



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

Desarrollo de una herramienta de asesoramiento neutral para fomentar la adopción de medidas de autoconsumo en España

Autor: Luis Acosta Borreguero

Director: Rosendo Castañón Naseiro

Madrid

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título: **Desarrollo de una herramienta de asesoramiento neutral para fomentar la adopción de medidas de autoconsumo en España**

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el

curso académico 2022/23 es de mi autoría, original e inédito y

no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido

tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

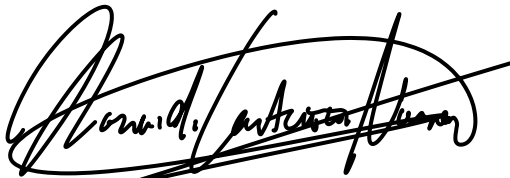


Fdo.: Luis Acosta Borreguero

Fecha: 07/07/2023

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Rosendo Castañón Naseiro

Fecha: 07/07/2023



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

Desarrollo de una herramienta de asesoramiento neutral para fomentar la adopción de medidas de autoconsumo en España

Autor: Luis Acosta Borreguero

Director: Rosendo Castañón Naseiro

Madrid

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA DE ASESORAMIENTO NEUTRAL PARA FOMENTAR LA ADOPCIÓN DE MEDIDAS DE AUTOCONSUMO EN ESPAÑA

Autor: Acosta Borreguero, Luis.

Director: Castañón Naseiro, Rosendo.

Entidad Colaboradora: IdEst Advisory

RESUMEN DEL PROYECTO

El contexto energético actual, la extraordinaria volatilidad de los mercados energéticos, unida a los exigentes objetivos de descarbonización, ha provocado un creciente interés público y privado por adoptar una postura proactiva en la transición energética. Esta transición se ve impulsada por la necesidad de mitigar el cambio climático reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero.

En este sentido, las Comunidades Energéticas Locales (CCEE) surgen como un instrumento atractivo para fomentar la participación ciudadana en el reparto de energía limpia, fomentando la producción, distribución y consumo de energía renovable. Con la figura de la Comunidad Energética se permite a los integrantes de esta compartir los recursos de generación, típicamente constituido por una instalación fotovoltaica, y beneficiarse de la generación y consumo local de energía limpia.

En última instancia, las CCEEs ofrecen una oportunidad para fomentar la participación ciudadana en la transición energética promoviendo la generación descentralizada, distribución y consumo de energía eléctrica limpia a nivel local. Dichas CCEEs tienen un importante beneficio económico sin embargo es importante analizar los aspectos económicos, técnicos y regulatorios de la cuestión antes de tomar ninguna decisión ante una inversión en este ámbito.

Este Proyecto tiene como objetivo aportar una herramienta que determine de forma automática e independiente la solución óptima, en cuestión de retorno esperado de la inversión, a instalar en una determinada vivienda dados parámetros de localización y demanda eléctrica, ayudando a complementar al actual Estado del Arte ante la falta de herramientas neutrales y formativas en el mercado. El modelo planteado se basa en técnicas enraizadas en la investigación operativa y ha sido implementado en Python, automatizando la descarga de datos de radiación y obteniéndose de esta manera la instalación óptima estimada para los parámetros introducidos.

El proceso de modelado es transparente, tanto la formulación como la metodología de obtención de los datos de entrada. La función objetivo del modelo propuesto consiste en la maximización de la suma de los siguientes términos : i) el ahorro generado en la vida de la instalación descontado anualmente en el cual se consideran dos términos: la energía suministrada desde la red, considerado como una compra de energía generando un flujo de caja negativo; y el excedente vertido a la red de distribución, considerando como una venta de energía generando un flujo de caja positivo, y ii) el coste neto de la instalación, realizándose dicho desembolso al inicio del proyecto o en el año 0. Por tanto, las inversiones propuestas las realizaría el usuario con la finalidad de maximizar el ahorro a lo largo de la vida de la instalación.

Entre las conclusiones más relevantes se destaca que:

- Las herramientas de dimensionamiento de soluciones de autoconsumo disponibles en el mercado y al alcance de los usuarios son aquellas que ofrecen las comercializadoras de este tipo de soluciones por ello surge la necesidad de una herramienta independiente para analizar la solución óptima en cada uno de los casos.
- En las distintas Comunidades Autónomas existen distintos valores totales de radiación anual, debido a esto el modelo ofrece diferentes dimensiones para instalación optima a realizar. Pese a ello, las instalaciones optimizadas tienen un retorno de inversión similar con una TIR de entre un 10.8% y un 12%.
- La sensibilidad del modelo de programación lineal a los datos de entrada es muy significativa, variando la instalación optima entre un caso pesimista y optimista en +/-60% con respecto del caso base.
- Se considera el caso base adecuado dado que los escenarios favorables y desfavorables anuales de radiación en los años de amortización de las instalaciones se van compensando, se muestra en el análisis estadístico de los conjuntos de las radiaciones anuales por comunidad autónoma dado que el valor promedio y de la mediana prácticamente coinciden y no hay asimetrías relevantes en la distribución.
- La curva de demanda es un parámetro de importancia para este tipo de instalaciones, por ello la completa optimización de las soluciones de autoconsumo pasa por la adaptación de la demanda. Otra opción que aparecerá en la sección de futuros desarrollos pasa por la adopción de soluciones de almacenamiento.

DEVELOPMENT OF A NEUTRAL ADVISORY TOOL TO PROMOTE THE ADOPTION OF SELF-CONSUMPTION SOLUTIONS IN SPAIN

Author: Acosta Borreguero, Luis.

Director: Castañón Naseiro, Rosendo

Collaborating Entity: IdEst Advisory

ABSTRACT

The current energy context, the extraordinary volatility of energy markets, coupled with the demanding decarbonization objectives, have sparked a growing public and private interest in taking a proactive stance in the energy transition. This transition is driven by the need to mitigate climate change by reducing greenhouse gas emissions.

In this regard, Local Energy Communities emerge as an attractive instrument to promote citizen participation in the distribution of clean energy, fostering the production, distribution, and consumption of renewable energy. Through the concept of an Energy Community, its members are allowed to share generation resources, typically constituted by a photovoltaic installation, and benefit from local generation and consumption of clean energy.

Ultimately, Local Energy Communities offer an opportunity to promote citizen participation in the energy transition by fostering decentralized generation, distribution, and consumption of clean electricity at the local level. These Local Energy Communities have significant economic benefits, but it is important to analyze the economic, technical, and regulatory aspects of the issue before making any investment decisions in this area.

This project aims to provide a tool that automatically and independently determines the optimal solution, in terms of expected return on investment, for installing a specific energy system in a given household, considering location and electricity demand parameters. It aims to complement the current state of the art by addressing the lack of neutral and educational tools in the market. The proposed model is based on techniques rooted in operations research and has been implemented in Python, automating the data retrieval process for radiation data. As a result, the estimated optimal installation for the input parameters can be obtained.

The modeling process is transparent, both in terms of formulation and the methodology for obtaining input data. The objective function of the proposed model consists of maximizing the sum of the following terms: i) The savings generated over the lifetime of the installation, discounted annually. This term takes into account two components: the energy supplied from the grid, considered as a purchase of energy and generating a negative cash flow; and the surplus energy injected into the distribution grid, considered as a sale of energy and generating a positive cash flow and ii) The net cost of the installation, which is incurred either at the beginning of the project or in year 0. Therefore, the proposed investments are made by the user with the aim of maximizing savings over the lifetime of the installation.

Among the most relevant conclusions, the following stand out:

- The available self-consumption sizing tools in the market, provided by energy suppliers offering such solutions, are not independent. This highlights the need for an independent tool to analyze the optimal solution in each case.
- Different autonomous communities have varying annual total radiation values, which is reflected in the dimensioning of the optimal installation. However, despite these differences, the optimized installations show similar return on investment.
- The sensitivity of the linear programming model to input data is significant. The optimal installation can vary almost threefold between pessimistic and optimistic scenarios, primarily driven by variations in radiation and installation prices.
- The chosen base case is considered appropriate since the favorable and unfavorable annual radiation scenarios during the installation's amortization years tend to balance out. This is supported by the statistical analysis of the annual radiation datasets for each autonomous community, where the average and median values practically coincide.
- The demand curve is a crucial parameter for this type of installation. Therefore, the complete optimization of self-consumption solutions requires adapting the demand accordingly.

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	6
Capítulo 2. Estado de la Cuestión	9
Capítulo 3. Definición del Trabajo	15
3.1 Justificación.....	15
3.2 Objetivos	15
3.3 Metodología.....	16
3.4 Recursos:	17
Capítulo 4. Modelo Desarrollado.....	20
4.1 Planteamiento y flujograma.....	20
4.2 Hipótesis de modelado y ejecución	23
4.3 Nomenclatura	24
4.4 Función objetivo.....	25
4.4.1 Función para optimizar.....	25
4.4.2 Ecuaciones auxiliares.....	26
4.5 Restricciones	26
Capítulo 5. Datos de Entrada.....	29
5.1 Obtención de curvas potencia radiación.....	29
5.2 Análisis de los datos de radiación:	33
5.2.1 Análisis comunidades autónomas.....	33
5.3 Obtención de la curva de demanda.....	38
Capítulo 6. Impacto Social.....	40
6.1 Alineación con los ODS	41
6.1.1 1) Fin de la pobreza	42
6.1.2 7) Energía asequible y no contaminante:.....	42
6.1.3 11) Ciudades y comunidades sostenibles:	43
6.1.4 13) Acción por el clima:	43
Capítulo 7. Análisis de sensibilidades.....	45

7.1	Caso Madrid:	46
7.2	Caso Sevilla:	47
7.3	Caso Oviedo:	47
7.4	Casos más representativos:	48
Capítulo 8. Conclusiones y Trabajos Futuros.....		52
Capítulo 9. Bibliografía.....		54
ANEXO I: Datos de radiación comunidades autónomas		60

Índice de figuras

Figura 1: gráfico de demanda y generación eléctrica en una vivienda Fuente: elaboración propia	20
Figura 2: desglose de energías en una instalación con solución de autoconsumo Fuente: elaboración propia	21
Figura 3: precios de energía en función del término horario y modalidad de tarifa Fuente: elaboración propia	21
Figura 4: flujograma del modelo Fuente: elaboración propia	22
Figura 5: gráfica potencia-radiación módulo 390Wp Fuente: Kaseel	29
Figura 6: gráfica potencia-radiación módulo 560Wp Fuente: Kaseel	30
Figura 7: gráfica potencia-radiación módulo 455Wp Fuente: Kaseel	30
Figura 8: gráfica potencia-radiación módulos Fuente: elaboración propia	31
Figura 9 gráfica potencia-radiación módulos modificada Fuente: elaboración propia	31
Figura 10: Diagrama de radiación anual por Comunidades Autónomas Fuente: elaboración propia	34
Figura 11: Diagrama de radiación anual Madrid, Oviedo y Sevilla Fuente: elaboración propia	37
Figura 12: curva de demanda unitaria Fuente: elaboración propia	38
Figura 13: gráfica resumen análisis de sensibilidades	49
Figura 14: Diagrama radiación anual provincias Andalucía Fuente: elaboración propia	60
Figura 15: Diagrama radiación anual provincias Aragón Fuente: elaboración propia	60
Figura 16: Diagrama radiación anual provincias Cantabria Fuente: elaboración propia	61
Figura 17: Diagrama radiación anual provincias Castilla la Mancha Fuente: elaboración propia	61
Figura 18: Diagrama radiación anual provincias Castilla y León Fuente: elaboración propia	62
Figura 19: Diagrama radiación anual provincias Cataluña Fuente: elaboración propia	62

Figura 20:Diagrama radiación anual provincia Comunidad de Madrid Fuente: elaboración propia.....	63
Figura 21:Diagrama radiación anual provincia Navarra Fuente: elaboración propia	63
Figura 22: Diagrama radiación anual provincias Comunidad Valenciana Fuente: elaboración propia	64
Figura 23:Diagrama radiación anual provincias Extremadura Fuente: elaboración propia	64
Figura 24:Diagrama radiación anual provincias Galicia Fuente: elaboración propia	65
Figura 25:Diagrama radiación anual provincias País Vasco Fuente: elaboración propia ...	65
Figura 26:Diagrama radiación anual provincias Asturias Fuente: elaboración propia	66
Figura 27:Diagrama radiación anual provincia Murcia Fuente: elaboración propia.....	66
Figura 28:Diagrama radiación anual provincia La Rioja Fuente: elaboración propia	67

Índice de tablas

Tabla 1: áreas de estudio documentos mencionados	13
Tabla 2: Plan de trabajo	17
Tabla 3: subíndices	24
Tabla 4 :parámetros	24
Tabla 5: Variables.....	25
Tabla 6: datos curvas módulos	32
Tabla 7: indicadores estadísticos radiación Comunidades Autónomas.....	35
Tabla 8: Indicadores estadísticos provincias Sevilla, Madrid y Oviedo.....	37
Tabla 9: Análisis de sensibilidades casos Madrid	46
Tabla 10: Análisis de sensibilidades casos Sevilla.....	47
Tabla 11: Análisis de sensibilidades casos Oviedo	48
Tabla 12:Tabla 7: indicadores estadísticos radiación provincias	68

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

El contexto energético actual, la extraordinaria volatilidad de los mercados energéticos, unida a los exigentes objetivos de descarbonización, ha provocado un creciente interés público y privado por adoptar una postura proactiva en la transición energética. Esta transición se ve impulsada por la necesidad de mitigar el cambio climático reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero.

En este sentido, las Comunidades Energéticas Locales (CCEE) surgen como un instrumento atractivo para fomentar la participación ciudadana en el reparto de energía limpia, fomentando la producción, distribución y consumo de energía renovable. Con la figura de la Comunidad Energética se permite a los integrantes de esta compartir los recursos de generación, típicamente constituido por una instalación fotovoltaica, y beneficiarse de la generación y consumo local de energía limpia. Por otra parte, las CCEE actúan como mecanismo de cobertura para reducir la exposición de los ciudadanos a la potencial volatilidad del mercado, al generar energía de forma local los integrantes de la comunidad reducen su exposición ante las fluctuaciones en los precios de los diferentes carburantes fósiles y la electricidad contribuyendo a un importante ahorro en costos de electricidad. Entre sus múltiples beneficios en los ámbitos económico, medioambiental y energético (aumento de la eficiencia energética, mitigación de las emisiones y reducción de los costes de la electricidad), a nivel social, las CCEE podrían actuar como vector para fomentar la cooperación social e impulsar el mercado laboral local.

Sin embargo, el despliegue de las CCEE provoca desafíos económicos y regulatorios. La volatilidad en términos de incentivos, tarifas y regulaciones dificulta el análisis del retorno esperado de la inversión en soluciones de autoconsumo. Motivado por la incertidumbre económica y regulatoria del desarrollo de las CCEE, el objetivo de este trabajo se basa en analizar y estimar adecuadamente el retorno esperado de la inversión en soluciones de autoconsumo.

En esta línea el presente proyecto trata de desarrollar una herramienta que facilite dichos análisis partiendo de la base de diferentes ofertas de soluciones de autoconsumo obtenidas para el cliente, para ello la herramienta propuesta i) se integra con BBDDs públicas para estimar el potencial de generación, ii) analiza la viabilidad de las ofertas introducidas mostrando cual es la más óptima (en términos de ROI) y iii) propone el modelo tarifario óptimo al implantar la solución de autoconsumo (entre opciones predeterminadas). Dicho proyecto podrá ser además usado por una de las ONGs con mayor presencia nacional e internacional, cliente de la empresa de nueva creación “IdEst Advisory”, ante un análisis mayor considerando el factor del beneficio social añadido producido por la implantación de CCEEs ante la lucha contra la pobreza energética.

