



MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Modelo de análisis de sistemas de autoconsumo fotovoltaico: rentabilidad, ahorro y excedentes

Autor: María Bru Chao

Director: Miguel Ángel Sánchez Bodas

Madrid

Enero 2024

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título

**Modelo de análisis de sistemas de autoconsumo fotovoltaico:
rentabilidad, ahorro y excedentes**

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico **2023-24** 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.: *Maria Bru Chao*

Fecha: 24/01/2024

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.:



Fecha: 24/01/2024

Miguel Ángel Sánchez Bodas

Resumen

En el presente trabajo se expone el desarrollo de una Herramienta de Autoconsumo Fotovoltaico, que permite calcular a futuro los importes de la factura eléctrica de domicilios o pymes que cuenten con autoconsumos fotovoltaicos.

Los autoconsumos fotovoltaicos permiten a los consumidores generar su propia energía eléctrica. Gracias a este tipo de tecnologías, se puede llegar a reducir la factura de electricidad, independizarse de las fuentes de energía externa y contribuir a la descarbonización del sistema eléctrico.

El desarrollo de este modelo puede ayudar a los consumidores a tomar decisiones informadas acerca de si invertir en una instalación de estas características. Además, permite realizar un estudio de cómo potenciar la rentabilidad de una instalación de autoconsumo, puesto que permite analizar en profundidad cada una de las partes que componen la factura eléctrica.

Los principales objetivos del desarrollo del modelo de análisis de autoconsumo fotovoltaico se pueden resumir en:

1. Analizar la rentabilidad de inversiones en instalaciones de autoconsumo fotovoltaico doméstico o de pequeña industria.
2. Maximizar la TIR en función de la potencia instalada en una instalación de autoconsumo fotovoltaico.
3. Determinar el ahorro futuro anual que conlleva una instalación de autoconsumo fotovoltaico.
4. Estudiar el sistema de compensación de excedentes y la energía regalada a la red con una instalación de autoconsumo.
5. Desarrollar una calculadora predictiva de la factura eléctrica.
6. En el corto plazo, determinar que combinación de tarifa, potencia y precio de la energía, resultan más rentable para cada caso particular.

1. Modelo desarrollado

Desarrollo del modelo, explicando paso a paso su elaboración y funcionamiento. Se da a conocer su estructura y las variables de entrada y salida que lo componen, así como las hipótesis tomadas a la hora de calcular los diferentes apartados del modelo (precios de la electricidad, degradación de los paneles, excedentes etc.)

1.1. Arquitectura del modelo

El modelo consta de dos códigos de Python que funcionan de forma paralela. En primer lugar, presenta un código que genera una interfaz para la recogida de datos de entrada y la asignación a sus variables correspondientes. Por otro lado, el segundo código recoge la herramienta en sí misma, con todos los cálculos necesarios para la obtención de los resultados.

Los datos introducidos por el usuario permiten personalizar una ejecución del modelo obteniendo un caso concreto de análisis. Además de estos datos, la herramienta se apoya en varias tablas de Excel que tienen información básica para el funcionamiento del modelo.

Con las variables de entrada introducidas por el usuario y dichas tablas ya incluidas en la base de datos de la herramienta, se procede a la ejecución del código y este devuelve una serie de tablas de resultados que de manera automática exporta a Excel. Para una mejor visualización de los resultados, estos se cargan a un fichero de Power Bi en el que, de manera automática, se presentan los resultados obtenidos en diferentes gráficas.

- Entradas del modelo:

Por un lado, el modelo requiere de cierta información fija para su funcionamiento (perfil de generación y consumo, calendario...). Esta parte de las entradas se encuentra en la base de datos de la herramienta. La segunda parte de las entradas incluye los datos característicos del caso a analizar. Se trata de la información introducida por el usuario y que caracteriza cada configuración (potencia instalada, energía consumida, tipo de contrato eléctrico, información sobre la inversión, etc.). Estos datos se introducirán en la herramienta a través de la interfaz y se asignarán a su variable correspondiente.

El primer paso para la ejecución del modelo es el desarrollo de un archivo calendario, que incluya todo el rango de fechas alcanzable por el modelo (01/01/2023 al 31/12/2055) y que diferencie para cada hora de cada día el periodo correspondiente. Con este primer bloque se obtiene el primer archivo de datos necesarios para el funcionamiento de la Herramienta de Autoconsumo (*calendario_horas.csv*).

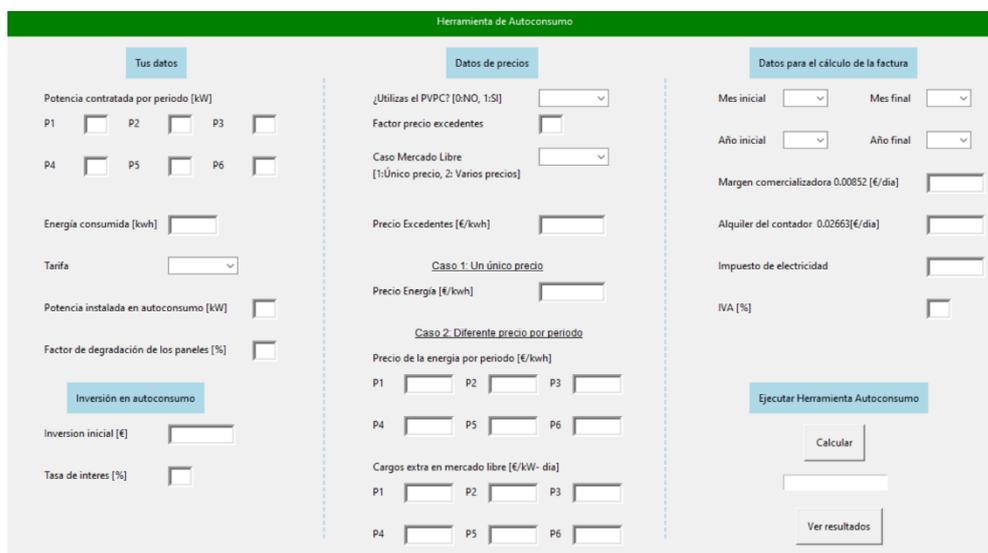
El resto de los archivos de Excel necesarios, se recogen de forma resumida en la siguiente tabla, así como dónde encontrarlos.

Archivo	Definición	Dónde encontrarlo
Consumo	Consumo horario en pu [kWh/kWh] para la tarifa 2.0TD y 3.0TD	Publicado anualmente en el BOE en la Resolución del 22/12/2022
Generación	Perfil de generación de un autoconsumo fotovoltaico en España (horas equivalentes, 1724h anuales)	Simulyde
xPryce	Predicción de los precios de los precios horarios de la electricidad en el mercado mayorista	Simulyde
Valores mensuales	Resultado porcentual de estimar el peso del precio del pool sobre el PVPC	Elaboración propia

Cargos y peajes	Diferentes archivos para los cargos y peajes de potencia y energía	Cargos: Orden Ministerial, publicados en el BOE Peajes: Determinado por la CNMC
------------------------	--	--

Ilustración 1. Resumen de las entradas del modelo en archivos de Excel [Elaboración propia, 2023]

La segunda parte de las entradas al modelo hace referencia a los datos característicos de cada caso particular que se quiera analizar con la Herramienta de Autoconsumo. Estas variables son introducidas por el usuario a través de la interfaz de la herramienta y se asignan en cada ejecución.



The screenshot shows the 'Herramienta de Autoconsumo' interface with three main sections:

- Tus datos:** Includes fields for 'Potencia contratada por periodo [kW]' (P1-P6), 'Energía consumida [kwh]', 'Tarifa', 'Potencia instalada en autoconsumo [kW]', and 'Factor de degradación de los paneles [%]'. There is also a sub-section for 'Inversión en autoconsumo' with 'Inversión inicial [€]' and 'Tasa de interes [%]'.
- Datos de precios:** Includes a dropdown for '¿Utilizas el PVPC? [0:NO, 1:SI]', 'Factor precio excedentes', 'Caso Mercado Libre' (with sub-options for 'Único precio' or 'Varios precios'), 'Precio Excedentes [€/kwh]', 'Precio Energía [€/kwh]', and 'Precio de la energía por periodo [€/kwh]' (P1-P6). It also has fields for 'Cargos extra en mercado libre [€/kW- día]' (P1-P6).
- Datos para el cálculo de la factura:** Includes 'Mes inicial' and 'Mes final' dropdowns, 'Año inicial' and 'Año final' dropdowns, 'Margen comercializadora 0.00852 [€/día]', 'Alquiler del contador 0.02663[€/día]', 'Impuesto de electricidad', and 'IVA [%]'. A 'Calcular' button and a 'Ver resultados' button are also present.

Ilustración 2. Interfaz para la introducción de las variables de entrada en la herramienta de autoconsumo [Elaboración propia, 2023]

La interfaz está ordenada en diferentes apartados, de forma que resulte intuitiva la introducción de datos para el usuario. Los apartados que presenta son:

- Tus datos: Información sobre situación eléctrica doméstica y contrato actual del usuario.
 - Datos de precios: Se pide la información acerca de la tarifa eléctrica que se tiene contratada y los precios en el caso de que se tengan pactados con la comercializadora.
 - Datos para el cálculo de la factura: Se pregunta al usuario el periodo temporal del que se quiere obtener la predicción del valor de la factura eléctrica.
 - Inversión en autoconsumo: Información acerca del desembolso económico de la inversión en la instalación de autoconsumo y la tasa de descuento a aplicar.
 - Ejecutar: Botón para la ejecución del modelo y recuadro para mostrar el mensaje de que se ha ejecutado con éxito.
- Funcionamiento del modelo:

El funcionamiento del modelo está estructurado en cuatro partes fundamentales, en cada una de las cuales las variables calculadas tienen distinto rango temporal. El primer bloque se corresponde con la asignación de datos al modelo, la segunda parte trata la información horaria

(los datos de partida son horarios); la tercera parte, correspondiente con la obtención de la factura, trata la información a nivel mensual; y, por último, se realiza el análisis de la inversión por lo que los datos se tratan a escala anual.

Algunas de las variables de entrada que la herramienta requiere del usuario permiten al modelo determinar en qué caso está trabajando; se trata de variables de selección. En función de su valor el modelo cogerá unos datos u otros de las Tablas de Excel de entrada.

En función de estas variables, el modelo se encontrará en alguno de los siguientes casos.

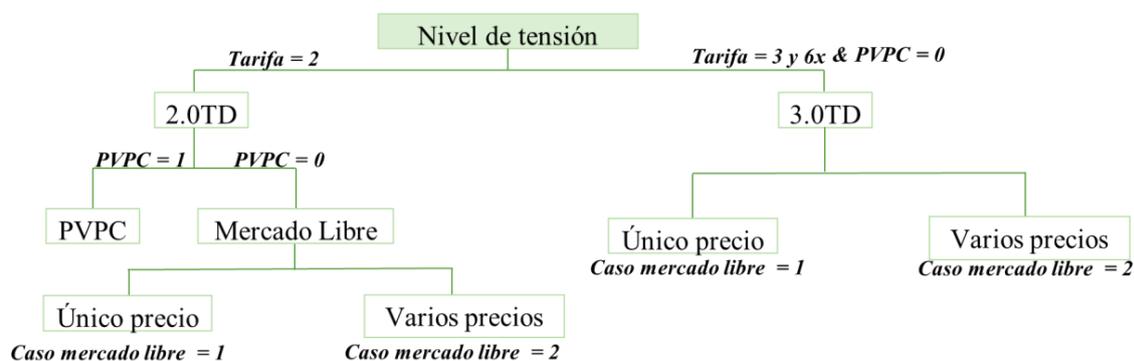


Ilustración 3. Esquema explicativo de los diferentes casos según las variables de selección del modelo [Elaboración propia, 2023]

En función de la tarifa seleccionada la herramienta lleva a cabo la:

- Asignación de los periodos: a cada hora del día le corresponde un periodo y estos varían en función de la tarifa. De las columnas del calendario se obtiene la columna correspondiente a los periodos de la tarifa seleccionada.
- Asignación de los cargos y peajes correspondientes. Asignación del perfil de consumo. En función de la tarifa el modelo selecciona un perfil de consumo u otro, ya que para diferentes niveles de tensión los consumos varían.

En función del mercado al que se acoja el consumidor, tiene lugar la:

- Asignación del precio de la electricidad: si el mercado seleccionado es el regulado, el precio de la energía será el del PVPC, mientras que si la elección es el mercado libre se establecerá el precio fijo introducido por el usuario.

En los cálculos horarios tiene lugar el cálculo de la componente variable de la factura eléctrica. En esta primera parte también se aplica al perfil de generación de los paneles solares y la degradación anual introducida por el usuario.

Los calculo mensuales se corresponden con los cálculos del importe de la factura (que tiene periodicidad mensual). Una vez calculada la parte variable de la factura eléctrica, se procede a agrupar la información obtenida de manera mensual y a añadir el resto de los componentes que

configuran la totalidad de la factura eléctrica (cargos y peajes fijos, margen de la comercializadora, impuesto eléctrico, contador e IVA).

Los cálculos anuales son los necesarios para llevar a cabo el análisis de la inversión. Se calculan el VAN, el TIR y el retorno de la inversión, utilizando como Cash Flows el ahorro generado en la factura gracias a la instalación de autoconsumo.

- Salidas del modelo:

Tras la ejecución del modelo se generan las tablas resultado en forma de data-frame de Python y, además, se generan archivos de Excel. Puesto que se trata de una gran cantidad de datos, se ha desarrollado también un archivo de Power BI que permite visualizar estas tablas resultado de manera gráfica.

1.2 Hipótesis para el cálculo del PVPC:

Es fundamental para el cálculo de la factura poder determinar el precio aplicado en las tarifas del mercado regulado. Tras estudiar las componentes del PVPC y su cálculo establecido en la normativa, se establece una hipótesis preliminar para su obtención.

La hipótesis de partida para la obtención del PVPC es que este proviene de diferentes elementos que le influyen en su valor final en mayor o menor proporción. El objetivo es determinar el porcentaje de influencia del precio del mercado diario en el valor final del PVPC. Para llevar a cabo este estudio, eSios cuenta con el histórico (desde 2014) de todos estos valores en su base de datos, por lo que disponiendo de estos valores se puede analizar la influencia de cada elemento en el precio final.

2. Aplicación del modelo

Con el modelo en funcionamiento, se procede a su uso para analizar diferentes casos. En este trabajo se ejecutan y presentan un total de 10 casos diferentes para consumos domésticos en el mercado libre o regulado y pymes.

La diferencia entre estos dos tipos de cliente radica principalmente en el perfil de consumo y en la energía consumida total. Las pymes consumen más energía anualmente que un consumo doméstico y dicho consumo se distribuye de manera diferente a lo largo del año, lo cual afecta a muchas de las variables de la instalación, tales como las potencias contratadas por periodo, la potencia instalada en la instalación...etc. Los casos por ejecutar se agrupan en el siguiente diagrama.

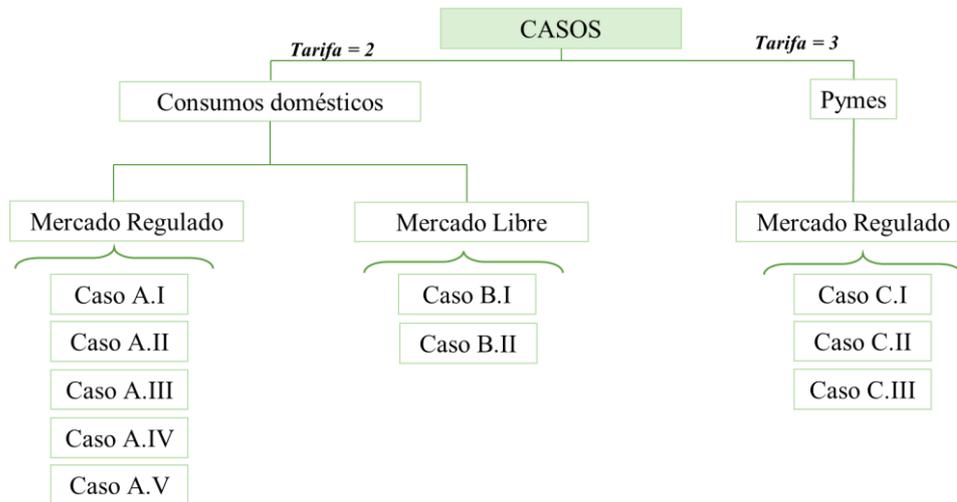


Ilustración 4. Diagrama resumen de los casos a ejecutar en el Modelo de Autoconsumo [Elaboración Propia, 2023]

Para cada caso se varían las variables de entrada (potencia instalada, contratada, energía consumida, tarifa...) y para todos se aplica, en el análisis de la rentabilidad, una tasa de descuento del 7%, correspondiente al WACC del sector en España.

3. Análisis de resultados

Se analizan los casos ejecutados y se muestran los resultados en un informe de Power BI, versátil y potente herramienta de visualización de datos. Para llegar a toda la profundidad de análisis que permite este visualizador de datos, se adjunta como parte de este trabajo el archivo de Power BI, que recoge el informe de resultados del Caso Base.

También se lleva a cabo un análisis comparativo de los casos ejecutados, lo que permite hacer un estudio de la rentabilidad, estudiando qué casos son más rentables y por qué. Para el análisis comparativo se presentan tres indicadores fundamentales: un indicador de consumo (refleja la eficiencia en el dimensionamiento de la instalación), un indicador de ahorro (representa el ahorro conseguido) y un indicador del nivel de excedentes compensados.

Para el estudio de la rentabilidad, se calculan los indicadores del VAN, la TIR y el retorno de la inversión, de forma que se puedan comparar los casos a través de métricas financieras de rentabilidad.

- **Archivo de Power BI: Caso Base**

En primer lugar, se analiza en profundidad el archivo de resultados realizado en Power BI, presentando los resultados del Caso Base. Los apartados principales que incluye el archivo son.

1. Factura eléctrica: En esta pestaña se muestra una gráfica comparando los importes mensuales o anuales de la factura eléctrica con y sin autoconsumo. Incluye el precio medio de la energía en cada mes (en el caso de usar los precios del mercado regulado, equivaldría al precio medio mensual o anual del PVPC).
2. Balance generación y consumo: En esta pestaña se muestran la generación, consumo y balance (diferencia entre generación y consumo). Se puede ver la agregación anual o bajar un nivel para ver la distribución mensual.
3. Ahorro con autoconsumo: En esta pestaña se muestra una gráfica de líneas que presenta la cantidad de dinero ahorrado con autoconsumo fotovoltaico (diferencia entre la factura mensual sin autoconsumo y con autoconsumo). También muestra los excedentes generados en cada periodo, ya que se trata de uno de los responsables principales del ahorro en la factura. La otra partida relevante que afecta en el ahorro es la disminución de los cargos y peajes variables y el resto de las partidas de la factura al haber consumido menos cantidad de energía de la red.
4. Análisis de excedentes [€ y kWh]: En esta pestaña se representa el gasto variable de energía frente a los excedentes generados. Los excedentes pueden descontarse de la factura hasta alcanzar como máximo el coste variable de energía. Representar ambos en la gráfica permite analizar visualmente la compensación de excedentes, ya que cuando se vean excedentes superando al coste variable (ese mes) se estará regalando parte de la energía generada a la red, mientras que si el coste de energía supera a los excedentes se va a reducir del importe de la factura todos los excedentes generados. Es recomendable analizar este gráfico con granularidad mensual, puesto que la compensación de excedentes tiene lugar mes a mes.
5. Análisis de la inversión: En este apartado se presenta un análisis de la inversión en autoconsumo para el caso ejecutado. Con la inversión realizada, los precios y las tarifas seleccionadas y el consumo establecido se estudia qué rentabilidad se está obteniendo con la inversión en la instalación de autoconsumo, considerando el ahorro obtenido como los beneficios de la inversión. Para realizar el análisis de la inversión se ha optado por el uso de las métricas financieras del VAN y la TIR, indicadores financieros que permiten determinar el beneficio y la rentabilidad de una inversión.

