumo, el usuario y el propietario de la instalación pueden ser una persona física o jurídica diferente.

1.5.2.2 Subvenciones

Como se ha comentado anteriormente, la implantación de las energías renovables se está viendo favorecida, pero actualmente es una opción mucho más atractiva gracias al nuevo RD 477/2021 que tiene por objeto regular la concesión directa de ayudas a las comunidades autónomas y ciudades de Ceuta y Melilla para la ejecución de diversos programas de incentivos ligados al autoconsumo y al almacenamiento, con fuentes de energía renovable, así como a la implantación de sistemas térmicos renovables en el sector residencial [21]. Este Real Decreto también ha realizado la aprobación de seis programas de incentivos de autoconsumo, almacenamiento y usos térmicos de energías renovables, siendo de gran importancia en este estudio los programas 4 y 6, cuyas características se verán a continuación.

Programa de incentivos 4: Realización de instalaciones de autoconsumo, con fuentes de energía renovable, en el sector residencial, las administraciones públicas y el tercer sector, con o sin almacenamiento.

Tabla 3: Subvenciones del programa de incentivos 4 [21].

Tecnología	Ayudas al sector residencial	Ayudas a las administraciones públicas
Instalación Fotovoltaica	300 - 600 €/kWp	500 – 1.000 €/kWp
Almacenamiento	140 - 490 €/kWh	140 - 490 €/kWh

Programa de incentivos 6: Realización de instalaciones de energías renovables térmicas en el sector residencial.

Tabla 4: Subvenciones del programa de incentivos 6 [21].

Tipo de instalación	Sector residencial	Viviendas de propiedad pública y tercer sector
Instalación Solar Térmica	450 – 900 €/kW	650 – 950 €/kW
Biomasa	250 €/kW	350 €/kW
Instalaciones aerotérmicas	500 €/kW	650 €/kW

1.5.3 Estado del arte

1.5.3.1 Impacto del autoconsumo

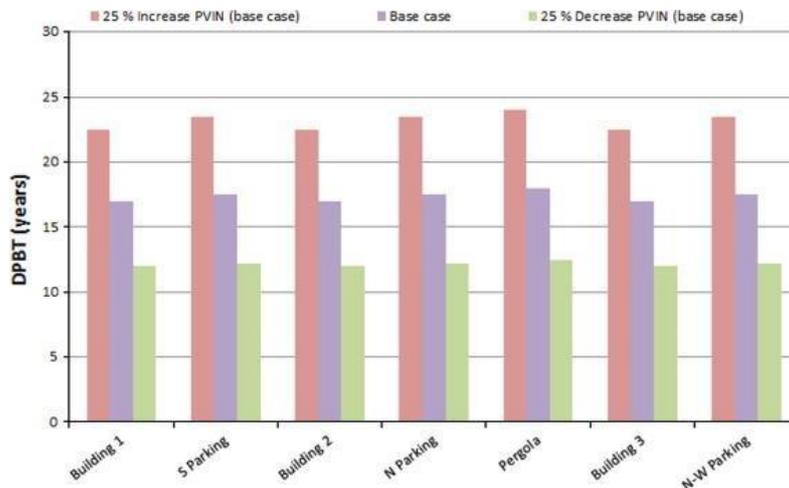
Las comunidades energéticas son fundamentales para afrontar el reto del cambio climático. El despliegue masivo de recursos renovables distribuidos para el autoconsumo puede tener varias ventajas. En primer lugar, aumenta el uso de fuentes de energía renovable en el suministro de electricidad, lo que permite reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Desde el punto de vista técnico, la generación local reduce las pérdidas de energía, a la vez que aplaza las futuras inversiones en infraestructuras de transmisión y distribución. Desde el punto de vista financiero, el despliegue del autoconsumo conlleva recursos adicionales procedentes en su mayoría de los consumidores, lo que ayuda a diversificar las inversiones energéticas centralizadas. A nivel socioeconómico, la generación distribuida aumenta el número de actores que comparten los beneficios asociados a la actividad de generación eléctrica, históricamente concentrados en un número reducido de grandes empresas. Además, dado que se acepta de forma generalizada que el autoconsumo se basará mayoritariamente en sistemas fotovoltaicos, cabe mencionar que la fotovoltaica distribuida está asociada a mayores tasas de creación de empleo por MW que otras fuentes de energía, incluida la fotovoltaica a gran escala [22].

En los últimos años, la transposición a nivel nacional de las directivas europeas relacionadas con el paquete de energía limpia para todos los europeos se traduce en nuevos marcos legales nacionales, incluyendo la noción de autoconsumo y comunidades energéticas [23]. Esto supuso

un cambio radical en España, ya que la legislación anterior era un auténtico obstáculo para el autoconsumo [24, 25], y estaba mal valorada en muchos estudios comparativos internacionales [20, 26]. Sin embargo, y como se mencionó anteriormente se da lugar al Real Decreto 244/2019 que puso fin a la fiscalidad de la energía autoconsumida, introduciendo mecanismos de retribución del exceso de producción y definiendo las condiciones para crear comunidades energéticas.

A continuación, se mostrarán una serie de ejemplos de instalaciones de autoconsumo diferenciadas por el tipo de legislación, y gracias a esto, se podrá comprender la importancia de la legislación a la hora de fomentar las instalaciones de autoconsumo para luchar contra el cambio climático.

Con el marco normativo anterior, una serie de trabajos que consideran el caso de estudio de España presentaron conclusiones que ya no son válidas, ya que el marco legal en torno al autoconsumo ha cambiado drásticamente. Por ejemplo [27], analizó el rendimiento económico de una instalación fotovoltaica en la universidad de Jaén (sur de España). Los resultados mostraron un coste medio nivelado de la energía de unos 125 €/MWh, en tres escenarios diferentes, obteniendo como resultado un tiempo de recuperación de la inversión de 17,5 años, como se puede en la Gráfica 4.



Gráfica 4 Análisis del Payback con distintas inversiones [27]

Pero si se habla de actualidad, tres trabajos recientes abordaron diferentes aspectos del autoconsumo en España bajo el nuevo marco legal analizaron la rentabilidad de las instalaciones solares fotovoltaicas de autoconsumo en los hogares españoles en función del número de miembros del hogar, de uno a cuatro.

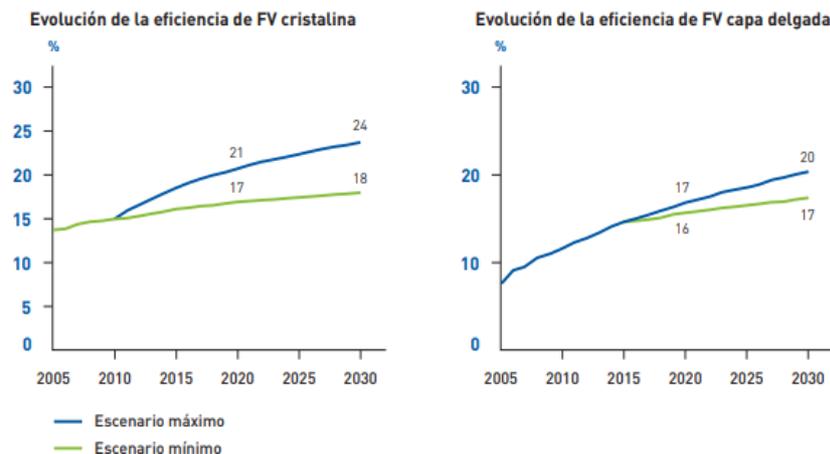
Finalmente, analizaron la rentabilidad del autoconsumo fotovoltaico residencial individual en España, para el caso particular de instalaciones sin almacenamiento [28]. Las conclusiones reforzaron la idea de que el autoconsumo fotovoltaico conectado a la red es rentable en España bajo el nuevo marco legal, y esto es debido a la caída de los precios de las instalaciones de autoconsumo como se podrá observar en el apartado de Estado del arte, y al aumento del precio

de la electricidad en España, reflejado en la Gráfica 4. También se señaló que el autoconsumo colectivo es una de las principales vías para mejorar la rentabilidad económica.

1.5.4 Tendencias del mercado

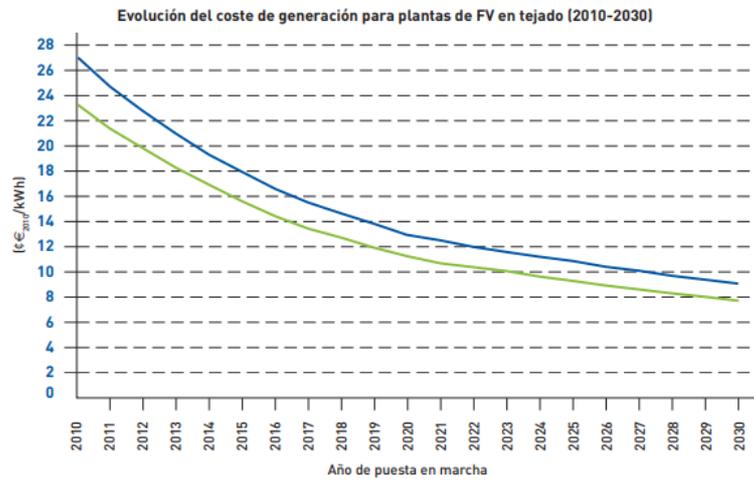
1.5.4.1 Evolución tecno-económicas de los PV

Los costes de la energía fotovoltaica han experimentado un fuerte descenso en un periodo de tiempo relativamente corto [29, 30], así como su eficiencia está experimentando un notable crecimiento y que la predicción para el futuro es que siga aumentando como se puede observar en la figura 6 [31]. También cabe destacar el aumento del precio de la electricidad en España [32], que puede ser uno de los factores a tener en cuenta para ver la rentabilidad de una instalación.



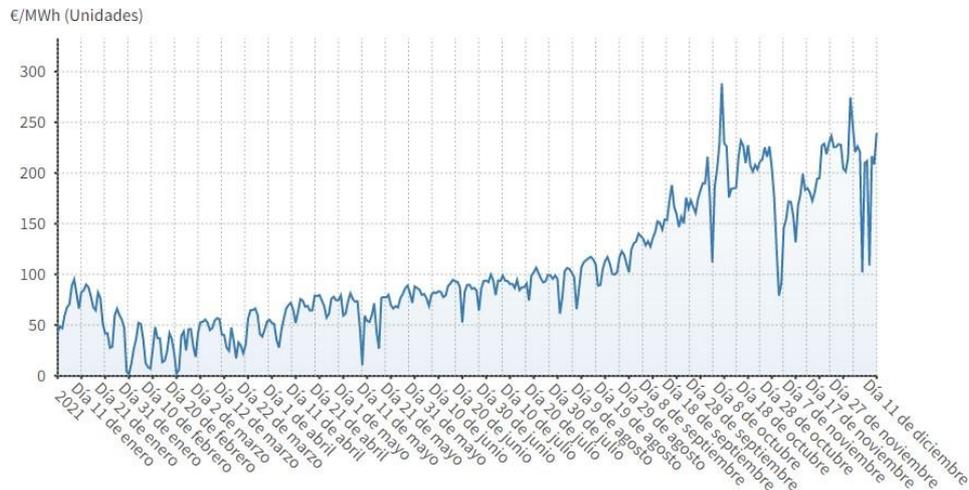
Gráfica 5 Evolución de la eficiencia de los módulos fotovoltaicos [32]

Dado que el coste de la tecnología es uno de los principales impulsores de la rentabilidad del autoconsumo, se requieren cifras actualizadas y análisis de sensibilidad. Es interesante analizar los costes de la tecnología (para los paneles FV y las baterías), ya que las tendencias de disminución actuales y futuras [32] pueden redefinir todo el escenario para que los países implementen transiciones energéticas. En el caso de los paneles fotovoltaicos, en la última década se ha experimentado un importante descenso de los costes, lo que, por ejemplo, ha convertido a la fotovoltaica en una de las fuentes de energía más competitivas a nivel mundial y ha allanado el camino para una masificación de las instalaciones a pequeña escala en condiciones adecuadas.



Gráfica 6 Evolución del coste de la fotovoltaica en tejados [32]

1.5.5 Evolución del precio del mercado eléctrico



Gráfica 7: Evolución del precio de la electricidad en España [32]

1.5.6 Almacenamiento de la energía fotovoltaica

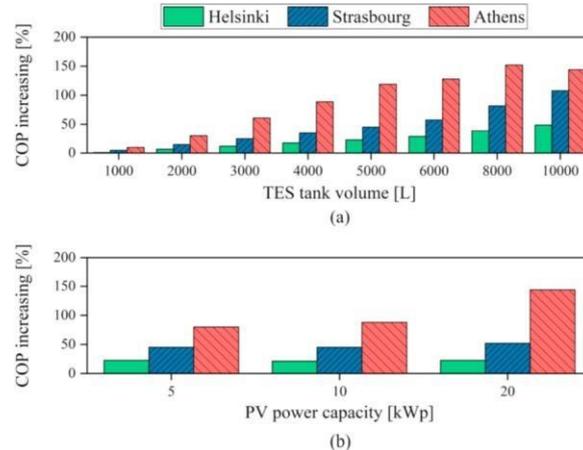
Los sistemas fotovoltaicos domésticos en los tejados suelen instalarse sin almacenamiento de energía y la energía generada en exceso de la carga eléctrica del edificio debe exportarse a la red o reducirse.

Pero existe la posibilidad de almacenar el exceso de energía fotovoltaica: una de las formas es almacenar esa energía sobrante en baterías eléctricas [33], siendo necesarias en instalaciones aisladas de la red; y la otra forma es almacenar térmicamente el exceso de energía fotovoltaica, y que será el objeto de este apartado del estado del arte; o incluso podría existir la posibilidad de combinar ambos almacenamientos en una misma instalación [34].

Este apartado del estado del arte se centrará más en el almacenamiento de energía en forma de calor. Para ello se han analizado diferentes artículos que demuestran como el almacenamiento de energía térmica combinado la tecnología fotovoltaica puede obtener beneficios tanto energéticos como económicos, que a su vez pueden presentar una gran opción para aumentar el rendimiento del autoconsumo en el sector residencial.