En resumen, las CCEEs ofrecen una oportunidad para fomentar la participación ciudadana en la transición energética promoviendo la generación descentralizada, distribución y consumo de energía eléctrica limpia a nivel local. Dichas CCEEs tienen un importante beneficio económico sin embargo es importante analizar los aspectos regulatorios de la cuestión antes de tomar ninguna decisión ante una inversión en este ámbito

En este documento se expone el estado del arte de las tecnologías comerciales disponibles para las soluciones de autoconsumo, así como una revisión de los softwares y bases de datos “OpenSource” accesibles en el mercado, la motivación del proyecto, los objetivos principales, la metodología de trabajo y los recursos a emplear. Se incluye también el modelo de optimización empleado y un análisis de sensibilidades ante cambios en los datos de entrada al modelo.

Capítulo 2. ESTADO DE LA CUESTIÓN

El estado del arte del presente proyecto incluye varios proyectos y estudios sobre las partes a abordar y analizar con el trabajo para desarrollar un criterio de análisis de casos fundamentado en la literatura reconocida y de esta forma desarrollar la herramienta.

El trabajo de [1] realiza un análisis en profundidad con datos experimentales sobre la tecnología de micro inversores frente a la del inversor central o en *string*. El análisis de la localización de cada instalación y las sombras es fundamental ante la elección de la tecnología a implantar. Los inversores centrales o en *string* disponen los módulos fotovoltaicos en serie, alcanzando tensiones de hasta 1000Vdc. El comportamiento de estas instalaciones con inversores en *string* ante sombras parciales sobre la instalación tiene algunos inconvenientes dado que la disposición en serie produce que una caída en el rendimiento de un módulo se traduzca en una pérdida de eficiencia en la totalidad de la instalación. Por otra parte, las instalaciones con micro inversores típicamente se asigna un inversor a cada uno de los módulos, por esta razón la eficiencia neta de la instalación ante sombras parciales es mayor. Los fabricantes de estos dispositivos consideran como micro inversor todo inversor de menos de 1kWp, los más común es que estos sean de 400W y que se encuentren asociados a un único módulo fotovoltaico de 450Wp (con una potencia de pico superior al 10% de la nominal del inversor, tal y como marcan las normas habituales de diseño y despliegue, véase [2]).

El IDAE [3] define el concepto de autoconsumo como aquellas situaciones en las que un usuario genera en su propia vivienda o instalación parte o toda la energía eléctrica que consume. Introduce el concepto fundamental del excedente fotovoltaico: se trata de la energía fotovoltaica (FV) no consumida en dicho instante y por tanto vertida a red. Además, expone la necesidad de la conexión a red para aquellos instantes en los que la energía FV no es suficiente para suplir con la demanda doméstica. En el artículo [4] se proponen los

modelos de autoconsumo con balance neto en el cual la energía FV restante se vierte a red habiendo una compensación por la misma o el modelo con gestión de demanda en el cual el excedente se propone almacenar en baterías. Finalmente, en un marco económico sin considerar subvenciones de ningún tipo contempla un periodo de retorno esperado de 10 años en una instalación de 3.2kWp en una vivienda con 4.6kW de potencia eléctrica contratada con unos consumos anuales de 3900kWh caso promedio según Red Eléctrica Española (REE) [5].

El artículo [6] comenta las diferentes tecnologías fotovoltaicas con menor profundidad que [1], pero indaga en los conceptos de ángulo de azimut y ángulo de inclinación: definiendo el ángulo de azimut como el ángulo entre el sur verdadero y una línea de proyección del sol al horizonte. Se debe considerar que la inclinación óptima es variable según las estaciones del año por ello en las instalaciones fijas se debe proporcionar el balance adecuado para optimizar la producción anual. Las BBDDs públicas disponibles presentan un algoritmo para optimizar la orientación y ángulo de azimut dada una localización determinada. Propone un método analítico de dimensionamiento de instalaciones basado en el uso de la Hora Solar Pico (HSP) promedio anual. Se define HSP como la cantidad de energía que recibe una superficie durante una hora dada una radiación de 1.000W/m². Por otra parte, haciendo una estimación del consumo diario y el HSP se obtiene la potencia FV a instalar.

El artículo [7] al igual que [6] y [1] hace una breve exposición sobre las componentes de una instalación fotovoltaica. Explica el marco legislativo de las instalaciones de autoconsumo definiendo legislativamente las instalaciones como tipo 1 o tipo 2. Las instalaciones de tipo 1 son aquellas instalaciones de menos de 100kW cuya finalidad es la de suministro con autoconsumo, es decir, la generación está destinada al consumo propio y por tanto no se debe de dar de alta Registro Administrativo de Instalaciones de Producción de Energía Eléctrica (RAIPRE) en este tipo de instalaciones es fundamental la presencia de equipos de medida que contabiliza la energía neta de la instalación y otro dispositivo independiente en la frontera de la instalación. Las instalaciones de tipo 2 son aquellas instalaciones sin limitación

de potencia cuya finalidad es la de producción con autoconsumo por tanto deberán estar registradas en el Registro Administrativo de Instalaciones de Producción de Energía Eléctrica (RAIPRE).

El artículo [8] presenta un modelo de optimización ante un caso de una instalación FV con almacenamiento mediante baterías compartida entre un determinado número de consumidores, que en este caso son fábricas. Se pretende optimizar el marco económico en el sentido de minimizar el coste de la energía. Por otra parte, se busca optimizar el impacto medioambiental minimizando las emisiones equivalentes a la utilización de energía de la red. El resto de las restricciones del modelo introducen otras condiciones del estilo de que la demanda eléctrica de cada uno de los consumidores deberá ser suministrada o el estado de carga de la batería. Finalmente muestra los resultados para un determinado caso de estudio, optimizando ambos objetivos según una ponderación de importancia de cada uno de los objetivos hasta determinar el balance entre ambos considerado correcto.

El proyecto [9] resume brevemente las componentes de la instalación fotovoltaica y el marco legislativo actual. Destaca el análisis económico en profundidad realizando los cálculos del retorno esperado ante distintos escenarios de consumo colectivo, además realiza un desglose económico del coste de cada uno de los elementos de la instalación. El resultado del análisis de costes realizado concluye que todos los elementos de la instalación, y por tanto sus costes son directamente atribuibles a la potencia pico instalada.

El proyecto [10] además de realizar un análisis en profundidad del aspecto técnico de elementos que forman la instalación, propone un modelo analítico de dimensionamiento de instalaciones basado en la instalación de la totalidad de la potencia nominal requerida por las todas las cargas eléctricas a alimentar. Contiene un apartado de simulación utilizando el software Homer PRO cuyo algoritmo pondera el consumo asignándolo a tramos horarios, utilizando BBDDs de radiación obtiene la curva de generación y comparándola con la demanda y utilizando los datos tarifarios introducidos calcula el retorno esperado de la inversión y estima el impacto ecológico.

El proyecto [11] realiza un análisis en profundidad de los elementos de la instalación fotovoltaica y el dimensionamiento de estos, realiza un análisis de la viabilidad de las baterías. Por otra parte, analiza el marco legislativo del autoconsumo comparando a la legislación actual con las anteriores ya derogadas. Son realmente interesantes los casos expuestos de viabilidad del autoconsumo en una vivienda unifamiliar y en un local comercial, dado que por las características del consumo de cada uno de ellos los retornos de la inversión y la optimalidad de la instalación varia: el local comercial tiene los picos de consumo durante horas de sol, mientras que la vivienda unifamiliar promedio tiene picos de consumo considerables tras anochecer.

El documento [12] es el borrador de Real Decreto por el que se desarrollan las figuras de las comunidades energéticas renovable publicado el veinte de abril de 2023, en él se recogen importantes elementos en el marco regulatorio de la cuestión en España. Destacando la reserva de un cupo en las subastas de renovables y la liberación de un 5% en la capacidad de los nudos de la red eléctrica reservados para concursos de acceso y conexión, y serán otorgados por orden de prelación a nuevas instalaciones de generación correspondientes a comunidades energéticas con la finalidad de garantizar la evacuación de su producción. El documento no se limita únicamente al termino eléctrico, también se consideran soluciones térmicas, de movilidad o de eficiencia energética, aprobando una línea de apoyo específica para comunidades energéticas dotada de 100 millones de euros en esfuerzo de incluir a la ciudadanía y autoridades locales en la transición energética.

A continuación, se presenta una tabla que presenta las áreas de estudio por cada uno de los trabajos mencionados.

Tabla 1: áreas de estudio documentos mencionados

	1	4	6	7	8	9	10	11	12
Elementos de instalación fotovoltaica, explicación técnica									
Elementos de instalación fotovoltaica, explicación económica									
Concepto de autoconsumo									
Legislación vigente en España									
Modelo dimensionamiento instalación									
Instalación aislada									
Simulación de la instalación									
Retorno esperado de la instalación									

Capítulo 3. DEFINICIÓN DEL TRABAJO

3.1 JUSTIFICACIÓN

Este Proyecto tiene como objetivo aportar una herramienta que determine la oferta de paneles óptima a instalar en una determinada vivienda, ayudando a complementar al actual Estado del Arte ante la falta de herramientas neutrales y formativas en el mercado.

Se analizará la influencia del precio de la instalación y las variaciones de radiación neta a lo largo de un año dado en vistas a evaluar el ahorro y viabilidad económica de la inversión, así como los riesgos asociados a la inversión, medidos como desviaciones respecto a un caso base. Finalmente se determinará un criterio interno para recomendaciones a futuros clientes.

3.2 OBJETIVOS

El modelo planteado se basa en técnicas enraizadas en la investigación operativa y ha sido implementado en Python para seguir los siguientes objetivos:

- Desarrollar un modelo de optimización para evaluar la instalación óptima en una determinada localización dados los parámetros de localización y consumo de energía eléctrica, considerando la restricción de espacio que tiene una determinada azotea.
- Entender los parámetros de influencia ante el dimensionamiento de las instalaciones de autoconsumo
- Hacer acopio de las diferentes tecnologías disponibles y sus campos de aplicación óptimos.
- Analizar la viabilidad económica de las instalaciones usando un modelo de flujos de caja descontado a presente.
- Plantear una herramienta comercial automatizada para este tipo de estudios
- Analizar la sensibilidad de la viabilidad económica de las instalaciones al introducir cambios en los precios de las instalaciones o cambios en la radiación anual neta.

- Entender e interpretar los datos de entrada al modelo de optimización automatizado.

3.3 METODOLOGÍA

La primera etapa del proyecto se basa en el entendimiento del problema a abordar. Es necesario profundizar en distintos conceptos como analizar la metodología que aplican las comercializadoras a la hora de ofertar y las diferentes tecnologías extendidas en el mercado analizando las ventajas e inconvenientes de cada una de las mismas analizando las herramientas disponibles abiertamente, como por ejemplo la calculadora fotovoltaica de EDP Solar [13] o el simulador de Total Energies [14]. Por otra parte, es fundamental la familiarización con Python que es el lenguaje escogido para el desarrollo de la automatización de la herramienta.

Una vez se haya cumplido las dos primeras fases se pasará a la automatización de los datos de entrada al modelo correspondientes a datos de radiación devenidos de la base de datos PVGIS [15] (una herramienta europea abierta al público). Con estos datos se obtendrá el modelo de la generación solar esperada a partir de los datos de radiación, y de compararla contra una curva de demanda esperada (que podría ser obtenida a partir de los datos de las facturas proporcionadas por un cliente), se modelará el retorno esperado de la inversión proporcionando al usuario la oferta más adecuada tomando el NPV como criterio decisor.

Tras crearse el modelo, da lugar la fase de análisis de sensibilidades y consecuente análisis de resultado. Cabe destacar que a lo largo de la totalidad del proyecto será necesario llevar a cabo una constante investigación y revisión bibliográfica con la finalidad de ganar entendimiento sobre la materia y validar los criterios adoptados considerando las diferentes perspectivas y publicaciones de los autores más reconocidos en la materia y constante revisión del marco regulatorio en España en constante evolución.

Con el fin de alcanzar los objetivos expuestos anteriormente, se va a seguir el plan de trabajo mostrado a continuación en tramos quincenales.

Tabla 2: Plan de trabajo

FASE	Ene 1/2	Ene 2/2	Feb 1/2	Feb 2/2	Mar 1/2	Mar 2/2	Abr 1/2	Abr 2/2	Jun 1/2	Jun 2/2
Planteamiento del trabajo y definición de objetivos a perseguir										
Familiarización con el entorno de Python										
Descarga automática de datos de la base de datos PVGIS										
Modelado de la generación de una instalación										
Modelado del beneficio obtenido con la instalación										
Análisis de resultados										
Conclusiones										
Redacción del trabajo										
Revisión bibliográfica y búsqueda de información										

3.4 RECURSOS:

Los criterios empleados y parte de los datos de entrada son propiedad de Idest Advisory, empresa de nueva creación con la que se está desarrollando el proyecto.

La revisión bibliográfica se desarrollará a lo largo de la duración del proyecto y se verá basada en documentación encontrada en internet. Para ello, se podrán emplear repositorios como los dados por la propia Universidad Pontificia de Comillas, o de algunas páginas como EUROSTATS, IDAE, ResearchGate, Dialnet o sciELO.

El desarrollo del modelo se realizara en Python, lenguaje de programación del alto nivel administrado por *Python Software Foundation* [16] cuya licencia es de código abierto. Se han utilizado diferentes librerías de código abierto citadas a continuación: librería Pandas [17] que proporciona estructuras de datos y herramientas de análisis de datos de alto rendimiento, la librería Geopy.geocoders [18] en la cual se encuentra la función de

geolocalización empleada en la automatización, la librería Pyomo [19] empleada para la resolución del modelo de optimización planteado y la librería Pvlb [20] empleada para la automatización de la descarga de los datos de entrada correspondientes a la radiación de la BBDD Pvgis [15].

El solucionador empleado para la resolución del modelo es Gurobi [21] utilizando la licencia gratuita de estudiantes que ofrecen.

Por último, para la redacción de los distintos anexos y la memoria se empleará el paquete de programas de ofimática de Microsoft Office (Word, Excel, PowerPoint).

Capítulo 4. MODELO DESARROLLADO

4.1 PLANTEAMIENTO Y FLUJOGRAMA

El modelo de optimización propuesto representa inversiones en instalaciones de autoconsumo fotovoltaicas en un contexto multianual maximizando el retorno esperado de la inversión (NPV).

En el análisis de un caso de autoconsumo genérico hay que distinguir dos potencias en cada instante de tiempo: la potencia demandada por los usuarios y la potencia generada por la instalación de autoconsumo. Estas potencias se representan típicamente con cronología horaria, tal y como se muestra en la FIGURA 1.

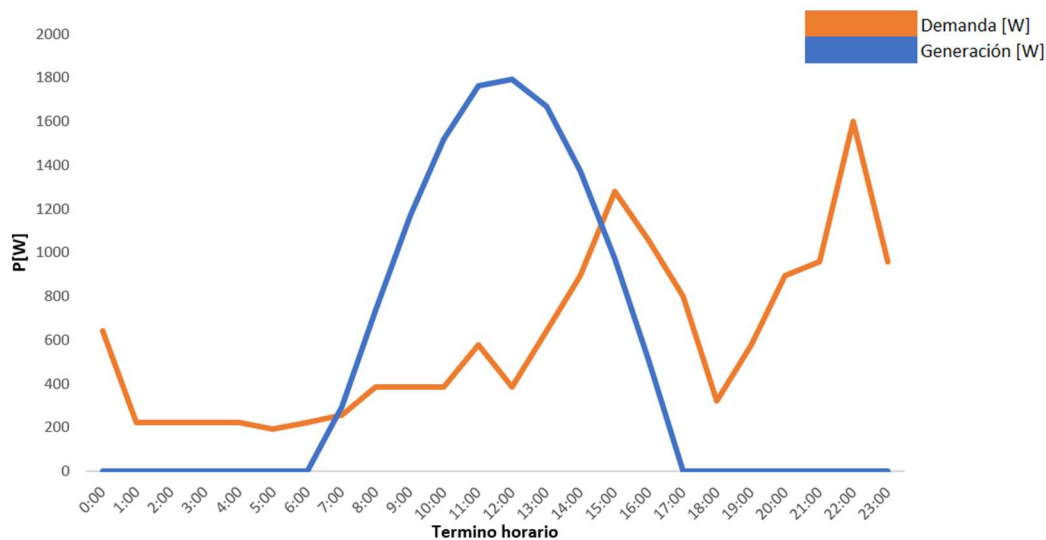


Figura 1: gráfico de demanda y generación eléctrica en una vivienda Fuente: elaboración propia

Tal y como se puede observar en la FIGURA 2, fundamentalmente, caben dos situaciones posibles. La primera presenta la posibilidad de que se necesita suministrar energía adicional al autoconsumo (obtenida de la red) para satisfacer la demanda de la instalación, esto es, se realiza una compra de energía a la red. La segunda posibilidad resulta del caso en el que la instalación fotovoltaica instalada genere mayor energía que la solicitada por la instalación y

como resultado de que la energía no se puede almacenar dicha energía se estará vertiendo a la red, es decir, se produce una venta de energía a la red.