- **Análisis de la inversión y de los excedentes**

Tras estudiar lo anteriormente dicho de todos los casos (total de 10 casos, entre consumos domésticos con mercado libre o regulado y pymes) se hace un análisis comparativo de estos, lo que permita hacer un estudio de la rentabilidad, estudiando qué casos son más rentables y por qué. Para el análisis comparativo se presentan tres indicadores fundamentales para el análisis, un indicador de consumo (refleja la eficiencia de la instalación), un indicador de ahorro (representa el ahorro conseguido) y un indicador del nivel de excedentes compensados.

En este apartado, se realiza un análisis comparativo de los resultados obtenidos en los tres casos ejecutados:

- Caso A: Consumos domésticos con PVPC
- Caso B: Consumos domésticos con mercado libre
- Caso C: Consumos de pymes

Para determinar qué caso resulta el más interesante como inversión, se comparan los valores de la TIR de cada caso. Los resultados muestran que el caso C, el de las pymes, es el más rentable, seguido del caso A y el caso B.

Casos	Consumo [kWh]	P.Instalada [kW]	Inversión inicial	VAN	TIR	Retorno	Consumo	Ahorro	Excedentes compensados
Consumos domésticos - PVPC									
Caso A.I	3500	5	5 000 €	1 863.30 €	11.70%	8.74	49.8%	67.1%	74.4%
Caso A.II	3500	7	6 000 €	1 658.70 €	10.50%	9.5	35.6%	74.8%	58.5%
Caso A.III	5500	5	5 000 €	3 780.80 €	16.70%	6.32	78.2%	58.8%	95.8%
Caso A.IV	5500	7	6 000 €	4 327.90 €	16.10%	6.57	55.9%	70.4%	80.6%
Caso A.V	6500	8	6 500 €	5 543.50 €	17.80%	5.93	57.8%	69.3%	82.4%
Consumos domésticos - Mercado libre									
Caso B.I	3500	5	5 000 €	-670.00 €	5.30%	14.48	42.1%	42.1%	47.4%
Caso B.II	6500	8	6 500 €	2 424.90 €	11.70%	8.57	57.8%	47.0%	92.5%
Pymes									
Caso C.I	15000	15	8 000 €	9 698.40 €	22.80%	4.53	68.2%	61.2%	70.2%
Caso C.II	18000	17	9 000 €	12 001.40 €	24.40%	4.2	72.8%	61.9%	74.7%
Caso C.III	19000	18	10 000 €	12 181.70 €	22.80%	4.51	72.6%	61.4%	74.5%

Ilustración 5. Recopilación de los resultados obtenidos para todos los casos. [Elaboración propia, 2023]

Las principales razones que explican estos resultados son:

- Mayor potencia instalada en los casos de mayor potencia se ha considerado un consumo energético mayor. Por tanto, al ahorrar en un consumo mayor, aumenta la rentabilidad de la instalación.

- Coste fijo diario: El caso B, en el que los precios de la electricidad son fijos, presenta un coste fijo diario adicional (cargos extras que añaden las comercializadoras libres). Este coste no puede ser reducido ni eliminado por los excedentes, por lo que empeora la rentabilidad de la instalación para potencias instaladas más bajas.
- Eficiencia en el dimensionamiento de la instalación: La rentabilidad de la instalación también depende de la eficiencia de la energía generada. Esto se puede medir a través de dos indicadores:
 - Porcentaje de consumo: La relación entre la energía consumida en el periodo y la generada por la instalación.
 - Porcentaje de excedentes compensados: La proporción de excedentes totales que han recibido compensación en el periodo.

En general, se observa que los casos con mayor TIR son los que presentan un mayor porcentaje de consumo y un mayor porcentaje de excedentes compensados. Esto significa que estas instalaciones están optimizando la proporción de la energía autogenerada, usando la mayoría para el consumo propio y la restante compensándola a través de los excedentes.

Profundizando en el análisis de los excedentes se observa que los excedentes generados por una instalación no siempre se compensan. Existe un límite en cuanto a los excedentes que se pueden compensar, ya que estos no pueden superar al coste de la energía consumida de la red en un mes. Por ello, cuando se alcanza este importe se deja de compensar los excedentes restantes y se comienza a regalar electricidad a la red.

Teniendo esto en cuenta, y con el objetivo de optimizar la rentabilidad de la instalación de autoconsumo, es importante que la mayor cantidad posible de energía generada se consuma en el domicilio y que, de la energía excedentaria, es importante que se compense la gran mayoría.

Maximizando estos dos aspectos, se consigue optimizar la instalación de autoconsumo lo que potencia la rentabilidad obtenida.

La rentabilidad de la instalación está en optimizar la eficiencia de la energía generada, idóneamente usando la mayoría para el consumo propio y la restante compensándola a través de los excedentes. Esto se puede ver de forma numérica en los valores de porcentaje de consumo y el porcentaje de excedentes compensados. En la siguiente grafica se observa la variación de estas medidas frente a la evolución de la TIR, para los casos ejecutados.

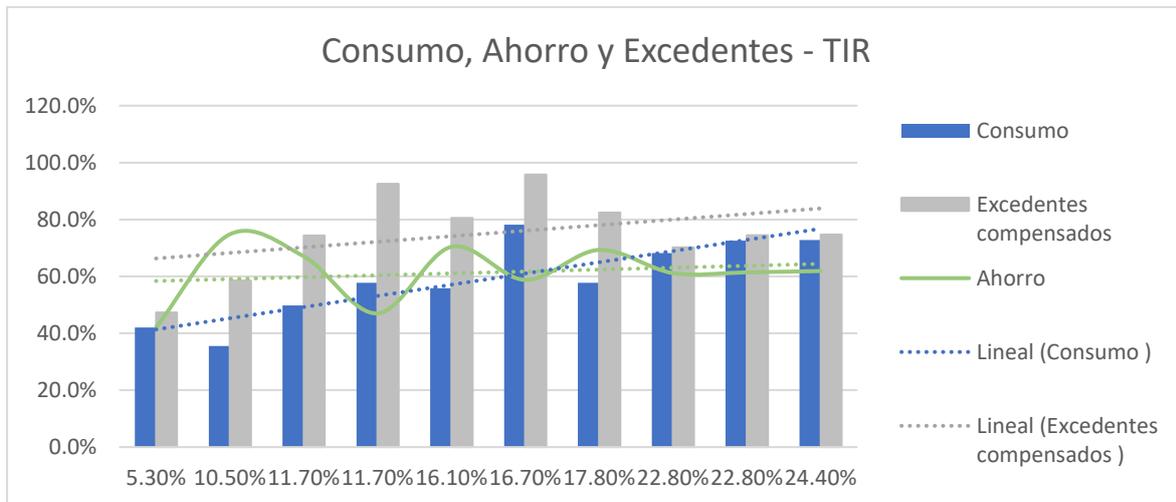


Ilustración 6. Indicadores de Consumo, Ahorro y Excedentes frente a la TIR obtenida [Elaboración propia, 2023]

Se observa, como era de esperar, que la tendencia es que se obtienen mayores rentabilidades en los casos de mayor porcentaje de consumo, ahorro y excedentes compensados.

Para maximizar la rentabilidad se requiere que tanto el indicador de consumo como el de los excedentes compensados se encuentren entre el 60%-80%. Es necesario optimizar ambos puntos para optimizar la instalación, valores muy altos solamente de uno de ellos no es suficiente para optimizar la rentabilidad.

Se observa en la gráfica que los tres mejores casos ejecutados, presentan ambos indicadores por encima del 60% y con valores muy similares.

Si analizamos la línea de ahorro, observamos que presenta un carácter más sinusoidal, por lo que se puede deducir que afecta en menor medida a la TIR. Recordemos que esto se debe a que el porcentaje de ahorro es una medida relativa para el análisis de la inversión, puesto que lo que afecta realmente es el importe real ahorrado, más que el porcentaje de ahorro obtenido.

Abstract

This paper presents the development of a Photovoltaic Self-consumption Tool, which allows to calculate the future amounts of the electricity bill of households or SMEs that have photovoltaic self-consumption.

Photovoltaic self-consumption allows consumers to generate their own electricity. Thanks to this type of technology, it is possible to reduce the cost of electricity bill, become independent of external energy sources and contribute to the decarbonization of the system.

The development of this model can help consumers make informed decisions about whether to invest in such an installation. In addition, it allows a study of how to enhance the profitability of a self-consumption installation, since it allows an in-depth analysis of each of the parts that make up the electricity bill.

The main objectives of the development of the photovoltaic self-consumption analysis model can be summarized as follows:

1. To analyze the profitability of investments in domestic or small industry photovoltaic self-consumption installations.
2. Maximize the IRR as a function of the installed power in a photovoltaic self-consumption installation.
3. Determine the annual future savings of a photovoltaic self-consumption installation.
4. To study the surplus compensation system and the energy given to the grid with a self-consumption installation.
5. Generate an electricity bill predictive calculator.
6. In the short term, determine which combination of tariff, power and energy price is the most profitable for each case.

1. Developed Model

Development of the model, explaining step by step its elaboration and operation. Its structure and input and output variables are explained, as well as the assumptions made when calculating the different sections of the model (energy prices, panel degradation, surpluses, etc.).

1.1 Model Structure

The model consists of two Python codes that work in parallel, firstly, it presents a code that generates an interface for collecting input data and assigning them to their corresponding variables. On the other hand, the second code collects the tool itself, with all the calculations necessary to obtain the results.

The data entered by the user allows to customize a model run obtaining a specific case of analysis, but in addition to this data, the tool is supported by several Excel tables that have basic information for the operation of the model.

With the input variables entered by the user and these tables already included in the tool's database, the code is executed and returns a series of result tables that are automatically exported to Excel. For a better visualization of the results, these are loaded to a Power Bi file in which, automatically, the results obtained are presented in different graphs.

- Inputs of the model

On the one hand, the model requires certain fixed information for its operation (generation and consumption profile, calendar...). This part of the inputs is found in the tool's database. The second part of the inputs includes the characteristic data of the case to be analyzed, this is the information entered by the user and which characterizes each configuration (installed power, energy consumed, type of electricity contract, investment information...). These data will be entered into the tool through the interface and assigned to their corresponding variable.

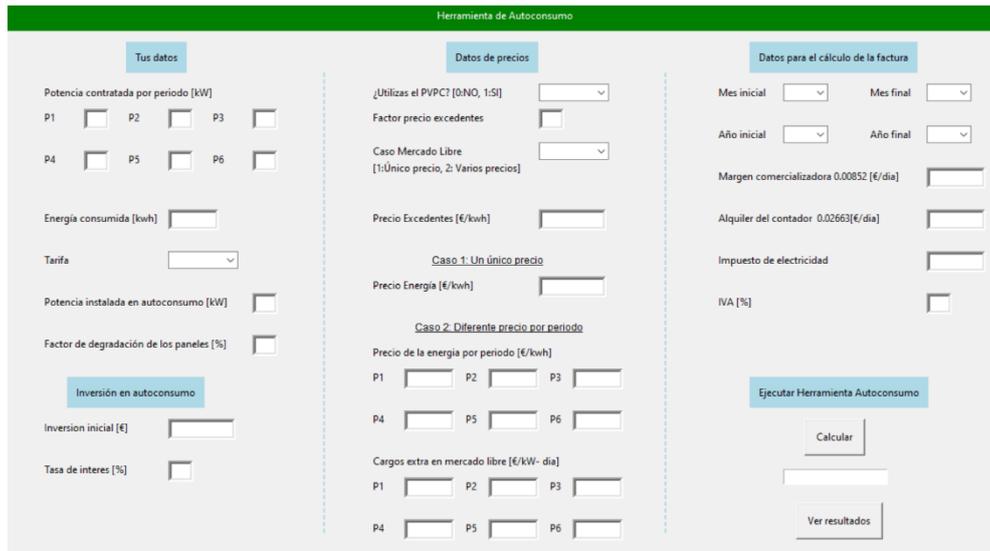
The first step for the execution of the model is the development of a calendar file, which includes the whole range of dates reachable by the model (01/01/2023 to 31/12/2055) and which differentiates for each hour of each day the corresponding period. With this first block, the first data file necessary for the operation of the Self-consumption Tool is obtained (calendar_hours.csv).

The rest of the necessary Excel files are summarized in the following table, as well as where to find them.

File	Definition	Where to find it
Consumption	Hourly consumption in pu [kWh/kWh] for tariff 2.0TD and 3.0TD.	Published annually in the BOE in the Resolution of 22/12/2022
Generation	Generation profile of a photovoltaic self-consumption in Spain (Equivalent hours, 1724h per year)	Simulyde
xPryce	Prediction of hourly electricity prices on the wholesale market	Simulyde
Monthly values	Percentage result of estimating the weight of the pool price on the PVPC	Own elaboration
Charges and tolls	Different files for power and energy charges and tolls	Charges: Ministerial Order, published in the BOE Tolls: Determined by the CNMC

Ilustración 7. Summary of model inputs in Excel files [Own elaboration, 2023].

The second part of the inputs to the model refers to the characteristic data of each case to be analyzed with the Self-Supply Tool. These variables are entered by the user through the tool interface and are assigned at each run.



The screenshot shows the 'Herramienta de Autoconsumo' interface, which is divided into three main sections:

- Tus datos:** Includes fields for 'Potencia contratada por periodo [kW]' (P1, P2, P3, P4, P5, P6), 'Energía consumida [kwh]', 'Tarifa', 'Potencia instalada en autoconsumo [kW]', 'Factor de degradación de los paneles [%]', 'Inversión en autoconsumo' (Inversion inicial [€], Tasa de interes [%]), and '¿Utilizas el PVPC? [D,NO, 1,5I]'. There are also checkboxes for 'Factor precio excedentes' and 'Caso Mercado Libre [1:Único precio, 2: Varios precios]'. A 'Calcular' button is located at the bottom right of this section.
- Datos de precios:** Includes 'Precio Excedentes [€/kwh]', 'Precio Energía [€/kwh]', and 'Precio de la energía por periodo [€/kwh]' (P1, P2, P3, P4, P5, P6). There are also fields for 'Cargos extra en mercado libre [€/kW- día]' (P1, P2, P3, P4).
- Datos para el cálculo de la factura:** Includes 'Mes inicial', 'Mes final', 'Año inicial', 'Año final', 'Margen comercializadora 0.00852 [€/día]', 'Alquiler del contador 0.02663[€/día]', 'Impuesto de electricidad', and 'IVA [%]'. A 'Ver resultados' button is located at the bottom right of this section.

Ilustración 8. Interface for the introduction of input variables in the self-consumption tool [Own elaboration, 2023].

The interface is organized in different sections, to make data entry intuitive for the user. The sections presented are:

- Your data: Information about domestic electricity situation and the user's current contract.
 - Price data: Information is requested about the contracted electricity tariff and the prices in case they have been agreed.
 - Data for the calculation of the bill: The user is asked for the time period for which the prediction of the value of the electricity bill is to be obtained.
 - Investment in self-consumption: Information about the economic disbursement of the investment in the self-consumption installation and the discount rate to be applied.
 - Execute: Button for the execution of the model and box to show the message that it has been successfully executed.
- Operation of the model

The operation of the model is structured in three fundamental parts, in each of which the calculated variables have a different time range. The first block corresponds to the assignment of data to the model; the second part deals with hourly information (the starting data are hourly);

the third part, corresponding to obtaining the invoice, deals with information at a monthly level; and, finally, the investment analysis is carried out, so the data are dealt with on an annual scale.

Some of the input variables that the tool requires from the user allow the model to determine in which case it is working; these are selection variables. Depending on their value, the model will take some data or others from the input Excel Tables.

Depending on these variables, the model will be in one of the following cases.

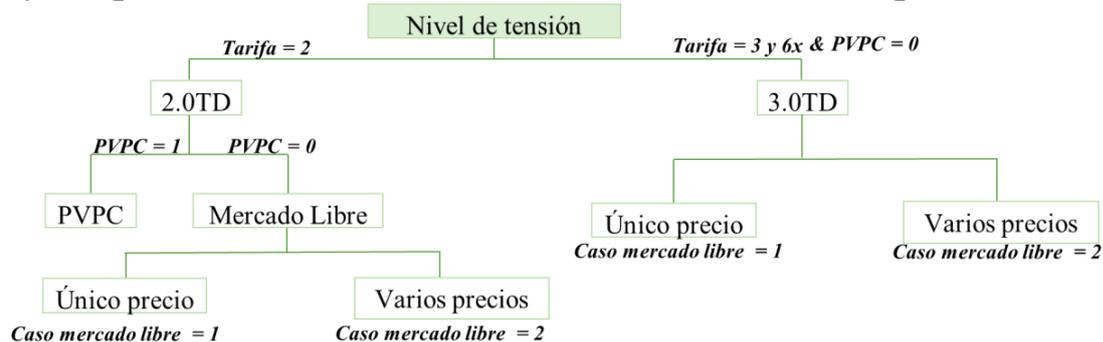


Ilustración 9. Explanatory diagram of the different cases according to the model selection variables [Own elaboration, 2023].

Depending on the selected tariff, the tool performs the:

- Assignment of the periods. Each hour of the day corresponds to a period, and these vary according to the tariff. From the columns of the calendar, the column corresponding to the periods of the selected tariff is obtained.
- Assignment of the corresponding charges and tolls.
- Assignment of the consumption profile. Depending on the tariff, the model selects one consumption profile or another, since consumption varies for different voltage levels.

Depending on the market to which the consumer subscribes, the:

- Assignment of the electricity price. If the market selected is the regulated market, the price of energy will be the PVPC, while if the choice is the free market, the fixed price entered by the user will be established.

In the hourly calculations takes place the calculation of the variable component of the electricity bill, in this first part is also applied to the generation profile of the solar panels, the annual degradation introduced by the user.

The monthly calculations correspond to the calculation of the amount of the bill (which has a monthly periodicity). Once the variable part of the electricity bill has been calculated, the information obtained on a monthly basis is grouped together and the rest of the components that make up the total electricity bill (fixed charges and tolls, distributor's margin, electricity tax, meter and VAT) are added.

The annual calculations are those necessary to carry out the investment analysis. The NPV, IRR and return on investment are calculated, using as Cash Flows, the savings generated in the bill thanks to the self-consumption installation.

- Outputs of the model

After the execution of the model, the result tables are generated in the form of Python data frame and, in addition, Excel files are generated. Since a large amount of data is involved, a Power BI file has also been developed to visualize these result tables graphically.

1.2 Hypothesis for the calculation of the PVPC:

It is essential for the calculation of the bill to be able to determine the price applied in the regulated market tariffs. After studying the components of the PVPC and its calculation established in the regulations, a preliminary hypothesis is established to obtain it.

The starting hypothesis for obtaining the PVPC is that it comes from different elements that influence its final value to a greater or lesser extent. The objective is to determine the percentage of influence of the daily market price on the final value of the PVPC. To carry out this study, eSios has the history (since 2014) of all these values in its database, so that by having these values available, the influence of each element on the final price can be analyzed.

2. Model Application

With the model in operation, it is used to analyze different cases. In this work, a total of 10 different cases are run and presented for domestic consumption in the free or regulated market and SMEs.

The difference between these two types of customer lies mainly in the consumption profile and the total energy consumed. SMEs consume more energy annually than a domestic consumption and this consumption is distributed differently throughout the year, which affects many of the variables of the installation, such as the contracted power per period, the power installed in the installation...etc. The cases to be executed are grouped in the following diagram.