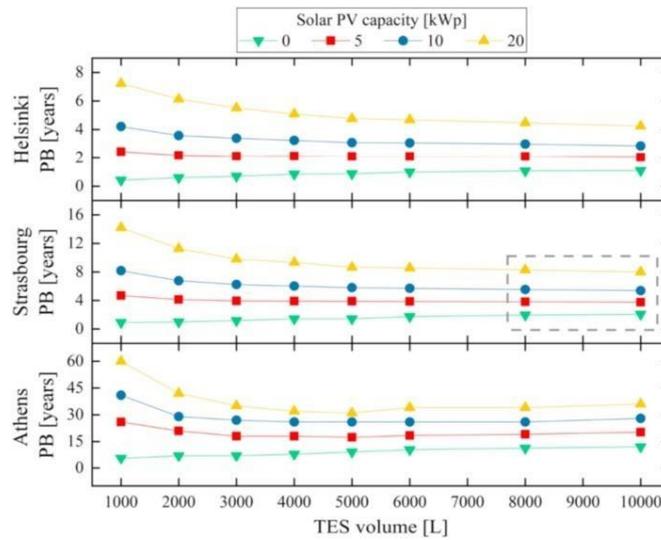
El primer estudio se basó en el análisis de un sistema de calefacción en tres zonas climáticas diferentes y para diferentes servicios a través de un modelo de control predictivo [30], en el que se analiza el impacto de diferentes combinaciones de volúmenes de tanques de almacenamiento de energía térmica y de capacidades de potencia fotovoltaica instalada, junto con una bomba de calor. Los resultados del primer estudio fueron:

Desde el punto de vista energético, aumentar el volumen del tanque de TES proporcionó beneficios energéticos en todos los casos independientemente del clima. La capacidad del modelo de control predictivo para hacer funcionar la bomba de calor durante las horas de alto rendimiento hizo que el sistema de calefacción fuera más eficiente, ya que el COP aumentó, mientras que el consumo puntual suministrado por la bomba de calor se redujo. Esto se demostró con un aumento del COP cuando se aumentó el volumen del depósito de TES del sistema, como se puede observar en la figura 9. Sin embargo, una mayor capacidad de potencia redujo el consumo de la red eléctrica, pero no mejoró el rendimiento de la bomba de calor a menos que el clima estudiado fuera soleado.



Gráfica 8: Tasa de aumento del COP, en función del volumen del tanque de TES (a) o de la capacidad de energía fotovoltaica (b) [35]

Desde un punto de vista económico, al instalar sólo un depósito de almacenamiento térmico se obtuvieron los menores periodos de payback en todos los climas. Sin embargo, el acoplamiento de altas capacidades de energía fotovoltaica con un gran tanque redujo el período de PB en comparación con la inversión en paneles fotovoltaicos con pequeños volúmenes de tanque. Otro detalle que cabe destacar es que el sistema ofrece un mayor ahorro en los climas más fríos ya que la demanda de calefacción es más elevada.



Gráfica 9: Evolución del payback en función de la potencia fotovoltaica y del volumen de almacenamiento térmico [35]

El segundo estudio consistió en el análisis del almacenamiento de energía térmica para abastecer el consumo de agua caliente sanitaria a través calentadores eléctricos con un volumen de 315 litros con el exceso de la generación fotovoltaica instalados en 410 hogares australianos.

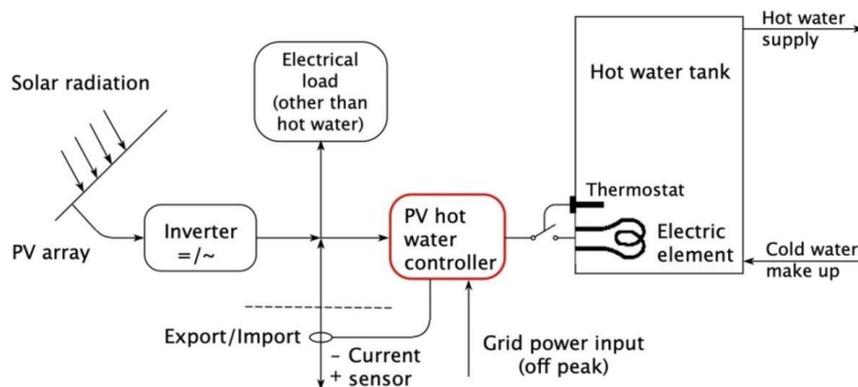


Ilustración 3: Ejemplo de esquema de instalación [36]

Los resultados demostraron que, para el perfil típico de consumo de agua caliente de una familia trabajadora, se puede suministrar una media del 48% del ACS diario mediante el exceso de energía fotovoltaica, lo que corresponde a una mejora del 28% del autoconsumo fotovoltaico. Sin embargo, hay una cantidad significativa de exceso de energía fotovoltaica después de suministrar el agua caliente, lo que implica un mayor margen para otras aplicaciones de baterías y almacenamiento térmico. Estos resultados demuestran que la utilización del exceso de energía fotovoltaica para el suministro de agua potable y saneamiento tiene un gran potencial para reducir la factura de los hogares.

1.6 Descripción de la solución propuesta

1.6.1 Emplazamiento

Como se ha comentado anteriormente en el apartado de objeto y alcance, el objetivo de este trabajo es optimizar una comunidad energética, la cual irá ubicada en un pequeño pueblo llamado Guzmán que pertenece al municipio de Pedrosa de Duero, provincia de Burgos, comunidad autónoma de Castilla y León (España).



Ilustración 4: Ubicación de Guzmán

Es un pueblo situado en el suroeste de la provincia de Burgos en la vertiente atlántica de la provincia, con una altitud de 814 metros sobre el nivel del mar, y que se accede mediante la carretera local BU-P-1321.



Ilustración 5: Emplazamiento de la instalación.

1.6.2 Datos meteorológicos

La ubicación elegida para la implantación de la comunidad energética goza de un clima continental oceánico templado que se caracteriza por tener unos inviernos moderadamente fríos y veranos calurosos y soleados, pero con noches frescas, y además sin abundantes precipitaciones a lo largo del año.

Tabla 5: Temperaturas medias desde 1991-2021 [37]

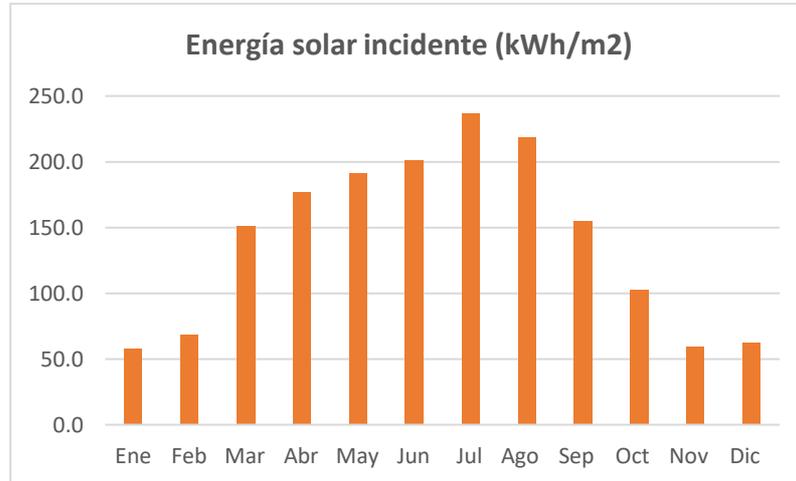
Mes	Temperatura media (°C)	Temperatura min. (°C)	Temperatura máx. (°C)
Enero	3	0.1	6.5
Febrero	3.5	-0.1	7.7
Marzo	6.3	2	11.2
Abril	8.6	3.9	13.7
Mayo	12.2	7	17.5
Junio	16.8	11.1	22.7
Julio	19.1	13	25.7
Agosto	19.4	13.5	26.2
Septiembre	16.3	11.1	22.4
Octubre	12.2	7.9	17.1
Noviembre	6.3	3.2	10
Diciembre	3.7	0.6	7.4

Tabla 6: Resumen de datos meteorológicos de 1999-2019 [37]

Mes	Precipitación (mm)	Humedad (%)	Días lluviosos (días)	Horas de sol (horas)
Enero	60	85%	8	3.6
Febrero	49	79%	7	4.7
Marzo	53	73%	8	6.3
Abril	69	72%	9	7.3
Mayo	69	70%	9	9.1
Junio	46	63%	6	10.9
Julio	24	57%	3	11.6
Agosto	21	54%	3	10.8
Septiembre	41	60%	5	9.0
Octubre	65	70%	7	6.5
Noviembre	70	81%	9	4.2
Diciembre	60	82%	8	3.9

En lo relacionado a la instalación solar fotovoltaica, un aspecto muy importante a tener en cuenta es la cantidad de radiación solar tanto directa como difusa que incide sobre la superficie del terreno ya que esto está directamente ligado con la energía que será capaz de producir los

módulos fotovoltaicos (PV). A continuación, en la Gráfica 10 que representa la cantidad de radiación solar acumulada a lo largo de los meses del año por unidad de superficie.



Gráfica 10: Energía solar incidente mensual.

1.6.3 Perfil de la comunidad energética

La comunidad estará formada por quince entidades diferentes, de las cuáles once son viviendas, dos entidades públicas que son el ayuntamiento y el sistema de bombeo de agua, un pequeño hotel y una herrería que compartirán la energía producida a partir de una instalación fotovoltaica. Un aspecto muy importante a tener en cuenta para la CEL es el perfil de consumo eléctrico de cada usuario puesto que esa información será muy útil a la hora de repartir la energía eléctrica generada, sobre todo los consumos de calefacción y agua caliente sanitaria, ya que en esta zona son los servicios que más energía eléctrica se consume. En la Tabla 7 se recogen que tipo de energía utiliza cada usuario para abastecer dichos servicios.

Tabla 7: Tipo de energía por servicio

Miembro	Calefacción	ACS
Alvaro Casa	Energía térmica	Energía térmica
Antonio	Energía térmica	Energía térmica
Antonio y Rosa	Energía térmica	Energía eléctrica
Ayto. (Bomba de aguas)	X	X
Ayto. Dep Munic.	Energía térmica	Energía térmica
Bea	Energía térmica	Energía eléctrica
Diego	Energía térmica	Energía eléctrica
Elena (Palacio + Bar)	Energía térmica	Energía térmica
Emi y Conchi	Energía térmica	Energía eléctrica
Luismi	Energía eléctrica	Energía eléctrica
Néstor	Energía térmica	Energía eléctrica
Pepe e Inés	Energía térmica	Energía eléctrica
Raul	Energía térmica	Energía térmica
Rosa	Energía térmica	Energía eléctrica
Santiago A.	Energía eléctrica	Energía eléctrica

1.6.4 Características de la instalación solar fotovoltaica

La ubicación elegida para situar la instalación solar fotovoltaica será una cubierta a dos aguas de una pequeña industria a las afuera del pueblo que está orientada al sureste, de la cual se necesitará una superficie útil de 142,5 m², y que tiene una inclinación de 10 grados con respecto a la horizontal.



Ilustración 6: Cubierta de la instalación fotovoltaica

La instalación tendrá una potencia nominal pico de 29,1 kWp que producirá 47,9 MWh hora a final de año. Para ello serán necesarios 64 módulos fotovoltaicos distribuidos por la cubierta que solo necesitarán unos dispositivos de sujeción a la cubierta como el de la Ilustración 7 sin la necesidad de una estructura metálica para aportarle la inclinación, puesto que se aprovechará la inclinación de la propia cubierta.

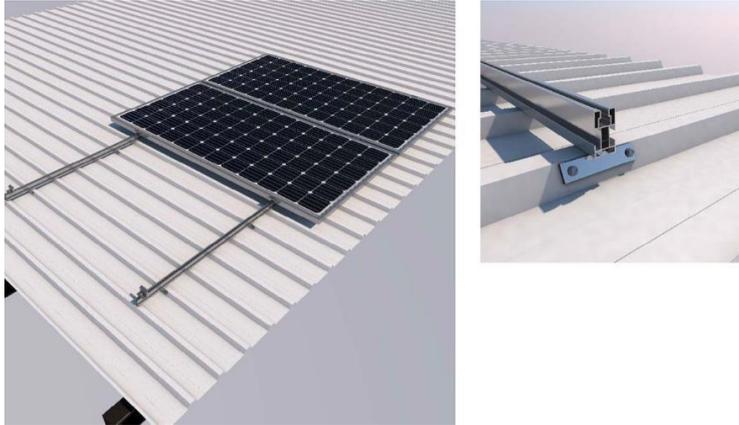


Ilustración 7: Dispositivo de sujeción de los módulos

El módulo fotovoltaico seleccionado para la instalación será un módulo del fabricante *JA Solar* de 455W de potencia eléctrica que está formado por células monocristalinas PERC que pertenece a la gama *JAM72S20*, cuyas características más significativas se recogen en la Tabla 8, y sus características más específicas en el Anexo 1: Ficha técnica.

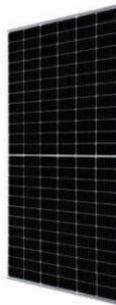
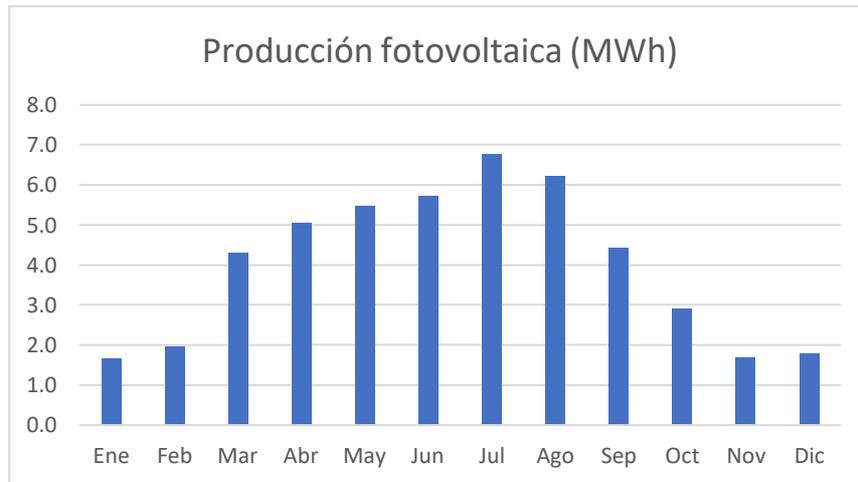


Ilustración 8: Módulo fotovoltaico 455 W

Tabla 8: Características del módulo fotovoltaico

Tipo de células	Monocristalino
Potencia nominal	455 W
Eficiencia	20 %
Dimensiones	2,226 m ²

Finalmente, una vez finalizado el dimensionamiento de la instalación necesaria para la comunidad, se muestran los cálculos de la energía eléctrica que será capaz de producir a lo largo de los meses de año en la Gráfica 11.



Gráfica 11: Producción fotovoltaica por mes

Lógicamente en los meses donde hay una radiación solar mayor dan lugar a una mayor producción de energía eléctrica. Al final del año la producción total es igual a 47,9 MWh, y por lo tanto se podrá abastecer una parte importante del consumo total.

1.6.5 Precio de la electricidad

Gracias a una comercializadora, se han podido obtener los precios de energía eléctrica que se dividen en tres tarifas diferentes con IVA incluido que son las tarifas correspondientes a los diferentes horarios valle, llano y punta. El precio de la electricidad es un factor muy importante a tener en cuenta puesto que es uno de los indicadores que señalan la rentabilidad que puede ofrecer la comunidad energética ya que el valor de este es directamente proporcional al ahorro, y como consecuencia al beneficio que se obtendrá. Un precio muy bajo de la electricidad puede llevar a cabo una rentabilidad muy baja o incluso inexistente, pero por el contrario si el precio se eleva el efecto que se producirá es el contrario, haciendo que las CEL sean más atractivas.