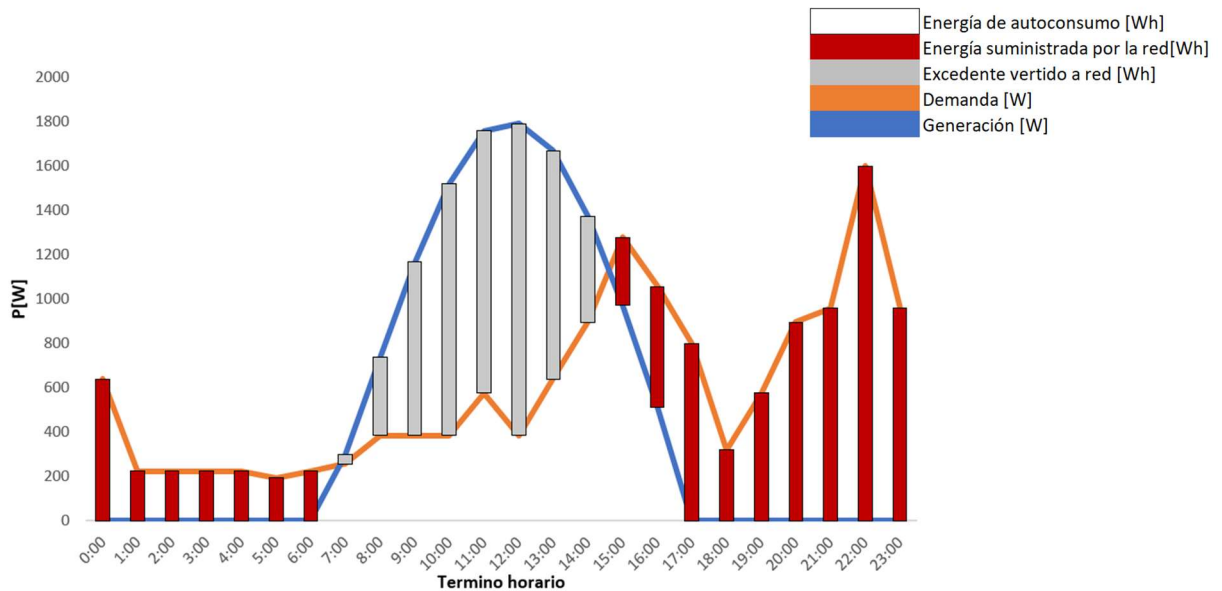


Figura 2: desglose de energías en una instalación con solución de autoconsumo Fuente: elaboración propia

Cada una de estas dos casuísticas tiene un flujo de caja asociado, ya sea negativo debido a la compra de energía de la red o positivo debido a la venta de energía a la red estando cada uno de los escenarios asociados a un precio tal y como se muestra en la FIGURA 3.

El modelo planteado replica el análisis planteado sumando todos los días del año en la vida de la instalación.

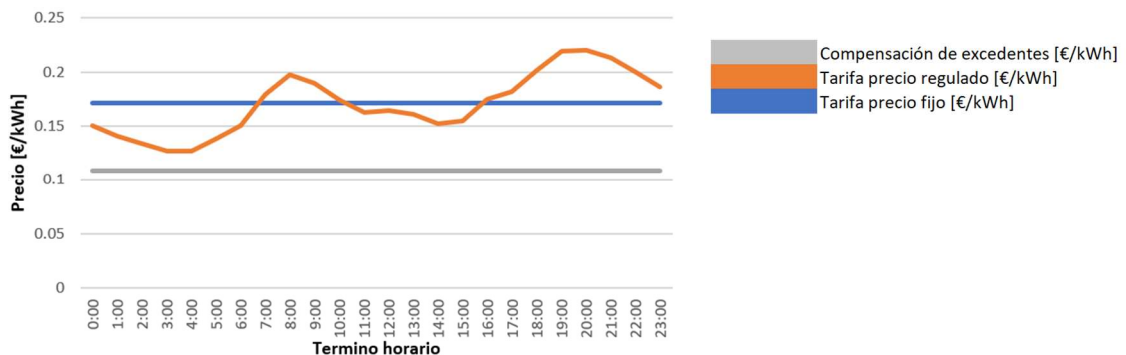


Figura 3: precios de energía en función del término horario y modalidad de tarifa Fuente: elaboración propia

En la FIGURA 4 se representa de manera esquemática un flujograma del modelo desarrollado en el que se presentan parámetros de entrada, restricciones y salidas.



Figura 4: flujograma del modelo Fuente: elaboración propia

4.2 HIPÓTESIS DE MODELADO Y EJECUCIÓN

En el siguiente apartado se describen las hipótesis de modelado y ejecución realizadas. Las hipótesis de modelado hacen referencia a las simplificaciones realizadas con la finalidad de simplificar la compleja realidad con la finalidad de representar decisiones reales en formato matemático mientras que las hipótesis de ejecución hacen referencia a las hipótesis realizadas para permitir la resolución computacionalmente.

Entre las hipótesis de modelado se encuentran:

- 1) Se considera que la instalación la totalidad del desembolso inicial en el año 0 del modelo, sin considerar posibles financiaciones/préstamos de terceros.
- 2) Se considera nulo el valor residual de la instalación al final de la vida de la inversión
- 3) Se considera que todos los elementos fundamentales de la instalación duran la totalidad de la vida del activo (esto es, que no se rompen).
- 4) No se considera ningún gasto de mantenimiento de forma explícita
- 5) No se considera pérdida de eficiencia de la instalación en el transcurso de su vida útil
- 6) No se consideran ningún tipo de ayudas o subvenciones concedidas por las autoridades con la finalidad de promover dichas instalaciones

Por su parte, las hipótesis de ejecución consideradas se exponen a continuación:

- 1) Se considera la misma demanda de energía eléctrica durante todos los días del año
- 2) Se consideran los mismos datos de radiación en todos los años del proyecto, aunque dicha radiación fluctúa de forma horaria dentro de un mismo año.
- 3) Se consideran invariantes las tarifas eléctricas durante el transcurso de la inversión.
- 4) La tasa de descuento deberá estar entre el 7% y 9%, en línea con la literatura relevante [22]

4.3 NOMENCLATURA

Esta sección se recoge la nomenclatura empleada en la formulación del modelo. Los parámetros e índices se representan con letra minúscula y las variables endógenas se representan con letra mayúscula.

Tabla 3: subíndices

<i>Índices</i>	<i>Significado</i>
p	tipo de panel a instalar
h	termino horario de los datos
n	año

Tabla 4 :parámetros

<i>Parámetros</i>	<i>Significado</i>
mnp_p	número máximo de paneles admisibles en una azotea dada [uds]
pp_p	precio de cada instalación neto por panel p [€/panel]
dem_h	demanda eléctrica en la hora h [wh]
tar_h	tarifa eléctrica en la hora h [€/wh]
cex_h	compensación de excedentes en la hora h [€/wh]
td	tasa de descuento [%]
y	años considerados para la optimización [año]

Tabla 5: Variables

<i>Variables</i>	<i>Significado</i>
VFO	función objetivo [€]
RED _h	energía tomada de la red a la instalación en la hora h [wh] - positiva
D_C_F	flujo de caja total descontado en la vida del proyecto
C_F_A _y	flujo de caja en cada año de la vida del proyecto
C_I	coste de la instalación
EX _h	excedente, energía vertida a red en la hora h [wh] - positiva
N _p	número de paneles del tipo p instalados [unidades] - positiva
X _p	Decisión sobre el tipo de panel a instalar - binaria

4.4 FUNCIÓN OBJETIVO

4.4.1 FUNCIÓN PARA OPTIMIZAR

$$\max VFO \rightarrow VFO = \sum_{n=1}^y C_F_A_y - C_I \quad (1)$$

Función objetivo que maximizar que expresa la diferencia entre el ahorro total en la vida de la instalación, y su coste de inversión. Se puede observar que está compuesto por dos términos siendo el primero el flujo de caja total descontado en la vida del proyecto y el segundo el coste de la instalación o CAPEX de proyecto siendo ambos términos los fundamentales en el modelo planteado.

4.4.2 ECUACIONES AUXILIARES

Factor_valor (n): $ftd = \frac{1}{(1+td)^n} \quad \forall n$ (2)

Ecuación auxiliar que calcula el factor a aplicar en cada año con la tasa de descuento parametrizada al inicio del modelo

Cash_Flow_Anuar: $C_F_A_y = \sum_h dem_h * tar_h - (RED_h * tar_h - EX_h * cex_h) \quad \forall y$ (3)

Ecuación auxiliar del flujo de caja anual. Se trata del ahorro generado por la instalación, el primer término se trata del coste de la electricidad sin solución de autoconsumo y el segundo término corresponde al coste de la electricidad con solución de autoconsumo. Se considera como flujo de caja el ahorro generado por la instalación

Discounted_Cash_Flow: $D_C_F = \sum_{n=1}^y ftd * C_F_A$ (4)

Ecuación auxiliar por la que se calcula el flujo de caja total descontado de todos los años del proyecto

Coste_instalación: $C_I = \sum_p N_p * pp_p$ (5)

Ecuación auxiliar que calcula el coste de la instalación en función del número de paneles a instalar representando el CAPEX del proyecto, no se le aplica descuento dado que se considera que el este coste se asume en el año 0.

4.5 RESTRICCIONES

Tipo_panel : $1 \geq \sum_p X_p \quad \forall p$ (6)

Cada instalación debe estar formada por un único tipo de panel

$$\text{Max_panel (p)} : \sum_p N_p \leq mnp_p \quad \forall p \quad (7)$$

Restricción que marca el máximo número de paneles a instalar de cada una de las clases, se trata de una restricción de espacio de una determinada azotea o tejado. Esto es, que la superficie total ha de ser siempre superior a la de la suma de las superficies de los paneles instalados.

$$\text{Balance (h)} : dem_h = \sum_p N_p * X_p * pot_{un_{p,h}} + RED_h - EX_h \quad \forall h \quad (8)$$

Ecuación de balance de energías para calcular en cada hora h la energía tomada de la red o vertida a la red para satisfacer la demanda de la instalación. Nótese que ambas variables horarias RED y EX se han fijado como variables positivas.

$$\text{Panel_seleccionado (p)} : X_p * minf \geq N_p \quad \forall p \quad (9)$$

Restricción lógica que fija a 0 la cantidad de paneles de los tipos no utilizados

Capítulo 5. DATOS DE ENTRADA

5.1 OBTENCIÓN DE CURVAS POTENCIA RADIACIÓN

En el siguiente análisis se emplea el catálogo de KASEEL [23] (uno de los fabricantes de referencia en Europa) con el ánimo de realizar cierta consistencia en el análisis. Con todo, cabe destacar que las características tecnológicas y funcionales de los módulos son muy similares en una gran mayoría de los fabricantes, i.e., los paneles solares son una “commodity” en el mercado. Los módulos seleccionados son de 390Wp, 455Wp y 560Wp

Analizamos las curvas características de cada uno de los módulos con la finalidad de obtener una curva genérica de generación por unidad de superficie. Las FIGURAS 5,6 y 7 contienen las curvas características proporcionadas por el fabricante.

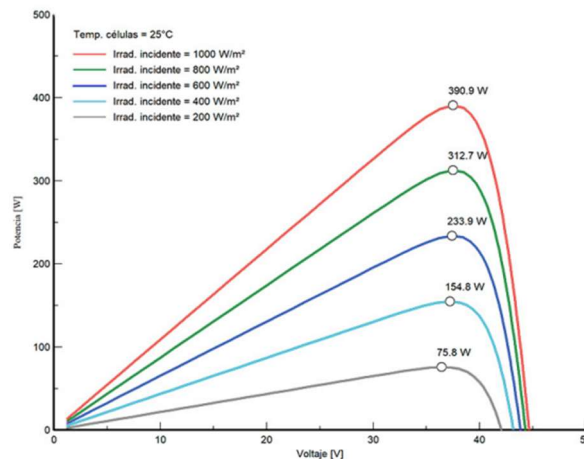


Figura 5: gráfica potencia-radiación módulo 390Wp Fuente: Kaseel

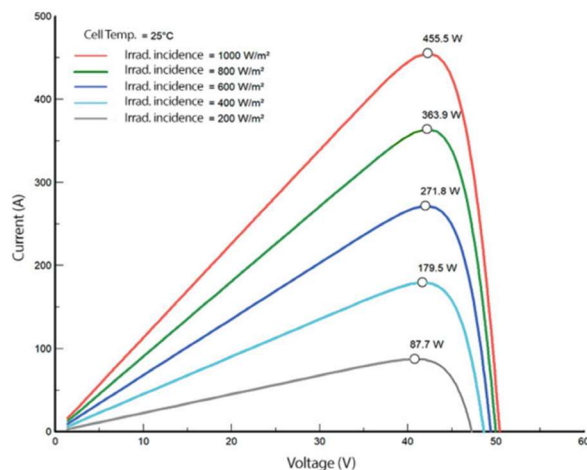


Figura 7: gráfica potencia-radiación módulo 455Wp Fuente: Kaseel

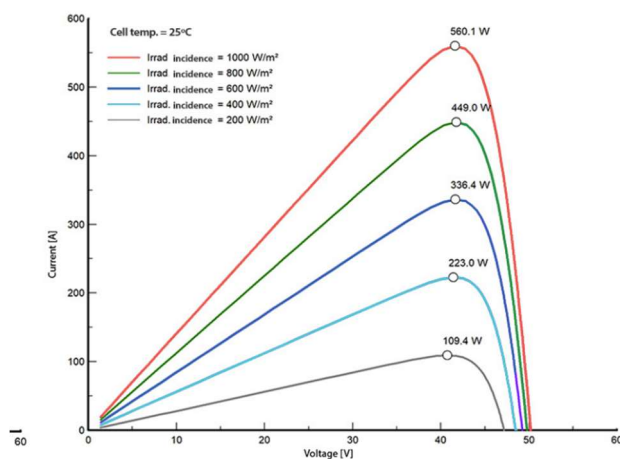


Figura 6: gráfica potencia-radiación módulo 560Wp Fuente: Kaseel

Analizando la curva Corriente[A]-Voltaje[V] en función de la Radiación [W/m^2] podemos extraer conclusiones de Potencia [W] llegando a la siguiente gráfica:

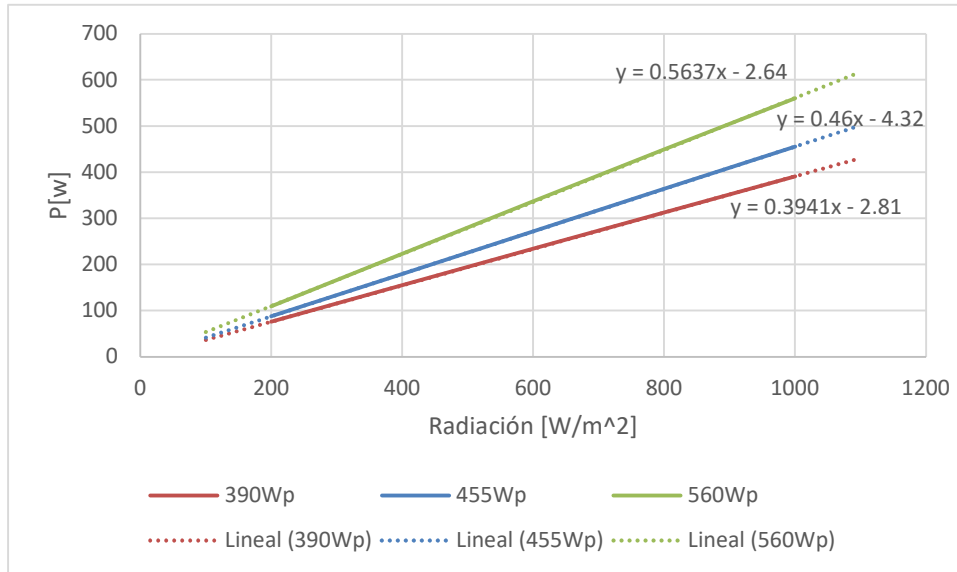


Figura 8: gráfica potencia-radiación módulos Fuente: elaboración propia

Tras realizar dicho análisis llegamos a la conclusión de que dado que la recta de tendencia se trata de un análisis estadístico se da lugar a un término independiente, pero dado el sentido físico de la cuestión este término se considera despreciable. Con ello llegamos a la siguiente curva al forzar el paso de la línea de tendencia por el origen:

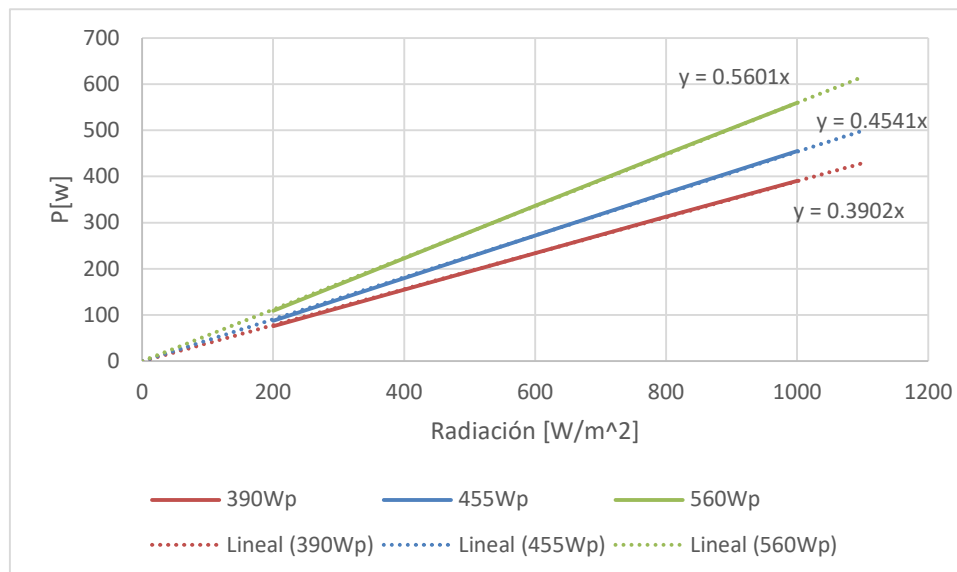


Figura 9 gráfica potencia-radiación módulos modificada Fuente: elaboración propia

La siguiente tabla recoge la información analizada en los anteriores apartados:

Consideramos que la función Potencia[W]-Radiación[W/m²] es de la forma $f(x)=A*x$

Tabla 6: datos curvas módulos

	Superficie [m ²]	Termino A	A/superficie
445 Wp	2.1735	0.4541	0.2089
390 Wp	1.8217	0.3902	0.2141
560 Wp	2.5844	0.5601	0.2167

Realizando la media llegamos a que el coeficiente a emplear es: **0.2133** cuya interpretación es la de un factor de ajuste del área introducida por módulo para que se mantenga la relación lineal entre la potencia de pico y el área introducida

Dicho resultado permite emplear una única curva Potencia[W]-Radiación[W/m²] de la forma obteniéndose de esta forma las curvas de generación unitarias de cada uno de los módulos:

$$Pun(R, A) = 0.2133 * A * R$$

Siendo Pun la potencia producida por un módulo en W, A la superficie útil del módulo a emplear en m² y R la radiación que incide sobre dicho módulo en W/m².

Generalizando de esta forma permite una sencilla adaptación a cualquier módulo de cualquier capacidad de tipo monocristalino actualmente con mayor presencia en el mercado.

5.2 ANÁLISIS DE LOS DATOS DE RADIACIÓN:

El siguiente análisis se realizó mediante la descarga de los datos de radiación horarios de los años 2006 a 2020 en cada una de las capitales de provincia de la península, analizando las radiaciones netas, es decir, la suma de todos los términos horarios de cada uno de los años descargados. La base de datos escogida es SARAH-2 disponible en el visor abierto al público PVGIS [15].

Para generar un criterio común y consistente en el análisis de radiación de las distintas geografías se descargan los datos de radiación asociados a los ayuntamientos de cada una de las provincias. Se han escogido estas localizaciones por considerarse estratégicas en el sentido de generación de expectativa social normativa y empírica de la concienciación medioambiental de los organismos públicos. Los datos obtenidos de radiación se estudian con a partir de los promedios anuales, con el ánimo de identificar posibles tendencias o patrones en las desviaciones con respecto de la media.

A continuación, pasan a mostrarse los resultados del análisis efectuado de estudios en referencia a la media por comunidad autónoma y los casos de las comunidades autónomas empleados para el posterior análisis de sensibilidades.

5.2.1 ANÁLISIS COMUNIDADES AUTÓNOMAS

La radiación solar recibida por las diferentes comunidades autónomas se ve afectada, entre otros factores climáticos, por la ubicación geográfica la altitud y la orientación de los paneles. A continuación, se ofrece un análisis general de la radiación solar de las comunidades autónomas de la península utilizando datos históricos. Se podrá observar que las condiciones climáticas varían a lo largo del tiempo dando lugar a cambios en la radiación medida año a año. Por supuesto, hay que tener en cuenta que se trata de un análisis general y que la radiación varía dentro de cada comunidad autónoma. En la FIGURA 11 se muestra un diagrama de cajas conteniendo los conjuntos de datos de radiación de cada comunidad autónoma y en la TABLA 7 se contienen los indicadores estadísticos fundamentales para la interpretación de estos.

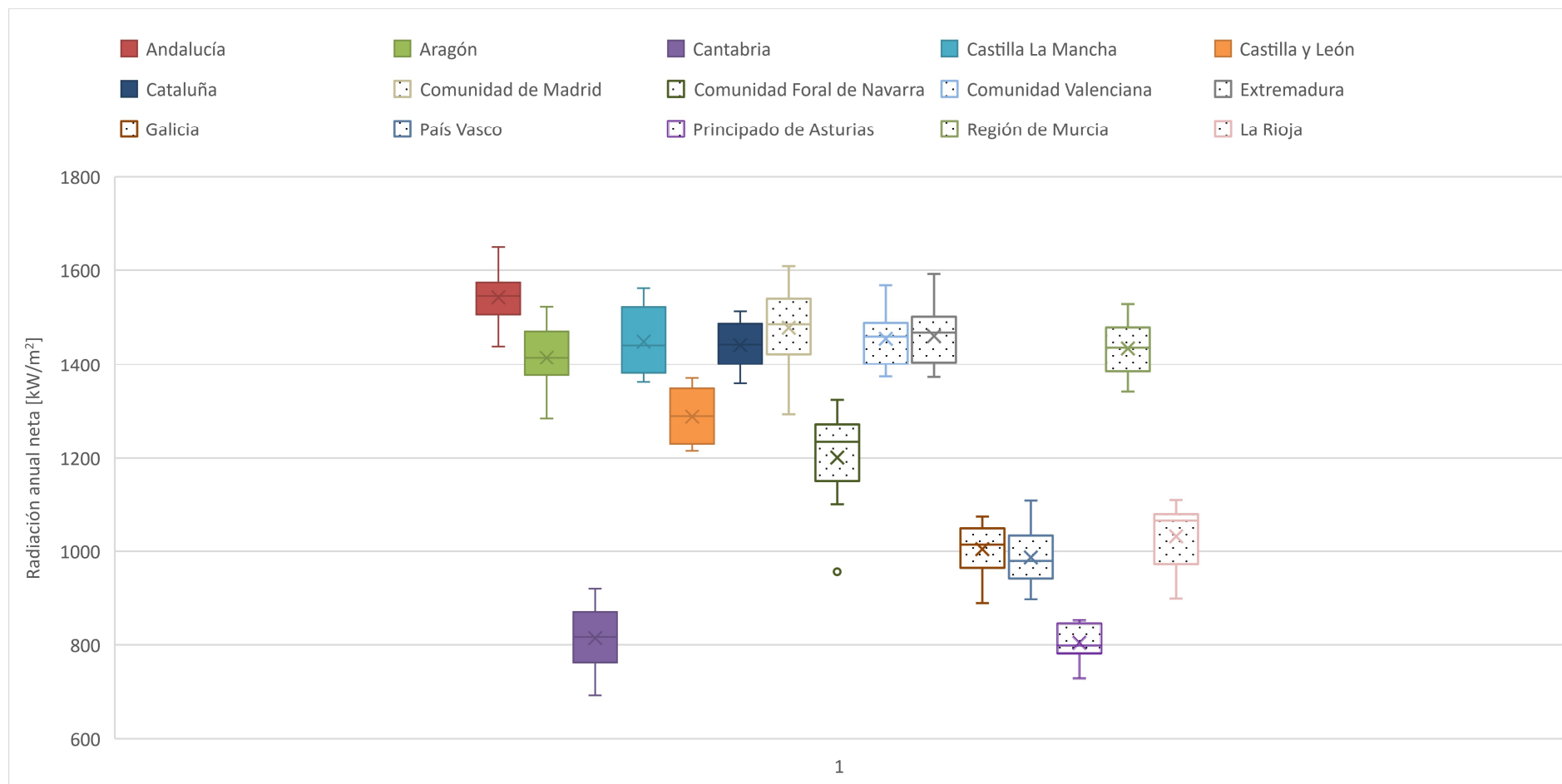


Figura 10: Diagrama de radiación anual por Comunidades Autónomas Fuente: elaboración propia

Tabla 7: indicadores estadísticos radiación Comunidades Autónomas

	Promedio	Desviación típica	Mediana	g de Pearson	Coef. asimetría de Fisher
Andalucía	1542.3045	56.8337	1545.1700	0.0368	-0.0093
Aragón	1414.8602	66.6685	1414.9586	0.0471	-0.3023
Cantabria	814.0887	67.1268	816.6782	0.0825	-0.2156
Castilla La Mancha	1448.6541	71.0364	1440.5527	0.0490	0.2737
Castilla y León	1288.1299	58.0288	1288.9596	0.0450	0.1521
Cataluña	1441.4247	50.2070	1442.6547	0.0348	-0.1187
Comunidad de Madrid	1478.3808	84.4565	1485.9036	0.0571	-0.7149
Comunidad Foral de Navarra	1200.9549	101.2594	1234.7655	0.0843	-1.2819
Comunidad Valenciana	1455.2794	57.4482	1459.8362	0.0395	0.3365
Extremadura	1460.4235	63.8443	1468.0751	0.0437	0.3736
Galicia	1004.5718	54.2709	1013.9314	0.0540	-0.8192
País Vasco	986.6737	59.5941	979.7710	0.0604	0.4639
Principado de Asturias	804.1002	38.3056	798.3579	0.0476	-0.3416
Región de Murcia	1434.5239	62.2204	1436.0931	0.0434	0.0167
La Rioja	1031.6529	64.0169	1065.2142	0.0621	-0.8791

Dado que los coeficientes g de Pearson de todos los conjuntos de datos se encuentran por debajo del 10% se considera que el promedio es el indicador más representativo de los conjuntos de datos debido a la escasa varianza en relación con los valores de la media. Por otra parte, la mediana de los conjuntos de datos coincide prácticamente con el valor promedio, enfatizando la importancia del indicador del promedio.

Se puede observar que las comunidades del norte peninsular, como Galicia, Principado de Asturias, Cantabria y País Vasco, la cantidad de radiación solar tiende a ser más baja en comparación con otras regiones. Se observa la presencia de asimetría positiva, verificándose que los sucesos ocurridos no son favorables en referencia a la radiación total incidida. Se debe principalmente al clima más húmedo y nublado que actúa como barrera ante la radiación solar que llega a la superficie. La escueta varianza de los conjuntos de datos se debe a la escasa variación en las condiciones meteorológicas en los diferentes años.

En el centro y sur peninsular, la cantidad de radiación solar tiende a ser mayor debido principalmente al clima más seco y soleado con un mayor de horas de sol al año. Se observa una asimetría negativa en todos los casos, interpretándose la misma como que los fenómenos ocurridos son favorables en referencia a la radiación total incidida.

A continuación, se muestran los conjuntos de radiación correspondientes a las provincias de Sevilla, Madrid y Oviedo, provincias escogidas para el posterior análisis de resultados. Se presenta un diagrama de cajas en la FIGURA 12 y los indicadores estadísticos asociados en la TABLA 8:

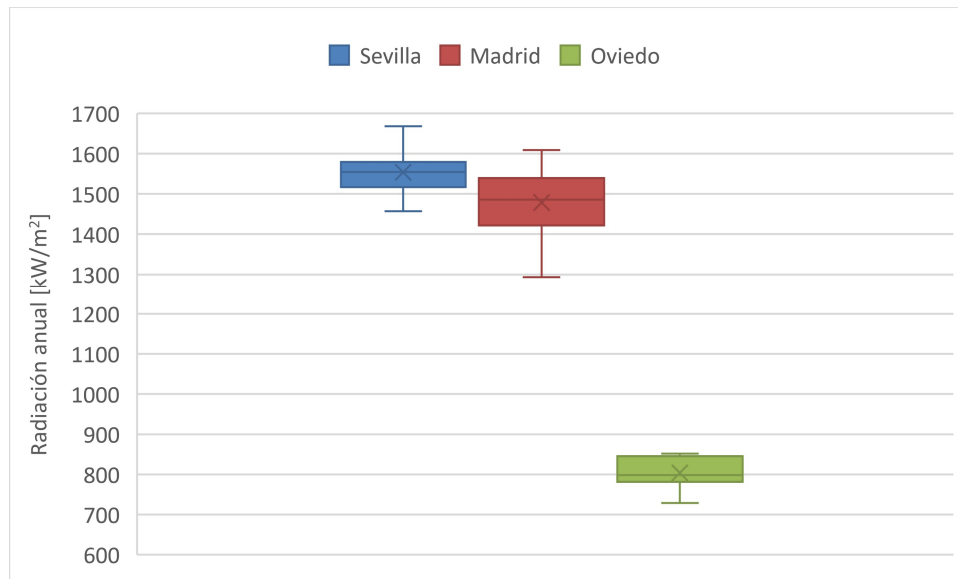


Figura 11: Diagrama de radiación anual Madrid, Oviedo y Sevilla Fuente: elaboración propia

Tabla 8: Indicadores estadísticos provincias Sevilla, Madrid y Oviedo

	Promedio	Desviación típica	Mediana	g de Pearson	Coef. asimetría de Fisher
Sevilla	1553.9226	57.4145	1554.4652	0.0369	0.2267
Madrid	1478.3808	84.4565	1485.9036	0.0571	-0.7149
Oviedo	804.1002	38.3056	798.3579	0.0476	-0.3416

Al igual que en el análisis anterior se observa que los coeficientes de dispersión g de Pearson son claramente menores al 10% considerando de esta forma que el valor promedio es el indicador más representativo del conjunto de datos, las medianas y los valores promedio prácticamente coinciden apoyando la importancia del valor promedio.