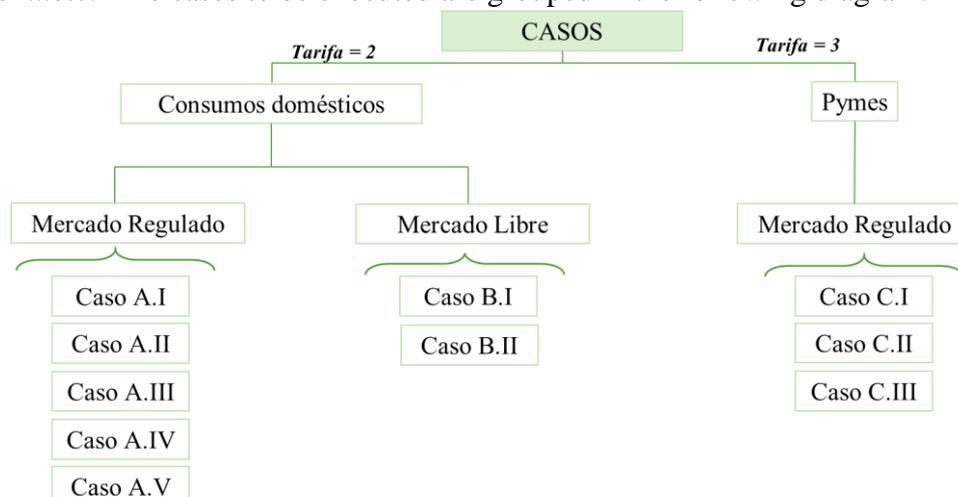


Ilustración 10. Diagram summarizing the cases to be executed in the Self-consumption Model [Own elaboration, 2023].

For each case, the input variables (installed and contracted power, energy consumed, tariff, etc.) are varied and for all cases a discount rate of 7%, corresponding to the WACC of the sector in Spain, is applied in the profitability analysis.

3. Results análisis

The executed cases are analyzed, and the results are shown in a Power BI report, a powerful data visualization tool. To reach the full depth of analysis that this data visualizer allows, the Power BI file, which contains the Base Case results report, is attached as part of this work.

A comparative analysis of the executed cases is also carried out, which allows a comparative study of the profitability, studying which cases are more profitable and why. For the comparative analysis, three fundamental indicators are presented for the analysis, a consumption indicator (reflecting the efficiency of the installation), a savings indicator (representing the savings achieved) and an indicator of the level of compensated surpluses.

For the profitability study, NPV, IRR and return on investment indicators are calculated, so that the cases can be compared through financial profitability metrics.

- **Power BI File: Base Case**

First, the results file created in Power BI is analyzed in depth, presenting the results of the Base Case. The main sections included in the file are:

1. Electricity bill: This tab shows a graph comparing the monthly or annual amounts of the electricity bill with and without self-consumption. It includes the average price of energy in each month (in the case of using regulated market prices, it would be equivalent to the average monthly or annual price of the PVPC).
2. Generation and consumption balance: This tab shows generation, consumption and balance (difference between generation and consumption). You can see the annual aggregation or go down one level to see the monthly distribution.
3. Savings with self-consumption: This tab displays a line graph showing the amount of money saved with PV self-consumption (difference between the monthly bill without self-consumption and with self-consumption). It also shows the surpluses generated in each period, as this is one of the main factors responsible for the savings on the bill. The other relevant item that affects the savings is the decrease in variable charges and tolls and the rest of the items on the bill, as the cost of energy is lower since less energy is consumed from the grid.)

4. Surplus analysis [€ and kWh]: This tab plots the variable energy cost against the generated surplus. The surplus can be deducted from the bill up to a maximum of the variable energy cost. Representing both in the graph allows visual analysis of surplus compensation, since when surpluses exceed the variable cost (that month or year), part of the energy generated will be given away to the grid, while if the cost of energy exceeds the surpluses, all the surpluses generated will be reduced from the amount of the bill. It is advisable to analyze this graph with monthly granularity since the compensation of surpluses takes place month by month.
5. Investment analysis: This section presents an analysis of the investment in self-consumption for the executed case. With the investment made, the prices and tariffs selected, and the consumption established, the profitability obtained with the investment in the self-consumption installation is studied, considering the savings obtained as the benefits of the investment. To carry out the investment analysis, the financial metrics of NPV and IRR, financial indicators that allow determining the benefit and profitability of an investment, have been used.

- **Investment and surplus analysis**

After studying the above mentioned of all the cases (total of 10 cases, between domestic consumption with free or regulated market and SMEs) a comparative analysis of these cases is made, which allows to make a comparative study of the profitability, studying which cases are more profitable and why. For the comparative analysis, three fundamental indicators are presented for the analysis, a consumption indicator (reflecting the efficiency of the installation), a savings indicator (representing the savings achieved) and an indicator of the level of compensated surpluses.

In this section, a comparative analysis is made of the results obtained in the three cases executed:

- Case A: Domestic consumption with PVPC
- Case B: Domestic consumption with free market
- Case C: Pymes

To determine which case is the most interesting as an investment, the IRR values of each case are compared. The results show that case C, the SME case, is the most profitable, followed by

case A and case B.

Casos	Consumo [kWh]	P.Instalada [kW]	Inversión inicial	VAN	TIR	Retorno	Consumo	Ahorro	Excedentes compensados
Consumos domésticos - PVPC									
Caso A.I	3500	5	5 000 €	1 863.30 €	11.70%	8.74	49.8%	67.1%	74.4%
Caso A.II	3500	7	6 000 €	1 658.70 €	10.50%	9.5	35.6%	74.8%	58.5%
Caso A.III	5500	5	5 000 €	3 780.80 €	16.70%	6.32	78.2%	58.8%	95.8%
Caso A.IV	5500	7	6 000 €	4 327.90 €	16.10%	6.57	55.9%	70.4%	80.6%
Caso A.V	6500	8	6 500 €	5 543.50 €	17.80%	5.93	57.8%	69.3%	82.4%
Consumos domésticos - Mercado libre									
Caso B.I	3500	5	5 000 €	-670.00 €	5.30%	14.48	42.1%	42.1%	47.4%
Caso B.II	6500	8	6 500 €	2 424.90 €	11.70%	8.57	57.8%	47.0%	92.5%
Pymes									
Caso C.I	15000	15	8 000 €	9 698.40 €	22.80%	4.53	68.2%	61.2%	70.2%
Caso C.II	18000	17	9 000 €	12 001.40 €	24.40%	4.2	72.8%	61.9%	74.7%
Caso C.III	19000	18	10 000 €	12 181.70 €	22.80%	4.51	72.6%	61.4%	74.5%

Ilustración 11. *Compilation of the results obtained for all cases. [Own elaboration, 2023]*

The main reasons for these results are:

- Higher installed power: The higher the installed power and the electricity demand, the higher the profitability of the installation, since the expense is higher and, therefore, so is the saving.
- Daily fixed cost: Case B, in which energy prices are fixed, presents an additional daily fixed cost. This cost cannot be reduced or eliminated by the surpluses, which worsens the profitability of the installation for lower installed power.
- Efficiency of the installation: The profitability of the installation also depends on the efficiency of the energy generated. This can be measured by two indicators:
 - Percentage of consumption: The ratio between the energy consumed in the period and the energy generated by the facility.
 - Percentage of surpluses compensated: The proportion of total surpluses that have received compensation in the period.

In general, it is observed that the cases with the highest IRR are those with a higher percentage of consumption and a higher percentage of compensated surpluses. This means that these facilities are optimizing the efficiency of the energy generated, using most of it for their own consumption and the rest compensating it through surpluses.

Further analysis of the surpluses shows that the surpluses generated by a facility are not always compensated. There is a limit to the surpluses that can be compensated; these cannot exceed the cost of the energy consumed from the grid in a month. Therefore, when this amount is reached, the remaining surpluses are no longer compensated.

Taking this into account, and with the aim of optimizing the profitability of the self-consumption installation, it is important that as much of the energy generated as possible is consumed at home and that most of the surplus energy is compensated.

By maximizing the efficiency of these two points, it is possible to optimize the self-consumption installation, which enhances the profitability obtained.

The profitability of the installation lies in optimizing the efficiency of the energy generated, ideally using most of it for own consumption and the remainder compensating it through surpluses. This can be seen numerically in the values of the percentage of consumption and the percentage of compensated surpluses. The following graph shows the variation of these measures versus the evolution of the IRR, for the executed cases.

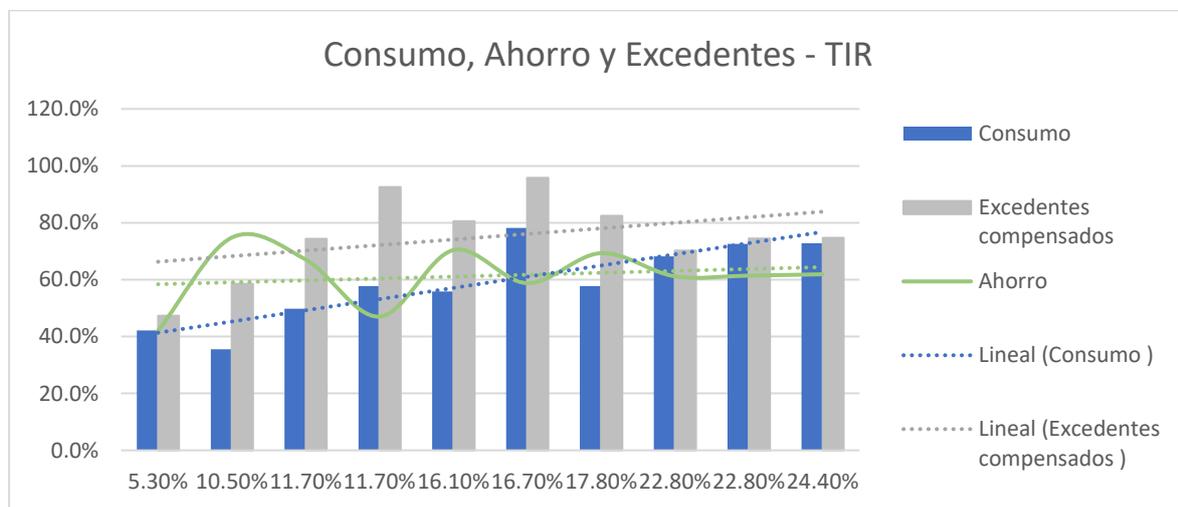


Ilustración 12. Consumption, Savings and Surplus Indicators versus IRR obtained [Own elaboration, 2023].

It is observed, as expected, that the tendency is that higher returns are obtained in the cases of higher percentage of consumption, savings and compensated surpluses.

To maximize profitability, both the consumption indicator and the compensated surplus indicator must be between 60%-80%. It is necessary to optimize both points to optimize the installation; very high values of only one of them is not enough to optimize profitability.

It is observed in the graph that the three best executed cases present both indicators above 60% and with very similar values.

If we analyze the savings line, we observe that it presents a more sinusoidal character, so it can be deduced that it affects the IRR to a lesser extent. Remember that this is since the savings percentage is a relative measure for the analysis of the investment, since what it really affects is the actual amount saved, rather than the percentage of savings obtained.

Índice de la memoria

1. Introducción	26
1.1 Motivación.....	27
1.2 Objetivos.....	28
1.3 Metodología.....	29
2. Marco teórico: Sistema eléctrico en España.....	31
2.1 Funcionamiento del Mercado eléctrico	31
2.2 Factura eléctrica.....	35
2.2.1 Componentes de la factura eléctrica	35
2.2.2 Teoría sobre cargos y peajes.....	37
3. Modelo desarrollado: Herramienta de análisis de autoconsumo fotovoltaico	39
3.1 Objetivos de la herramienta.....	39
3.2 Arquitectura y Funcionamiento de la herramienta	40
3.2.1 Entradas del modelo.....	41
3.2.2 Herramienta de análisis de autoconsumo fotovoltaico	49
3.2.3 Salidas del modelo.....	55
3.3 Fuentes de datos e hipótesis preliminares.....	60
3.3.1 Hipótesis para el cálculo del PVPC	60
3.3.2 Hipótesis para el cálculo de la degradación de los paneles	65
4. Aplicación del modelo	67
4.1 Consumos domésticos	68
4.1.1 Mercado regulado: Caso A	68
4.1.2 Mercado libre: Caso B	69
4.2 Pequeñas y medianas empresas: Caso C	70
5. Análisis de resultados.....	72
5.1 Informe de resultados: Power BI.....	72
5.2 Análisis de los casos	83
5.1.1 Caso A.II.....	84
5.1.2 Caso A.III.....	86
5.1.3 Caso A.IV.....	88

5.1.4	Caso A.V.....	90
5.1.5	Caso B.I.....	93
5.1.6	Caso B.II.....	95
5.1.7	Caso C.I.....	97
5.1.8	Caso C.II	99
5.1.9	Caso C.III.....	101
5.2	Análisis de la inversión	103
5.3	Análisis de excedentes.....	106
6.	Conclusiones y líneas futuras	109
7.	Relación con los ODS	113
8.	Bibliografía.....	115

Índice de ilustraciones

<i>Ilustración 1. Resumen de las entradas del modelo en archivos de Excel [Elaboración propia, 2023].....</i>	<i>3</i>
<i>Ilustración 2. Interfaz para la introducción de las variables de entrada en la herramienta de autoconsumo [Elaboración propia, 2023].....</i>	<i>3</i>
<i>Ilustración 3. Esquema explicativo de los diferentes casos según las variables de selección del modelo [Elaboración propia, 2023].....</i>	<i>4</i>
<i>Ilustración 4. Diagrama resumen de los casos a ejecutar en el Modelo de Autoconsumo [Elaboración Propia, 2023].....</i>	<i>6</i>
<i>Ilustración 5. Recopilación de los resultados obtenidos para todos los casos. [Elaboración propia, 2023]</i>	<i>8</i>
<i>Ilustración 6. Indicadores de Consumo, Ahorro y Excedentes frente a la TIR obtenida [Elaboración propia, 2023].....</i>	<i>10</i>
<i>Ilustración 7. Summary of model inputs in Excel files [Own elaboration, 2023].</i>	<i>12</i>
<i>Ilustración 8. Interface for the introduction of input variables in the self-consumption tool [Own elaboration, 2023].....</i>	<i>13</i>
<i>Ilustración 9. Explanatory diagram of the different cases according to the model selection variables [Own elaboration, 2023].</i>	<i>14</i>
<i>Ilustración 10. Diagram summarizing the cases to be executed in the Self-consumption Model [Own elaboration, 2023].....</i>	<i>16</i>
<i>Ilustración 11. Compilation of the results obtained for all cases. [Own elaboration, 2023]</i>	<i>18</i>
<i>Ilustración 12. Consumption, Savings and Surplus Indicators versus IRR obtained [Own elaboration, 2023]. ..</i>	<i>19</i>

<i>Ilustración 13. Actividades del Sector Eléctrico [Isabel Enseñat Saavedra, 2022].....</i>	<i>34</i>
<i>Ilustración 14. Componentes de la factura eléctrica [Elaboración propia, 2023].....</i>	<i>36</i>
<i>Ilustración 15. Periodos término de potencia y energía de la tarifa 2.0TD [Som Energía, 2023].....</i>	<i>37</i>
<i>Ilustración 16. Periodos horarios de los términos de potencia y energía de la tarifa 3.0TD [Som Energía, 2023].....</i>	<i>38</i>
<i>Ilustración 17. Diagrama de bloques de la arquitectura del modelo [Elaboración propia, 2023].....</i>	<i>41</i>
<i>Ilustración 18. Diagrama de bloques de las entradas del modelo [Elaboración propia, 2023].....</i>	<i>41</i>
<i>Ilustración 19. Diagrama de las entradas del modelo: Tablas de Excel [Elaboración propia, 2023].....</i>	<i>42</i>
<i>Ilustración 20. Extracto de la tabla resultado calendario_horas.csv [Elaboración propia, 2023].....</i>	<i>43</i>
<i>Ilustración 21. Interfaz para la introducción de las variables de entrada en la herramienta de autoconsumo [Elaboración propia, 2023].....</i>	<i>46</i>
<i>Ilustración 22. Diagrama de bloques de la arquitectura interna del modelo [Elaboración propia, 2023].....</i>	<i>49</i>
<i>Ilustración 23. Esquema explicativo de los diferentes casos según las variables de selección del modelo [Elaboración propia, 2023].....</i>	<i>50</i>
<i>Ilustración 24. Diagrama de bloques de las salidas del modelo [Elaboración propia, 2023].....</i>	<i>56</i>
<i>Ilustración 25. Conjunto de tablas resultado del modelo [Elaboración propia, 2023].....</i>	<i>56</i>
<i>Ilustración 26. Valor del PVPC en tiempo real, publicado por REE [eSios, 2023].....</i>	<i>61</i>
<i>Ilustración 27. Componentes del PVPC [eSios, 2023].....</i>	<i>61</i>
<i>Ilustración 28. Elementos y definición de los componentes del PVPC [Elaboración Propia, 2023].....</i>	<i>62</i>
<i>Ilustración 29. Diagrama resumen de los casos a ejecutar en el Modelo de Autoconsumo [Elaboración Propia, 2023].....</i>	<i>67</i>
<i>Ilustración 30. Portada del informe de resultados de Power BI [Elaboración propia, 2023].....</i>	<i>72</i>
<i>Ilustración 31. Informe de resultados: Factura eléctrica [Elaboración propia, 2023].....</i>	<i>73</i>
<i>Ilustración 32. Caso Base: Balance generación y consumo [kWh] [Elaboración propia, 2023].....</i>	<i>74</i>
<i>Ilustración 33. Caso Base: Ahorro obtenido con la instalacion de autoconsumo PV [Elaboración propia, 2023].....</i>	<i>75</i>
<i>Ilustración 34. Caso Base: Desglose de la factura eléctrica, elementos fijos e impuestos [Elaboración propia, 2023].....</i>	<i>76</i>
<i>Ilustración 35. Caso Base: Compensación de excedentes, coste variable de la energía vs excedentes generados [Elaboración propia, 2023].....</i>	<i>78</i>
<i>Ilustración 36. Caso Base: Reparto de los excedentes generados [€]. Importes compensado vs sin compensar [Elaboración propia, 2023].....</i>	<i>79</i>
<i>Ilustración 37. Caso Base: Reparto de los excedentes generados [kWh]. Importes compensado vs sin compensar [Elaboración propia, 2023].....</i>	<i>80</i>
<i>Ilustración 38. Caso Base: Precio de la energía aplicado en la Herramienta de Autoconsumo [€/kWh] [Elaboración propia, 2023].....</i>	<i>81</i>
<i>Ilustración 39. Análisis de la inversión en autoconsumo: VAN y TIR [Elaboración propia, 2023].....</i>	<i>82</i>
<i>Ilustración 40. Caso A II: Balance generación y consumo [Elaboración propia, 2023].....</i>	<i>84</i>
<i>Ilustración 41. Caso A II: Reparto de los excedentes generados [Elaboración propia, 2023].....</i>	<i>85</i>
<i>Ilustración 42. Caso A II: Análisis de la inversión [Elaboración propia, 2023].....</i>	<i>85</i>
<i>Ilustración 43. Caso A III: Balance generación y consumo [Elaboración propia, 2023].....</i>	<i>86</i>
<i>Ilustración 44. Caso A III: Reparto de los excedentes generados [Elaboración propia, 2023].....</i>	<i>87</i>
<i>Ilustración 45. Caso A III: Análisis de la inversión [Elaboración propia, 2023].....</i>	<i>88</i>
<i>Ilustración 46. Caso A IV: Balance generación y consumo [Elaboración propia, 2023].....</i>	<i>89</i>
<i>Ilustración 47. Caso A IV: Reparto de los excedentes generados [Elaboración propia, 2023].....</i>	<i>89</i>
<i>Ilustración 48. Caso A IV: Análisis de la inversión [Elaboración propia, 2023].....</i>	<i>90</i>
<i>Ilustración 49. Caso A V: Balance generación y consumo [Elaboración propia, 2023].....</i>	<i>91</i>
<i>Ilustración 50. Caso A V: Reparto de los excedentes generados [Elaboración propia, 2023].....</i>	<i>91</i>
<i>Ilustración 51. Caso A V: Análisis de la inversión [Elaboración propia, 2023].....</i>	<i>92</i>

<i>Ilustración 52. Caso B I: Importe de la factura y precio</i>	<i>93</i>
<i>Ilustración 53. Caso B I: Ahorro obtenido con la instalacion de autoconsumo PV [Elaboración propia, 2023]</i>	<i>94</i>
<i>Ilustración 54. Caso B I: Reparto de los excedentes generados [Elaboración propia, 2023].....</i>	<i>94</i>
<i>Ilustración 55. Caso B I: Análisis de la inversión [Elaboración propia, 2023]</i>	<i>95</i>
<i>Ilustración 56. Caso B II: Análisis de la inversión [Elaboración propia, 2023].....</i>	<i>96</i>
<i>Ilustración 57. Caso B II: Balance generación y consumo [Elaboración propia, 2023]</i>	<i>96</i>
<i>Ilustración 58. Caso B II: Reparto de los excedentes generados [Elaboración propia, 2023]</i>	<i>97</i>
<i>Ilustración 59. Caso C I: Ahorro obtenido con la instalacion de autoconsumo PV [Elaboración propia, 2023]</i>	<i>98</i>
<i>Ilustración 60. Caso C I: Reparto de los excedentes generados [Elaboración propia, 2023]</i>	<i>98</i>
<i>Ilustración 61. Caso C I: Análisis de la inversión [Elaboración propia, 2023].....</i>	<i>99</i>
<i>Ilustración 62. Caso C II: Balance generación y consumo [Elaboración propia, 2023]</i>	<i>100</i>
<i>Ilustración 63. Caso C II: Reparto de los excedentes generados [Elaboración propia, 2023]</i>	<i>100</i>
<i>Ilustración 64. Caso C II: Análisis de la inversión [Elaboración propia, 2023]</i>	<i>101</i>
<i>Ilustración 65. Caso C III: Análisis de la inversión [Elaboración propia, 2023]</i>	<i>102</i>
<i>Ilustración 66. Indicadores de Consumo, Ahorro y Excedentes frente a la TIR obtenida [Elaboración propia, 2023].....</i>	<i>105</i>
<i>Ilustración 67. Diagrama que representa la compensación máxima por excedentes generados.....</i>	<i>107</i>

Índice de Tablas

<i>Tabla 1: Variables de entrada necesarias para la obtención de la tabla principal.....</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 2. Variables de entrada necesarias para la obtención de la factura mensual</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 3. Variables de entrada necesarias para el análisis de la inversión</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 9. Valores mensuales para el cálculo del PVPC partiendo del precio del Mercado Diario [Elaboración Propia, 2023].....</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 10: Casos a ejecutar y valores que toman las principales variables del modelo</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 11. Tarifa de luz ofrecida por Endesa e Iberdrola y variables del modelo.....</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 12. Casos que ejecutar y valores de las principales variables del modelo para PYMES.</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 13. Caso C: Potencia contratada en cada periodo.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 14. Precios por energía y por potencia a aplicar en el Caso C.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 15. Recopilación de los resultados obtenidos para todos los casos. [Elaboración propia, 2023]</i>	<i>103</i>

1. INTRODUCCIÓN

La energía eléctrica es un recurso esencial para el desarrollo de las sociedades y economías. Es necesaria para el funcionamiento diario de las industrias, los hogares y los servicios públicos. Sin embargo, la producción y suministro de electricidad presentan numerosos desafíos, como el impacto medioambiental y el coste de los servicios.