Tabla 9: Tipos de tarifa

Tipo de tarifa	Horario	Precio
Tarifa en valle	(00:00-8:00)U(Findes)	0,228€
Tarifa en llano	(8:00-10:00)U(14:00-18:00)U(22:00-00:00)	0.286€
Tarifa en punta	(10:00-14:00)U(18:00-22:00)	0,396€



2 Metodología

2.1 Descripción de tareas

Para llevar a cabo el desarrollo de este trabajo ha sido necesario realizar una serie de tareas de manera clara y ordenada han permitido conseguir los resultados deseados para optimizar la comunidad de energía solar fotovoltaica. Seguidamente, se presentarán las tareas que se han ejecutado en un orden de principio a fin:

- **T1: Recogida de datos sobre el consumo energético:** a través de una distribuidora energética, que se encarga de hacer llegar la energía al punto de consumo, se han descargado y recogido en una hoja de Excel los datos sobre el consumo energético hora a hora a lo largo de un año de los vecinos del pueblo que comprenden la comunidad. En la misma hoja de Excel se contemplan los precios de la energía según tramo horario gracias a una comercializadora que es la entidad que se dedica a facturar la energía consumida.
- **T2: Diseño y dimensionamiento de la instalación solar fotovoltaica:** En primer lugar, se ha estimado la producción solar fotovoltaica para la orientación sureste por unidad de superficie cada hora a lo largo de un año. El siguiente paso ha sido determinar la superficie necesaria la cubierta que cumpla con las características del panel fotovoltaico seleccionado, para abastecer una gran parte del consumo total, y además que los excedentes que se exportan a la red sean lo mínimo posible. Finalmente, con la superficie de cubierta elegida, se calculan los módulos solares fotovoltaicos necesarios para cubrir esa superficie y cuál es la potencia total de la instalación.
- **T3: Cálculo de los coeficientes de reparto:** se ha investigado los diferentes métodos o criterios que se han llevado a cabo en otras comunidades energéticas para establecer los coeficientes de reparto. Una vez seleccionado el criterio que se desea para la presente comunidad, se han calculado los coeficientes de reparto fijos óptimos que cumpla con dicho objetivo para que todos los miembros que participan estén de acuerdo con la distribución.
- **T4: Análisis de medidas eficientes:** esta tarea se ha iniciado investigando la tecnología o materiales que se pueden sustituir, implantar o mejorar de la comunidad con el fin de obtener un ahorro energético y económico. Se observó que las medidas que podrían cumplir con el objetivo son:
 - **ST1: Sustitución de envolvente térmica e instalaciones de calefacción y ACS:** se estudió la viabilidad energética y económica de la sustitución de la envolvente térmica para ahorrar en el consumo de calefacción, y la sustitución de los equipos encargados de abastecer el servicio de calefacción y ACS por unos más eficientes.

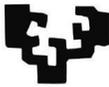


- **ST2: Implementación de baterías eléctricas:** se analizó la rentabilidad de la instalación de baterías para las entidades que más energía consumen, y, por lo tanto, aprovechar los excedentes y aumentar el autoconsumo.

- **T5: Análisis económico global de la comunidad energética:** se han analizado los aspectos económicos globales de la comunidad energética. En este análisis económico se calcularon los tiempos de retorno de la inversión y el ahorro económico al final de la vida útil de la instalación con dos hipótesis diferentes:
 - Sin subvención.
 - Con una subvención del 70%

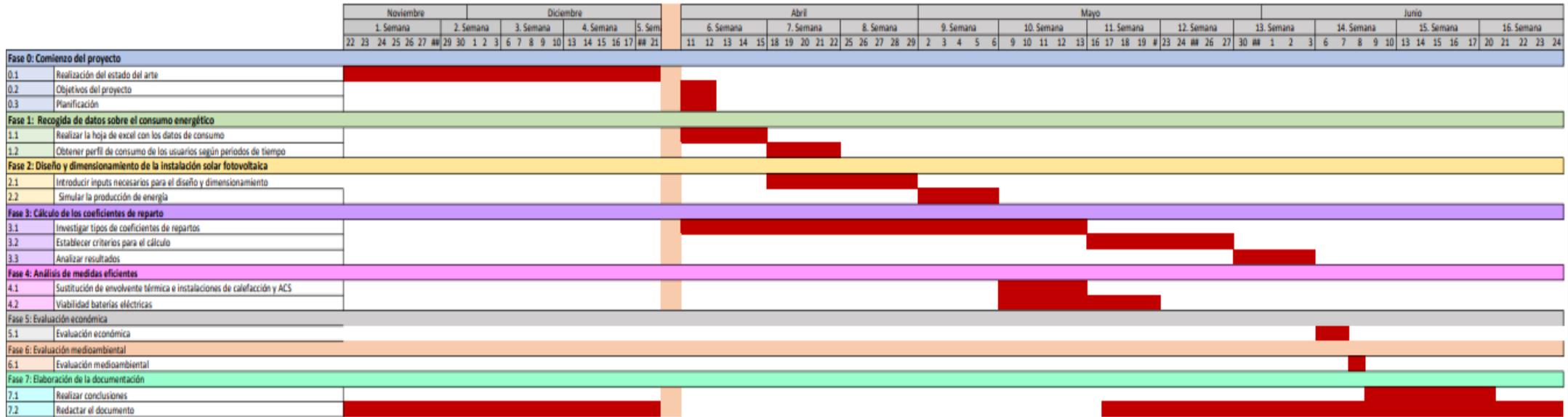
- **T6: Análisis medioambiental de la comunidad energética:** esta pequeña se ha basado en el cálculo de las emisiones totales debido a la implantación de la comunidad energética a lo largo de su vida útil.

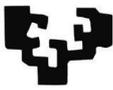
T7: Conclusiones generales del documento



2.2 Planificación

Tabla 10: Diagrama de Gantt





2.3 Cálculos

2.3.1 Cálculo de la producción solar de la instalación fotovoltaica

Para poder calcular la cantidad de energía solar que se va a obtener de los módulos fotovoltaicos es necesario determinar en qué momento del día el sol va a incidir sobre la superficie de dichos generadores eléctricos. Cabe destacar, que todas las fórmulas que se utilizarán para el cálculo de la producción se han obtenido del *Atlas de radiación solar del País Vasco* [38].

El ángulo de incidencia solar u es el que determina si el sol está por delante de la superficie de estudio, es decir, si la radiación solar está incidiendo en ese momento del día (si el ángulo de incidencia calculado está comprendido entre -90 y 90 grados, el Sol está incidiendo sobre la superficie, en el resto de los casos no). El cálculo del ángulo de incidencia solar se realiza a partir de la siguiente expresión:

$$\cos u = \cos \gamma \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta + \sin \gamma \cdot \cos \alpha \quad (1)$$

También es necesario conocer los factores de los que depende la fórmula anterior, y estos son:

- **Altitud solar (γ):** es el ángulo formado por la línea que une el punto del terreno con el centro del disco solar y la proyección del Sol en el plano horizontal, y se obtiene a partir de la carta solar.
- **Azimet módulo-Sol (α):** viene dado por la siguiente expresión:

$$\alpha = T - a \quad (2)$$

Donde:

- **Azimet solar (Ψ):** es el ángulo que forma el plano vertical que contiene la dirección del Sol y el plano vertical que contiene la dirección Norte-Sur.
- **Azimet de la superficie (α):** es el ángulo medido a partir de la dirección Sur entre el plano perpendicular que contiene a la normal del módulo fotovoltaico y el plano vertical que contiene la dirección Norte-Sur. En este caso, el azimet que tendrán los módulos será de -45 grados debido a que la cubierta elegida está situada al Sureste.

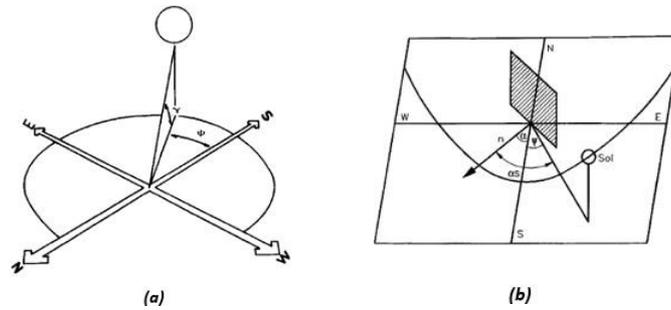


Ilustración 9. (a) azimut solar y altitud solar. (b) azimut solar y azimut de la superficie [38]

- **Inclinación del módulo fotovoltaico (β):** es el ángulo de inclinación de la superficie.

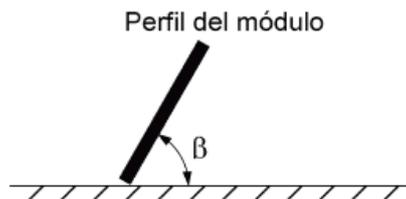


Ilustración 10: Inclinación del módulo fotovoltaico

Una vez obtenidos el cálculo de los valores anteriores, la expresión del ángulo de incidencia solar es la siguiente:

El siguiente paso es obtener los valores de la radiación, tanto directa como la difusa de la ubicación donde se desea instalar los generadores fotovoltaicos a partir de una base de datos, en este caso *PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System)*, y los valores de la altitud y el azimut solar, que se consiguen a partir de la carta solar de la zona de Burgos, a través del software *Design Builder*.

En una hoja de Excel se introducen los valores hora a hora a lo largo de un año que se han comentado anteriormente y se determina cuál será la energía en forma de radiación que recibirá el panel cuando el Sol esté incidiendo sobre él, que será la suma de la intensidad de la radiación directa sobre la superficie más la radiación difusa:

$$q_{Sol} \left(\frac{W}{m^2} \right) = rad_normal \left(\frac{W}{m^2} \right) \cdot \cos u + rad_difusa \left(\frac{W}{m^2} \right) \quad (3)$$

Si la cubierta seleccionada está orientada al sureste, la energía solar que recibirán los módulos fotovoltaicos cada hora tiene el siguiente valor:

$$q_{Sol} \left(\frac{W}{m^2} \right) = 1680799,2 \left(\frac{W}{m^2} \right)$$

A continuación, se calcula la cantidad energía eléctrica que es capaz de transformar el módulo fotovoltaico que se seleccione, de la radiación solar incidente sobre él.

$$W_{elec} \left(\frac{W}{m^2} \right) = \eta_{panel} \cdot q_{Sol} \left(\frac{W}{m^2} \right) \quad (4)$$

Finalmente, se multiplica el valor anterior por la cantidad de superficie útil de módulos fotovoltaicos y se divide entre 1000 para obtener la cantidad energía eléctrica producida a lo largo del año en kWh.

$$W_{elec}(kWh) = \frac{Sup_{\acute{u}til}(m^2) \cdot W_{elec} \left(\frac{W}{m^2} \right)}{1000} \quad (5)$$

Objetivos y resultados del diseño de la instalación.

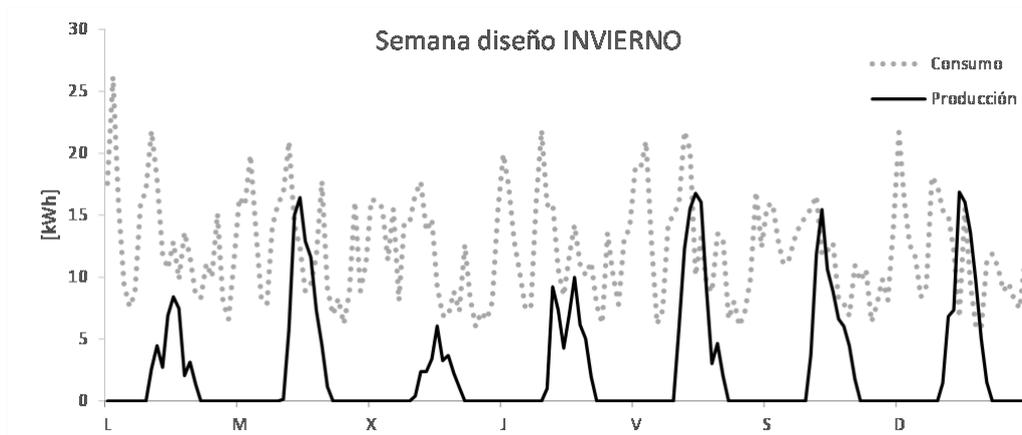
Como se ha comentado anteriormente el objetivo del diseño de la instalación como la CEL se ha basado en maximizar el porcentaje de autoconsumo, es decir, que toda la producción vaya directamente al consumo de CE y se vierta a la red la menor cantidad de energía posible. Una vez seleccionada la superficie útil de la instalación y el tipo de módulo, el resultado de la producción es el siguiente:

Tabla 11: Consumo vs Producción a lo largo del año

Mes	Consumo [MWh]	Producción [MWh]	Excedentes [MWh]
Enero	8,8	1,6	0,0
Feb	7,8	2,0	0,0
Mar	8,1	4,3	0,0
Abr	7,3	5,0	0,0
May	6,4	5,5	0,0
Jun	5,6	5,7	0,2
Jul	5,8	6,7	1,0
Ago	6,8	6,2	0,0
Sep	6,0	4,4	0,0
Oct	6,9	2,9	0,0
Nov	8,8	1,7	0,0
Dic	8,6	1,8	0,0
	86,9	47,9	1,1

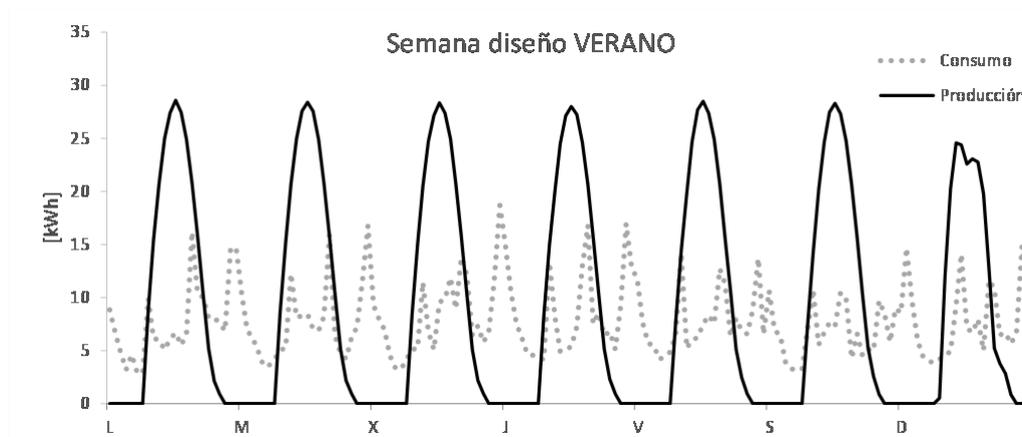
Como se puede observar, el autoconsumo de la presente instalación roza el 100% con unos excedentes de 1MWh, pero por desgracia estos valores solo tienen en cuenta la cantidad de energía en todo el día y no hora por hora, es decir, la suma del consumo corresponde cuando hay producción y cuando no hay, por lo que la producción en verano durante el día debe ser superior, convirtiéndose en excedentes, para compensar el consumo que existe cuando no hay

producción solar. A continuación, se mostrará el modo de operación de la CEL durante una semana de invierno y otra de verano, que ayudará a entender mejor el significado de autoconsumo.



Gráfica 12: Semana típica de invierno.

En este período se puede observar que el autoconsumo tiene un valor muy importante de casi el 100% (se consume todo lo que se produce) debido a que en los meses de invierno la producción es menor y el consumo aumenta generalmente debido a la demanda de calefacción básicamente.