La provincia de Sevilla presenta una asimetría positiva, verificándose que los fenómenos meteorológicos son favorables en cuanto a radiación total incidida; mientras que las provincias de Madrid y Oviedo presentan asimetría negativa, considerándose los fenómenos meteorológicos desfavorables en cuestiones de radiación total incidida. Por otra parte, cabe destacar la mayor varianza presente en el conjunto de datos de Madrid, principalmente

debido a su localización en el centro peninsular en la cual los fenómenos meteorológicos presentan mayores variaciones.

5.3 OBTENCIÓN DE LA CURVA DE DEMANDA

Con el objetivo de introducir una curva de demanda de electricidad horaria al modelo se tomó la proporcionada por el IDAE en su informe sobre el consumo energético del sector residencial en España [24].

Tomado la curva de potencia eléctrica demandada en un día se obtiene una curva normalizada que encierra un área de 1wh bajo la misma, dicha curva al multiplicarse por el consumo promedio diario resulta en el perfil de demanda de la instalación.

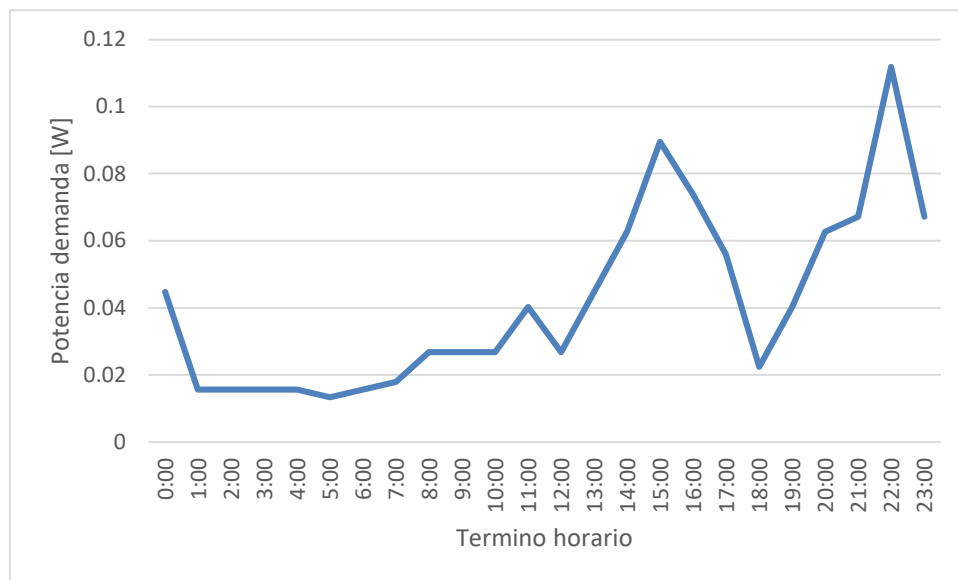


Figura 12: curva de demanda unitaria Fuente: elaboración propia

Capítulo 6. IMPACTO SOCIAL

El contexto energético actual, la extraordinaria volatilidad de los mercados energéticos los porcentajes de la población en riesgo de sufrir pobreza energética. El presente proyecto tiene como objetivo contribuir en la ayuda en el dimensionamiento de CCEEs. En 2018 el Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico publicó el documento de Estrategia Nacional contra la Pobreza Energética 2019-2024 [25] en el que por primera se da una definición de la situación de pobreza energética y del consumidor vulnerable y realiza un diagnóstico de la situación en España.

Entre los indicadores fundamentales de pobreza energética introducidos en [25], se pueden destacar los siguientes :

- 1) Indicador de gasto desproporcionado 2M: gasto relativo en energía superior a dos veces la mediana nacional
- 2) Indicador de gasto insuficiente M/2: gasto energético inferior a la mitad de la mediana nacional
- 3) Indicador de retrasos en pagos de las facturas: calculado mediante los retrasos declarados en el pago de las facturas de los anteriores doce meses
- 4) Indicador de temperatura inadecuada: incapacidad declarada para mantener la temperatura adecuada en invierno

Por otra parte la Cátedra de energía y Pobreza de la Universidad Pontificia de Comillas propone los siguientes indicadores adicionales [26]:

- 1) MIS: Renta neta después de los gastos de vivienda y del estándar de ingreso mínimo inferior a gastos energéticos del hogar, considerando como la referencia del ingreso mínimo el Salario Mínimo Interprofesional (SMI). El siguiente indicador representa el gasto desproporcionado en base al ingreso mínimo.

- 2) HEP: Indicador de pobreza energética oculta basada en el cumplimiento simultáneo de dos condiciones i) gasto energético real inferior a la mitad de su gasto teórico y ii) tener una media por debajo de la mediana de las rentas.

Por tanto, según la Cátedra de energía y Pobreza de la Universidad Pontificia de Comillas los indicadores más representativos están directamente relacionados con el cociente entre el gasto energético y la renta de las familias o personas. Dado que las CCEE actúan como mecanismo de cobertura para reducir la exposición de los ciudadanos a la potencial volatilidad del mercado, al generar energía de forma local los integrantes de la comunidad reducen su exposición ante las fluctuaciones en los precios de los diferentes carburantes fósiles y la electricidad contribuyendo a un importante ahorro en costos de electricidad y por tanto, reduciendo el riesgo de pobreza energética de aquellos más desfavorecidos.

6.1 ALINEACIÓN CON LOS ODS

Los ODS o Objetivos de Desarrollo Sostenible son una iniciativa global adoptada por la Asamblea General de la ONU en 2015 [27], compuesta por diecisiete objetivos interconectados abordando retos sociales, ambientales y económicos actuales, con la finalidad de lograr un desarrollo sostenible para el año 2030. Los ODS proporcionan una visión integral del desarrollo sostenible reconociendo la interdependencia de los diferentes aspectos y la necesidad añadida de abordarlos de manera integrada. Los objetivos son universales, por tanto, se aplican a países desarrollados como en vías de desarrollo, buscando armonizar la sociedad a distintos niveles, desde el gubernamental al sector privado, y desde la sociedad civil a los ciudadanos individuales.

A grandes rasgos, las mayores cuestiones a abordar en la actualidad son la erradicación de la pobreza en todas sus formas, acción contra el cambio climático, y la búsqueda de nuevas formas de energía sostenible, cuestiones con las que el proyecto presente alinea.

Así, el proyecto aquí planteado aborda de forma particular los siguientes ODS:

6.1.1 1) FIN DE LA POBREZA

[28] Este objetivo se define con la finalidad de eliminar la pobreza en todas sus formas para asegurar que todas las personas puedan vivir una vida digna con acceso a los recursos básicos como alimentos, agua potable, atención médica, energía, oportunidades económicas y educación. Las estrategias principales son i) implementar programas de protección social, ii) promover el crecimiento económico inclusivo, iii) garantizar acceso a los servicios básicos: educación, atención médica, energía, redes de saneamiento; y iv) proteger a las personas vulnerables ante desastres naturales y crisis económicas.

La implementación de la herramienta propuesta con su carácter formativo y neutral permite realizar un análisis de la viabilidad económica de las soluciones de autoconsumo fomentando el despliegue de este tipo de instalaciones en las zonas más desfavorecidas. Con este despliegue las personas más vulnerables se encontrarían menos expuestas a la volatilidad del mercado energético asegurando el acceso a una energía limpia y abundante.

6.1.2 7) ENERGÍA ASEQUIBLE Y NO CONTAMINANTE:

[29] Este objetivo se define con la finalidad de garantizar el acceso a una energía asequible, confiable, sostenible y moderna para todos, fomentando la eficiencia energética y reduciendo el impacto ambiental negativo. Las tres metas principales son i) las de asegurar el acceso universal a servicios energéticos modernos y asequibles, ii) aumentar la eficiencia energética y iii) aumentar la proporción de energías renovables en la matriz energética global.

La alineación con el proyecto es clara, dado que el objetivo de la herramienta planteada es el del estudio del retorno esperado de las soluciones de autoconsumo renovable, planteándolas como solución de producción energética limpia y descentralizadas proporcionando un estudio neutral y formativo sobre estas soluciones acercándolas a los grupos sociales más vulnerables.

6.1.3 11) CIUDADES Y COMUNIDADES SOSTENIBLES:

[30] Este objetivo pretende garantizar que las ciudades sean lugares inclusivos, seguros y sostenibles. Los aspectos clave son los siguientes: i) acceso a viviendas adecuadas y servicios básicos, ii) planificación y gestión sostenible de las ciudades, iii) protección del patrimonio cultural y natural, y iv) reducción del impacto ambiental y la vulnerabilidad ante desastres.

La implantación de CCEE se plantea como herramienta de sostenibilidad en las ciudades y diferentes comunidades permitiendo la transición energética desde tecnologías de producción más contaminantes. Por otra parte, descentralizar la generación reduce la posibilidad de interrupciones en el suministro eléctrico provocadas por fenómenos meteorológicos garantizando el acceso a los servicios básicos asociados con la energía en las zonas más vulnerables ante dichos cortes de suministro.

6.1.4 13) ACCIÓN POR EL CLIMA:

[31] Este objetivo se define con la finalidad de la toma de medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus impactos, abordando sus consecuencias a nivel mundial. Los aspectos clave son los siguientes: i) mitigación del cambio climático, ii) adaptación ante el cambio climático, iii) motivación de financiamiento climático y iv) fortalecimiento de capacidades y cooperación.

El reto al largo plazo es que estas energías limpias actúen favorablemente ante el cambio climático reduciendo los gases de efecto invernadero considerablemente frente al modelos de producción eléctrica del pasado. Las CCEEs se definen como un instrumento atractivo para fomentar la participación ciudadana en el reparto de energía limpia, fomentando la producción, distribución y consumo de energía renovable fortaleciendo la cooperación humana para la transición hacia fuentes de energía más limpias.

Capítulo 7. ANÁLISIS DE SENSIBILIDADES

Con la finalidad de realizar un análisis de sensibilidad del modelo de optimización propuesto consideramos la ejecución variando los datos de entrada del precio de la instalación y la radiación anual total en un año.

Continuando en la línea de plantear la el modelo como una herramienta para analizar CCEE en regiones con alto riesgo de pobreza energética se eligen tres localizaciones para realizar dicho análisis: Madrid, Sevilla y Oviedo. Madrid se elige por razones estratégicas de proximidad (a la empresa IdEst Advisory) además de aportar claramente el caso analizado en la zona más céntrica de la península, mientras que Sevilla y Oviedo son capitales de provincia con mayor riesgo a la pobreza energética representando las localizaciones Sur y Norte de la península ibérica según la Estrategia Nacional contra la Pobreza Energética 2019-2024 [25].

Los datos correspondientes al caso base se corresponden con los siguientes datos: la radiación horaria correspondiente al año 2020, se trata del año completo más reciente disponible para las tres localizaciones seleccionadas; la tarifa de mercado regulado promedio del año 2022, considerando los efectos de los diversos conflictos y volatilidad en el mercado de la energía; y los precios de instalaciones correspondientes al año 2022, sobre los cuales se reflejan también los efectos de los diversos conflictos en activo y la volatilidad de los mismos. La tasa de descuento tomada es de un 9%, una tasa de descuento muy conservadora reflejando la volatilidad del mercado, dado que se consideran tasas de descuento entre un 7% y un 9% en este tipo de proyectos.

En todas las ejecuciones se considera un consumo de 450kWh mensuales correspondientes a dos viviendas [32] en riesgo de pobreza energética sin considerar restricciones sobre el tamaño máximo de la instalación para que los resultados del análisis de sensibilidades sean lo más significativos, considerando invariantes los cambios tarifarios en todos los casos analizados y sin considerar ninguna ayuda o subvención disponible.

Por otra parte, las variaciones sobre el precio y la radiación se consideran de +/-10%: considerando el escenario de precio alto como el precio base incrementado en un 10% y el escenario de precio bajo como el precio base disminuido en un 10% realizando la misma operación con la radiación anual.

7.1 CASO MADRID:

Se considera como localización significativa la correspondiente al ayuntamiento del capital localizado en C. de Montalbán, 1, 28014 Madrid (Madrid).

Los casos analizados son los anteriormente expuestos, la tabla a continuación contiene los resultados obtenidos:

Tabla 9: Análisis de sensibilidades casos Madrid

Caso analizado		Número de paneles a instalar	Tipo de paneles a instalar	Tamaño de la instalación optima	TIR	Retorno de inversión
Radiación	Precio paneles					
Base	Base	11	455Wp	5kWp	11%	7.12 años
+10%	+10%	10	455Wp	4.55kWp	11%	7.12 años
+10%	-10%	16	455Wp	7.28kWp	14%	6.29 años
-10%	+10%	4	455Wp	1.82kWp	12%	6.69 años
-10%	-10%	13	455Wp	5.9kWp	11%	7.20 años

7.2 CASO SEVILLA:

Se considera como localización significativa la correspondiente al ayuntamiento de la capital de provincia localizado en Pl. Nueva, 1, 41001 Sevilla (Sevilla).

Los casos analizados son los anteriormente expuestos, la tabla a continuación contiene los resultados obtenidos:

Tabla 10: Análisis de sensibilidades casos Sevilla

Caso analizado		Número de paneles a instalar	Tipo de paneles a instalar	Tamaño de la instalación optima	TIR	Retorno de inversión
Radiación	Precio paneles					
Base	Base	13	455Wp	5.9kWp	10%	7.63 años
+10%	+10%	11	455Wp	5kWp	10%	7.54 años
+10%	-10%	17	455Wp	7.73kWp	12%	6.87 años
-10%	+10%	5	455Wp	2.28kWp	10%	7.51 años
-10%	-10%	14	455Wp	6.37kWp	11%	7.24 años

7.3 CASO OVIEDO:

Se considera como localización significativa la correspondiente al ayuntamiento de la capital de la provincia de Asturias localizado en Pl. de la Constitución, 33009 Oviedo (Asturias).

Los casos analizados son los anteriormente expuestos, la tabla a continuación contiene los resultados obtenidos:

Tabla 11: Análisis de sensibilidades casos Oviedo

Caso analizado		Número de paneles a instalar	Tipo de paneles a instalar	Tamaño de la instalación optima	TIR	Retorno de inversión
Radiación	Precio paneles					
Base	Base	5	455Wp	2.28kWp	11%	7.09 años
+10%	+10%	4	455Wp	1.82kWp	12%	6.67 años
+10%	-10%	10	455Wp	4.55kWp	11%	6.69 años
-10%	+10%	3	455Wp	1.37kWp	12%	6.91 años
-10%	-10%	5	455Wp	2.28kWp	11%	7.12 años

7.4 CASOS MÁS REPRESENTATIVOS:

En los apartados anteriores se muestra en tablas los resultados obtenidos en los casos de estudio, se verifica en todos los casos que los valores de la TIR se encuentran entre el 10% y el 12% verificándose la viabilidad económica de los proyectos considerándose un coste de la deuda del 9%. Como indicador más sencillo se encuentra la tasa de retorno la cual en todo momento se encuentra entre los 6.6 y 7.7 años. Por ello, se considera la viabilidad de todos los casos analizados prácticamente constante debido a que se tratan de los casos optimizados dadas unas condiciones de radiación y precio.

Para realizar el siguiente análisis se han considerado el caso base y los casos más extremos en referencia a la radiación incidente en cada una de las localizaciones y los precios de las instalaciones considerando el caso más desfavorable como el caso en el cual la radiación es un 10% menor que la base y el precio de la instalación es un 10% mayor que en el caso base

y como el caso más desfavorable el caso en el cual la radiación es un 10% mayor que la del caso base y el precio de la instalación es un 10% menor.