En la actualidad se está viviendo un proceso de transición hacia un sector eléctrico más sostenible y eficiente. Esta transición se basa en eliminar las fuentes fósiles de energías y sustituirlas por fuentes renovables y, por supuesto, son pilares fundamentales la eficiencia energética y la digitalización del sector.

Los objetivos que se persiguen con estos cambios no son únicamente medioambientales, sino también políticos, económicos y sociales. En los últimos años el precio de la electricidad ha experimentado aumentos significativos, debido a factores externos como el aumento de demanda, el coste de las materias primas y la incertidumbre geopolítica.

Una tecnología que permite solucionar, o por lo menos comenzar a solucionar algunos de los problemas del sector energético, es el autoconsumo fotovoltaico, que permite a los consumidores generar su propia energía eléctrica. Gracias a este tipo de tecnologías, se puede llegar a reducir el coste de la factura eléctrica, independizarse de las fuentes de energía externa y contribuir a la descarbonización del sistema.

En España, el autoconsumo fotovoltaico está experimentando (desde hace ya tiempo) un crecimiento notable. Esto se debe entre otras cosas, al aumento de los precios de la electricidad (los consumidores quieren cubrirse frente a ellos), a la mejora de las tecnologías, al buen recurso solar que hay en España y a la existencia de ayudas y subvenciones públicas.

En el presente trabajo se expone el desarrollo de una Herramienta de Autoconsumo Fotovoltaico, que permite calcular a futuro los importes de la factura eléctrica de domicilios o pymes que cuenten con autoconsumos fotovoltaicos.

El modelo, hecho en Python, tiene en cuenta el nivel de tensión del usuario, el perfil de consumo, la curva de generación, la potencia instalada, la contratada, la degradación de los paneles y por supuesto, los precios de la electricidad, permitiendo seleccionar los precios del mercado regulado (PVPC) o precios fijados en el mercado libre. Todas estas variables, son variables de entrada al modelo, lo que permite personalizar el caso a ejecutar, de manera que se puedan analizar infinidad de casos.

El desarrollo de este modelo puede ayudar a los consumidores a tomar decisiones informadas acerca de si invertir en una instalación de estas características. Además, permite realizar un

estudio de cómo potenciar la rentabilidad de una instalación de autoconsumo, puesto que permite analizar en profundidad cada una de las partes que componen la factura eléctrica.

En el trabajo se presenta un marco teórico que informa acerca de los puntos fundamentales del sistema y el mercado eléctrico, así como de la regulación pertinente. Ambas cosas son fundamentales para el desarrollo del modelo y una profunda comprensión de cómo se calcula la factura eléctrica y todos sus componentes.

Posteriormente se presenta el desarrollo del modelo, explicando paso a paso su elaboración y funcionamiento. Se da a conocer su estructura y las variables de entrada y salida que lo componen, así como las hipótesis tomadas a la hora de calcular los diferentes apartados del modelo (precios de la electricidad, degradación de los paneles, excedentes etc.)

Con el modelo en funcionamiento, se procede a su uso para analizar diferentes casos. En este trabajo se ejecutan y presentan un total de 10 casos diferentes para consumos domésticos en el mercado libre o regulado y pymes. Se ha considerado que es un número de casos suficiente para poder analizar las principales características que maximizan la rentabilidad de un autoconsumo fotovoltaico.

Se analizan los casos ejecutados y se muestran los resultados en un informe de Power BI, potente herramienta de visualización de datos. Para llegar a toda la profundidad de análisis que permite este visualizador de datos, se adjunta como parte de este trabajo el archivo de Power BI, que recoge el informe de resultados del Caso Base.

También se lleva a cabo un análisis comparativo de los casos ejecutados, lo que permite hacer un estudio de la rentabilidad, estudiando qué casos son más rentables y porqué. Para el análisis comparativo se presentan tres indicadores fundamentales: un indicador de consumo (refleja la eficiencia de la instalación), un indicador de ahorro (representa el ahorro conseguido) y un indicador del nivel de excedentes compensados.

Para el estudio de la rentabilidad, se calculan los indicadores del VAN, la TIR y el retorno de la inversión, de forma que se puedan comparar los casos a través de métricas financieras de rentabilidad.

1.1 MOTIVACIÓN

El desarrollo de este proyecto de fin de Máster se fundamenta en un tema de gran actualidad y preocupación generalizada: el consumo de energía. Ante la situación actual que se ha vivido relacionada con la carencia energética, la dependencia del gas ruso y el consecuente encarecimiento de las materias energéticas, el consumo de energía, su producción y distribución se han vuelto temas de interés generalizado. El sector eléctrico afecta en todos los ámbitos, en

el político, económico, social y por supuesto ambiental y cada vez la gente es más consciente de ello.

Aunque haya un interés creciente en cuanto al sector energético, según datos de OCU, solo un 11% de los consumidores entiende por completo su factura de la luz. Este dato evidencia el desconocimiento genérico que hay acerca el sector eléctrico entre la población y resulta conveniente y necesario que en la situación actual exista una formación y un conocimiento básico acerca del sector eléctrico. Potenciar una comprensión genérica de todos estos aspectos que sirvan como base para el entendimiento de todos los consumidores de energía, es una de las motivaciones principales que ha empujado el desarrollo de este trabajo.

Por otro lado, la preocupación medioambiental apoyada por la transición energética unida a las posibilidades de ahorro que presentan, han permitido un enorme desarrollo de los autoconsumos fotovoltaicos, que a nivel doméstico en España ya representan un 1,8%¹ de la demanda eléctrica nacional.

La capacidad instalada en autoconsumos fotovoltaicos domésticos y de industria se ha disparado en los últimos 5 años, lo que claramente evidencia que cada vez hay mas gente interesada en este tipo de instalaciones. A la hora de decidir si invertir en una instalación fotovoltaica hay numerosos elementos a considerar y para tomar la mejor decisión es necesario en primer lugar, entender los aspectos fundamentales del mercado eléctrico y el funcionamiento de las comercializadoras.

En segundo lugar, para optimizar el estudio de la inversión resulta de gran interés contar con información acerca de la evolución de la factura a futuro en el caso de tener autoconsumo instalado, ya que de esta forma el usuario se hace una idea del ahorro que puede llegar a obtener. El desarrollo del modelo de este proyecto pretende crear una herramienta que pueda dar estos resultados con una alta precisión y fiabilidad de forma que se pueda tomar una decisión acertada e informada acerca de las instalaciones domesticas de autoconsumo.

1.2 OBJETIVOS

El desarrollo de este trabajo tiene dos razones fundamentales. Por un lado, pretende actuar como medio divulgativo y dar a conocer aspectos básicos y fundamentales en torno al sector eléctrico y el cálculo de la factura eléctrica. Pretende dar a conocer, de manera sencilla y accesible para todos, el funcionamiento del sistema eléctrico español, la metodología de cálculo del PVPC, los componentes de la factura eléctrica y los elementos regulatorios que intervienen.

Por otro lado, la herramienta de análisis de autoconsumos está destinada a realizar un estudio en el largo plazo de la rentabilidad de una inversión en autoconsumo fotovoltaico. Permite comparar las rentabilidades obtenidas en diferentes casos (potencia instalada, tarifa, inversión

¹ (Appa Renovables , 2022)

inicial, etc.), de forma que se pueda tomar una decisión acertada a la hora de realizar una inversión de estas características.

Además, permite analizar el sistema de compensación de excedentes de la energía sobrante y volcada a la red, permite estudiar el importe recibido por esta energía excedentaria, así como la cantidad de energía que se regala a la red cuando se llega al límite de excedentes a deducir de la factura.

En definitiva, los objetivos de la herramienta de análisis de autoconsumo se pueden resumir en:

1. Analizar la rentabilidad de inversiones en instalaciones de autoconsumo fotovoltaico doméstico o de pequeña industria.
2. Maximizar la TIR en función de la potencia instalada en una instalación de autoconsumo fotovoltaico.
3. Determinar el ahorro futuro anual que conlleva una instalación de autoconsumo fotovoltaico.
4. Estudiar el sistema de compensación de excedentes y la energía regalada a la red con una instalación de autoconsumo.
5. Desarrollar una calculadora predictiva de la factura eléctrica.
6. En el corto plazo, determinar que combinación de tarifa, potencia y precio de la energía, resultan más rentable para cada caso particular.

El último objetivo (y en consecuencia del desarrollo del modelo) es tener un repositorio actualizado con toda la información pertinente para el cálculo de la factura eléctrica: datos de precios², valores de cargos³ y peajes⁴ actualizados, perfiles de consumo y generación⁵ y resto de regulación⁶ actualizada según la normativa vigente.

1.3 METODOLOGÍA

La elaboración de este proyecto se puede dividir en dos partes fundamentales. Por un lado, cuenta con la parte teórica acerca del sistema eléctrico español y, por otro lado, presenta el desarrollo y aplicación del modelo de análisis de sistemas de autoconsumo fotovoltaico.

El desarrollo del trabajo comienza con un proceso de lectura y entendimiento de todo el marco teórico que envuelve el tema tratado. En primer lugar, se analiza el funcionamiento del sistema eléctrico español profundizando en el mercado eléctrico para entender las fases que lo conforman y los agentes involucrados. También se profundiza en el funcionamiento del mercado para entender cómo funciona el mercado mayorista y cómo se establece el precio del mercado diario.

² Metodología del cálculo del PVPC, publicada en el BOE.

³ Publicados por Orden Ministerial

⁴ Publicados por la CNMV

⁵ Publicados por REE

⁶ Datos como el IVA, Impuesto Eléctrico, precio de alquiler de contador, margen de la comercializadora etc.

Para completar el marco teórico, es necesario analizar la estructura y los componentes de la factura eléctrica. Este conocimiento es imprescindible para el desarrollo posterior de la herramienta, ya que esta calcula los importes mensuales de la factura en el largo plazo.

La segunda parte del trabajo consiste en el desarrollo de la herramienta. Este proceso es sin duda el más largo, ya que conlleva una continua dinámica de prueba y error en la que se ha de comprobar si el código escrito ejecuta correctamente lo que se pretendía. La elaboración del modelo se realiza progresivamente, añadiendo en cada iteración un mayor nivel de complejidad hasta alcanzar la versión última en la que se tiene en cuenta todos los elementos que afectan y en toda su profundidad.

Tras tener la versión finalizada de la herramienta, llega el momento de comprobar su funcionamiento, es decir, si los resultados que se obtienen son coherentes y correctos. Una vez validado el correcto funcionamiento de la herramienta, se procede a la ejecución de los diferentes casos que se presentan en el proyecto.

Por último, se analizan los resultados obtenidos, se realiza el análisis comparativo y se llega a las conclusiones del proyecto.

2. MARCO TEÓRICO: SISTEMA ELÉCTRICO EN ESPAÑA

En este apartado del trabajo se pretende hacer una breve introducción al funcionamiento del sistema eléctrico español, a los sistemas de autoconsumo fotovoltaicos y a los elementos que configuran la factura eléctrica. Una comprensión mínima de estos tres aspectos resulta muy útil para la comprensión desarrollo del proyecto.

En el marco normativo, el mercado eléctrico en España comenzó su proceso de liberación en torno al año 1997, cuando desde Europa se pretende eliminar la fuerte intervención del Estado en las actividades económicas del sector eléctrico.

Desde este momento y tras la publicación de la Ley 54/1997, del 27 de noviembre⁷ con la que se implementó el proceso de liberación del sector eléctrico, se publicaron varios Reales Decretos-Leyes que iban aportando diversas medidas que dotaban al sector eléctrico de estabilidad y transparencia en términos de competencia. Hasta llegar a la publicación de la Ley 24/2013, del 26 de diciembre⁸, que se trata de la Ley del Sector eléctrico que está vigente en la actualidad.

Estas reformas permitieron hacer una distinción de las actividades reguladas (lo referido al transporte y distribución) y las actividades en las que se podía dar un régimen de libre competencia, como la generación y la comercialización de la electricidad.⁹

Gracias a esta nueva regulación se pudo “garantizar el suministro de energía eléctrica y adecuarlo a las necesidades en términos de seguridad, calidad, calidad, eficiencia, objetividad, transparencia y al mínimo coste para los usuarios”¹⁰

2.1 *FUNCIONAMIENTO DEL MERCADO ELÉCTRICO*

Con la última actualización de la Ley del Sector eléctrico establecida en la Ley 24/2013, se reestructura el mercado eléctrico y quedan definidas cuatro fases independientes y gestionadas por diferentes agentes.

1. Generación

Conforma la etapa en la que se produce la energía eléctrica en centrales eléctricas. Es una actividad regulada por el estado, pero que está liberalizada (tras la reforma del mercado eléctrico) por lo que cualquier persona o empresa puede decidir entrar en el sector.

⁷ (BOE, 1997)

⁸ (BOE, 2013)

⁹ (Saavedra, Junio 2022)

¹⁰ (Energía y Sociedad, 2021)

Una de las principales cuestiones o dificultades a la que se enfrentan algunos generadores es a la pregunta de cuánta energía producir. Puesto que no se puede almacenar energía a gran escala (es muy complejo y hay poco desarrollo de baterías) hay que estimar con la mayor precisión posible las necesidades de energía ya que la energía producida en cada momento debe coincidir con la demandada, para el correcto funcionamiento del sistema. Existen sistemas de generación primaria y secundaria para controlar esto y que el sistema no presente variaciones en su frecuencia que puedan llevar a un fallo.

2. Transporte

Conlleva el traslado de la electricidad generada de los generadores hasta puntos de consumo en alta tensión o redes de distribución. Esta fase, gestionada y regulada únicamente por REE, debido a sus características se trata de un Monopolio natural.

Partiendo de las centrales eléctricas, en las subestaciones transformadoras se eleva la tensión hasta 400 kV, para minimizar las pérdidas durante el transporte, derivadas del conocido efecto Joule. En ese momento, se incorpora la electricidad a las líneas de alta tensión.

Tras el paso por la red de transporte de REE, que cuenta con más de 44.000 km de líneas de alta tensión, la electricidad llega a las subestaciones de las distribuidoras eléctricas. Cabe mencionar que REE es también la encargada de realizar los intercambios internacionales.

3. Distribución

Una vez llega la electricidad a la subestación eléctrica, se reduce la tensión a valores de entre 1-66kV y es el momento de distribuir la electricidad hasta los hogares, negocios e industrias. Las encargadas de este proceso son las distribuidoras eléctricas, cuya función es distribuir la electricidad a los núcleos cercanos de población. Por último, antes de llegar a los domicilios, la electricidad pasa de nuevo por centros de transformación para reducir la tensión a los valores estándar de uso doméstico, entre 230 o 400 V.

4. Comercialización

La etapa final consiste en la venta de la energía a los clientes. Esta actividad corresponde a las comercializadoras, que son las que compran la energía en el mercado eléctrico o llegan a acuerdos bilaterales con generadores. La comercialización es una actividad liberalizada. Existen dos tipos de comercializadoras, en función del precio ofrecido:

- Comercializadoras de referencia: son las únicas compañías que pueden comercializar la tarifa regulada de luz Precio Voluntario al Pequeño Consumidor (PVPC). No pueden ofrecer descuentos en la tarifa porque el precio al que venden la electricidad está fijado por el Gobierno.
- Compañías de luz del mercado libre: en este caso, sí pueden ofrecer distintas ofertas de (BOE, 2019) tarifas y proponer servicios de mantenimiento.¹¹

¹¹ (Naturgy, 2022)

Tras ver el ciclo de vida de la electricidad resulta conveniente estudiar brevemente el funcionamiento del mercado eléctrico, en el que se establece diariamente el precio de la energía. Existen un conjunto de mercados conectados entre sí que negocian el precio de la electricidad.

Por un lado, están los mercados a largo plazo (meses-años), donde se suelen dar dos tipos de contratos:¹²

- Los que hacen las compañías industriales cuando contratan la energía que prevén utilizar en sus actividades a lo largo de un año. En este mercado, el precio de la electricidad se cierra con antelación.
- Los que corresponden a los pequeños consumidores domésticos, que firman contratos con la comercializadora. La duración de estos contratos suele ser de un año y se va renovando por periodos anuales de forma automática.

Por otro lado, está el mercado diario (mayorista) donde se negocia el precio del Pool. Se trata de una subasta convocada todos los días del año a las 12:00 CET, en la que se vende y compra la electricidad para las 24 horas del día siguiente. Hora a hora se va cerrando un precio para la energía, a través de un proceso de casación de las curvas de la oferta y demanda.

La oferta la marcan los generadores o productores de electricidad. El día antes de entregar la electricidad los productores presentan su oferta de venta horaria. Estas ofertas se ordenan de manera ascendente a través del algoritmo EUPHEMIA, generando así la curva de la oferta del mercado eléctrico.

La creación de la curva de demanda sigue un proceso similar. En este caso son las comercializadoras las que presentan sus ofertas de compra de la energía del día siguiente. El algoritmo EUPHEMIA las ordena de forma descendente obteniendo la curva de demanda.

La intersección de ambas curvas, hora a hora, establece el precio del mercado horario del próximo día. Se trata de un precio único para todos obtenido gracias a la casación de las curvas de oferta y demanda. El precio de venta al consumidor final difiere del precio del pool ya que se le incluye ciertos costes adicionales que tienen las comercializadoras.