Gráfica 13: Semana típica de verano.

Por el contrario, en una semana de verano ocurre que la producción es mayor que el consumo durante el día dando lugar a una gran cantidad de excedentes, y por lo tanto una reducción significativa del porcentaje de autoconsumo. Como consecuencia de lo comentado anteriormente el resultado del porcentaje de autoconsumo teniendo en cuenta hora por hora a lo largo del año disminuye al 59%, siendo el valor máximo que se puede alcanzar a la hora de repartir la producción a los miembros de la CEL.

2.3.2 Cálculo del dimensionamiento de la instalación fotovoltaica

El siguiente paso una vez que se ha calculado la energía solar por unidad de superficie que llega al módulo fotovoltaico, es estimar la superficie necesaria de cubierta para que los excedentes energéticos sean lo menos posible en los meses donde hay mayor radiación solar, así como el tipo de módulo fotovoltaico y sus características físicas y eléctricas.

Con el módulo fotovoltaico seleccionado, se determina la energía eléctrica que será capaz de producir la instalación fotovoltaica al final de año debido a su eficiencia con la ecuación (4).

$$W_{elec} \left(\frac{Wh}{m^2} \right) = 0,2 \cdot 1680799, = \mathbf{336159,8} \left(\frac{Wh}{m^2} \right)$$

Seguidamente, se elige cual es la superficie óptima que cumpla con los requisitos mencionados anteriormente. En este caso la superficie elegida es de 142,5 m², y se utiliza la ecuación (5) para cuantificar la energía que produce la presente instalación fotovoltaica a final de año.

$$W_{elec}(kWh) = \frac{142,5 \cdot 336159,8}{1000} = \mathbf{47902,8} \text{ (kWh)}$$

Finalmente, para acabar con el dimensionamiento se calculan la cantidad de módulos necesarios para conseguir la producción de energía deseada y que potencia nominal forma la instalación fotovoltaica.

$$N \text{ de módulos} = \frac{\text{Superficie instalación (m}^2\text{)}}{\text{Superficie del módulo (m}^2\text{)}} = \frac{142,5 \text{ m}^2}{2,226 \text{ m}^2} = \mathbf{64 \text{ módulos}} \quad (6)$$

2.3.3 Cálculo de mejoras para la reducción de la demanda eléctrica

La rehabilitación de las envolventes térmicas y la sustitución de acumulador eléctrico por aerotermia para calefacción y ACS de las viviendas de los miembros de la comunidad energética suponen un ahorro en la demanda eléctrica, y como consecuencia un ahorro económico. Un estudio realizado en un bloque de viviendas ubicado en la ciudad de Zaragoza [39], que tiene un clima correspondiente a una zona Continental, muy parecido al lugar del presente estudio, determinó que el cambio de la envolvente térmica da lugar a un ahorro del 55% aproximadamente en el consumo de calefacción del edificio. Otra forma de ahorro en la factura de la luz es la sustitución de los acumuladores eléctricos por una bomba de calor aerotérmica puesto que existe una mejora en el rendimiento de los equipos como se puede ver en la tabla que hay a continuación.

Tabla 12: Eficiencias de equipos

Equipo para calefacción y ACS	Eficiencia
Acumulador eléctrico	$\eta=100\%$
Bomba de calor aire-agua	COP=3

Para el presente estudio se ha supuesto un rendimiento del acumulador eléctrico de 100%, es decir, que toda la energía eléctrica que le llega se convertirá en calor; y en el caso de la bomba de calor aire-agua (aeroterminia) se escogerá una bomba de calor con un COP (Coefficient Of Performance) igual a 3, por lo que por cada una unidad de energía eléctrica se obtendrán 3 unidades de energía térmica. En cuanto al ahorro de energía por mejoras en la envolvente térmica se calcularán los ahorros energéticos en base a un 50% y no a un 55% de ahorro en el consumo de calefacción, para estimar a la baja los resultados que se obtengan. Por otra parte, cabe destacar que los cálculos que se realizarán a continuación serán en referencia a aquellos vecinos de la comunidad que consumen energía eléctrica para abastecer los servicios comentados anteriormente.

Una vez que se han determinado los rendimientos de los equipos y el porcentaje de ahorro al sustituir la envolvente, es necesario conocer que parte del consumo de los miembros va destinado para calefacción y cuanto para el agua caliente sanitaria. Para ello, este apartado se ha apoyado en un informe sacado del IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía), que muestra en la Tabla 13 cuáles son los porcentajes de consumos energéticos a lo largo de un año de media por hogar y zona climática.

Tabla 13: Porcentaje de consumo por servicio [9]

Unidad: tep/hogar	Servicios	Zona Atlántica		Zona Continental		Zona Mediterránea	
Pisos	Calefacción	0,171	22,2%	0,379	43,9%	0,135	24,6%
	Agua caliente sanitaria	0,194	25,1%	0,199	23,0%	0,142	25,8%
	Cocina	0,080	10,4%	0,059	6,8%	0,042	7,7%
	Refrigeración	0,045	5,9%	0,019	2,2%	0,011	2,0%
	Iluminación	0,031	4,0%	0,025	2,9%	0,041	7,5%
	Electrodomésticos	0,229	29,7%	0,162	18,8%	0,158	28,8%
	Standby	0,021	2,8%	0,021	2,4%	0,020	3,6%
	TOTAL	0,772	100%	0,864	100%	0,549	100%
Unifamiliares	Calefacción	0,855	45,9%	1,313	71,2%	0,795	63,3%
	Agua caliente sanitaria	0,120	6,4%	0,160	8,7%	0,138	11,0%
	Cocina	0,142	7,6%	0,099	5,3%	0,070	5,6%
	Refrigeración	0,447	24,0%	0,024	1,3%	0,015	1,2%
	Iluminación	0,029	1,5%	0,036	2,0%	0,040	3,2%
	Electrodomésticos	0,255	13,7%	0,194	10,5%	0,177	14,1%
	Standby	0,017	0,9%	0,018	1,0%	0,019	1,5%
	TOTAL	1,864	100%	1,844	100%	1,255	100%

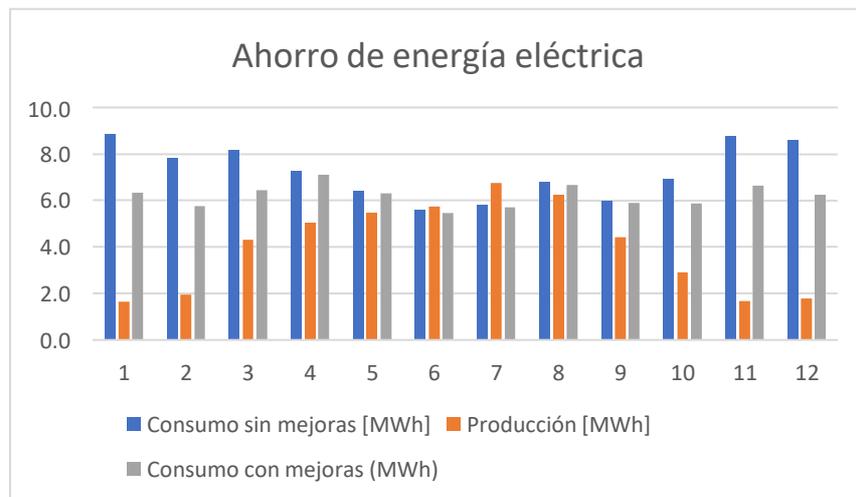
En este caso los porcentajes elegidos para realizar los cálculos son: 70% de consumo de calefacción únicamente en los meses de más fríos que comprenden desde octubre hasta marzo, y un 8% de ACS durante todo el año debido a que es un consumo constante.

Para comenzar a realizar los cálculos en relación con el ahorro de electricidad en esta comunidad energética es de vital importancia diferenciar entre dos diferentes casos de estudio que se muestran en la tabla que hay a continuación.

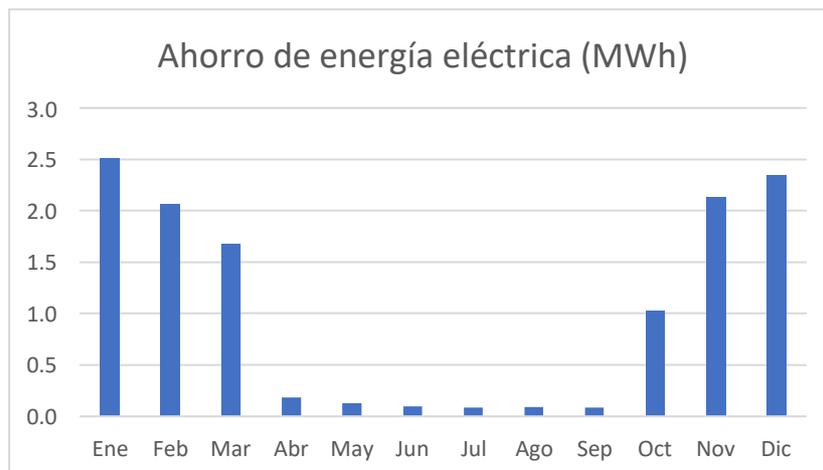
Tabla 14: Tipos de mejora

Casos	Servicios	Mejoras
Caso 1: 2 miembros	Calefacción y ACS	Envolvente + Aerotermia
Caso 2: 7 miembros	ACS	Aerotermia

2.3.3.1 Resultados



Gráfica 14: Consumo vs Producción



Gráfica 15: Ahorro de energía eléctrica (MWh) por mes

Finalmente, se muestran en la Gráfica 15 los resultados obtenidos a lo largo del año si se llevaran a cabo las mejoras propuestas comentadas anteriormente. Al final del año, el ahorro de energía eléctrica obtenidos es del 14% teniendo en cuenta a todos los miembros de la comunidad. Si solo se tuvieran en cuenta los vecinos a los cuales se le han tenido en cuenta las mejoras, este ahorro ascendería a un 34%, pero si por último solo se considerara a los vecinos a los que se le han realizado las dos mejoras el ahorro final sería de un 64%. Hay que recordar que este estudio es puramente energético y no se han tenido en cuenta aspectos económicos, esto es debido a que en la presente comunidad no se realizarán estos cambios, pero estas mejoras se pueden tener en cuenta para futuras comunidades que implementarán.

2.3.4 Cálculo de coeficientes fijo de reparto

El objetivo de este apartado es calcular unos coeficientes fijo de reparto, que es la parte fija de la producción a lo largo de un año que se le atribuirá a cada miembro de la comunidad energética en estudio, que tengan el mayor porcentaje de autoconsumo y que este valor sea lo más equitativo posible entre cada participante.

Tabla 15: Coeficientes fijos

Participante	Coeficiente fijo
Alvaro Casa	A
Antonio	B
Antonio y Rosa	C
Ayto. (Bomba de aguas)	D
Ayto. Dep Munic.	E
Bea	F
Diego	G
Elena (Palacio + Bar)	H
Emi y Conchi	I
Luismi	J
Néstor	K
Pepe e Inés	L
Raul	M
Rosa	N
Santiago A.	O

A cada miembro se le establece un coeficiente y la suma de estos coeficientes no puede superar el valor de 1 en ningún caso. En este caso existen 15 miembros a los cuáles se les dará un valor de coeficiente, que multiplicado por la producción total de la instalación fotovoltaica determinará la cantidad de energía que recibirá cada establecimiento.

2.3.4.1 Objetivos

- **Maximizar el porcentaje de autoconsumo**

Existen varias definiciones, pero en este caso se entenderá como autoconsumo la cantidad de producción que se le asigna a casa miembro para abastecer su consumo en esa hora, por lo que en el caso que la producción sea mayor que el consumo de esa hora se exporta a red como excedente, pero en el caso contrario será necesario inyectar energía de la red. Por otra parte, se establece el porcentaje de autoconsumo que será la relación entre el autoconsumo y la producción en una hora como se puede observar en la fórmula que se muestra a continuación.

$$(\%)Autoconsumo = \frac{Autoconsumo(kWh)}{Producción(kWh)} \cdot 100 \quad (7)$$

Pueden ocurrir varios casos a lo largo del día:

Tabla 16: Diferentes hipótesis

CASOS	AUTOCONSUMO	EXCEDENTES	RED
Producción > Consumo	Consumo	Producción - Consumo	Exportar
Producción = Consumo	Producción	0	0
Producción < Consumo	Producción	0	Importar

Una vez que se ha entendido la definición teórica de autoconsumo, lo siguiente será implementar todos los valores en una hoja de Excel con las condiciones correspondientes para que sea capaz de mostrar los resultados obtenidos a lo largo de un año, lo cual permitirá obtener unas conclusiones que indiquen la bondad del reparto. Finalmente, cuando se determine la suma hora a hora a final de año de todos los participantes de la comunidad del autoconsumo, el objetivo será dar unos valores a los coeficientes que supongan la mayor cantidad de autoconsumo posible.

- Reparto justo

El segundo objetivo hace referencia a un reparto equitativo entre los miembros de la comunidad energética. Para determinar que el reparto sea lo más igualado posible será necesario el cálculo del porcentaje de autoconsumo individual de cada uno como ya se ha visto en el apartado anterior, y una vez obtenido esos valores se hará la desviación estándar, que indica la dispersión de esos valores, con el fin de obtener el mínimo valor posible.

2.3.4.2 Criterios para el cálculo de los repartos fijos

Existen diferentes maneras para determinar el valor de los coeficientes de reparto, puesto que cada comunidad energética puede tener un propósito diferente como pueden ser el reparto igualitario según la inversión, el máximo ahorro económico etc.

En el caso de la presente comunidad el objetivo principal es maximizar el valor del autoconsumo colectivo teniendo en cuenta los valores de consumo hora a hora de cada persona del año 2019. Es por ello por lo que a lo largo del estudio se han establecido una serie de criterios para obtener los resultados deseados, y estos criterios son:

- **Criterio Ideal: Reparto variable**

Se ha llegado a la conclusión de que el criterio ideal para definir unos coeficientes de reparto con los datos de consumo hora a hora es atribuir unos coeficientes variables, es decir, que a cada miembro de la comunidad se le aplique un reparto diferente en cada hora del año mientras haya producción solar. Este reparto se iguala a la relación entre consumo de cada miembro individual y el consumo total de toda la comunidad energética en cada hora del año.

$$\text{Coeficiente variable} = \frac{\text{Consumo por miembro (kWh)}}{\text{Consumo total (kWh)}} \cdot 100 \quad (8)$$

En resumen, en cada día a cada participante se le asigna tantos coeficientes como horas haya de producción solar en ese mismo día. Este criterio no se aplicará en esta comunidad debido a la dificultad de predecir los consumos de los próximos días, pero sí será de gran utilidad para poder comparar los demás criterios y ver cuál es el más adecuado.

- **Reparto fijo 1: Relación del consumo anual**

El primer criterio estudiado tiene la misma idea que el ideal, pero con una pequeña diferencia en el tiempo del consumo. Los coeficientes se han calculado mediante la relación del consumo de cada miembro y el consumo total al final del año, por lo que la fórmula utilizada ha sido la misma que la del apartado anterior. Los valores de los coeficientes calculados se recogen en la tabla que se presenta a continuación.