El siguiente gráfico muestra los resultados del análisis de sensibilidades para cada una de las provincias citadas en cada uno de los casos a analizar.

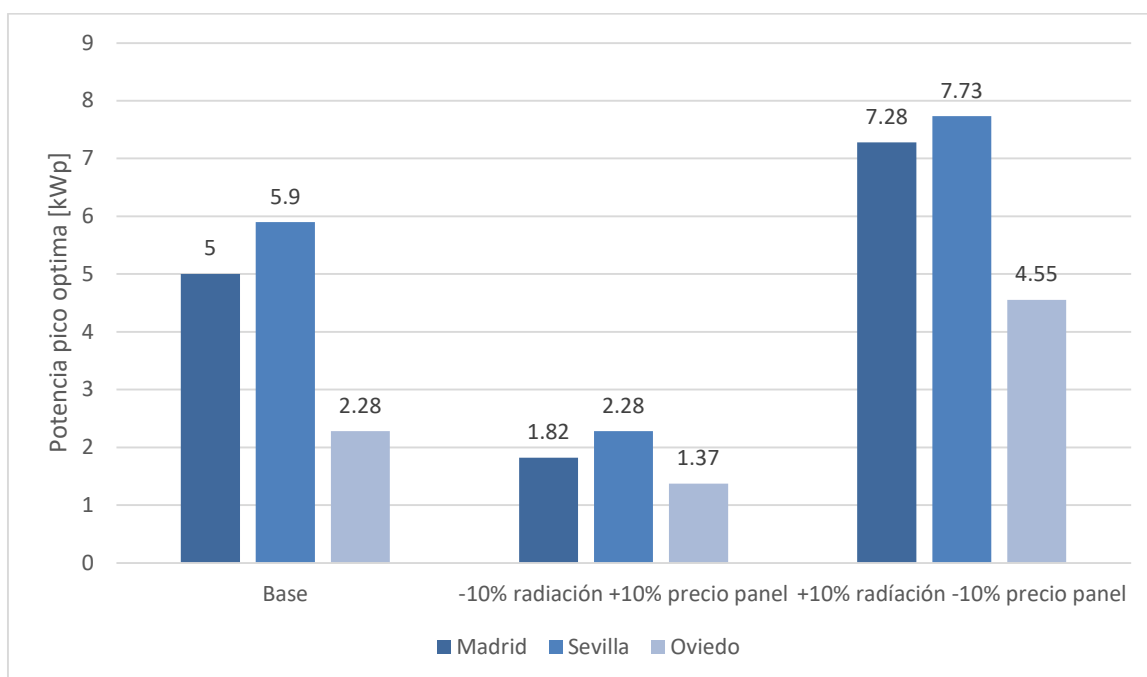


Figura 13: gráfica resumen análisis de sensibilidades

Tal y como podemos observar en el caso base, la totalidad de los resultados se debe únicamente a la diferencia de las radiaciones que se dan en cada una de las localizaciones: se llega a la conclusión de que Sevilla tiene una radiación solar ligeramente mayor que Madrid cuya diferencia con Oviedo es substancial. El efecto de esta diferencia estará presente en el resto de los casos a analizar.

En el caso más pesimista en el cual la radiación es un 10% menor que la base y el precio de los paneles un 10% mayor que en el caso base, se puede observar que la diferencia entre las instalaciones propuestas se reduce considerablemente, por ello se alcanza la conclusión de que en dicho caso el coste de la instalación pasa a ser el termino dominante en el problema

de optimización. Pese a esta conclusión, el efecto de las diferencias de radiación sigue estando claramente presentes en los resultados.

Finalmente, en el caso en el cual se toma una visión pesimista en el término de la radiación un 10% menor y una visión optimista en el coste de la instalación considerándose un 10% menor. Se puede observar que volvemos a un caso similar al base en el cual el termino dominante es el de generación, es decir, la entrada dominante al modelo es la correspondiente a la radiación solar siendo las instalaciones optimas de mayor potencia que las del caso base en todos los casos.

Con el análisis realizado se puede llegar a la conclusión de que según van variando los términos principales de la función objetivo, el termino dominante a optimizar va variando pese a ello en todos los casos se llega a una instalación con un retorno esperado de la inversión similar.

Capítulo 8. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En el proyecto presente se ha propuesto un modelo matemático con el objetivo de maximizar el retorno esperado en soluciones de autoconsumo, dando lugar a una herramienta neutral y formativa a la hora de realizar recomendaciones. El modelo cuenta con factores de índole i) financiera (CAPEX de las instalaciones) y ii) técnica (considerando la radiación, demanda energética, demanda energética, y espacio disponible para la instalación. La aportación de este trabajo recae en la realización de una recomendación de forma neutral con el objetivo de ser formativa e informativa en el estudio de la viabilidad de soluciones de autoconsumo en el proceso de lucha contra la pobreza energética.

El proceso de modelado es transparente, tanto la formulación como la metodología de obtención de los datos de entrada. La función objetivo del modelo propuesto consiste en la maximización de la suma de los términos del ahorro esperado descontado anualmente con el coste de la instalación asumido al inicio del proyecto. Por tanto, las inversiones propuestas las realizaría el usuario con la finalidad de maximizar el ahorro a lo largo de la vida de la instalación.

Tras evaluar el modelo este propone el tamaño óptimo de instalación para una determinada localización dados unos determinados valores de consumo permitiendo llegar a las siguientes conclusiones:

- Las herramientas de dimensionamiento de soluciones de autoconsumo disponibles en el mercado y al alcance de los usuarios son aquellas que ofrecen las comercializadoras de este tipo de soluciones por ello surge la necesidad de una herramienta independiente para analizar la solución óptima en cada uno de los casos.
- En las distintas Comunidades Autónomas existen distintos valores totales de radiación anual, debido a esto el modelo ofrece diferentes dimensiones para instalación óptima a realizar. Pese a ello, las instalaciones optimizadas tienen un retorno de inversión similar con una TIR de entre un 10.8% y un 12%.

- La sensibilidad del modelo de programación lineal a los datos de entrada es muy significativa, variando la instalación óptima entre un caso pesimista y optimista en +/-60% con respecto del caso base.
- Se considera el caso base adecuado dado que los escenarios favorables y desfavorables anuales de radiación en los años de amortización de las instalaciones se van compensando, se muestra en el análisis estadístico de los conjuntos de las radiaciones anuales por comunidad autónoma dado que el valor promedio y de la mediana prácticamente coinciden y no hay asimetrías relevantes en la distribución.
- La curva de demanda es un parámetro de importancia para este tipo de instalaciones, por ello la completa optimización de las soluciones de autoconsumo pasa por la adaptación de la demanda. Otra opción que aparecerá en la sección de futuros desarrollos pasa por la adopción de soluciones de almacenamiento.
- Los modelos tarifarios están en constante evolución para adaptarse a las soluciones de autoconsumo, por ello es relevante actualizar dichos modelos con el despliegue de la herramienta propuesta.

Futuros trabajos de desarrollo se centrarán en:

- 1) Estudiar el marco de las subvenciones y ayudas para el despliegue de soluciones de autoconsumo e introducirlas al modelo de optimización. Esta componente es tremendamente variante de un territorio a otro e incluso en el progreso del tiempo.
- 2) Estudiar la viabilidad de los proyectos con diferentes soluciones financieras como prestamos económicos o leasings de instalaciones.
- 3) Estudiar la viabilidad del almacenamiento ya sea en formato de baterías físicas o soluciones económicas como las baterías virtuales.
- 4) Estudiar una nueva propuesta de hábitos de consumo que optimicen una determinada instalación.

Capítulo 9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. L. Cortés Cortés, G. S. Gómez Gómez, F. Betancur Londoño, S. X. Carvajal Quintero, y N. Guerrero González, «Análisis experimental del desempeño de un sistema solar fotovoltaico con inversor centralizado y con microinversores: caso de estudio Manizales», *TecnoLógicas*, vol. 23, n.º 47, pp. 1-21, 2020.
- [2] «Seminarios PV in Bloom. Diseño de SFCR.pdf». Accedido: 12 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: http://www.ujae.es/investiga/solar/documentacion_pv_in_bloom/Seminarios%20PV%20in%20Bloom.%20Diseño%20de%20SFCR.pdf
- [3] «¿Qué es el autoconsumo? | Idae». <https://www.idae.es/tecnologias/energias-renovables/oficina-de-autoconsumo/que-es-el-autoconsumo> (accedido 12 de junio de 2023).
- [4] M. Alonso Abellá y F. Chenlo Romero, «Autoconsumo fotovoltaico», dic. 2014, Accedido: 12 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://documenta.ciemat.es/handle/123456789/150>
- [5] «Informe del Sistema Eléctrico Español 2020.».
- [6] O. Carmona López, A. Vidal Santo, A. G. Martínez López, J. Conde, y J. Tinoco Magaña, «Estudio de la viabilidad técnica para la implementación de un sistema de autoconsumo eléctrico basado en paneles fotovoltaicos para una vivienda», *QUID: Investigación, Ciencia y Tecnología*, n.º 26, pp. 29-38, 2016.
- [7] E. Villalba y H. F. Menéndez Milanés, «Análisis de la regulación en materia de autoconsumo fotovoltaico en España», *Tecnología y desarrollo*, n.º 15, p. 5, 2017.
- [8] H. Gribiss, M. M. Aghelinejad, y F. Yalaoui, «Economic and environmental evaluations of photovoltaic installations for self-consumption in industrial energy

communities», *IFAC-PapersOnLine*, vol. 55, n.º 10, pp. 1471-1476, 2022, doi: 10.1016/j.ifacol.2022.09.598.

[9] «Análisis económico del autoconsumo fotovoltaico residencial colectivo». <https://academica-e.unavarra.es/xmlui/handle/2454/38678> (accedido 12 de junio de 2023).

[10] A. A. Espinosa, J. S. Vargas, y J. H. Mora, «Metodología de dimensionamiento de un sistema de respaldo energético basado en tecnología fotovoltaica», *Tecnura*, vol. 19, pp. 66-71, nov. 2015, doi: 10.14483/22487638.9610.

[11] I. Durbán Heredia, «Estado del autoconsumo fotovoltaico en España y análisis comparado de casos», 2019. <https://oa.upm.es/57032/> (accedido 12 de junio de 2023).

[12] «Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico - DetalleParticipacionPublica». <https://energia.gob.es/es-es/participacion/paginas/DetalleParticipacionPublica.aspx?k=595> (accedido 12 de junio de 2023).

[13] «Calculadora solar fotovoltaica para autoconsumo», *EDP*. https://www.edpenergia.es/es/hogares/energia-solar/calculadora/?utm_source=Google&utm_medium=cpc&utm_campaign=Google-Search-Brand-Unifamiliares-Espa%C3%B1a-Always_on-SOLAR&utm_content=calculadora&gclid=CjwKCAjwhJukBhBPEiwAnilcNSkmWHZbstJgjdRnRFMg6VB8LCefnxA7QzEgty_6Kt3-aYEhSY5jRoC7RIQAvD_BwE&gclsrc=aw.ds (accedido 12 de junio de 2023).

[14] TotalEnergies, «Energía Solar: Instala Placas Fotovoltaicas | TotalEnergies», *Autocomsumo solar - Te lo ponemos fácil*. <https://www.totalenergies.es/es/hogares/autoconsumo-solar> (accedido 12 de junio de 2023).

[15] «JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) - European Commission». https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/es/ (accedido 12 de junio de 2023).

- [16] «Welcome to Python.org», *Python.org*. <https://www.python.org/psf-landing/> (accedido 12 de junio de 2023).
- [17] «pandas - Python Data Analysis Library». <https://pandas.pydata.org/> (accedido 12 de junio de 2023).
- [18] «Welcome to GeoPy's documentation! — GeoPy 2.3.0 documentation». <https://geopy.readthedocs.io/en/stable/> (accedido 12 de junio de 2023).
- [19] «Pyomo», *Pyomo*. <http://www.pyomo.org> (accedido 12 de junio de 2023).
- [20] W. F. Holmgren, C. W. Hansen, y M. A. Mikofski, «pvlib python: a python package for modeling solar energy systems», *JOSS*, vol. 3, n.º 29, p. 884, sep. 2018, doi: 10.21105/joss.00884.
- [21] «Gurobi Optimizer - Gurobi Optimization». https://www.gurobi.com/solutions/gurobi-optimizer/?campaignid=2027425882&adgroupid=77414946611&creative=601650357813&keyword=gurobi&matchtype=e&gclid=CjwKCAjwhJukBhBPEiwAnIcNVDwkkPSnLCs5lujM7EyPD5jcAtmF_KlazFnQDZHhbYWvKcGdBnfuhoCIu8QAvD_BwE (accedido 12 de junio de 2023).
- [22] M. Rebollo Reviriego, «Análisis de viabilidad económica del autoconsumo fotovoltaico residencial con vehículo eléctrico en Madrid», masters, E.T.S.I. Diseño Industrial (UPM), 2021. Accedido: 7 de julio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://oa.upm.es/71480/>
- [23] «KSHC-144-PERC-Solar-Orbiter-ENGLISH-1.pdf». Accedido: 13 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://cdn.enfsolar.com/z/pp/95g7k49cidgz/KSHC-144-PERC-Solar-Orbiter-ENGLISH-1.pdf>
- [24] «Consumo por usos residencial». <https://informesweb.idae.es/consumo-usos-residencial/informe.php> (accedido 30 de junio de 2023).

- [25] «[estrategianacionalcontralapobrezaenergetica2019-2024_tcm30-496282.pdf](https://www.miteco.gob.es/es/prensa/estrategianacionalcontralapobrezaenergetica2019-2024_tcm30-496282.pdf)». Accedido: 6 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.miteco.gob.es/es/prensa/estrategianacionalcontralapobrezaenergetica2019-2024_tcm30-496282.pdf
- [26] «Informe_Indicadores_2021_EyP_v4_completo.pdf». Accedido: 17 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.comillas.edu/xmlui/bitstream/handle/11531/75498/Informe_Indicadores_2021_EyP_v4_completo.pdf?sequence=-1
- [27] Miluska.Jara, «¿Sabes cuáles son los 17 objetivos de desarrollo sostenible?», *Desarrollo Sostenible*, 29 de agosto de 2018. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2018/08/sabes-cuales-son-los-17-objetivos-de-desarrollo-sostenible/> (accedido 17 de junio de 2023).
- [28] «Objetivo 1—Poner fin a la pobreza en todas sus formas y en todo el mundo | Naciones Unidas». <https://www.un.org/es/chronicle/article/objetivo-1-poner-fin-la-pobreza-en-todas-sus-formas-y-en-todo-el-mundo> (accedido 22 de junio de 2023).
- [29] U. Nations, «Objetivo 7—Garantizar el acceso a una energía asequible, fiable, sostenible y moderna para todos | Naciones Unidas», *United Nations*. <https://www.un.org/es/chronicle/article/objetivo-7-garantizar-el-acceso-una-energia-asequible-fiable-sostenible-y-moderna-para-todos> (accedido 17 de junio de 2023).
- [30] U. Nations, «Objetivo 11—Las ciudades desempeñarán un papel importante en la consecución de los Objetivos de Desarrollo Sostenible | Naciones Unidas», *United Nations*. <https://www.un.org/es/chronicle/article/objetivo-11-las-ciudades-desempenaran-un-papel-importante-en-la-consecucion-de-los-objetivos-de> (accedido 17 de junio de 2023).
- [31] «Cambio climático - Desarrollo Sostenible». <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/climate-change-2/> (accedido 17 de junio de 2023).