En el mercado regulado se establece una tarifa eléctrica denominada PVPC o Precio Voluntario para el Pequeño Consumidor. Se trata del precio de referencia que podrán contratar los consumidores de hasta 10 kW en una tarifa eléctrica regulada, frente al precio que el consumidor pudiera pactar a través de una negociación con una comercializadora (mercado libre).

La metodología de cálculo del PVPC, hasta 2023 incluido, se establece en el Real Decreto 216/2014, del 28 de marzo. Para 2024, se ha establecido en el Real Decreto 446/2023 del 13 de junio una nueva metodología que da mayor peso a los mercados a largo plazo. En el cálculo del PVPC se tiene en cuenta los peajes de acceso y cargos correspondientes, el coste de producción

¹² (Naturgy, 2022)

de energía eléctrica (el cual se determina en base al precio horario de los mercados diarios e intradiarios del sistema) y el coste regulado de gestión comercial.

El operador del sistema, Red Eléctrica Española (REE), publica cada día a las 20:15 los precios horarios para el día siguiente, además del valor del PVPC en cada instante. Estos datos y muchos más se publican en la web de eSios (Sistema de Información del operador del Sistema).¹³

Por último, existen también, los conocidos mercados intradiarios gestionados por el operador de mercado eléctrico de la electricidad, Operador del Mercado Ibérico, Polo-Español (OMIE). Debido a que la energía no se puede almacenar y que en el mercado diario se establece la oferta y demanda con 24 horas de antelación, lo ahí determinado, se trata de una previsión que no se puede conocer exactamente hasta el momento real. En el periodo de tiempo comprendido entre el cierre del mercado diario y el consumo real del cliente, se negocia energía en los mercados intermedios.

En el siguiente diagrama se resume el ciclo de vida de la energía y el flujo económico, así como las partes involucradas en cada proceso y si la actividad esta liberalizada, de forma que cualquiera pueda entrar en el sector, o no.

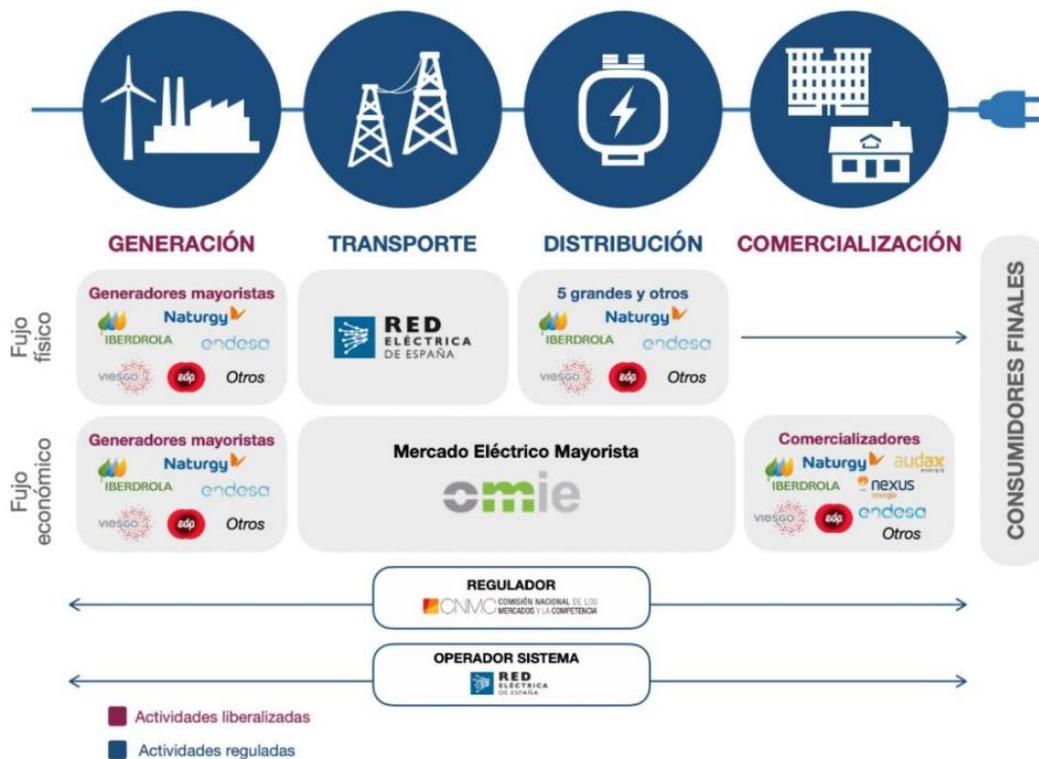


Ilustración 13. Actividades del Sector Eléctrico [Isabel Enseñat Saavedra, 2022]

A modo resumen, los agentes involucrados en todo el proceso son:

¹³ (Red Eléctrica Española, 2024)

- REE: Operador del Sistema, propietaria de todas las infraestructuras que permiten el transporte de la electricidad.
- Distribuidoras eléctricas: su función principal es la de distribuir la electricidad a los núcleos cercanos de las poblaciones. En España existen 336 distribuidoras, pero no se pueden crear nuevas ya que es una actividad no liberalizada. El consumidor no puede elegir a su distribuidora, sino que se le asigna una en función del lugar de consumo.
- Comercializadoras: compran la energía en el mercado eléctrico y la venden a los clientes finales.
- OMIE: Operador del Mercado Ibérico, Polo-español, responsable de la gestión del mercado diario e intradiario en la península ibérica (España y Portugal).
- OMIP: Operador del Mercado Ibérico, Polo-portugués. Responsable de la gestión de los mercados de largo plazo en la península ibérica (España y Portugal).
- CNMC: órgano público que supervisa el mercado eléctrico y el resto de los mercados económicos del país. Su objetivo es garantizar el buen funcionamiento de todos ellos, investigando y persiguiendo las malas praxis de las empresas que participan.

2.2 FACTURA ELÉCTRICA

Según datos de OCU, solo un 11% de los consumidores entiende por completo su factura de la luz. Tener claro los diferentes elementos que configuran la factura es fundamental para el usuario y más aún ante la posibilidad de tener una instalación de autoconsumo.

2.2.1 COMPONENTES DE LA FACTURA ELÉCTRICA

En primer lugar, hay que saber que, a través de la factura, el consumidor, paga los servicios tanto de la distribuidora como de la comercializadora. La primera recibe los cargos y peajes por el uso de las redes de transporte y distribución y la segunda cobra lo que es propiamente el coste de la energía.

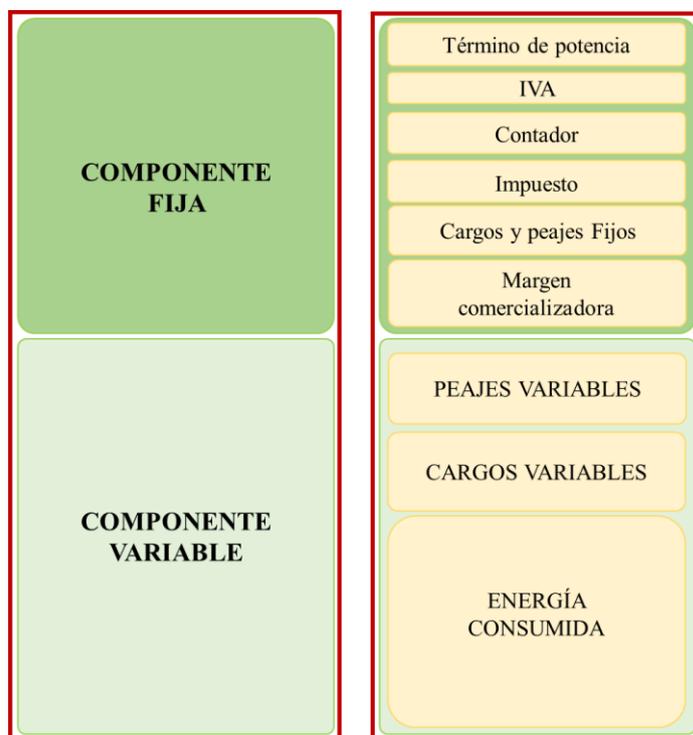
En líneas generales la factura de la luz la conforman dos grandes conceptos. Por un lado, el coste fijo de potencia, que se paga por cada kW contratado y por otro lado el coste de la electricidad consumida en los diferentes tramos horarios. Este último se conoce también como coste variable de la energía, puesto que depende del consumo mensual del usuario.

A estos dos elementos fundamentales, hay que añadirle otros como los impuestos, el alquiler del contador y otros servicios. Además, en caso de tener una instalación de autoconsumo en la vivienda puede aparecer en la factura un componente que haga referencia a los excedentes compensados.

Los componentes de la factura eléctrica se pueden resumir en los siguientes siete:

1. Importe por potencia contratada: depende del término de potencia y será fijo en cada factura.

2. Importe por energía consumida: depende del término de energía y de la energía consumida. Habrá tantos importes de energía como periodos de discriminación horaria, de manera que se cobra la energía consumida en cada uno de los periodos por separado.
3. Compensación de excedentes: Las instalaciones fotovoltaicas domesticas permiten compensar los excedentes vertidos a la red eléctrica, reduciendo el IEC ¹⁴ como máximo hasta que este sea nulo.
4. Impuesto especial eléctrico: Se aplica tanto sobre el termino de potencia como sobre la diferencia entre el importe de energía consumida y la compensación de excedentes. Durante el 2023, el IEE ha tenido un valor del 0,5%, gracias a la reducción aplicada por el gobierno desde 2021. A partir de 2024 va a ir volviendo a su valor normal de 5,11% de manera paulatina, manteniéndose en el primer trimestre en un 2,5%.
5. Contador: Precio diario establecido por usar el contador común. No paga IEE, por lo que no se tiene en cuenta en el cálculo del importe del impuesto electrico.
6. Margen de la comercializadora: Valor fijo establecido por ley que depende de la potencia contratada.
7. IVA: El impuesto sobre el valor añadido, que se aplica sobre todo lo anterior. También ha experimentado una reducción desde el año 2021 hasta finales del 2023 manteniéndose en el 5%. A partir del 1 de enero de 2024 se ha incrementado hasta un 10% para todos aquellos con potencias contratadas inferiores o iguales a 10kW.



En el siguiente diagrama se muestran todos los elementos que forman la factura eléctrica, diferenciando el carácter fijo o variable de cada uno de ellos, siendo los variables los que dependen de la energía consumida y los fijos los que se mantienen constantes en todas las facturas (a no ser que se produzca un cambio en las tarifas o en la regulación).

Ilustración 14. Componentes de la factura eléctrica [Elaboración propia, 2023]

¹⁴ Importe de Energía Consumida

2.2.2 TEORÍA SOBRE CARGOS Y PEAJES

Tanto para el cálculo del PVPC como para la factura eléctrica se aplican una serie de cargos y peajes regulatorios cuyos valores varían en función del periodo. Las actividades de transporte y distribución son monopolios naturales que se encuentran bajo un esquema regulado. Sus costes, por lo tanto, repercuten a todos los consumidores que usen dichos servicios independientemente del precio de la energía. A través de los cargos y los peajes de acceso se aplican dichos costes a los consumidores.¹⁵

Los cargos cubren los sobrecostes de las actividades de generación y todos aquellos costes que no son inducidos por los consumidores al demandar potencia o energía. Se establecen por Orden Ministerial¹⁶, diferenciando entre término de potencia y energía (Energía y Sociedad, 2022) y son iguales para todo el territorio nacional.

Por otro lado, los peajes de acceso los fija la CNMC y también son fijos para todo el territorio español. Su objetivo es cubrir todos los costes relacionados con la retribución de las redes de transporte y distribución.

Están compuestos por un término de potencia y un término de energía. De esta manera, el coste de acceso depende tanto de la potencia que el consumidor tenga contratada (término fijo, debido a que las redes deben ser diseñadas para garantizar en cualquier momento el suministro de las potencias que los consumidores tienen contratadas) como del consumo que haya realizado (término variable, en función del consumo de energía que haya circulado por la red).

Tanto los cargos como los peajes varían en función del tipo de tarifa (2.0TD, 3.0TD y 6.XTD) y del periodo horario en el que se realice el consumo. Los costes de los términos de energía y potencia son mayores cuanto menor es el nivel de tensión al que se conecta el consumidor (mayores para la tarifa 2.0TD).

Los periodos horarios pretenden reflejar que el consumo de energía no tiene el mismo coste en hora punta (mayor probabilidad de congestión de la red) que en hora valle. A modo representativo, se muestra a continuación los periodos¹⁷ pertinentes de las principales tarifas.

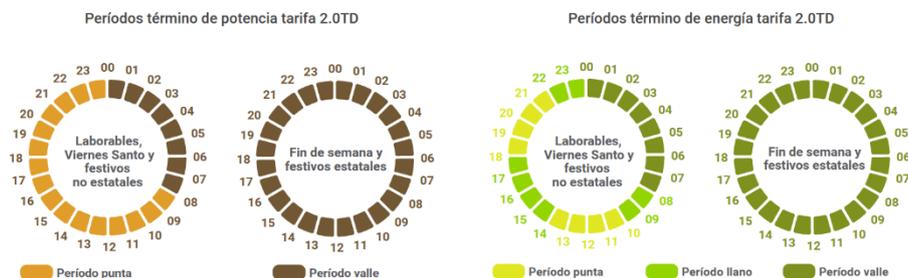


Ilustración 15. Periodos término de potencia y energía de la tarifa 2.0TD [Som Energía, 2023]

¹⁵ (Energía y Sociedad, 2022)

¹⁶ (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Orden TED/1312, 29 de diciembre de 2022)

¹⁷ (Som Energía, 2024)

Para la tarifa 3.0TD, existe además distinción mensual y sigue la distribución mostrada en la siguiente imagen. Para las tarifas restantes de alta tensión, 6.XTD, los periodos coinciden con los aquí mostrados.

MES	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	SABADOS, DOMINGOS Y FESTIVOS
0-1	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6
1-2	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6
2-3	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6
3-4	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6
4-5	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6
5-6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6
6-7	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6
7-8	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6
8-9	P2	P2	P3	P5	P5	P4	P2	P4	P4	P5	P3	P2	P6
9-10	P1	P1	P2	P4	P4	P3	P1	P3	P3	P4	P2	P1	P6
10-11	P1	P1	P2	P4	P4	P3	P1	P3	P3	P4	P2	P1	P6
11-12	P1	P1	P2	P4	P4	P3	P1	P3	P3	P4	P2	P1	P6
12-13	P1	P1	P2	P4	P4	P3	P1	P3	P3	P4	P2	P1	P6
13-14	P1	P1	P2	P4	P4	P3	P1	P3	P3	P4	P2	P1	P6
14-15	P2	P2	P3	P5	P5	P4	P2	P4	P4	P5	P3	P2	P6
15-16	P2	P2	P3	P5	P5	P4	P2	P4	P4	P5	P3	P2	P6
16-17	P2	P2	P3	P5	P5	P4	P2	P4	P4	P5	P3	P2	P6
17-18	P2	P2	P3	P5	P5	P4	P2	P4	P4	P5	P3	P2	P6
18-19	P1	P1	P2	P4	P4	P3	P1	P3	P3	P4	P2	P1	P6
19-20	P1	P1	P2	P4	P4	P3	P1	P3	P3	P4	P2	P1	P6
20-21	P1	P1	P2	P4	P4	P3	P1	P3	P3	P4	P2	P1	P6
21-22	P1	P1	P2	P4	P4	P3	P1	P3	P3	P4	P2	P1	P6
22-23	P2	P2	P3	P5	P5	P4	P2	P4	P4	P5	P3	P2	P6
23-0	P2	P2	P3	P5	P5	P4	P2	P4	P4	P5	P3	P2	P6

Ilustración 16. Periodos horarios de los términos de potencia y energía de la tarifa 3.0TD [Som Energía, 2023]

3. MODELO DESARROLLADO: HERRAMIENTA DE ANÁLISIS DE AUTOCONSUMO FOTOVOLTAICO

En el siguiente apartado se hará una descripción completa y exhaustiva de la herramienta de análisis de autoconsumo.

Se trata de un programa escrito en Python y desarrollado a través de la interfaz de Jupyter Lab y Visual Studio. La funcionalidad primera con la que surge la herramienta es la obtención de un modelo que permita el cálculo automático de la factura eléctrica mensual de cualquier consumo doméstico, diferenciando el caso de que se tenga autoconsumo instalado o no.

El desarrollo de la herramienta va acompañado de numerosos cambios y realizaciones que poco a poco van moldeando y definiendo las características de la propia herramienta, la cual ha ido evolucionando en función de los requisitos que se ha considerado necesario ir añadiendo.

3.1 OBJETIVOS DE LA HERRAMIENTA

El objetivo último de la herramienta de autoconsumo es contar con un modelo que pueda realizar un análisis de viabilidad económica para una inversión en un autoconsumo fotovoltaico.

El modelo, es capaz de calcular los importes mensuales de las facturas eléctricas de una vivienda o pequeña industria¹⁸ en el caso de tener o no un autoconsumo instalado. De esta forma es capaz de determinar la cantidad ahorrada mensualmente por generar energía con placas fotovoltaicas, lo que se tomará como los Cash Flows correspondientes para el análisis de la inversión y puede determinar los parámetros de la inversión; VAN, TIR y el tiempo de retorno.

Cabe destacar que una de las cualidades más interesantes del modelo, es que sus proyecciones se pueden dar hasta 30 o 40 años, pudiendo calcular la factura mensual de ese periodo.

La fiabilidad de esta proyección se fundamenta en un modelo de predicción de precios (xPryce) perteneciente a la empresa Simulyde, que calcula a futuro el precio de la energía eléctrica en el Mercado Diario. El modelo xPryce determina el precio horario del Mercado Diario¹⁹ a futuro, valor que se utiliza en este modelo para el cálculo del PVPC, que se explicará más adelante.

Otro uso de la herramienta, enfocado en el corto plazo, es determinar qué tipo de contrato eléctrico resulta más beneficioso, se tenga o no autoconsumo. Permite hacer una comparativa de las diferentes tarifas de luz y determinar con cuál de ellas se obtienen los precios de

¹⁸ Hasta tarifas 6.3 de baja tensión

¹⁹ El mercado diario tiene por objeto llevar a cabo las transacciones de energía eléctrica para cada una de las horas del día siguiente, mediante la presentación de ofertas de venta y adquisición por parte de los agentes del mercado. En él actúan como vendedores los generadores y como compradores los comercializadores y consumidores directos. Tanto el Mercado Diario como el Intradía están gestionados por el Operador del Mercado, la empresa OMIE.

electricidad más razonables, teniendo en cuenta todo aquello que afecta a la factura, conceptos que, muchas veces, se escapan del conocimiento del usuario.

La funcionalidad principal de la herramienta está destinada a realizar un estudio en el largo plazo de la rentabilidad de una inversión en autoconsumo fotovoltaico. Permite comparar las rentabilidades obtenidas en diferentes casos (potencia instalada, tarifa, inversión inicial...), de forma que se pueda tomar una decisión acertada a la hora de realizar una inversión de estas características.

Además, permite analizar el sistema de compensación de excedentes de la energía excedentaria y volcada a la red, permite estudiar el montante recibido por esta energía excedentaria, así como la cantidad de energía que se regala a la red cuando se llega al límite de excedentes a deducir de la factura.

En definitiva, los objetivos de la herramienta de análisis de autoconsumo se pueden resumir en:

1. Analizar la rentabilidad de inversiones en instalaciones de autoconsumo fotovoltaico domestico o de pequeña industria.
2. Maximizar la TIR en función de la potencia instalada de autoconsumo fotovoltaico.
3. Determinar el ahorro futuro anual que conlleva una instalación de autoconsumo fotovoltaico.
4. Estudiar el sistema de compensación de excedentes y la energía vertida a la red con una instalación de autoconsumo.
5. Calculadora predictiva de la factura eléctrica.
6. En el corto plazo, determinar que combinación de tarifa, potencia y precio de la energía resultan más rentable para cada caso particular.