- **Reparto fijo 2: Consumo cuando hay producción**

Este criterio se basa en la misma idea que el anterior, pero éste tiene en cuenta la relación del consumo de cada miembro y el consumo total al final del año cuando hay producción solar. Es un criterio que obtiene unos mejores resultados puesto que no tiene en cuenta el consumo cuando no hay producción solar, lo que tiene un sentido mayor. Para estimar estos coeficientes ha sido necesario discriminar los valores de consumo cuando no hay producción, seleccionando todos los valores en la pestaña de producción excepto el valor 0.

- **Reparto fijo 3: Solver de Excel**

Por último, para este reparto ha sido necesaria la ayuda de Solver que es un programa de complemento de Microsoft Excel que se utiliza para realizar un análisis para encontrar un valor óptimo (mínimo o máximo) para una fórmula en una celda, la celda objetivo, que está sujeta a restricciones o limitaciones en los valores de otras celdas de fórmula de una hoja de cálculo. En este caso ha variado los coeficientes de reparto para maximizar el valor de autoconsumo total, teniendo como restricción que la suma de los coeficientes deber ser igual a 1. De esta forma se han conseguido los mejores resultados.



Figura 1: Ubicación programa Solver

2.3.4.3 Resultados

Tabla 17: Resumen de los coeficientes fijos

Participante	Coeficiente		
	Reparto fijo 1	Reparto fijo 2	Reparto fijo3
Alvaro Casa	3,88%	3,91%	3,60%
Antonio	11,00%	13,80%	12,53%
Antonio y Rosa	2,54%	2,77%	2,33%
Ayto. (Bomba de aguas)	13,60%	11,17%	19,55%
Ayto. Dep Munic.	2,56%	2,41%	1,52%
Bea	4,19%	5,04%	5,25%
Diego	1,96%	1,24%	0,76%
Elena (Palacio + Bar)	24,57%	27,36%	24,40%
Emi y Conchi	2,72%	3,53%	3,24%
Luismi	12,90%	8,97%	9,97%
Néstor	1,99%	2,40%	2,36%
Pepe e Inés	3,23%	3,93%	3,58%
Raul	2,17%	2,83%	2,63%
Rosa	5,33%	5,45%	4,47%
Santiago A.	7,36%	5,18%	3,81%

Tabla 18: Resultados

Criterio	Autoconsumo (MWh)	(%) Autoconsumo	Desviación
Reparto variable	28,34	59,15%	6,58%
Reparto fijo 1	22,72	47,42%	13,09%
Reparto fijo 2	22,79	47,58%	8,25%
Reparto fijo 3	23,02	48,06%	8,75%

El criterio que se llevará a cabo será el reparto fijo 3 porque ofrece un autoconsumo de unos 200 kWh mayor, y además la desviación, que indica la bondad del reparto no se aleja mucho del

resultado ideal. A continuación, se muestra una tabla resumen con los resultados más destacados a nivel individual para cada miembro.

Tabla 19: Tabla resumen de resultados con el reparto fijo 3

Vivienda	Coeficiente	Consumo (MWh)	Producción	Autoconsumo	Compra red	Excedentes	AC
Álvaro Casa	3,5973%	3,4	1,7	0,9	2,5	0,9	50%
Antonio	12,5338%	9,6	6,0	3,4	6,2	2,6	57%
Antonio y Rosa	2,3254%	2,2	1,1	0,7	1,5	0,5	59%
Ayto. (Bomba de aguas)	19,5535%	11,8	9,4	2,7	9,1	6,6	29%
Ayto. Dep Munic.	1,5236%	2,2	0,7	0,4	1,9	0,4	49%
Bea	5,2504%	3,6	2,5	1,2	2,5	1,4	46%
Diego	0,7591%	1,7	0,4	0,2	1,5	0,2	44%
Elena (Palacio + Bar)	24,4000%	21,4	11,7	7,1	14,3	4,6	61%
Emi y Conchi	3,2436%	2,4	1,6	0,9	1,5	0,7	56%
Luismi	9,9650%	11,2	4,8	2,0	9,2	2,7	42%
Néstor	2,3594%	1,7	1,1	0,5	1,2	0,6	45%
Pepe e Inés	3,5828%	2,8	1,7	1,0	1,8	0,8	56%
Raul	2,6319%	1,9	1,3	0,7	1,2	0,6	53%
Rosa	4,4672%	4,6	2,1	0,8	3,8	1,3	39%
Santiago A.	3,8069%	6,4	1,8	0,7	5,7	1,1	40%
Total	1,00000	86,908057	47,902778	23,022489	63,885568	24,880289	8,75%

2.3.5 Cálculo de la viabilidad de las baterías

El objetivo de este apartado será calcular la rentabilidad que puede suponer la implementación de unas baterías solares con el fin de aumentar el autoconsumo de la comunidad energética, lo que supone un ahorro tanto energético como económico puesto se reduce la cantidad de energía que se importa de la red, y que lleva asociada un coste económico.

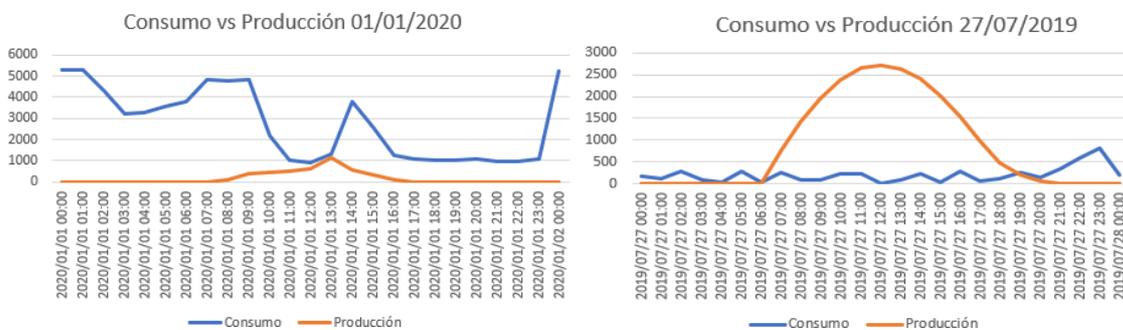
Las baterías solares se utilizan para poder almacenar la energía eléctrica generada por las placas solares fotovoltaicas en las horas de mayor radiación solar por lo general. De este modo, la energía almacenada se puede utilizar durante la noche o cuando la radiación solar no es tan elevada. Lo que se consigue con las baterías es que con los excedentes de energía se cargue para abastecer la demanda cuando no exista producción fotovoltaica, reduciendo la energía tanto importada de la red como exportada a la red, y por lo tanto aumentar el porcentaje de autoconsumo a lo largo de un día.

Para realizar los cálculos de viabilidad se elegirán a aquellas entidades que a lo largo del año más energía consuman y sobre todo exporten la mayor cantidad de excedentes hacia la red. A priori se han visto que las entidades que más excedentes tienen son:

Tabla 20: Consumo y producción

Entidad	Consumo (kWh)	Excedentes (kWh)
Sistema de bombeo	11821,2	4447,9
(Palacio + Bar) de Elena	21354,9	4681,3
Vivienda de Luismi	11213,8	3906,6
Herrería de Antonio	9563,7	2025,3

Se ha observado el perfil de consumo de cada entidad, se ha decidido excluir del estudio de viabilidad la vivienda de Luis Miguel puesto que la mayoría de su consumo tiene lugar en las horas nocturnas de los meses de invierno, que precisamente, es cuando no hay casi excedentes porque la radiación solar es menor, y al contrario ocurre en verano, que es cuando tiene muchos excedentes, pero no tiene consumo en las horas nocturnas. Ese perfil de consumo es debido a que cubre los servicios de calefacción y ACS con un acumulador eléctrico. En las grafica que se presenta a continuación se puede observar perfectamente los hábitos de su consumo.



Gráfica 16: (a) consumo vs producción en invierno. (b) consumo vs producción en verano

Una vez seleccionadas las entidades para estimar la viabilidad de las baterías, será necesario utilizar una hoja de Excel para simular la carga y descarga de las baterías aprovechando los excedentes y consumiendo cuando no exista producción solar de cada una de las entidades. En los resultados que se mostrarán a continuación se han tenido en cuenta unas baterías con las siguientes características.

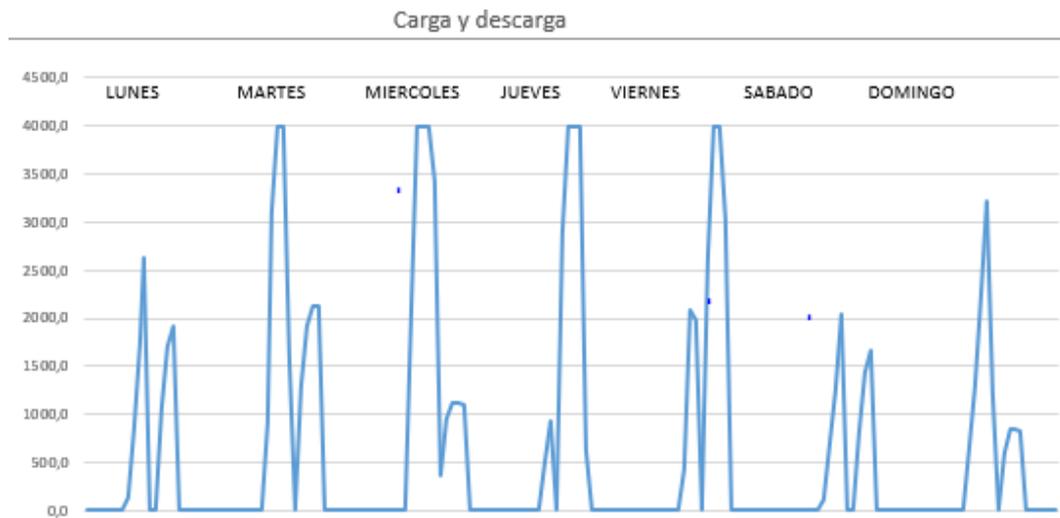
Tabla 21: Características de la batería

Precio	277 €/kWh
Profundidad de descarga (DOD)	80%
Rendimiento	100%

2.3.5.1 Sistemas de bombeo de agua

Otro factor importante a tener en cuenta de las baterías es el modo de uso, es decir, cuantos ciclos de carga y descarga realizará dicha batería a lo largo de un año, puesto que ese factor influirá en los años de vida útil de la batería. El sistema de bombeo tiene un perfil de consumo peculiar ya que no sigue un patrón fijo, solo consume una gran cantidad de energía en dos momentos diferentes del día, y es por ello, que la batería que se implemente en el sistema sufrirá dos ciclos carga y descarga durante el día como se puede observar en la gráfica que hay a continuación.

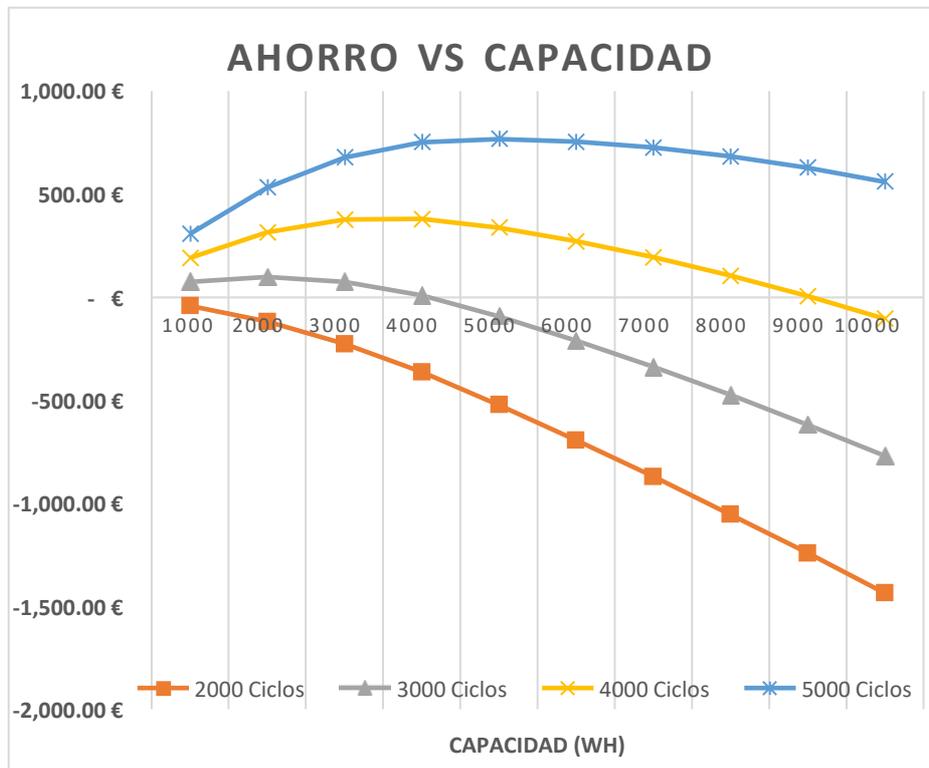
Resultados



Gráfica 17: Carga y descarga de la batería

$$\frac{\text{Ciclos}}{\text{año}} = 2 \frac{\text{Ciclos}}{\text{día}} \cdot 365 \frac{\text{días}}{\text{año}} = 730$$

Una vez conocido los ciclos que beneficios económicos realizará la batería a lo largo de un año, se estudiará cuanto debe ser la vida útil de la batería para comenzar a obtener algún ahorro económico cuando ésta deje de funcionar.