- [32] «Informe del Sistema Eléctrico Español 2020..pdf». Accedido: 12 de junio de 2023.
[En línea]. Disponible en:
https://www.ree.es/sites/default/files/publication/2022/05/downloadable/inf_sis_elec_ree_2020_0.pdf

ANEXO I: DATOS DE RADIACIÓN COMUNIDADES AUTÓNOMAS

El siguiente anexo contiene datos de radiación históricos de las provincias peninsulares organizadas por comunidades autónomas.

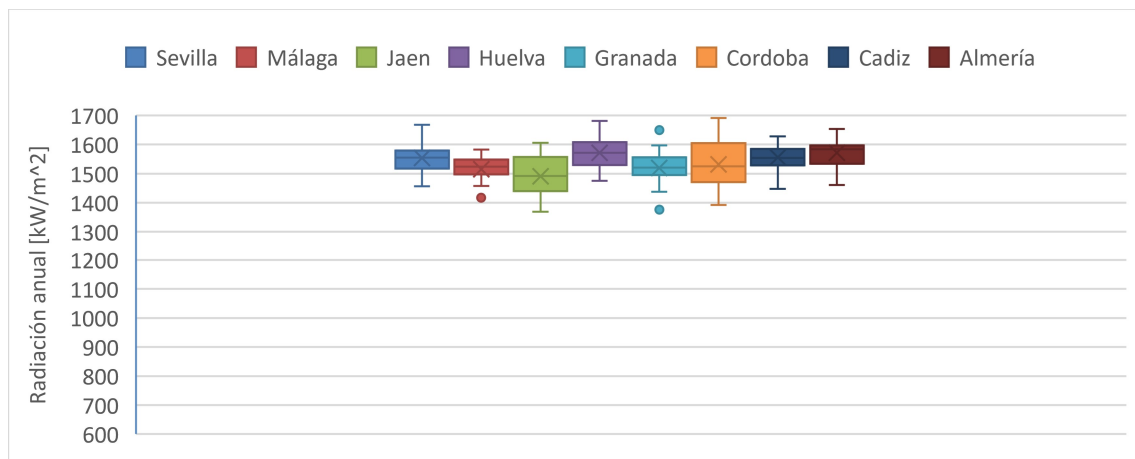


Figura 14: Diagrama radiación anual provincias Andalucía Fuente: elaboración propia

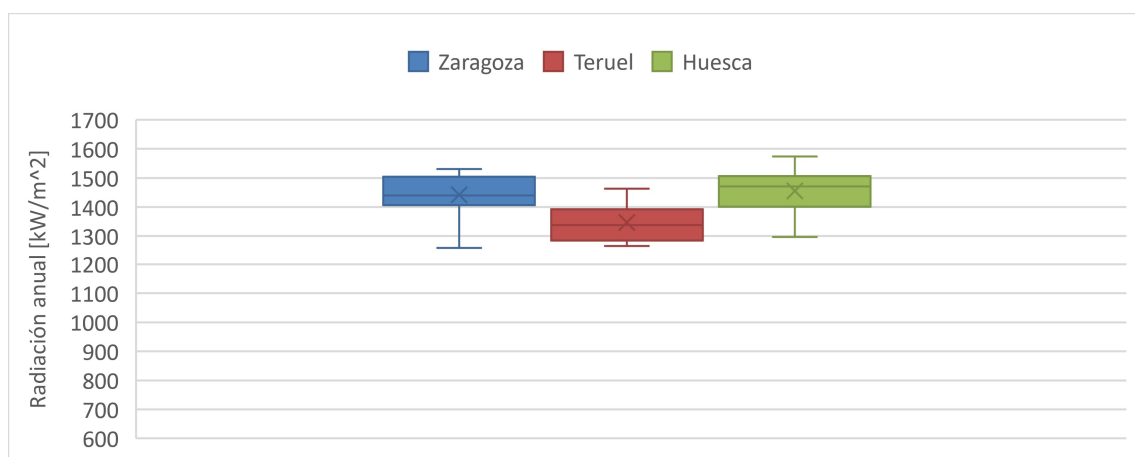


Figura 15: Diagrama radiación anual provincias Aragón Fuente: elaboración propia

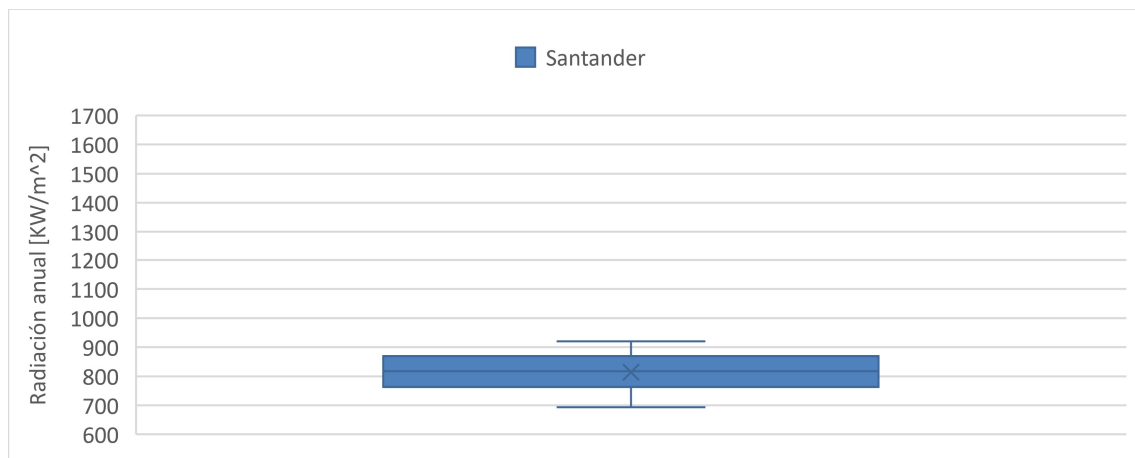


Figura 16: Diagrama radiación anual provincias Cantabria Fuente: elaboración propia

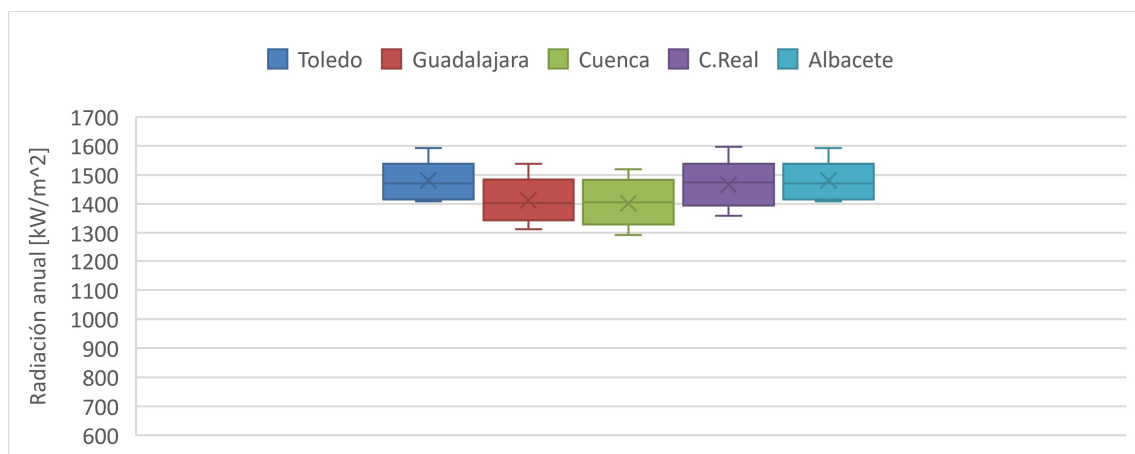


Figura 17: Diagrama radiación anual provincias Castilla la Mancha Fuente: elaboración propia

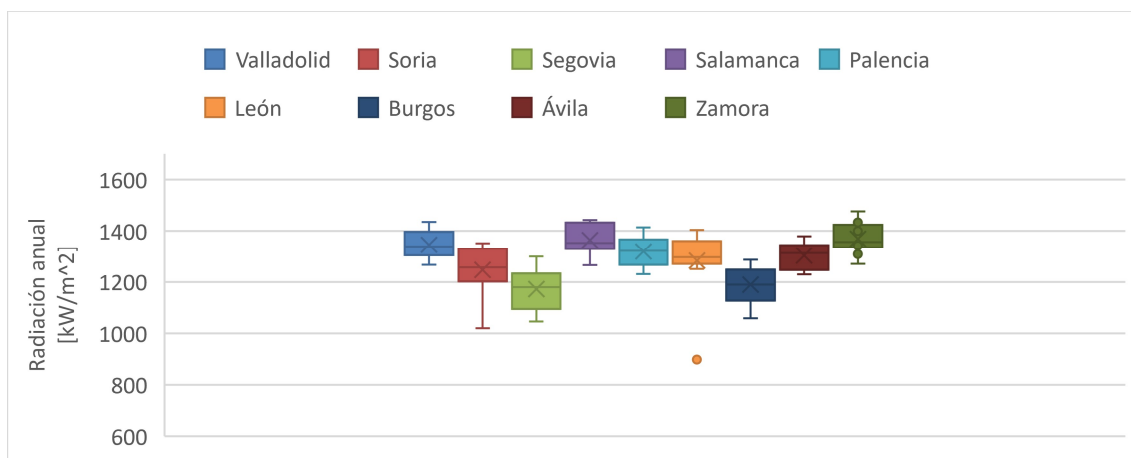


Figura 18: Diagrama radiación anual provincias Castilla y León Fuente: elaboración propia

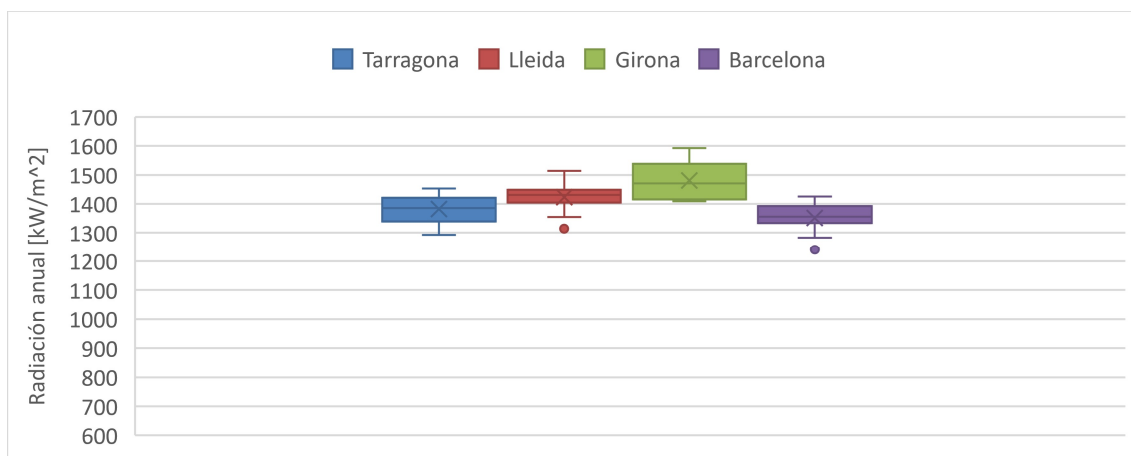


Figura 19: Diagrama radiación anual provincias Cataluña Fuente: elaboración propia

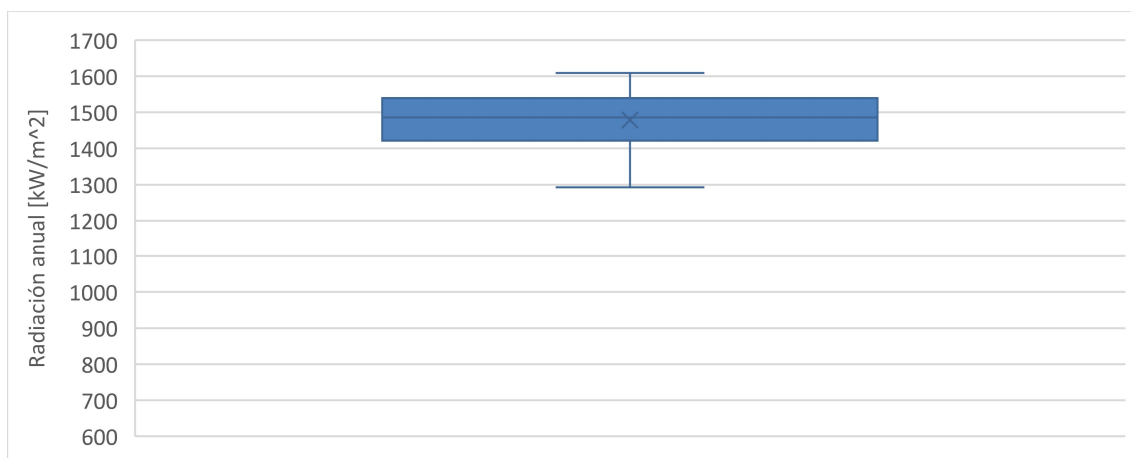


Figura 20: Diagrama radiación anual provincia Comunidad de Madrid Fuente: elaboración propia

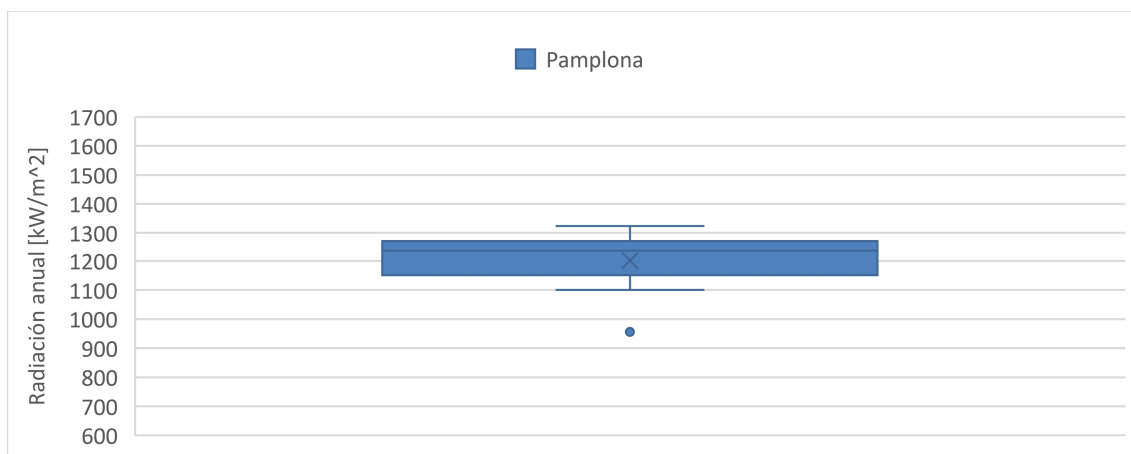


Figura 21: Diagrama radiación anual provincia Navarra Fuente: elaboración propia

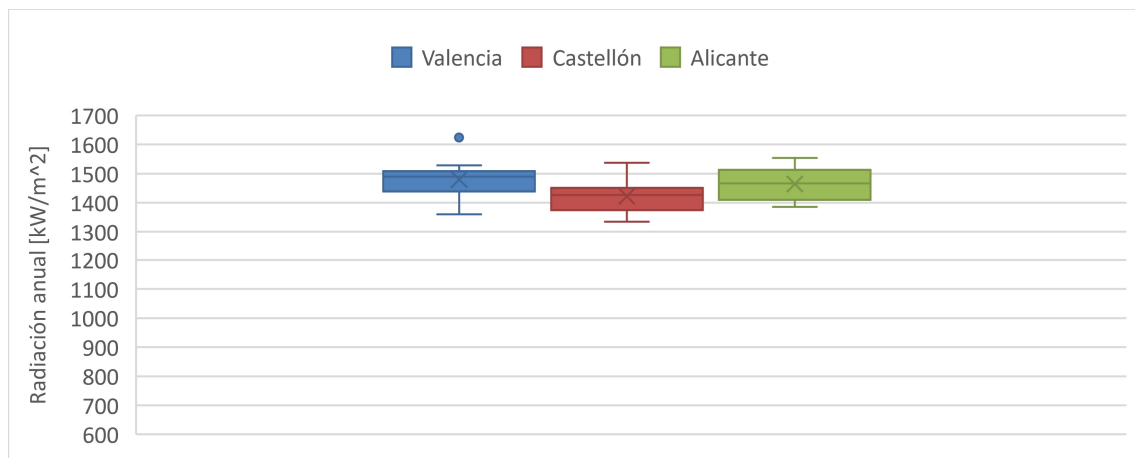


Figura 22: Diagrama radiación anual provincias Comunidad Valenciana Fuente: elaboración propia