3.2 ARQUITECTURA Y FUNCIONAMIENTO DE LA HERRAMIENTA

El modelo consta de dos códigos de Python que funcionan de forma paralela, en primer lugar, presenta un código que genera una interfaz para la recogida de datos de entrada y la asignación a sus variables correspondientes. Por otro lado, el segundo código recoge la herramienta en sí misma, con todos los cálculos necesarios para la obtención de los resultados.

Los datos introducidos por el usuario permiten personalizar una ejecución del modelo obteniendo un caso concreto de análisis, pero además de estos datos, la herramienta se apoya en varias tablas de Excel que tienen información básica para el funcionamiento del modelo.

Con las variables de entrada introducidas por el usuario y dichas tablas ya incluidas en la base de datos de la herramienta, se procede a la ejecución del código y este devuelve una serie de tablas de resultados que de manera automática exporta a Excel. Para una mejor visualización de los resultados, estos se cargan a un fichero de Power Bi en el que, de manera automática, se presentan los resultados obtenidos en diferentes gráficas.

La arquitectura básica del modelo se resume en el siguiente diagrama.



Ilustración 17. Diagrama de bloques de la arquitectura del modelo [Elaboración propia, 2023]

Como se puede observar en el diagrama, el funcionamiento básico de la herramienta de autoconsumo consiste en introducir al modelo los datos característicos del caso a analizar y este devuelve los resultados del caso en concreto.

A continuación, se va a desglosar cada una de las tres partes de la arquitectura básica del modelo, analizando sus componentes en profundidad.

3.2.1 ENTRADAS DEL MODELO

El bloque de entradas del modelo está compuesto a su vez por dos partes a diferenciar, como se muestra en la siguiente imagen.

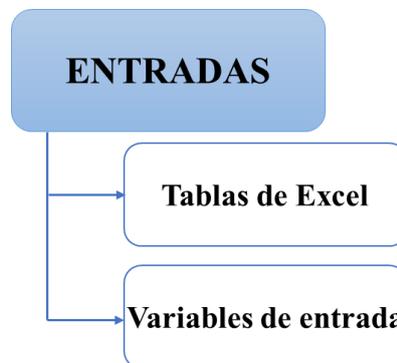


Ilustración 18. Diagrama de bloques de las entradas del modelo [Elaboración propia, 2023]

Por un lado, el modelo requiere de cierta información fija para su funcionamiento (perfil de generación y consumo, calendario...). Esta parte de las entradas no depende del caso a analizar y el usuario no la introduce, sino que se encuentra en la base de datos de la herramienta.

La segunda parte de las entradas incluye los datos característicos del caso a analizar, se trata de la información introducida por el usuario y que caracteriza cada configuración (potencia instalada, energía consumida, tipo de contrato eléctrico, información sobre la inversión...). Estos datos se introducirán en la herramienta a través de la interfaz y se asignarán a su variable correspondiente. Con cada ejecución de la herramienta, el usuario tendrá que volver a introducir esta información.

3.2.1.1 Tablas de Excel

El primer bloque de las entradas incluye toda aquella información común a todos los casos a analizar. Esta información se carga al modelo en un total de 9 tablas de Excel, las cuales hay que revisar y mantener actualizadas.

La primera tabla necesaria para el modelo (*calendario_horas.csv*) se trata de un calendario, que se obtiene de un pequeño programa en Python que permite determinar las horas de cada año incluido en el fichero inicial de calendario. Dicho programa reinicia las horas a 0 al llegar a la finalización de un año (hora 8760). Esta columna de horas del año es fundamental para el programa ya que, entre otras cosas, el análisis de la inversión se realizará de forma anual, por lo que es necesario conocer el inicio y final de cada año a estudiar en el modelo.

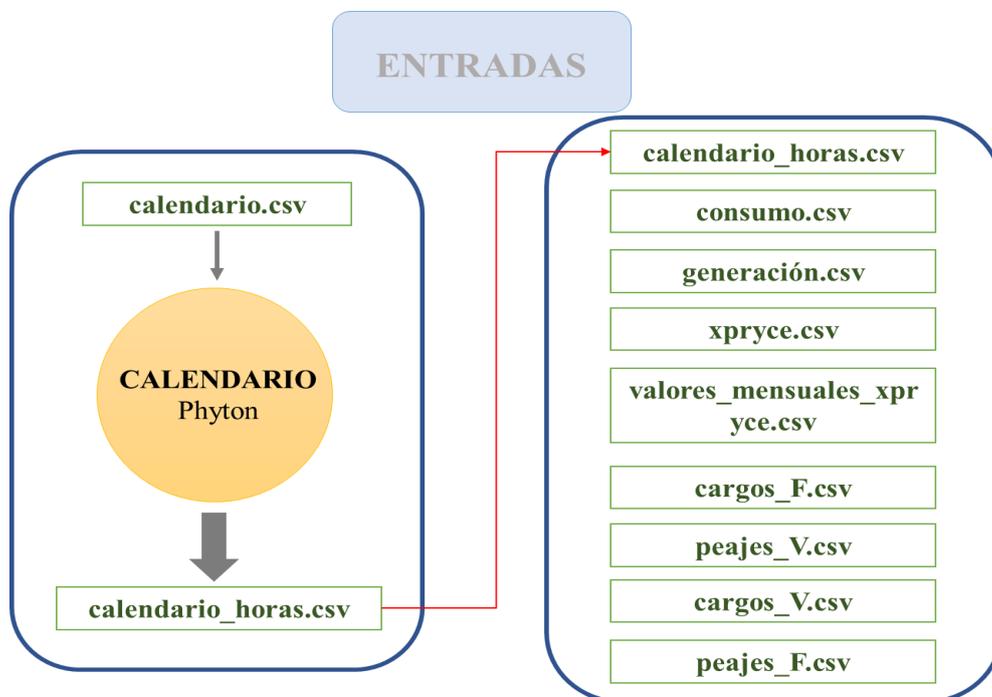


Ilustración 19. Diagrama de las entradas del modelo: Tablas de Excel [Elaboración propia, 2023]

Este primer bloque requiere un archivo de entrada denominado *calendario.csv*, que es de elaboración propia y actualmente incluye desde la fecha 01/01/2023 hasta el 31/12/2055. Añadir más fechas requeriría modificarlo manualmente.

En este archivo de valores se incluyen también columnas que determinan los periodos de potencia y energía según la tarifa para cada hora de cada año. En concreto se determinan los periodos de potencia y energía de la tarifa 2.0TD y los periodos de la tarifa 3.0TD (iguales para potencia y energía). Para el resto de las tarifas de alta tensión los periodos coinciden con la tarifa 3.0TD, por lo que con estas tres columnas para la distinción de periodos es suficiente.

Para una mejor comprensión del archivo resultado de este primer bloque calendario, se incluye en la siguiente imagen un recorte de la tabla perteneciente al archivo de salida *calendario_horas.csv*. En la tabla se pueden ver las 9 columnas que forman el archivo.

	FECHA	PERIODO	MES	ANIO	HORAS	20TD_POT	20TD_CON	30TD	HORA
0	01/01/2023	0	1	2023	0	2	3	6	0
1	01/01/2023	1	1	2023	1	2	3	6	1
2	01/01/2023	2	1	2023	2	2	3	6	2
3	01/01/2023	3	1	2023	3	2	3	6	3
4	01/01/2023	4	1	2023	4	2	3	6	4
...
289267	31/12/2055	19	12	2055	289267	1	1	1	8755
289268	31/12/2055	20	12	2055	289268	1	1	1	8756
289269	31/12/2055	21	12	2055	289269	1	1	1	8757
289270	31/12/2055	22	12	2055	289270	1	2	2	8758
289271	31/12/2055	23	12	2055	289271	1	2	2	8759

Ilustración 20. Extracto de la tabla resultado calendario_horas.csv [Elaboración propia, 2023]

- Fecha: fecha completa desde el 01/01/2023 al 31/12/2055. Esta columna es íntegramente la que se encuentra en el archivo inicial de *calendario.csv*.
- Periodo: Incluye las horas diarias de cada día de la 0 a la 23.
- Mes: Mes correspondiente a la fecha.
- Año: Año correspondiente a la fecha.
- Horas: Contabiliza las horas totales representadas en la tabla, desde la fecha inicial hasta la final.
- 20TD_POT, 20TD_CON y 30TD: Estas columnas determinan para cada hora de cada día de cada año el periodo correspondiente a esa hora para cada tarifa en potencia (POT) y energía (CON).
- Hora: Columna calculada por el programa de Python del primer bloque, que reinicia las horas al final de cada año, para contabilizar el transcurso de los años.

Con este primer bloque se obtiene el primer archivo de datos necesarios para el funcionamiento de la Herramienta de Autoconsumo (*calendario_horas.csv*). El resto de las tablas de Excel que configuran las entradas del modelo, son:

- Consumo.csv

Se trata de un archivo de valores que incluye en pu [kWh/kWh] el consumo horario para las diferentes tarifas. Para cada hora de un año se publica el perfil de consumo de la tarifa 2.0TD (consumos domésticos) y la tarifa 3.0TD. Para las tarifas de alta tensión no hay perfiles publicados, puesto que al tratarse de industria el consumo varía mucho en función del sector y la actividad que se esté realizando, se trata por lo tanto de consumos más personalizados y por ello no se hace una estimación promedio de estos perfiles de consumo.

Estos perfiles de consumo requieren de una actualización periódica anual. Se publican a finales de cada año en el BOE, para este proyecto se utilizan los perfiles actualizados del 2023, publicados en la Resolución del 22/12/2022²⁰.

- Generación.csv

En este archivo, cuya fuente es Simulyde, se representa el perfil de generación autoconsumo fotovoltaico en España, para todas las horas de un año. Se trata de un perfil en pu, con unas horas equivalentes de utilización de 1724 horas anuales. Es importante destacar que en el modelo se aplicará un factor anual en este perfil de generación para representar la degradación de los paneles por deterioro y suciedad.

- Xpryce.csv

Este archivo recoge una predicción de los precios horarios mayoristas de electricidad en el Mercado Diario. Se trata de los resultados del modelo xPryce²¹ de predicción de precios, que incluye los precios horarios desde el año 2023 hasta el 2050, pero este rango es ampliable hasta el año que se determine en el modelo de xPryce.

- Valores mensuales pvpc.csv

Este archivo incluye una serie de valores numéricos entre el 0 y 1 para cada mes del año (enero a diciembre), que son el resultado de estimar el cálculo del PVPC en función del precio de la energía en el Mercado Diario, el cual se explica más adelante en el apartado 3.3.1 de este trabajo.

Conviene revisar el cálculo de forma periódica (por lo menos cada año) para reajustar estos coeficientes para el cálculo del PVPC en el modelo. Una posible mejora, que además no resulta complicada, sería introducir en el modelo el cálculo de estos coeficientes, de manera que, con actualizar los datos necesarios se recalculasen los coeficientes a aplicar de manera automática.

- Cargos y peajes

Los costes de las redes, junto con los costes ajenos al suministro eléctrico se repercuten a todos los consumidores conectados a cualquier nivel de tensión a través de los cargos y peajes.

Los peajes, determinados por la CNMC, son únicos en todo el territorio español y deben ser calculados para cubrir todos los costes relacionados con la retribución de las redes de transporte y distribución²².

²⁰ (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 28 de diciembre de 2022)

²¹ Modelo de predicción de precios de Simulyde

²² (Universidad Politécnica de Madrid)

Los cargos, determinados por el Gobierno, se empiezan a diferenciar de los peajes desde la publicación de la Ley 24/2013, del 26 de diciembre, para ajustarse a la terminología utilizada por la normativa europea.

Con esta diferenciación, se establece en los cargos aquellos costes generales que el consumidor no realiza de manera directa cuando demanda potencia o energía. Así pues, los cargos cubren los sobrecostes de la actividad de generación a partir de fuentes de energía renovables, cogeneración de alta eficiencia y residuos. También cubren anualidades correspondientes a los déficits del sistema eléctrico, con sus correspondientes intereses y ajustes, política energética, etc.

Al igual que los peajes, los cargos son iguales para todo el territorio español y se establecen por Orden Ministerial y se publican en el BOE.

Para incluir en el modelo los valores de los cargos y peajes se establecen cuatro tablas diferentes, dos para cargos y dos para peajes. Cada una de ellas incluye los cargos o peajes de potencia (término fijo porque depende de la potencia contratada) o energía (término variable que depende de la cantidad de energía consumida).

Estas cuatro tablas incluyen los valores de las diferentes tarifas (desde la 2.0TD hasta la 6.4TD) diferenciando el valor en función del periodo.

- *Cargos_F.csv*: Cargos fijos o de potencia. Las unidades que se publican en el BOE son anuales pero las unidades de la tabla son diarias, para facilitar así el cálculo de la factura mensual [€/kW- día].
- *Cargos_V.csv*: Cargos variables o de energía [€/kWh].
- *Peajes_F.csv*: Peajes para el termino de potencia o termino fijo [€/kW- día].
- *Peajes_V.csv*: Peajes variables o de energía [€/kWh].

3.2.1.2 Variables de entrada introducidas por el usuario

Esta segunda parte de las entradas al modelo hace referencia a los datos característicos de cada caso particular que se quiera analizar con la Herramienta de Autoconsumo. Estas variables son introducidas por el usuario a través de la interfaz de la herramienta y se asignan en cada ejecución.

En la siguiente imagen se puede observar la interfaz con la que interactúa el usuario y donde se introducen estas variables de entrada.

Herramienta de Autoconsumo

Tus datos

Potencia contratada por periodo [kW]
P1 P2 P3
P4 P5 P6

Energía consumida [kwh]

Tarifa

Potencia instalada en autoconsumo [kW]

Factor de degradación de los paneles [%]

Inversión en autoconsumo

Inversión inicial [€]

Tasa de interes [%]

Datos de precios

¿Utilizas el PVPC? [0:NO, 1:SI]

Factor precio excedentes

Caso Mercado Libre
[1:Único precio, 2: Varios precios]

Precio Excedentes [€/kwh]

Caso 1: Un único precio

Precio Energía [€/kwh]

Caso 2: Diferente precio por periodo

Precio de la energía por periodo [€/kwh]

P1 P2 P3
P4 P5 P6

Cargos extra en mercado libre [€/kW- día]

P1 P2 P3
P4 P5 P6

Datos para el cálculo de la factura

Mes inicial Mes final

Año inicial Año final

Margen comercializadora 0.00852 [€/día]

Alquiler del contador 0.02663[€/día]

Impuesto de electricidad

IVA [%]

Ejecutar Herramienta Autoconsumo

Ilustración 21. Interfaz para la introducción de las variables de entrada en la herramienta de autoconsumo [Elaboración propia, 2023]

La interfaz está ordenada en diferentes apartados, de forma que resulte intuitiva la introducción de datos para el usuario. Los apartados que presenta son:

- Tus datos: Información sobre situación eléctrica doméstica y contrato actual del usuario.
- Datos de precios: Se pide la información acerca de la tarifa eléctrica que se tiene contratada y los precios en el caso de que se tengan pactados.
- Datos para el cálculo de la factura: Se pregunta al usuario el periodo temporal del que se quiere obtener la predicción del valor de la factura eléctrica.
- Inversión en autoconsumo: Información acerca del desembolso económico de la inversión en la instalación de autoconsumo y la tasa de descuento a aplicar.
- Ejecutar: Botón para la ejecución del modelo y recuadro para mostrar el mensaje de que se ha ejecutado con éxito.

A continuación, se muestran las variables de entrada necesarias para la obtención de la tabla principal del modelo. Esta es la tabla con toda la información de generación, consumo e importe económico horario de la parte variable o de consumo de la factura eléctrica.

VARIABLE DE ENTRADA	DEFINICIÓN
<i>FACTOR_PRECIO_EXCEDENTE</i>	Para el cálculo del precio de los excedentes en el mercado libre, factor de relación de este precio con el precio de la energía en el mercado diario
<i>ENERGIA_CONSUMIDA [kWh]</i>	Energía consumida por el usuario en un año
<i>POTENCIA_INSTALADA [kW]</i>	Potencia instalada en la instalación de autoconsumo
<i>FACTOR_DEGRADACION [%]</i>	Factor de degradación anual de los paneles. Indica el deterioro en la generación de los paneles.
<i>TARIFA [-]</i>	Tarifa contratada por el usuario en función del nivel de tensión. TARIFA = [2, 3, 61, 62, 63, 64]
<i>PVPC [-]</i>	Variable binaria (0-1) que determina si el precio seleccionado para la tarifa en cuestión es el del mercado regulado (PVPC=1) o precio fijo (PVPC=0)
<i>PRECIO_EXCEDENTES [€/kWh]</i>	Para el caso de que la energía se pague a precio fijo, indicar el valor del precio de los excedentes.
<i>CASO_MERCADO_LIBRE [-]</i>	Variable que indica si en Mercado Libre se tiene un único precio para la energía consumida, o varios, diferenciando por periodos. CASO_MERCADO_LIBRE=1 → un único precio CASO_MERCADO_LIBRE=2 → varios precios de energía
<i>PRECIO_ENERGIA [€/kWh]</i>	En el caso de mercado libre y un único precio fijo indicar en esta variable su coste
<i>PRECIO_ENERGIA_Px [€/kWh]</i>	Vector de 6 posiciones para indicar el precio de la energía en cada periodo (en el caso de tarifa 2.0TD, solo serán necesarios los tres primeros periodos)

Tabla 1: Variables de entrada necesarias para la obtención de la tabla principal

En segundo lugar, se muestran las variables necesarias para la obtención de la factura eléctrica mensual.

VARIABLE DE ENTRADA	DEFINICIÓN
<i>MES_INI</i>	Mes inicial desde el que se requiere el cálculo de las facturas
<i>MES_FIN</i>	Mes hasta el que se requiere el cálculo de las facturas
<i>AÑO_INI</i>	Primer año para el cálculo de facturas
<i>AÑO_FIN</i>	Último año del que se quiere la factura. Este valor esta capado por el último año de la tabla de precios de xPryce o el último año del calendario, el año máximo lo determina el más restrictivo.
<i>POTENCIA_CONTRATADA_Px [kW]</i>	Indicar la potencia contratada en cada periodo. Hay un total de 6 variables, una por periodo. X= [1,2,3,4,5,6]
<i>cargo_extra_Px [€/kW - día]</i>	En ciertas tarifas del mercado libre se cobran cargos extra fijos por kW en algunos periodos. (6 variables, una por periodo)
<i>margen_comercializadora [€/día]</i>	Precio establecido por la comercializadora por el servicio prestado
<i>precio_contador [€/día]</i>	Precio diario por alquilar el contador
<i>impuesto_electricidad [%]</i>	Impuesto especial de la electricidad, que grava la fabricación de esta. Actualmente tipo impositivo reducido al 0,5% hasta el 31/12/2023.
<i>IVA [%]</i>	Impuesto del Valor Añadido, Actualmente tipo impositivo reducido al 5% para consumos de menos de 10kW hasta el 31/12/2023.

Tabla 2. Variables de entrada necesarias para la obtención de la factura mensual

Por último, las variables de entada restantes que son necesarias para el análisis de la inversión se muestran en la siguiente tabla.

VARIABLE DE ENTRADA	DEFINICIÓN
<i>INVERSION_INICIAL [€]</i>	Inversión en la instalación de autoconsumo fotovoltaico a analizar
<i>TASA_INTERES [%]</i>	Tasa de descuento a aplicar a la inversión en autoconsumo, descuenta el valor de los Cash Flow futuros de la inversión teniendo en cuenta el coste de oportunidad y de financiación de dicha inversión. Se recomienda una tasa de descuento media del 7% para este tipo de inversiones.

Tabla 3. Variables de entrada necesarias para el análisis de la inversión

Todas estas variables de entrada son las que se muestran en la interfaz presentada anteriormente, y determinan el caso particular que la herramienta va a analizar. Las diferencias fundamentales entre un posible caso y otro residen en estas variables. Las características fundamentales que pueden hacer rentable o no una instalación de autoconsumo dependerán de factores como la

potencia instalada en las placas solares, el tipo de precio pactado para la energía (mercado regulado o de mercado libre) y la tasa de retorno de la inversión entre otros.