Gráfica 18: Ahorro vs Capacidad

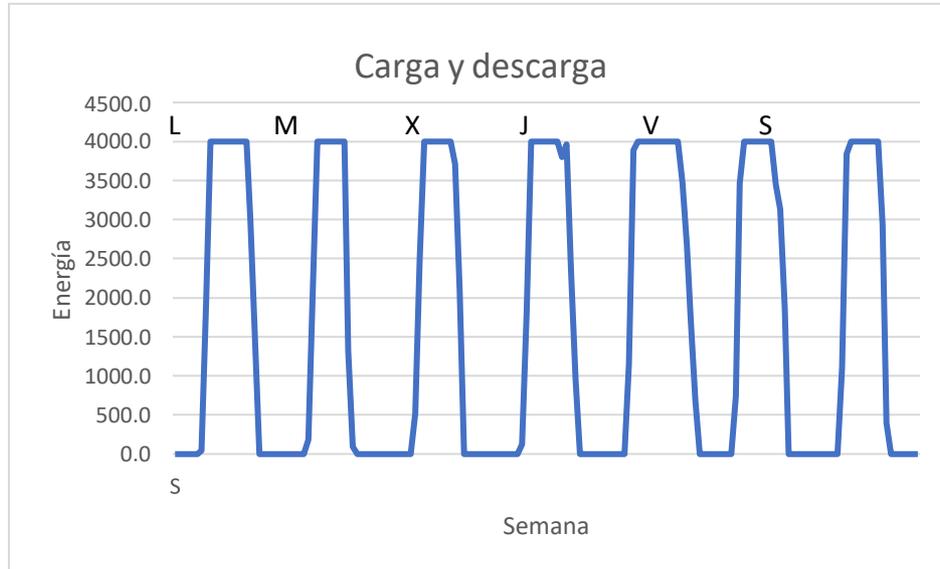
En la gráfica anterior se puede observar que la batería empieza a ser rentable cuando supera los 3000 ciclos de vida, pero además su capacidad no debe ser muy elevada debido a que a más capacidad hay un punto en el que la vida útil de la batería y el tiempo de retorno son iguales. También se muestra que, si hay posibilidad de implementar una batería que tenga 5000 ciclos de vida, o lo que es lo mismo 6,8 años de vida útil, el mayor beneficio se obtiene con una batería con una capacidad de 5000 kWh consiguiendo un ahorro al final de su vida útil de 767 euros.

$$Vida\ útil\ (años) = \frac{Ciclos\ de\ vida}{Ciclos/año} \quad (9)$$

2.3.5.2 Palacio y bar de Elena

A diferencia del sistema de bombeo de agua, el consumo del bar y del palacio siguen un patrón más o menos fijo, en donde durante el día se consume la mayor cantidad de energía, y sobre todo en el mediodía. Por este motivo la batería en los meses de invierno se cargará durante la mañana y abastecerá el consumo cuando necesite a lo largo del día por lo general, y en los meses de más radiación se cargará a lo largo del día y se descargará en las horas nocturnas, quedando la gráfica carga y descarga de la siguiente forma:

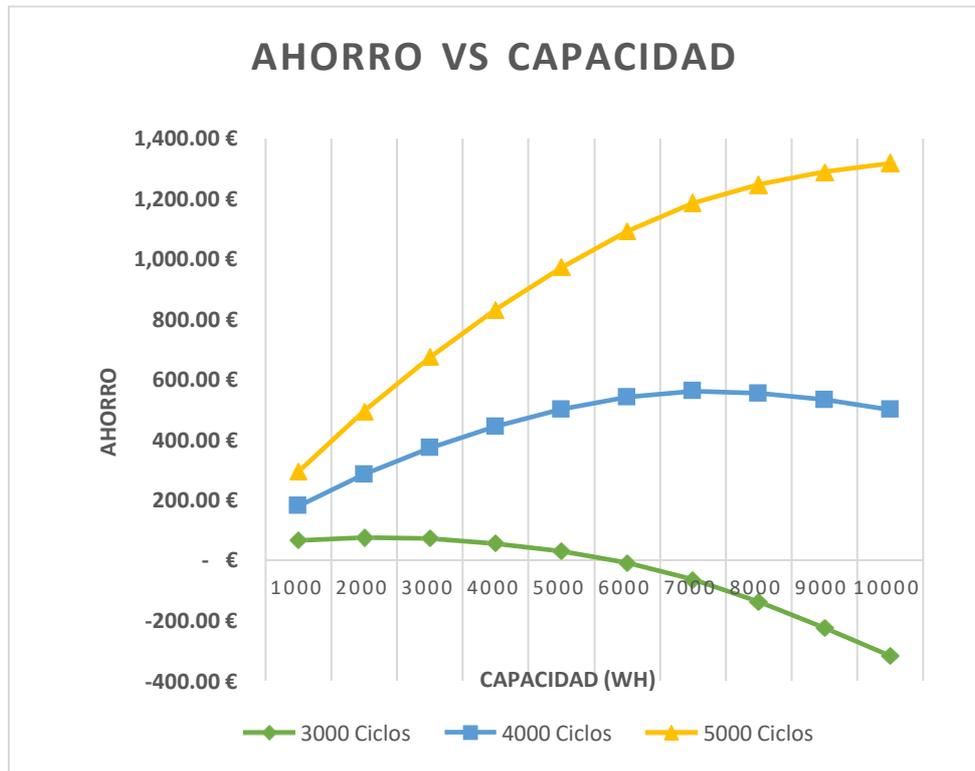
Resultados



Gráfica 19: Carga y descarga

$$\frac{\text{Ciclos}}{\text{año}} = 1 \frac{\text{Ciclo}}{\text{día}} \cdot 365 \frac{\text{días}}{\text{año}} = 365$$

Al tener menos ciclos por año, la vida útil de la batería será mayor, en este caso será el doble de años del apartado anterior. El siguiente paso es analizar la rentabilidad de las baterías.



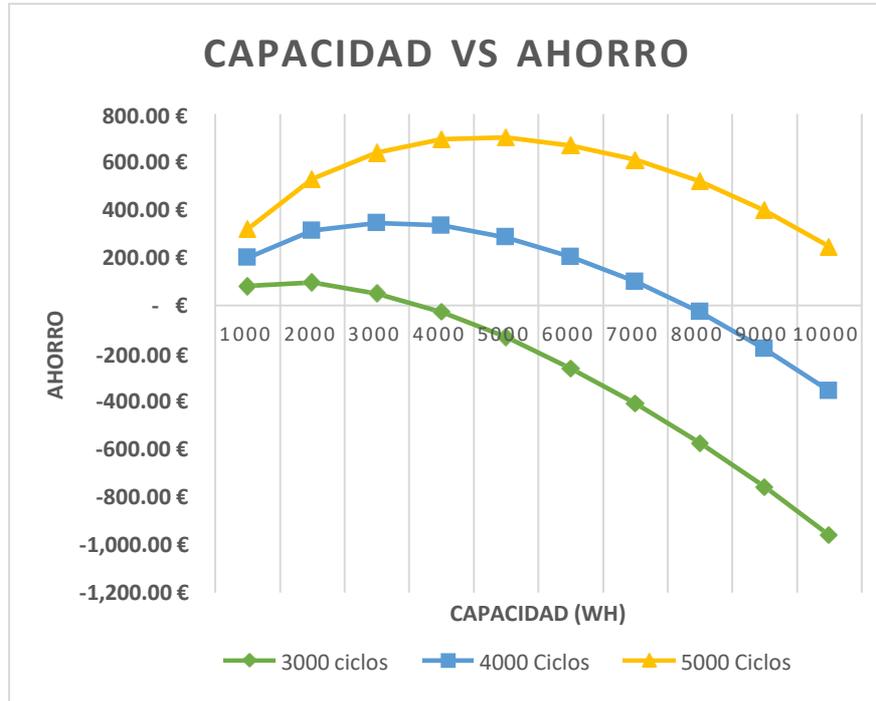
Gráfica 20: Ahorro vs Capacidad

Al igual que en el caso anterior la rentabilidad de la batería puede existir si ésta tuviera un ciclo de vida superior a los 3000, lo que equivale a 8,2 años. Si existiera la posibilidad, una batería con una vida útil de 13,6 años y un almacenamiento de 10000Wh podría suponer un ahorro de 1318 euros.

2.3.5.3 Herrería de Antonio

Por último, se analizará la rentabilidad de las baterías que aprovecha los excedentes de la herrería de Antonio. El perfil de consumo de energía, y a su vez la carga y descarga de la batería es igual que el bar y el palacio de Elena por lo que tanto los ciclos anuales y la carga y descarga de la batería se asemeja a la Gráfica 21. La viabilidad se presenta en la gráfica que se propone a continuación.

Resultados



Gráfica 21. Capacidad vs Ahorro

Los beneficios económicos se producen a partir de baterías de muy baja capacidad con 3000 ciclos de vida. El mejor de los casos tiene lugar con una batería con 5000 ciclos de vida, con una capacidad de 5000Wh, en la cual se obtiene un ahorro al final de su vida útil de 702 euros.

2.3.5.4 Resultados óptimos

Tabla 22: Resultados

	Sistema de bombeo	Palacio y bar de Elena	Herrería de Antonio
Ciclo de vida	5000	5000	5000
Vida útil (años)	6,8	13,7	13,7
Capacidad (Wh)	5000	10000	5000
Inversión	1385	2770	1385
Ahorro anual	314,20 €	298,41 €	152,38 €
Payback (años)	4,4	9,3	9,1
Ahorro energético (kWh)	2209,0	2188,3	903,4
Ahorro total	767,04 €	1.317,74 €	702,33 €



Instalar baterías para aumentar el autoconsumo y obtener beneficios energéticos es una opción que se debe tener en cuenta si quieres optimizar la comunidad energética. Los resultados indican que las baterías pueden ser viables en el momento que su vida útil supere los 3000 ciclos en general, pero en la realidad, el beneficio se obtiene a partir de los 4000 ciclos debido a que en el estudio no se tuvo en cuenta las pérdidas que tienen las baterías. En la actualidad encontrar una batería que cumpla con las características mencionadas es casi imposible, por lo que no será rentable en estos casos colocar unas baterías, aunque no se descartará en el futuro cuando la tecnología de las baterías avance, pero siempre teniendo en cuenta los precios de éstas.

3 Evaluación económica

Con el fin de justificar la implementación de la comunidad energética que se ha estudiado a lo largo del documento, se realizará una evaluación económica que contemplará los beneficios económicos y los tiempos de retorno de la inversión tanto globalmente para la comunidad como individualmente para cada participante.

3.1 Rentabilidad de la comunidad energética

La evaluación se ejecutará teniendo en cuenta dos hipótesis diferentes, y además no se tendrá en cuenta los costes de mantenimiento ni criterios medioambientales por lo que el resultado final en la realidad será un poco peor.

- Sin ningún tipo de subvención económica

A partir del presupuesto que ofrecen las empresas de energías renovables se estima un precio global de la instalación que ronda un valor de 1,1 €/W. A partir de ese dato se obtiene que la inversión inicial a realizar es:

$$Inversión(€) = 1,1 \left(\frac{€}{W}\right) \cdot Potencia\ de\ la\ instalación\ (W) \quad (10)$$

$$Inversión(€) = 1,1 \left(\frac{€}{W}\right) \cdot 29127,4\ (W) = \mathbf{32048,1€}$$

El ahorro económico anual debido a consumir la energía eléctrica a partir de la producción de la instalación fotovoltaico tiene dos componentes que son el propio ahorro por dejar de pagar la energía de la red y se determina a partir del ahorro energético por el precio de la energía a esa hora, y la compensación económica de los excedentes a red que son los excedentes energéticos de un año por el precio al que lo descuenta de la factura la comercializadora.

$$Ahorro\ anual\ \left(\frac{€}{año}\right) = Ahorro\ factura(€) + compensación(€) \quad (11)$$

$$Ahorro\ anual\ \left(\frac{€}{año}\right) = 7097,1€ + 4155,0€ = \mathbf{11252,2\ \left(\frac{€}{año}\right)}$$

El tiempo de retorno o payback de la inversión indica el tiempo necesario para recuperar la inversión realizada y resulta de la relación entre la inversión y el ahorro económico anual que ofrece la instalación.

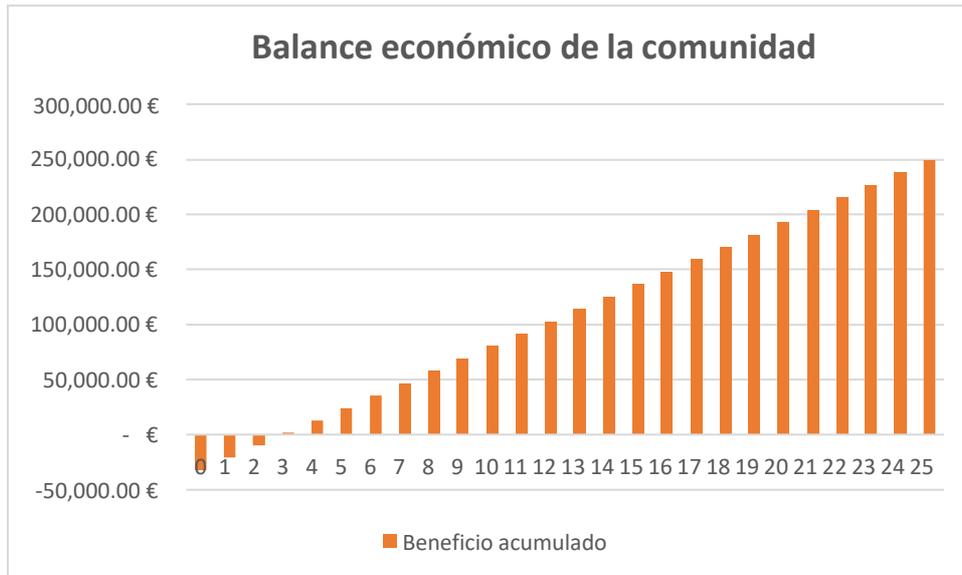
$$Payback\ (años) = \frac{Inversión(€)}{Ahorro\ anual\ \left(\frac{€}{año}\right)} \quad (12)$$

P ayback



$$(años) = \frac{32048,1€}{11252,2 \left(\frac{€}{año}\right)} = \mathbf{2,8 años}$$

Si se supone una vida útil de la instalación fotovoltaica de 25 años, se puede mostrar en la Gráfica 22 cuáles son los beneficios obtenidos a lo largo de la vida útil de la instalación.



Gráfica 22: Balance económico hipótesis 1

El beneficio económico que se consigue cuando se acaba la vida de la instalación asciende a unos 250000 euros.

- **Con una subvención económica de 17114 euros**

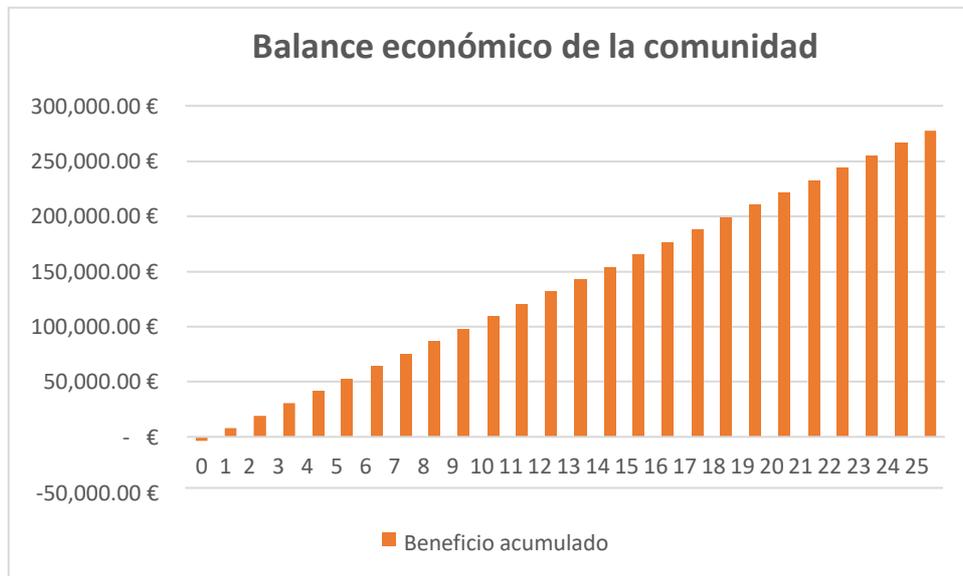
Con esta hipótesis, el ahorro anual se mantiene igual ya que la instalación es la misma, pero se diferencia en que a la inversión se le resta la cantidad de la subvención, y como consecuencia su tiempo de retorno disminuye considerablemente.

$$Inversión(€) = 32048,1(€) - 17114(€) = 14934,1€$$

$$Payback (años) = \frac{14934,1€}{11252,2 \left(\frac{€}{año}\right)} = 1,3 \text{ años}$$

Esto significa que con la presente subvención y con los precios de la electricidad que ofrece la comercializadora, el tiempo necesario para recuperar la inversión inicial de la comunidad energética en su globalidad es de un año y cuatro meses aproximadamente.