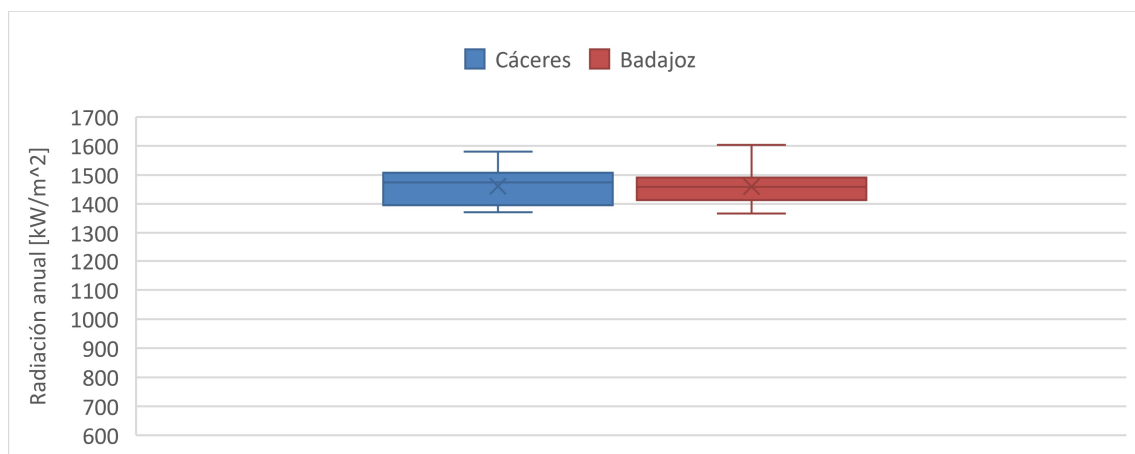


Figura 23: Diagrama radiación anual provincias Extremadura Fuente: elaboración propia

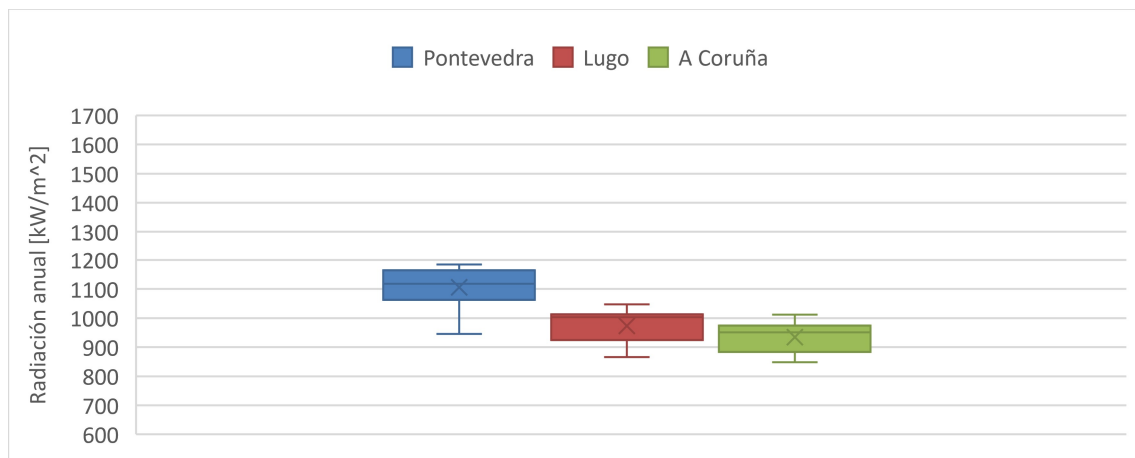


Figura 24: Diagrama radiación anual provincias Galicia Fuente: elaboración propia

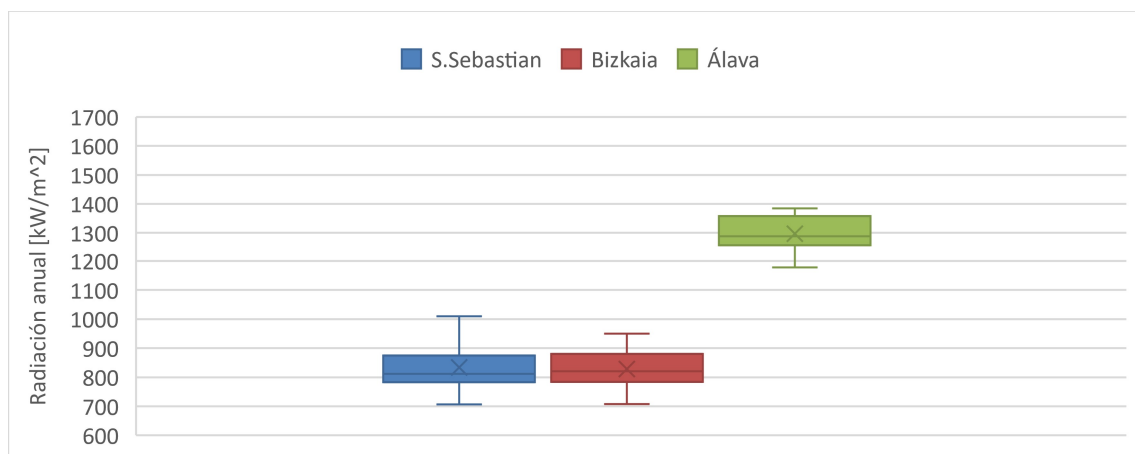


Figura 25: Diagrama radiación anual provincias País Vasco Fuente: elaboración propia

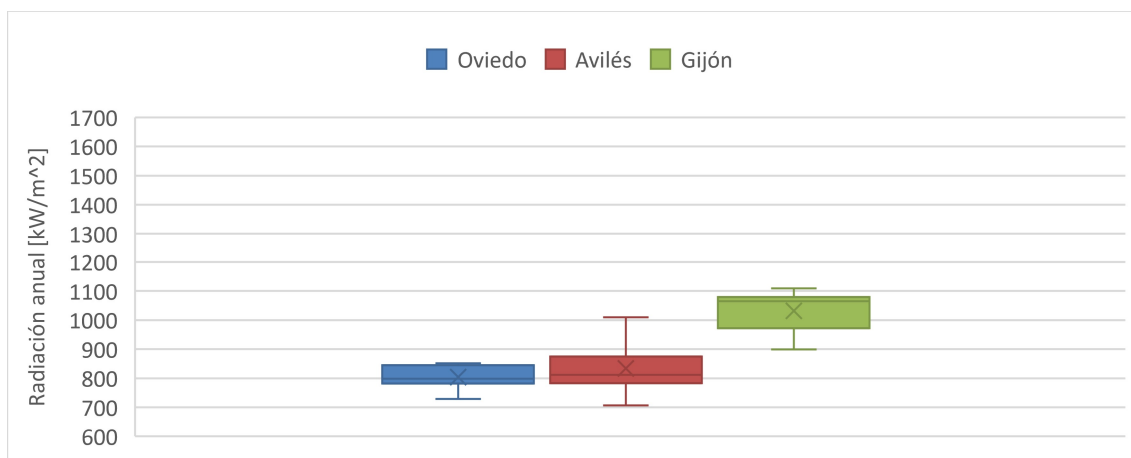


Figura 26: Diagrama radiación anual provincias Asturias Fuente: elaboración propia

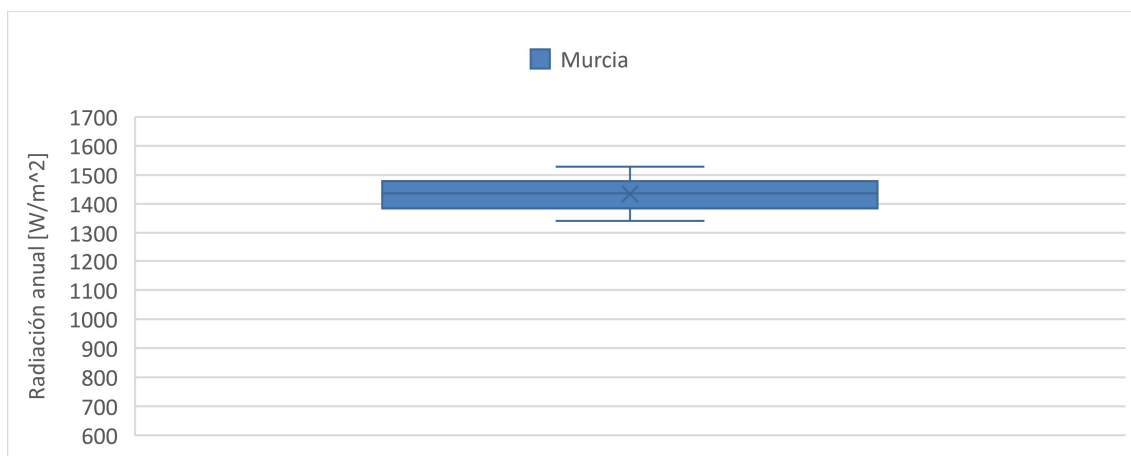


Figura 27: Diagrama radiación anual provincia Murcia Fuente: elaboración propia

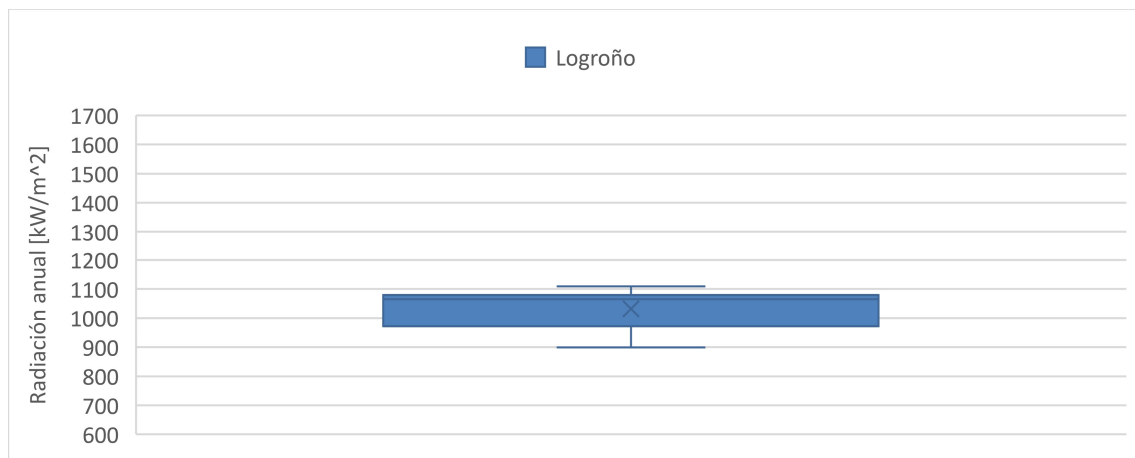


Figura 28: Diagrama radiación anual provincia La Rioja Fuente: elaboración propia

Tabla 12: Tabla 7: indicadores estadísticos radiación provincias

	Media	Desviación típica	Mediana	g de Pearson	Coef. asimetría de Fisher
Zaragoza	1442.2837	75.8244	1439.5245	0.0526	-1.1541
Zamora	1369.7042	59.0496	1357.0777	0.0431	0.3250
Valladolid	1345.9594	54.8528	1339.0460	0.0408	0.1928
Valencia	1479.3343	66.2894	1489.8574	0.0448	0.3684
Toledo	1480.6042	64.8627	1470.4664	0.0438	0.3411
Teruel	1347.4424	62.6100	1337.7864	0.0465	0.3859
Tarragona	1381.8111	48.7415	1385.5913	0.0353	-0.1974
Soria	1246.9797	96.7464	1256.9223	0.0776	-1.1441
Sevilla	1553.9226	57.4145	1554.4652	0.0369	0.2267
Segovia	1172.2939	83.2439	1179.1915	0.0710	-0.0820
Sta.Cruz Tenerife	1454.2102	75.9371	1465.7481	0.0522	-2.2234
S. Sebastián	834.1725	82.3896	811.7230	0.0988	0.7550
Salamanca	1364.3399	60.6609	1352.3818	0.0445	-0.0064
Pontevedra	1106.2570	67.8010	1118.1010	0.0613	-1.1708
Palencia	1318.7617	57.5134	1321.4832	0.0436	0.0802
Ourense	1096.3378	66.3985	1104.1737	0.0606	-0.8317
Pamplona	1200.9549	101.2594	1234.7655	0.0843	-1.2819
Murcia	1434.5239	62.2204	1436.0931	0.0434	0.0167
Melilla	1369.9946	89.7880	1370.9130	0.0655	0.3556
Málaga	1515.5068	44.5477	1523.5917	0.0294	-0.8964
Madrid	1478.3808	84.4565	1485.9036	0.0571	-0.7149
Lugo	973.5693	59.7207	1002.7382	0.0613	-0.8636
Lleida	1422.6794	50.4550	1431.2955	0.0355	-0.6572
León	1282.6005	129.5258	1296.1977	0.1010	-2.6844
Las Palmas	1189.0550	47.7349	1195.8023	0.0401	0.2507
Logroño	1031.6529	64.0169	1065.2142	0.0621	-0.8791
Jaén	1490.3475	74.9867	1491.3567	0.0503	-0.2662
Palma	1274.3697	63.2720	1288.4983	0.0496	-0.5137
Huesca	1454.8546	76.7885	1470.9693	0.0528	-0.5413
Huelva	1571.1597	59.3297	1571.3413	0.0378	0.2561
Guadalajara	1412.6185	73.5076	1403.4458	0.0520	0.2632
Granada	1519.9829	69.9660	1520.1492	0.0460	-0.2841
Girona	1480.6042	64.8627	1470.4664	0.0438	0.3411
Cuenca	1402.6485	81.7548	1405.2763	0.0583	0.0379
Córdoba	1532.1077	86.5852	1524.9190	0.0565	0.1355

C.Real	1466.7950	78.5060	1473.9677	0.0535	0.2371
Ceuta	1298.9451	101.1647	1277.9184	0.0779	1.7664
Castellón	1421.8793	55.7016	1426.6073	0.0392	0.3265
Santander	814.0887	67.1268	816.6782	0.0825	-0.2156
Cádiz	1555.5530	48.4154	1553.8466	0.0311	-0.6888
Cáceres	1460.7293	65.5903	1474.0263	0.0449	0.1405
Burgos	1189.9686	71.0488	1189.7709	0.0597	-0.3240
Bizkaia	828.3568	64.7417	820.9700	0.0782	0.1235
Barcelona	1351.7115	52.4261	1355.3766	0.0388	-0.7380
Badajoz	1460.1177	63.5644	1458.2109	0.0435	0.6371
Ávila	1302.5609	54.4362	1312.9634	0.0418	-0.0899
Oviedo	804.1002	38.3056	798.3579	0.0476	-0.3416
Almería	1571.0009	52.2563	1583.0706	0.0333	-0.6163
Albacete	1480.6042	64.8627	1470.4664	0.0438	0.3411
Alicante	1464.6246	57.1334	1466.2422	0.0390	0.1976
Álava	1297.4918	63.4006	1288.3735	0.0489	-0.2482
A Coruña	933.8892	55.1560	950.9692	0.0591	-0.3631