La combinación de estas variables con las tablas de Excel introducidas en el modelo, permite contar con toda la información necesaria para el funcionamiento de la herramienta de análisis de autoconsumos fotovoltaicos.

3.2.2 HERRAMIENTA DE ANÁLISIS DE AUTOCONSUMO FOTOVOLTAICO

En este apartado se explica el funcionamiento interno del modelo desarrollado. Partiendo de las entradas introducidas, se analizan para comprender el cálculo y la lógica que hay detrás de la obtención de la factura eléctrica.

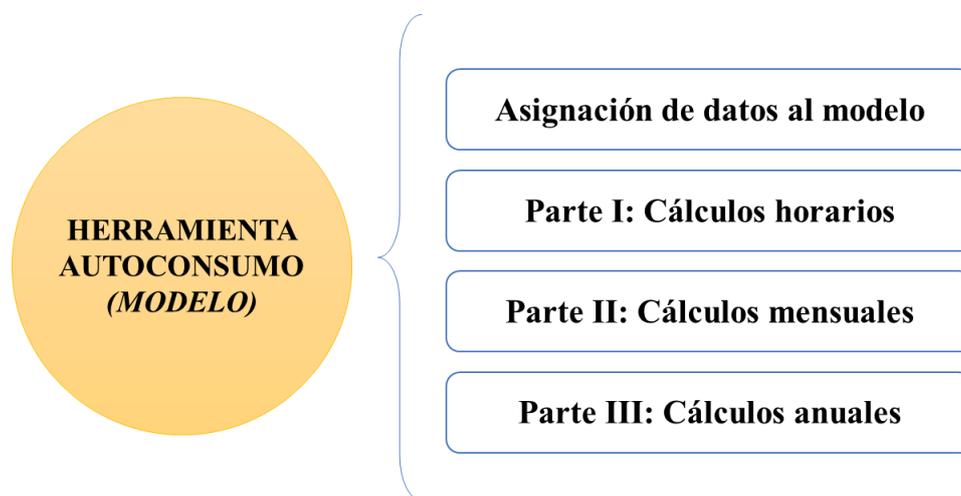


Ilustración 22. Diagrama de bloques de la arquitectura interna del modelo [Elaboración propia, 2023]

El funcionamiento del modelo está estructurado en tres partes fundamentales, en cada una de las cuales las variables calculadas tienen distinto rango temporal. La primera parte trata la información horaria (los datos de partida son horarios); la segunda parte, correspondiente con la obtención de la factura, trata la información a nivel mensual; y, por último, en la tercera parte, se realiza el análisis de la inversión por lo que los datos se tratan a escala anual.

A continuación, se presentan los cálculos pertinentes a cada uno de estos tres bloques de la herramienta, pero en primer lugar conviene explicar cómo el modelo trata la información de entrada para asignar los datos correctos al caso particular seleccionado por el usuario.

1. Asignación de datos al modelo

Algunas de las variables de entrada que la herramienta requiere del usuario permiten al modelo determinar en qué caso está trabajando, se trata de variables de selección. En función de su valor el modelo cogerá unos datos u otros de las Tablas de Excel de entrada.

Las variables de selección son tres:

- **TARIFA:** Variable que determina la tarifa contratada por el usuario en función del nivel de tensión. Puede tomar los siguientes valores que referencian las diferentes tarifas, [2, 3, 61, 62, 63, 64].
- **PVPC:** Variable binaria (0-1) que determina si el precio seleccionado para la tarifa en cuestión es el del mercado regulado (PVPC=1) o mercado libre (PVPC=0).

El modelo permite seleccionar la tarifa de acceso que se quiere aplicar, desde las tarifas de baja tensión hasta las de alta tensión. Para la tarifa de baja tensión 2.0TD el usuario puede además seleccionar o bien la tarifa regulada (PVPC) o contratar mercado libre. El resto de las tarifas, (que superan los 15 kW) no pueden acceder al PVPC.

En el caso de seleccionar mercado libre para la energía, se ha de determinar si dicho precio es único o varía en función del periodo, por ello, la variable *Caso Mercado Libre* determina esta diferenciación.

- **CASO MERCADO LIBRE:** Variable que indica si en el mercado libre se tiene un único precio para la energía consumida, o varios, diferenciando por periodos (1: un único precio, 2: varios precios de energía)

La siguiente imagen presenta en modo esquemático esta asignación de datos en función del valor que tomen las variables de selección.

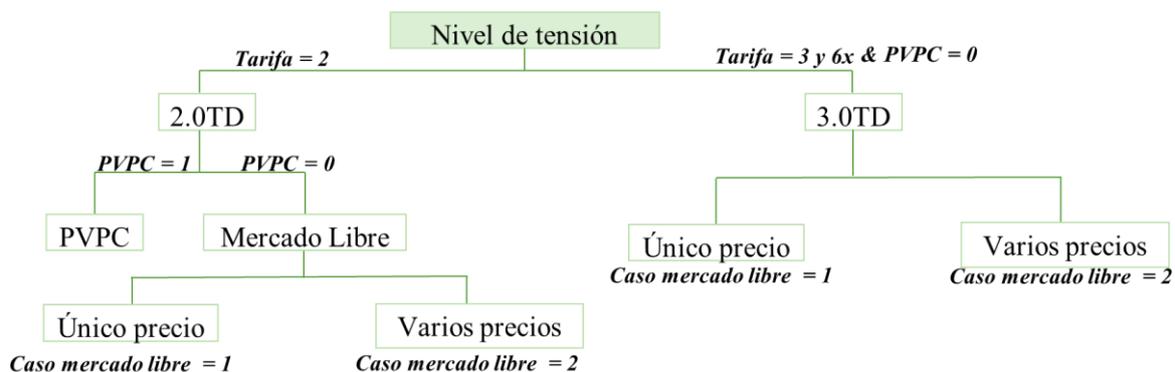


Ilustración 23. Esquema explicativo de los diferentes casos según las variables de selección del modelo [Elaboración propia, 2023]

Una vez seleccionado el caso concreto (tipo de tarifa y mercado para el precio de la electricidad), la herramienta asigna unos datos correspondientes al caso seleccionado. Cada una de las variables de selección supone una asignación de datos concreta.

En función de la tarifa seleccionada la herramienta lleva a cabo la:

- Asignación de los periodos. A cada hora del día le corresponde un periodo y estos varían en función de la tarifa. De las columnas del calendario se obtiene la columna correspondiente a los periodos de la tarifa seleccionada.
- Asignación de los cargos y peajes correspondientes.
- Asignación del perfil de consumo. En función de la tarifa el modelo selecciona un perfil de consumo u otro, ya que para diferentes niveles de tensión los consumos varían. No

cuenta con perfiles de consumo para alta tensión, ya que estos dependen de la industria y el sector y no se deben generalizar. Eso sí, la herramienta está preparada para introducir un perfil de alta tensión personalizado si así se requiriese y podría funcionar, ya que el resto de los parámetros (cargos, peajes, periodos, etc.), sí se han contemplado.

En función del mercado al que se acoja el consumidor, tiene lugar la:

- Asignación del precio de la electricidad. Si el mercado seleccionado es el regulado, el precio de la energía será el del PVPC, mientras que si la elección es el mercado libre se establecerá el precio fijo introducido por el usuario.

Para que el modelo sea preciso y consistente, al seleccionar un precio (o varios en función del periodo) fijo, este se indexa al precio del pool para que en los años siguientes experimente la variación del mercado, ya que no sería realista suponer que un precio fijo a día de hoy se va a mantener en un intervalo de 30 años.

2. Parte I: Tabla principal (cálculos horarios)

Tras la asignación de datos al modelo comienzan los cálculos necesarios para obtener la factura mensual. En este primer apartado se tratan los datos de entrada en su forma de partida (horaria), se trata de la gestión de datos más compleja del modelo debido a la alta cantidad de información, ya que cuenta con información horaria de generación, consumo y precios de la energía desde el año 2023 hasta el 2050 aproximadamente.

Este bloque concluye con la obtención del importe horario (para todas las horas de todos los años) de la parte variable²³ de la factura eléctrica, esto es, el coste de la energía consumida y el coste de los cargos y peajes variables.

$$\text{Componente Variable [€]} = \text{Energía consumida} + \text{Cargos y Peajes Variables}$$

El modelo realiza el cálculo de la factura tanto para sistemas con autoconsumo fotovoltaico instalado como para sistemas sin autoconsumo. La diferencia entre los dos casos está en que la energía consumida de la red con autoconsumo es menor, lo cual supondrá una reducción en el gasto en energía consumida y en el gasto de cargos y peajes (se pagan por kWh consumido).

El cálculo de la componente variable de un sistema sin autoconsumo es muy intuitivo:

$$\begin{aligned} \text{Energía consumida SIN AUTO} &= \text{Consumo [KWh]} * \text{Precio energía [€/KWh]} \\ \text{Cargos Variables SIN AUTO} &= \text{Consumo [KWh]} * \text{CargosV [€/KWh]} \\ \text{Peaje Variables SIN AUTO} &= \text{Consumo [KWh]} * \text{PeajesV [€/KWh]} \end{aligned}$$

El cálculo de la componente variable de la factura eléctrica de un sistema con autoconsumo debe tener en cuenta cuánta energía consumida por el sistema procede del autoconsumo y cuánta de la red. Para ello es necesario conocer hora a hora cuánto ha sido la generación y

²³ Se denomina componente variable de la factura, ya que, depende de la energía consumida de la red. Varía con el consumo.

cuánto el consumo horariamente, información que se almacenam en una variable denominada *Diferencia generación consumo*.

$$Diferencia\ generación - consumo [kWh] = Generacion - Consumo$$

En función del signo de esta variable estaremos ante diferentes casos:

$$Diferencia\ generación - consumo > 0 \rightarrow Se\ genera\ más\ de\ lo\ que\ se\ consume$$

$$Diferencia\ generación - consumo = 0 \rightarrow Se\ consume\ todo\ lo\ generado$$

$$Diferencia\ generación - consumo < 0 \rightarrow Se\ consume\ más\ de\ lo\ generado$$

El último caso, en el que se consume más de lo generado, representa el momento en el sistema ha de consumir energía de la red para poder cubrir la demanda en esa hora. La cantidad de energía que requiera de la red (valor absoluto de la variable *Diferencia generación consumo*) será la que haya que pagar al precio firmado con la comercializadora, y la que suponga un coste por cargos y peajes variables.

Por ello, el modelo realiza una comprobación antes de calcular la componente variable de un sistema con autoconsumo. En una hora concreta, el sistema tiene que estar consumiendo de la red para que la componente variable tenga un valor distinto de cero, ya que, si no se consume energía de la red, en esa hora no hay que pagar por energía consumida.

$$if\ (Diferencia\ generación - consumo < 0)\{$$

$$Energía\ consumida\ CON\ AUTO = ABS\ (Diferencia\ gen - con)\ [KWh] * Precio\ energía\ [€/KWh]$$

$$Cargos\ Variables\ CON\ AUTO = ABS(Diferencia\ gen - con)\ [KWh] * CargosV\ [€/KWh]$$

$$Peaje\ Variables\ CON\ AUTO = ABS(Diferencia\ gen - con)\ [KWh] * PeajesV\ [€/KWh]$$

$$\}else\{$$

$$Componente\ Variable\ CON\ AUTO = 0\ }$$

Además del cálculo de la componente variable de la factura eléctrica, en esta primera parte también se aplica al perfil de generación de los paneles solares, la degradación anual introducida por el usuario. De manera que los datos de energía generada sean realistas en el largo plazo, y representen la degradación de los paneles fotovoltaicos.

3. Parte II: Tabla factura (cálculos mensuales)

Una vez calculada la parte variable de la factura eléctrica, se procede a agrupar la información obtenida de manera mensual y a añadir el resto de los componentes que configuran la totalidad de la factura eléctrica.

$$Componente\ Variable\ mensual\ [€/mes] = \sum_{mes,año} Componente\ Variable$$

Tanto esto como la compensación de excedentes, se calculan en esta segunda parte del modelo. Los cálculos a partir de aquí serán mensuales.

Lo primero en este apartado es agrupar la componente variable de la factura eléctrica de forma mensual, para lo que se hace un sumatorio de dicha variable para cada día de cada mes de cada año. Este valor es muy importante para los sistemas con autoconsumo instalado, ya que es sobre este componente sobre el que se realiza la compensación de excedentes.

Los excedentes generados (valorados a precio de excedentes) se descuentan de forma mensual, y como máximo pueden llegar a cubrir el gasto variable en energía de ese mes. Para realizar esta comprobación, se lleva a cabo lo siguiente:

$$\begin{aligned} & \textit{if (Componente Variable mensual > excedentes)}\{ \\ & \quad \textit{Factura CON AUTO} = \textit{Componente Variable mensual} - \textit{excedentes} \\ & \quad \textit{else}\{ \\ & \quad \quad \textit{Factura CON AUTO} = 0 \} \end{aligned}$$

En el caso de que los excedentes superen en un mes al gasto en energía, esa diferencia se estará “regalando” a la red, puesto que al haber cubierto ya el coste mensual, los excedentes restantes se dejan de percibir.

Sin autoconsumo, no hay excedentes, por lo que simplemente se calcula el montante de la componente variable mensual (energía).

A continuación, se va añadiendo a las variables de *Factura* el resto de las componentes de la factura eléctrica mensual. A partir de aquí, las adiciones a la factura son componentes de carácter fijo, es decir, se trata de gastos que no dependen del consumo de energía, sino que dependen del término de potencia contratado y los días del mes. Se dan de manera fija por el simple hecho de tener contratado una tarifa de luz y usar los servicios de la red eléctrica. Por orden, se van añadiendo los siguientes componentes fijos:

- Cargos y peajes fijos: Su valor por kW es fijo e igual para todo el territorio español. La CNMC determina los cargos y el Ministerio los peajes.
- Margen de la comercializadora: Valor fijo en el mercado regulado establecido por Orden Ministerial que depende de la potencia contratada. En el caso de mercado libre, se trata de un valor pactado.
- Impuesto eléctrico: En este punto, se calcula el importe correspondiente al IEE, sobre el montante total de la factura sin tener en cuenta el coste por el alquiler del contador (por eso se añade después), que no está gravado por este impuesto.
- Contador: Precio de alquiler diario establecido por usar un contador que pertenece a la distribuidora.
- IVA: Por último, sobre el total a pagar, se aplica el IVA correspondiente (reducido o no), obteniendo así el valor real de factura eléctrica mensual.

Tras esta parte, el modelo ha calculado el valor de la factura eléctrica para todos los meses de todos los años seleccionados (2023-2050), para sistemas con autoconsumo fotovoltaicos y sistemas sin él.

4. Parte III: Tabla inversión (cálculos anuales)

En el tercer y último bloque se realiza el análisis de una inversión en paneles fotovoltaicos, teniendo en cuenta el ahorro que supone en la factura tener una instalación de autoconsumo.

Para estudiar la rentabilidad de la inversión se calcula lo siguiente: VAN, TIR, retorno de la inversión, rentabilidad equivalente y tabla comparativa del TIR para diferentes potencias instaladas.

Para el cálculo del VAN, TIR y retorno de la inversión, es necesario determinar que flujos de caja anuales va a producir la inversión, tomándose el ahorro anual como flujo de caja. El ahorro se calcula como la diferencia entre el gasto anual en la factura eléctrica en el caso de no tener autoconsumo y el gasto en la factura cuando se tiene una instalación de autoconsumo.

En primer lugar, conociendo los flujos de caja generados, se obtiene el VAN de la inversión aplicando la fórmula:

$$VAN = \sum \frac{\text{Ahorro factura (año)}}{(1+r)^t} - \text{Inv inicial}$$

Los datos necesarios para el cálculo son:

Inversión inicial: Variable de entrada introducida al modelo por el usuario

Años (t): Tomando el año en el que se realiza la inversión inicial como año 0 hasta el último año del que se calcula el montante de la factura eléctrica.

Ahorro factura anual: Flujos de caja de la inversión, calculados por el modelo como el sumatorio anual de las diferencias entre la factura mensual sin autoconsumo y la factura con autoconsumo.

Tasa de descuento (r): Representa la tasa a la que se van a devaluar anualmente los flujos de caja de la inversión. Esta tasa tiene en cuenta el coste de oportunidad de la inversión y el coste de financiación. La tasa de descuento la determina el inversor. Para proyectos en autoconsumos fotovoltaicos como los aquí presentados, se recomienda usar una tasa de descuento de al rededor del 7%.

En segundo lugar, la TIR se obtiene calculando la tasa que hace que el VAN sea cero.

Por otro lado, el retorno de la inversión representa el tiempo necesario para recuperar la inversión inicial a través de los flujos de caja anuales que genera la inversión. Para ello se determina el momento en el que los flujos de caja han cubierto el coste inicial de la inversión.

$$\text{Calcular } t: \sum_t \text{Cash Flows} \geq \text{Inversión inicial}$$

Por último, en este bloque tiene lugar la construcción de una tabla comparativa del TIR frente a la potencia instalada de autoconsumo. Esta matriz se realiza con varias ejecuciones del modelo, almacenando los resultados fila a fila. Conviene mencionar que el modelo obtendrá esta tabla para los diferentes casos ejecutados por el usuario y para que la comparación tenga sentido tendrá que ser el usuario el que valide que los casos a comparar son los correctos, es decir, que cambie únicamente la potencia instalada en los datos de entrada.

La tabla calculada presenta una fila para cada caso de potencia diferente y las columnas con los datos obtenidos para cada caso son:

- VAN
- TIR
- Rentabilidad equivalente

3.2.3 SALIDAS DEL MODELO

Tras la ejecución del modelo se generan las tablas resultado en forma de data frame de Python y, además, se generan archivos de Excel. Puesto que se trata de una gran cantidad de datos, se ha desarrollado también un archivo de Power BI que permite visualizar estas tablas resultado de manera gráfica. Dicho archivo está automatizado con el modelo, de manera que, si se ejecuta de nuevo y cambian las tablas resultadas, cambiarán también los datos representados en el Power Bi

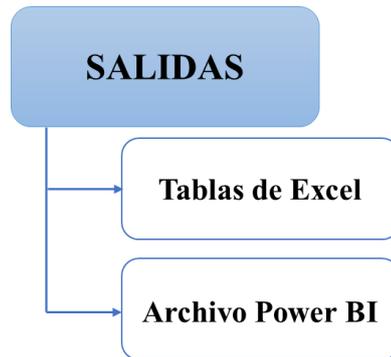


Ilustración 24. Diagrama de bloques de las salidas del modelo [Elaboración propia, 2023]

Los resultados obtenidos en el modelo se recogen en 6 tablas de Excel las cuales se cargan al archivo de Power Bi para su representación gráfica. Las tablas resultado son:

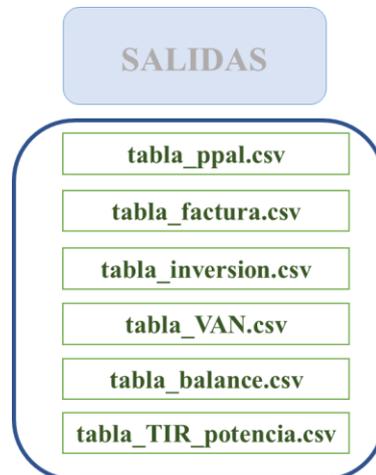


Ilustración 25. Conjunto de tablas resultado del modelo [Elaboración propia, 2023]

Las tres primeras tablas (*tabla_ppal*, *tabla_factura*, *tabla_inversion*), son los resultados directos de los tres bloques principales del modelo. Por lo que cada una de estas tablas presenta la información en las unidades correspondientes a cada bloque, presentando la *tabla_ppal* datos horarios, la *tabla_factura* datos mensuales y la *tabla_inversion* datos anuales.

A continuación, se presentan las variables obtenidas en la tabla factura y la tabla inversión. La tabla principal no se incluye para intentar simplificar la exposición de resultados. Con las tablas mostradas se abarcan todas las variables de salida importantes del modelo puesto que los datos de la tabla principal se usan para la obtención éstas.