Con los nuevos datos a partir de la subvención se presenta en la Gráfica 23 los nuevos beneficios económicos acumulados a lo largo de la vida útil.



Gráfica 23: Balance económico hipótesis 2

3.2 Rentabilidad y reparto justo de los beneficios de los participantes

En el apartado anterior se analizó la rentabilidad global de la comunidad, pero es muy importante saber si todos los miembros de la instalación conseguirán los mismos beneficios, por eso a partir de la misma metodología utilizada para el tiempo de retorno de la instalación, se calcularán la recuperación de la inversión individualmente para cada entidad con una subvención económica de 17114 euros, que es la que se llevará a cabo.

Tabla 23: Resultados económicos de la comunidad

Miembro	Ahorro factura	Compensación	Ahorro anual	Inversión	Payback (años)	Ahorro total
Álvaro Casa	263,78 €	143,30 €	407,08 €	537,22 €	1,3	9.639,69 €
Antonio	1.056,85 €	432,69 €	1.489,54 €	1.871,81 €	1,3	35.366,72 €
Antonio y Rosa	200,73 €	75,80 €	276,53 €	347,28 €	1,3	6.566,05 €
Ayto. (Bomba de aguas)	847,46 €	1.108,21 €	1.955,68 €	2.920,13 €	1,5	45.971,75 €
Ayto. Dep Munic.	109,93 €	62,10 €	172,03 €	227,54 €	1,3	4.073,17 €
Bea	363,32 €	226,01 €	589,33 €	784,10 €	1,3	13.949,10 €
Diego	48,65 €	33,74 €	82,39 €	113,36 €	1,4	1.946,40 €
Elena (Palacio + Bar)	2.179,62 €	770,90 €	2.950,52 €	3.643,93 €	1,2	70.119,04 €
Emi y Conchi	268,38 €	113,45 €	381,83 €	484,41 €	1,3	9.061,36 €
Luismi	622,05 €	458,63 €	1.080,68 €	1.488,19 €	1,4	25.528,74 €
Néstor	157,17 €	103,83 €	261,00 €	352,36 €	1,4	6.172,62 €
Pepe e Inés	295,47 €	126,24 €	421,71 €	535,06 €	1,3	10.007,63 €
Raúl	203,33 €	99,60 €	302,93 €	393,06 €	1,3	7.180,20 €
Rosa	256,10 €	218,99 €	475,09 €	667,14 €	1,4	11.210,00 €
Santiago A.	224,37 €	181,51 €	405,88 €	568,53 €	1,4	9.578,57 €
Total	7.097,20 €	4.155,01 €	11.252,21 €	14.934,10 €	1,3	266.371,03 €

Como se puede observar en la tabla y para concluir este trabajo el tiempo de retorno de los participantes se sitúa entre uno y dos años, que es un valor muy bajo, pero que además se debe tener en cuenta el precio de la electricidad como se comentó anteriormente. El tiempo de retorno de cada uno tienen un valor muy parecido que abarca entre uno y dos años lo que indica



un reparto equitativo de los beneficios. Hay que tener en cuenta los resultados que se han obtenido son unos valores muy bajos dado que la subvención que se le ha otorgado a la presente comunidad es de un gran porcentaje de la inversión inicial.

4 Evaluación medioambiental

4.1 Introducción

La energía solar fotovoltaica es un recurso de generación de energía eléctrica que, al igual que otras energías renovables, constituye, frente a los combustibles fósiles, una fuente inagotable, contribuye al autoabastecimiento energético nacional y es menos perjudicial para el medio ambiente, evitando los efectos de su uso directo (contaminación atmosférica, residuos, etc.) y los derivados de su generación (excavaciones, minas, canteras, etc.). Cabe destacar que la energía fotovoltaica solo produce efectos perjudiciales para el medioambiente a la hora de la fabricación y el transporte, pero no de su producción.

4.2 Cálculo de las emisiones evitadas por el uso de sistemas fotovoltaicos.

Para el cálculo de las emisiones evitadas de CO₂ que se obtiene a partir de la generación de energía eléctrica con un sistema fotovoltaico, serán necesarios unos factores de conversión de kWh a Kg de CO₂ que proporciona el IDAE a partir de la siguiente tabla:

Tabla 24: Factores de emisiones de CO₂[40]

Factores de emisión de CO ₂		
	Fuente	Valores aprobados
		kg CO ₂ /kWh E. final
Electricidad convencional Nacional	(*)	0,357
Electricidad convencional peninsular	(**)	0,331
Electricidad convencional extrapeninsular	(**)	0,833
Electricidad convencional Baleares	(**)	0,932
Electricidad convencional Canarias	(**)	0,776
Electricidad convencional Ceuta y Melilla	(**)	0,721
Gasóleo calefacción	(***)	0,311
GLP	(***)	0,254
Gas natural	(***)	0,252
Carbón	(***)	0,472
Biomasa no densificada	(***)	0,018
Biomasa densificada (pelets)	(***)	0,018



Esta tabla muestra cuáles son los coeficientes de paso de ahorro en el caso de usar energías renovables frente a las diferentes fuentes de energía. En el caso de la presente instalación las emisiones evitadas se calculan con el coeficiente de paso de electricidad convencional Nacional:

$$Emisiones\ evitadas\ \left(\frac{kg\ CO_2}{año}\right) = 47902,8\ (kWh) \cdot 0,357\ \left(\frac{kg\ CO_2}{kWh}\right) = \mathbf{17101,3\ \left(\frac{kg\ CO_2}{año}\right)}$$

Con el resultado obtenido es posible calcular cual es la cantidad que se evita debió a implantar la comunidad energética si se considera una vida útil de la instalación de 25 años.

$$Emisiones\ evitadas(kg\ CO_2) = 17101,3\ \left(\frac{kg\ CO_2}{año}\right) \cdot 25\ (años) = \mathbf{427532,5(kg\ CO_2)}$$

5 Conclusiones

Este trabajo investiga las diferentes variables que pueden existir dentro de una comunidad de energías renovables para que ésta opere de la forma más eficiente posible o, dicho de otra forma, que se consuma la mayor parte de la energía generada por la instalación solar fotovoltaica que comparten todas las entidades que participan en el presente proyecto.

El documento pone en evidencia diferentes criterios a tener en cuenta a la hora de distribuir la energía eléctrica procedente de la instalación fotovoltaica a cada miembro asociado a la CEL de forma que establece un valor de coeficiente que será fijo en todo momento. Se ha llegado a la conclusión que el buen reparto de esta energía es clave puesto que no por tener un gran coeficiente de reparto significa que los beneficios tanto energéticos como económicos sean mayores, pero sí que hace que la inversión a realizar incremente su valor, y de ese motivo la importancia de la optimización de la comunidad. Los resultados obtenidos en base a los diferentes criterios de reparto han sido: en el caso del **CR1** los resultados no son atractivos dado que en el reparto se tiene en cuenta los consumos eléctricos de los miembros en las horas en las que la instalación solar fotovoltaica no está produciendo energía eléctrica dando lugar a un porcentaje de autoconsumo del 47,4%, que además dio lugar al reparto menos equitativo entre los miembros con una desviación típica del 13,1%; en el caso del **CR2** donde si se ha tenido en cuenta los consumos solo cuando hay producción, este porcentaje de autoconsumo alcanzó un 48,6%, pero en cambio se obtuvo los mejores resultados a la hora del reparto igualitario entre los participantes con una desviación típica del 8,2%; y en el **CR3** se han obtenido los mejores resultados según el objeto principal establecido al inicio del documento, a la hora de repartir la producción mediante coeficientes de repartos fijos a partir del programa **Solver** de Excel en el que se le introduce un objetivo, en este caso aumentar al máximo el valor del autoconsumo, y unas restricciones que deban cumplir para que el reparto sea posible, dando como resultado un porcentaje de autoconsumo del 48%, además de un buen resultado del reparto justo de una desviación de 8,7%. También se calculó viabilidad de implementar para aumentar aún más el porcentaje de autoconsumo, pero éstas todavía no son rentables dado que su vida útil no es muy elevada. Por último, el tiempo de retorno de la inversión TRS necesaria para poner en marcha la comunidad y con una subvención de 17114 euros puede variar entre unos y dos años puesto que dependen de factores como el precio del mercado eléctrico, lo que significa que a partir de ese valor se producirán ahorros económicos para cada miembro hasta el final de la vida útil de la instalación, y en el mejor de los casos se podría obtener un ahorro al final de la vida útil de la instalación de hasta 265000 euros.

Otros resultados, pero para comunidades que se vayan a implantar en el futuro, dieron lugar a que un cambio en mejoras de las envolventes térmicas y un cambio de los equipos que abastecen el servicio de calefacción y ACS por una bomba de calor aire-agua (aeroterminia), que es capaz de producir estos servicios con una eficiencia de 3 a 5 veces superior que un acumulador eléctrico, suponen un ahorro energético del 64% en la comunidad de estudio, pero se puede conseguir incluso un ahorro muy superior.

Por último, cabe destacar que, en el futuro los coeficientes de reparto calculados en este documento sufrirán cambios puesto que el perfil de consumo de los usuarios será diferente al aprovechar la energía generada por los módulos al máximo posible. Otra manera para mejorar



los resultados conseguidos es la sustitución de coeficientes fijos por unos coeficientes dinámicos que se establecen cada hora del año, y en España todavía no se ha implantado esta forma de operación.

6 Bibliografía

1. ipcc, «The Intergovernmental Panel on Climate Change,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.ipcc.ch/>. [Último acceso: Junio 2022].
2. N. N. O. a. a. administration, «May 2022 among Earth's top-10 warmest,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.noaa.gov/>. [Último acceso: Junio 2022].
3. GreenPeace, «Máximo histórico de concentraciones de CO2 en la atmósfera,» 9 Junio 2020. [En línea]. Available: <https://es.greenpeace.org/es/sala-de-prensa/comunicados/maximo-historico-de-concentraciones-de-co2-en-la-atmosfera/>. [Último acceso: Junio 2022].
4. R. Eléctrica, «EVOLUCIÓN DE LA GENERACIÓN RENOVABLE Y NO RENOVABLE,» 9 Junio 2022. [En línea]. Available: <https://www.ree.es/es/datos/generacion/evolucion-renovable-no-renovable>. [Último acceso: Junio 2022].
5. Iazzolino, G., Sorrentino, N., Menniti, D., Pinnarelli, A., De Carolis, M., & Mendicino, L. (2022). *Energy communities and key features emerged from business models review*. Energy Policy, 165, 112929.
6. Oria, J., Madariaga, E., Ortega, A., Díaz, E., & Mateo, M. (2015). Influence of characteristics of marine auxiliary power system in the energy efficiency design index. *J. Maritime Transp. Eng*, 4, 67.
7. LÓPEZ-RODRÍGUEZ, M. A., et al. *Analysis and modeling of active occupancy of the residential sector in Spain: An indicator of residential electricity consumption*. Energy Policy, 2013, vol. 62, p. 742-751.
8. TORRITI, Jacopo. *Demand Side Management for the European Supergrid: Occupancy variances of European single-person households*. Energy Policy, 2012, vol. 44, p. 199-206.
9. IDAE, *Consumos del Sector Residencial en España Resumen de Información Básica*, Final Report, Spanish Institute for Energy Diversification and Saving, Madrid, 2019.
10. ARGHIRA, Nicoleta, et al. *Prediction of appliances energy use in smart homes*. Energy, 2012, vol. 48, no 1, p. 128-134.
11. BURLINSON, Andrew; GIULIETTI, Monica; BATTISTI, Giuliana. *Technology adoption, consumer inattention and heuristic decision-making: Evidence from a UK district heating scheme*. Research Policy, 2018, vol. 47, no 10, p. 1873-1886.
12. DE ALMEIDA, Anibal, et al. *Characterization of the household electricity consumption in the EU, potential energy savings and specific policy recommendations*. Energy and Buildings, 2011, vol. 43, no 8, p. 1884-1894.
13. YAMAGUCHI, Y., et al. *A cross analysis of existing methods for modelling household appliance use*. Journal of Building Performance Simulation, 2019, vol. 12, no 2, p. 160-179.
14. MCKENNA, R., et al. *A stochastic multi-energy simulation model for UK residential buildings*. Energy and Buildings, 2018, vol. 168, p. 470-489.
15. PANÃO, Marta JN Oliveira; BRITO, Miguel C. *Modelling aggregate hourly electricity consumption based on bottom-up building stock*. Energy and Buildings, 2018, vol. 170, p. 170-182.



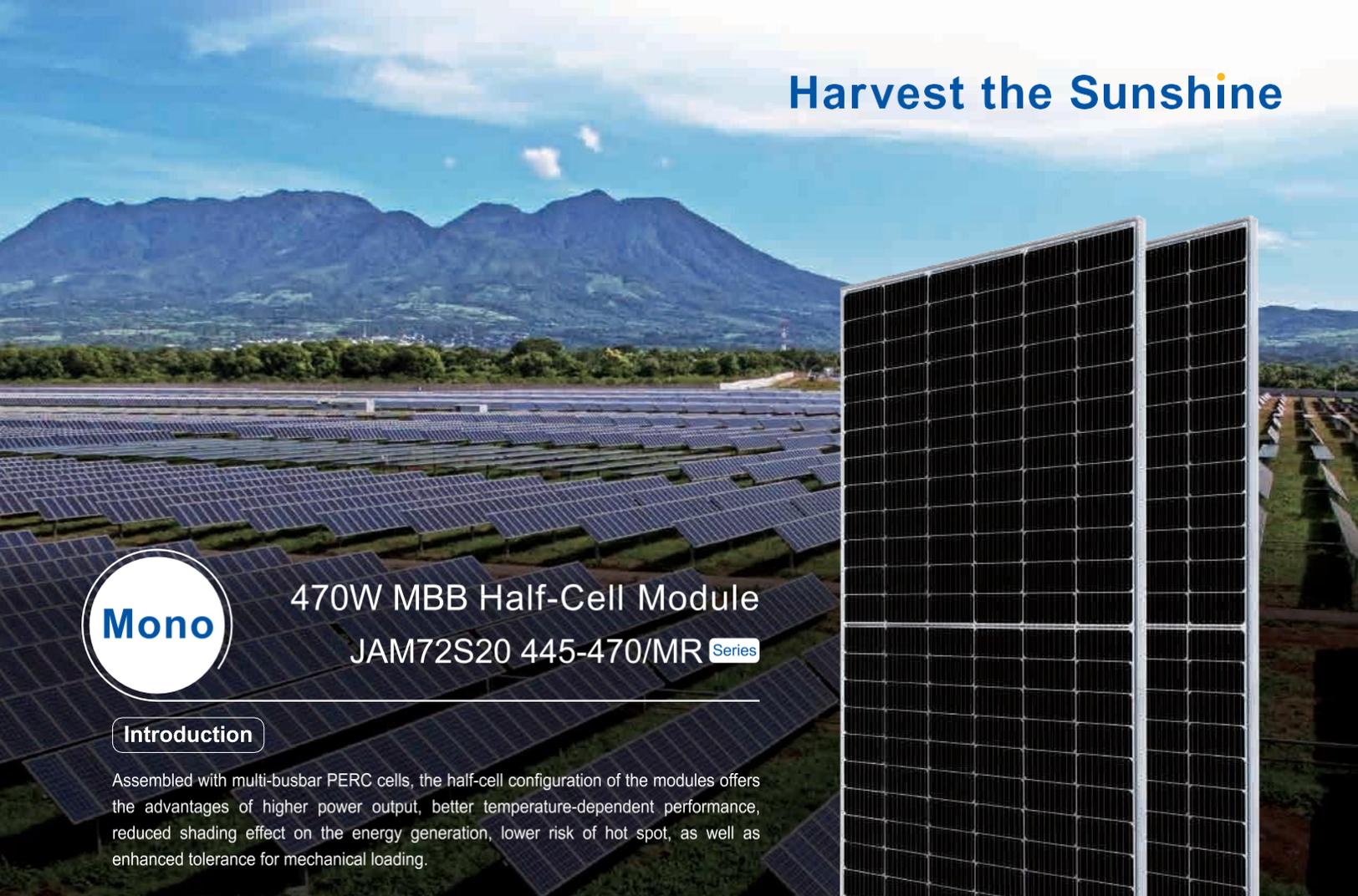
16. AUDER, Benjamin, et al. *Scalable clustering of individual electrical curves for profiling and bottom-up forecasting*. *Energies*, 2018, vol. 11, no 7, p. 1893.
17. ESCOBAR, P., et al. *Modeling and analysis of the electricity consumption profile of the residential sector in Spain*. *Energy and Buildings*, 2020, vol. 207, p. 109629.
18. BOE 2013, Ley 24/2013, de 26 de Diciembre, del Sector Eléctrico.
19. BOE 2019, Real Decreto 244/2019, de 5 de Abril.
20. MASSON, Gaëtan; BRIANO, Jose Ignacio; BAEZ, Maria Jesus. *Review and analysis of PV self-consumption policies*. IEA Photovoltaic Power Systems Programme (PVPS), 2016, vol. 1, no 28.
21. BOE 2021, Real Decreto 477/2021, de 29 de Junio.
22. BLYTH, Will, et al. *Low carbon jobs: The evidence for net job creation from policy support for energy efficiency and renewable energy*. London: UK Energy Research Centre, 2014, vol. 31.
23. INÊS, Campos, et al. *Regulatory challenges and opportunities for collective renewable energy prosumers in the EU*. *Energy Policy*, 2020, vol. 138, p. 111212.
24. PROL, Javier López; STEININGER, Karl W. *Photovoltaic self-consumption regulation in Spain: Profitability analysis and alternative regulation schemes*. *Energy Policy*, 2017, vol. 108, p. 742-754.
25. MIR-ARTIGUES, Pere; DEL RÍO, Pablo; CERDÁ, Emilio. *The impact of regulation on demand-side generation. The case of Spain*. *Energy Policy*, 2018, vol. 121, p. 286-291.
26. GIMENO, José Ángel; LLERA, Eva; SCARPELLINI, Sabina. *Investment determinants in self-consumption facilities: characterization and qualitative analysis in Spain*. *Energies*, 2018, vol. 11, no 8, p. 2178.
27. TALAVERA, D. L., et al. *Grid parity and self-consumption with photovoltaic systems under the present regulatory framework in Spain: The case of the University of Jaén Campus*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, vol. 33, p. 752-771.
28. FERNÁNDEZ, Juan Manuel Roldán; PAYÁN, Manuel Burgos; SANTOS, Jesús Manuel Riquelme. *Profitability of household photovoltaic self-consumption in Spain*. *Journal of Cleaner Production*, 2021, vol. 279, p. 123439.
29. CREUTZIG, Felix, et al. *The underestimated potential of solar energy to mitigate climate change*. *Nature Energy*, 2017, vol. 2, no 9, p. 1-9.
30. HAEGEL, Nancy M., et al. *Terawatt-scale photovoltaics: Transform global energy*. *Science*, 2019, vol. 364, no 6443, p. 836-838.
31. IDAE, Evolución tecnológica de costes de las energías renovables, 2020.
32. OMIE.
33. HASSAN, Aakash, et al. *Optimal sizing and energy scheduling of grid-supplemented solar PV systems with battery storage: Sensitivity of reliability and financial constraints*. *Energy*, 2022, vol. 238, p. 121780.
34. CHENNAIF, Mohammed, et al. *Electric System Cascade Extended Analysis for optimal sizing of an autonomous hybrid CSP/PV/wind system with Battery Energy Storage System and thermal energy storage*. *Energy*, 2021, vol. 227, p. 120444.



35. TARRAGONA, Joan, et al. *Analysis of thermal energy storage tanks and PV panels combinations in different buildings controlled through model predictive control*. *Energy*, 2022, vol. 239, p. 122201.
36. CLIFT, Dean Holland; SUEHRCKE, Harry. *Control optimization of PV powered electric storage and heat pump water heaters*. *Solar Energy*, 2021, vol. 226, p. 489-500.
37. C. d. ORG, «CLIMA BURGOS,» 2022. [En línea]. Available: <https://es.climate-data.org/europe/espana/castilla-y-leon/burgos-1767/>.
38. IKERLAN, EVE. (1998). Atlas de radiación solar del País Vasco. Bilbao.
39. García-Ballano, C. J., Ruiz-Varona, A., Bailo, C. M., & Matud, C. C. (2022). Monitoring of housing blocks in Zaragoza (Spain) to validate the energy savings calculation method for the renovation of nZEB dwellings. *Energy and Buildings*, 256, 111737.
40. Gobierno de España, «FACTORES DE EMISIÓN DE CO₂ y COEFICIENTES DE PASO A ENERGÍA PRIMARIA,» Enero 2016. [En línea]. Available: FACTORES DE EMISIÓN DE CO₂ y COEFICIENTES DE PASO A ENERGÍA PRIMARIA. [Último acceso: Junio 2022].



7 Anexo 1: Ficha técnica



470W MBB Half-Cell Module

JAM72S20 445-470/MR Series

Introduction

Assembled with multi-busbar PERC cells, the half-cell configuration of the modules offers the advantages of higher power output, better temperature-dependent performance, reduced shading effect on the energy generation, lower risk of hot spot, as well as enhanced tolerance for mechanical loading.



Higher output power



Lower LCOE



Less shading and lower resistive loss

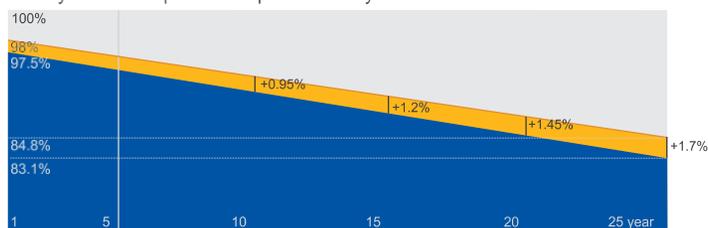


Better mechanical loading tolerance

Superior Warranty

- 12-year product warranty
- 25-year linear power output warranty

0.55% Annual Degradation Over 25 years



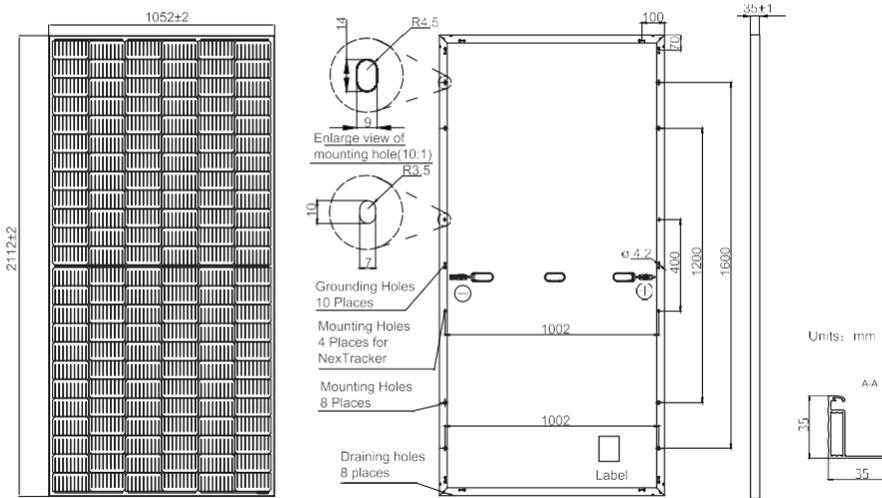
■ New linear power warranty ■ Standard module linear power warranty

Comprehensive Certificates

- IEC 61215, IEC 61730, UL 61215, UL 61730
- ISO 9001: 2015 Quality management systems
- ISO 14001: 2015 Environmental management systems
- ISO 45001:2018 Occupational health and safety management systems
- IEC TS 62941: 2016 Terrestrial photovoltaic (PV) modules – Guidelines for increased confidence in PV module design qualification and type approval



MECHANICAL DIAGRAMS



Remark: customized frame color and cable length available upon request

SPECIFICATIONS

Cell	Mono
Weight	24.7kg±3%
Dimensions	2112±2mm×1052±2mm×35±1mm
Cable Cross Section Size	4mm ² (IEC) , 12 AWG(UL)
No. of cells	144 (6×24)
Junction Box	IP68, 3 diodes
Connector	QC 4.10(1000V) QC 4.10-35(1500V)
Cable Length (Including Connector)	Portrait: 300mm(+)/400mm(-); Landscape: 1200mm(+)/1200mm(-)
Packaging Configuration	31pcs/pallet 682pcs/40ft Container

ELECTRICAL PARAMETERS AT STC

TYPE	JAM72S20 -445/MR	JAM72S20 -450/MR	JAM72S20 -455/MR	JAM72S20 -460/MR	JAM72S20 -465/MR	JAM72S20 -470/MR
Rated Maximum Power(Pmax) [W]	445	450	455	460	465	470
Open Circuit Voltage(Voc) [V]	49.56	49.70	49.85	50.01	50.15	50.31
Maximum Power Voltage(Vmp) [V]	41.21	41.52	41.82	42.13	42.43	42.69
Short Circuit Current(Isc) [A]	11.32	11.36	11.41	11.45	11.49	11.53
Maximum Power Current(Imp) [A]	10.80	10.84	10.88	10.92	10.96	11.01
Module Efficiency [%]	20.0	20.3	20.5	20.7	20.9	21.2
Power Tolerance	0~+5W					
Temperature Coefficient of Isc(α _{Isc})	+0.044%/°C					
Temperature Coefficient of Voc(β _{Voc})	-0.272%/°C					
Temperature Coefficient of Pmax(γ _{Pmp})	-0.350%/°C					
STC	Irradiance 1000W/m ² , cell temperature 25°C, AM1.5G					

Remark: Electrical data in this catalog do not refer to a single module and they are not part of the offer. They only serve for comparison among different module types.

ELECTRICAL PARAMETERS AT NOCT

TYPE	JAM72S20 -445/MR	JAM72S20 -450/MR	JAM72S20 -455/MR	JAM72S20 -460/MR	JAM72S20 -465/MR	JAM72S20 -470/MR
Rated Max Power(Pmax) [W]	336	340	344	348	352	355
Open Circuit Voltage(Voc) [V]	46.65	46.90	47.15	47.38	47.61	47.84
Max Power Voltage(Vmp) [V]	38.95	39.19	39.44	39.68	39.90	40.10
Short Circuit Current(Isc) [A]	9.20	9.25	9.29	9.33	9.38	9.42
Max Power Current(Imp) [A]	8.64	8.68	8.72	8.76	8.81	8.86
NOCT	Irradiance 800W/m ² , ambient temperature 20°C, wind speed 1m/s, AM1.5G					

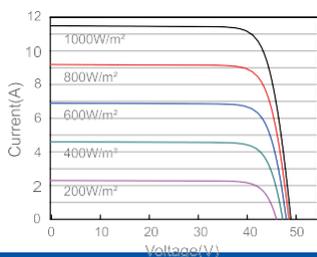
*For NexTracker installations ,Maximum Static Load, Front is 1800Pa while Maximum Static Load, Back is 1800Pa.

OPERATING CONDITIONS

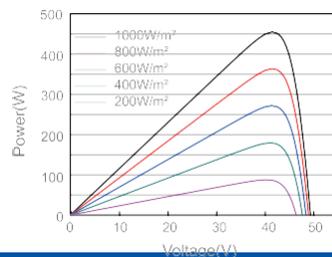
Maximum System Voltage	1000V/1500V DC
Operating Temperature	-40°C~+85°C
Maximum Series Fuse Rating	20A
Maximum Static Load,Front*	5400Pa(112 lb/ft ²)
Maximum Static Load,Back*	2400Pa(50 lb/ft ²)
NOCT	45±2°C
Safety Class	Class II
Fire Performance	UL Type 1

CHARACTERISTICS

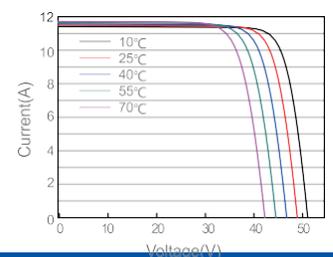
Current-Voltage Curve JAM72S20-455/MR



Power-Voltage Curve JAM72S20-455/MR



Current-Voltage Curve JAM72S20-455/MR





8 Anexo 2: Presupuesto

Descripción

Presupuesto de ejecución material para una instalación fotovoltaica de autoconsumo de 29,12 kWp

Desglose y conceptos del presupuesto

Capítulo	Subcapítulo	uds	€/ud	Concepto
1 Módulos	..... Suministro e instalación de módulos FV JAM72s20 455 MR de 455 W de potencia	64	162,25 €	10.384,00 €
2 Inversor	..... Suministro e instalación de inversor Fronius Tauro Eco 50-3-D de 50000 W de potencia. Incluye protección de alterna según normativa	1	1.951,06 €	1.951,06 €
3 Estructura	..... Suministro y montaje de estructura Schletter. Tecnología alemana de alta calidad, específica para cubiertas de chapa trapezoidal.	64	70,38 €	4.504,10 €
4 Elementos auxiliares	..... Grúa para colocación de módulos y estructura	1	372,00 €	372,00 €
5 Cableado y protecciones	..... Suministro y montaje de cableado de continua y alterna así como el resto de protecciones necesarias según normativa. Incluye canal.	1	3.850,06 €	3.850,06 €
5 Contador eléctrico	..... Suministro y montaje de contador de energía para producción. Incluye colocación en pared y caja	1	550,00 €	550,00 €
6 Proyecto	..... Incluye la redacción de proyecto, plan de seguridad y salud, plan de gestión de residuos, visado, tramitación y dirección de obra.	1	4.550,00 €	4.550,00 €
7 Tramitación subvención		1	300	300,00 €
8 Subtotal	.....			26.461,22 €
9 IVA	.....		21,00 %	5.556,86 €
10 TOTAL	.....			32.018,08 €

En Valladolid a 15/01/2022. Esta oferta es válida durante tres meses. Los precios podrán variar en caso de modificación sustancial de los precios del material en el mercado.