VARIABLE DE SALIDA	DEFINICIÓN
ANIO	Año correspondiente a la fecha [2023,2055]
MES	Mes correspondiente a la fecha [1,12]
DÍAS	Número de días en cada mes correspondiente a la fecha
FACTURA_CON_AUTO	Montante mensual de la factura eléctrica con autoconsumo

FACTURA_SIN_AUTO	Montante mensual de la factura eléctrica sin autoconsumo
EXCEDENTES [€]	Valoración en euros, a precio de excedentes, de la energía excedentaria mensual (vertida a la red, ya que la generación ha superado el consumo)
E. NETA [kWh]	Balance mensual de la generación y el consumo del sistema con autoconsumo
CARGOSYPEAJES_F [€]	Montante mensual correspondiente a los Cargos y Peajes fijos de potencia
MARGEN_COMERCIALIZADOR RA [€]	Margen fijo de la comercializadora (establecido por ley los €/Kw-día)
CONTADOR [€]	Montante por el alquiler del contador
PRECIO_MEDIO_MES [€/kWh]	Precio medio horario de la energía en el mes correspondiente (se toma el precio usado horariamente para el cálculo de la factura, PVPC, mercado libre...)
PRECIO_MEDIO_REAL_SIN [€/kWh]	Precio medio horario total del coste variable de la energía en el mes correspondiente (tiene en cuenta el precio de la energía más los cargos y peajes variables y hace una media horaria del mes). Para una instalación sin autoconsumo.
PRECIO_MEDIO_REAL_CON [€/kWh]	Precio medio horario TOTAL del coste variable de la energía en el mes correspondiente (tiene en cuenta el precio de la energía más los cargos y peajes variables y hace una media horaria del mes). Para una instalación con autoconsumo.
PRECIO_MEDIO_EXCEDENTE S [€/kWh]	Precio medio horario de los excedentes en el mes correspondiente.
EUROS_REGALADOS [€]	Excedentes que se regalan a la red mensualmente (ocurre si los excedentes superan al coste variable de energía en ese mes)
IMPUESTO_CON [€]	Impuesto Especial de Electricidad en el sistema con autoconsumo. Se aplica al total de la factura sin tener en cuenta el alquiler del contador y el IVA.
IMPUESTO_SIN [€]	Impuesto Especial de Electricidad en el sistema sin autoconsumo. Se aplica al total de la factura sin tener en cuenta el alquiler del contador y el IVA.
IVA_CON [€]	IVA a pagar con un sistema con autoconsumo.
IVA_SIN [€]	IVA a pagar sin un sistema sin autoconsumo.
AHORRO_AUTOCONSUMO [€]	Diferencia entre la factura eléctrica mensual de una vivienda con autoconsumo y sin autoconsumo.

Tabla 4. Variables de salida del modelo que constituyen la tabla_factura

Como resultado del tercer bloque del modelo, se obtiene la *tabla_inversion*, en la que se incluyen los parámetros de análisis de la inversión en el autoconsumo para el caso introducido al modelo.

VARIABLE DE SALIDA	DEFINICIÓN
ANIO	Año correspondiente a la fecha [2023,2055]
CASH_FLOW	Flujos de caja anuales de una inversión en autoconsumo: ahorro anual que supone en la factura eléctrica una instalación fotovoltaica.
ESTADO_INVERSION	Balance en euros de la recuperación de la inversión inicial cada año
PAYBACK	Indica con un (1) si el año correspondiente, los flujos de caja se siguen destinando a recuperar la inversión inicial

Tabla 5. Variables de salida del modelo que constituyen la tabla_inversion

La *tabla_VAN* recoge, para el caso ejecutado, los valores de los indicadores económicos VAN, TIR y retorno de la inversión.

VARIABLE DE SALIDA	DEFINICIÓN
VAN	Valor Actual Neto de la inversión en autoconsumo
TIR	Tasa Interna de Retorno de la inversión
RETORNO	Periodo de tiempo en años que se tarda en recuperar la inversión inicial

Tabla 6. Variables de salida del modelo que constituyen la tabla_VAN

La *tabla_balance* recoge información mensual necesaria para el estudio de los excedentes. Permite visualizar la cantidad de energía consumida de la red, el montante de la factura, los excedentes generados y el importe monetario que deja de percibirse por el excedente no remunerado.

VARIABLE DE SALIDA	DEFINICIÓN
ANIO	Año correspondiente a la fecha [2023,2055]
MES	Mes correspondiente a la fecha [1,12]
E. NETA [kWh]	Balance mensual de la generación y el consumo del sistema con autoconsumo
PRECIO_MEDIO_EXCEDENT ES [€/kWh]	Precio medio horario de los excedentes en el mes correspondiente.

PRECIO_MEDIO_REAL_CON [€/kWh]	Precio medio horario total del coste variable de la energía en el mes correspondiente (tiene en cuenta el precio de la energía más los cargos y peajes variables y hace una media horaria del mes). Para una instalación con autoconsumo.
FACTURA_CON_AUTO [€]	Coste mensual variable de la energía, tiene en cuenta el gasto en energía consumida de la red y los cargos y peajes variables (todavía no se le ha aplicado la compensación de excedentes)
EXCEDENTES [€]	Saldo mensual valorado a precio de excedentes de la energía excedentaria vertida a la red, cuando la generación ha superado el consumo
EUROS_REGALADOS [€]	Excedentes que se regalan a la red mensualmente (ocurre si los excedentes superan al coste variable de energía en ese mes)

Tabla 7. Variables de salida del modelo que constituyen la tabla_balance

Por último, la *tabla_TIR_potencia*, representa para diferentes casos ejecutados los valores del TIR, VAN y rentabilidad equivalente, de modo que se puedan estudiar los indicadores económicos de los diferentes casos. Esta tabla se va generando a medida que se ejecutan diferentes casos, por lo que para que la tabla tenga suficiente información para ser representativa, habrá que ejecutar el modelo varias veces variando el valor de la potencia instalada.

VARIABLE DE SALIDA	DEFINICIÓN
Potencia Instalada	Potencia instalada en la instalación de autoconsumo, en Kw
VAN	Valor Actual Neto de la inversión para la potencia instalada correspondiente
TIR	Tasa Interna de Retorno de la inversión para la potencia instalada correspondiente
Rentabilidad Equivalente	Rentabilidad fija equivalente que ha generado la inversión en autoconsumo.

Tabla 8. Variables de salida del modelo que constituyen la tabla_TIR_POTENCIA

Todos estos datos obtenidos y recogidos en archivos de Excel se exportan a Power Bi para visualizarlos en graficas generando así un archivo de visualización de datos para cada caso ejecutado.

3.3 FUENTES DE DATOS E HIPÓTESIS PRELIMINARES

La herramienta de autoconsumo desarrollada sirve como modelo financiero para determinar la rentabilidad de una instalación de autoconsumo, basándose en el cálculo de la factura eléctrica a futuro, tomando como inputs datos de generación y consumos históricos y una predicción de precios de electricidad a futuro. La parte matemática del modelo es robusta y funciona correctamente, por lo que la precisión de los resultados se basa en los datos futuros en los que se fundamenta el modelo, y por ello resulta crucial apoyarse en datos coherentes.

Los datos de generación se obtienen en base a perfiles de generación estimados que determinan las horas útiles de utilización de instalaciones fotovoltaicas. El perfil introducido actualmente en el modelo pertenece a la empresa Simulyde. Una posible línea futura o mejora del modelo, consiste en incluir diferentes perfiles de generación según la Comunidad Autónoma o provincia en la que se encuentre la instalación para conseguir un perfil de generación más preciso.

El perfil de consumo se publica anualmente en el BOE²⁴ para las tarifas de baja tensión 2.0TD, 3.0TD y 3.0TDVE, se trata del perfil medio en España para consumos domésticos y de pequeñas empresas o pequeña industria. En el caso de querer concretar el perfil de consumo para un caso particular se podría insertar en el modelo el perfil de consumo deseado para ajustar el modelo a dicho caso. Del mismo modo habría que proceder para los casos de alta tensión, tarifas para las que no se publican en el BOE sus perfiles de consumo, ya que estos pueden variar en función del sector e industria.

Los datos de los precios son los más complicados de determinar en el largo plazo y son los más importantes de obtener de manera precisa. La precisión del modelo es especialmente sensible a la predicción de precios del mercado eléctrico en el largo plazo. El modelo utiliza un archivo de precios del mercado diario generado por otro modelo de la empresa Simulyde, denominado xPryce y a partir del cual se obtiene el valor del PVPC que posteriormente se aplica a la factura.

3.3.1 HIPÓTESIS PARA EL CÁLCULO DEL PVPC

Para el modelo es necesario determinar el precio del PVPC, haciendo una estimación de su cálculo a partir del precio del mercado diario (valores conocidos gracias al modelo xPryce de Simulyde). Para realizar una correcta estimación se ha analizado el Real Decreto 216/2014, por el que se establece la metodología de cálculo del PVPC y sobre todo se han estudiado los datos (publicados en eSios) que forman parte del PVPC.

²⁴ (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Resolución de 22 de diciembre, 2022)

TÉRMINO DE FACTURACIÓN DE ENERGÍA ACTIVA DEL PVPC

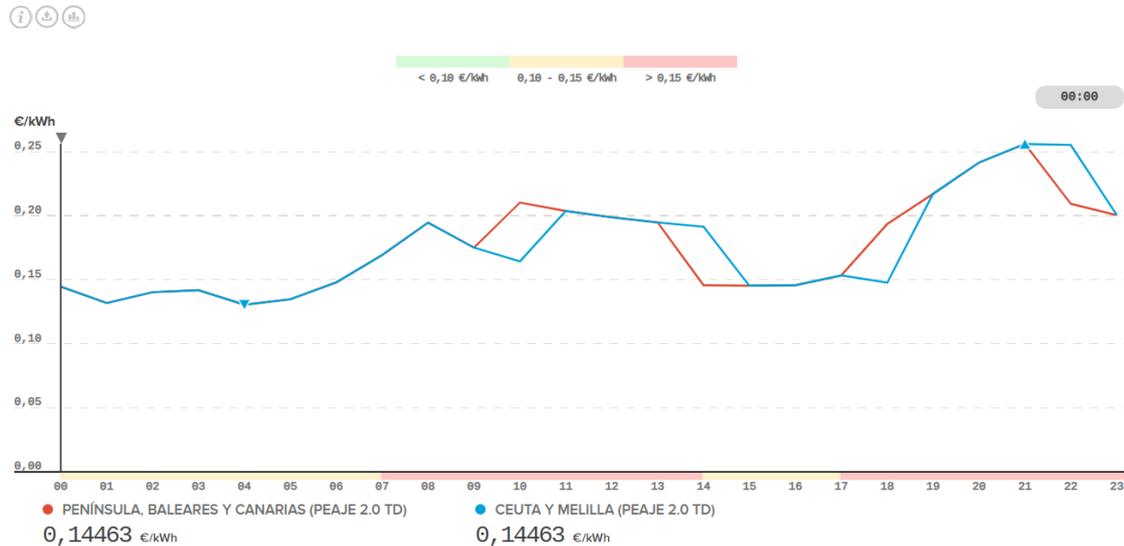


Ilustración 26. Valor del PVPC en tiempo real, publicado por REE [eSios, 2023]

En la imagen se muestra un recorte de la página web oficial de REE, en la que se publican los datos reales del PVPC en cada instante, además, REE aporta también los elementos que componen el PVPC, como se puede observar en la siguiente ilustración.

Todos los componentes mostrados en la imagen forman parte de alguna manera del valor final del PVPC. La relación entre estos componentes y el valor final (se observa en la ilustración 12), es lo que hay que determinar de la manera más precisa posible.



Ilustración 27. Componentes del PVPC [eSios, 2023]

Para llevar a cabo este estudio, eSios cuenta con el histórico (desde 2014) de todos estos valores en su base de datos, por lo que disponiendo de estos valores se puede analizar la influencia de

cada elemento en el precio final. El 01/06/2021, se aplica la nueva estructura de peajes y cargos de los términos de energía y de potencia de la factura de electricidad, lo que afecta directamente al PVPC, por ello los datos que se usan para determinar el cálculo del PVPC son los posteriores al año 2021.

La hipótesis de partida para la obtención del PVPC es que este proviene de diferentes elementos que le influyen en su valor final en mayor o menor proporción. El objetivo de aplicar esta hipótesis es determinar el porcentaje de influencia del precio del mercado diario en el valor final del PVPC.

Sabemos que el PVPC es el resultado de los siguientes componentes:

CÁLCULO DEL PVPC [1001]		Referencia eSios
Mercado Diario e Intradía	Precios de los mercados mayorista de electricidad, regulados por la OMIE.	1875
Peajes y Cargos	Costes de las redes de transporte y distribución y otros costes regulados del sistema.	1876
Servicios de ajuste	Coste de los servicios de ajuste del sistema.	1871
Financiación OS	Retribución del Operador del Sistema (REE).	1877
Financiación OM	Retribución del Operador del Mercado (OMIE).	1874
Comercializadora variable	Coste de la gestión comercial de comercializadoras en el mercado regulado.	1878
Mecanismo Ajuste del Gas	Mecanismo para limitar el precio del gas en la electricidad.	1900

Ilustración 28. Elementos y definición de los componentes del PVPC [Elaboración Propia, 2023]

En la imagen se muestran los números que referencian de cada uno de los componentes en la página web de eSios. Cada componente cargado en esa base de datos presenta un indicador numérico, el del PVPC, por ejemplo, es el 1001.

Los tres componentes que no aparecen en la tabla (Pago por capacidad, Excedente o déficit subastas renovables, Servicio de interrumpibilidad) se consideran irrelevantes en el cálculo del PVPC, ya que su aportación es muy pequeña y en el momento de realización del trabajo su valor era nulo (cabe la posibilidad de que esto cambie y haya que incluir en el cálculo del PVPC estos elementos, por ello se recomienda revisar periódicamente los datos y corregir cualquier desviación que se haya podido producir en el cálculo del PVPC).

Viendo estos elementos que componen el valor del PVPC se llega al planteamiento de la hipótesis para su cálculo y se establece que el PVPC es el resultado de:

$$PVPC \sim M. Diario e Intra + Peajes y Cargos + Servicio Ajuste + Financiación OS y OM + Comercializadora - MAG$$

La hipótesis inicial se basa en que el PVPC es el resultado de la aportación de los componentes mostrados en la ecuación sin tener en cuenta el Mecanismo de Ajuste del Gas. Esta decisión se ha tomado ya que se trata de un mecanismo temporal que ha entrado en vigor en el año 2022 como consecuencia de los altos precios del gas, pero dejará de estar activo (si no se prorroga) el 31 diciembre de 2023.

Por otro lado, los precios a futuro disponibles gracias a Simulyde son los valores horarios del mercado diario, es decir, del primer elemento solo la parte correspondiente a la del mercado diario y no el intradiario, por ello se decide separar estos dos conceptos. En eSios hay datos tanto de ambas partes en conjunto, como datos del Mercado Diario por separado, por ello resulta sencillo determinar la aportación del Mercado Intradiario, como la diferencia de ambas.

$$M. Intradiarios = M. Diario e Intra - M. Intradiarios$$

Puesto que la aportación principal proviene de los mercados diarios e intradiarios se ha decidido simplificar la ecuación en estos dos componentes y en un tercero que incluya todos los demás elementos.

$$PVPC \sim M. Diario + M. Intradiarios + Resto$$

$$Resto = PVPC - M. Diario e Intra - MAG$$

Teniendo esta simplificación del cálculo del PVPC, se procede a calcular el porcentaje que cada elemento representa sobre el Mercado Diario (son los datos conocidos), para ello se descargan los datos de todos estos componentes de eSios. Existen datos completos para todos los elementos únicamente desde junio de 2021, por lo que se toma un año natural completo de datos y hora a hora se realizan los cálculos pertinentes para determinar la aportación de cada elemento sobre el valor del Mercado Diario.

$$\%M. Intradiario = \frac{M. Intradiario}{M. Diario}$$

$$\%Resto = \frac{Resto}{M. Diario}$$

Conociendo estos porcentajes para cada hora de todo un año, se decide agruparlos en meses (media ponderada de las horas de cada mes), de manera que para cada mes se obtenga un único porcentaje, que representa qué proporción sobre el precio del mercado diario tiene la parte del PVPC generada debido a los mercados intradiarios y el resto de los componentes.

Los porcentajes mensuales obtenidos se muestran en la siguiente tabla y configuran la tabla de entrada al modelo, denominada *valores_mensuales_xpryce.csv*.

MES	%Total sobre M. Diario
1	0.422
2	0.431
3	0.374
4	0.783
5	0.497
6	0.592
7	0.561
8	0.561
9	0.489
10	0.400
11	0.312
12	0.456

Tabla 4. Valores mensuales para el cálculo del PVPC partiendo del precio del Mercado Diario [Elaboración Propia, 2023]

Con estos porcentajes mensuales se puede calcular el PVPC partiendo de los valores horarios de los precios de casación aplicando esta sencilla formula, en la que la X representa los valores porcentuales calculados y mostrados en la tabla.

$$PVPC = M. Diario \times (1 + X)$$

El mayor peso sobre el PVPC lo tiene el precio del mercado diario, por ello esta aproximación en su cálculo se puede aplicar obteniendo el valor del PVPC a través del precio de casación del mercado diario.

El análisis aquí mostrado para el cálculo del PVPC permite sacar dos conclusiones más aplicables al modelo.

1. Precio de los excedentes

En primer lugar, durante el análisis de precios se descargan también de eSios los datos correspondientes al precio de los excedentes (cuyo indicador de referencia es el 1739), para analizar su valor en función tanto del PVPC como del precio del Mercado Diario.

Se observa que el valor de los excedentes coincide en aproximadamente un 99% con el valor del Mercado Diario, lo cual implica que, efectivamente el precio de los excedentes es menor que el que paga un consumidor por consumir energía (PVPC) y que los excedentes fluctúan con el mercado.

Por ello se crea en el modelo la variable *factor precio excedentes*, a través de la cual el usuario ha de determinar qué factor quiere aplicar sobre el precio del Mercado Diario para el cálculo de los excedentes.

$$P. Excedentes = \text{factor precio excedentes} \times M. Diario$$

En líneas generales, se recomienda que dicha variable tenga un valor de 1, puesto que este valor es el más preciso con la realidad. Se ha decidido dejar como una variable modificable para el

usuario, para que éste tenga la libertad de aplicar sus hipótesis en cuanto a los precios de los excedentes.

2. Indexación del precio fijo al mercado diario

El valor de los precios del Mercado Diario va a cambiar con el tiempo y con ellos cambiarán los valores del PVPC y de los excedentes, por ello es necesario que, en el caso de haber seleccionado un precio fijo para la energía, éste varíe con el tiempo de una manera similar a la que va a variar el Mercado Diario.

Con este objetivo se llega a la conclusión de que es necesario indexar en el modelo el precio fijo de la energía introducido por el usuario a la variación del Mercado Diario.

Partiendo de los precios predichos del Mercado Diario a través del modelo xPryce de Simulyde, se calcula cuánto varía la media anual del precio del spot respecto al año de partida, año en el que el usuario pacta un precio fijo.

Siendo T el año inicial en el que se establece el precio fijo del mercado libre ML , se realiza la indexación del precio fijo a la variación del mercado diario de manera anual de la siguiente manera:

Año $T + 1$:

$$\text{Precio medio del M. Diario} \equiv \overline{MD} = \frac{\sum_{h=1}^{8760} M. \text{Diario}}{8760}$$

$$\text{Variación respecto al Pool} \equiv Var = \frac{\overline{MD} - ML}{ML}$$

$$ML_{T+1} = ML \times Var$$

Esta variación media anual se aplica al precio fijo introducido por el usuario, consiguiendo así que este valor fluctúe también con el precio del Mercado Diario.

Por otro lado, cabe mencionar que la correlación del mercado mayorista con el PVPC es mayor que con el mercado libre, que puede variar por otros motivos que estrictamente el precio mayorista. Así pues, en el largo plazo, se corresponderá con mayor precisión el precio de PVPC que el del mercado libre.

3.3.2 HIPÓTESIS PARA EL CÁLCULO DE LA DEGRADACIÓN DE LOS PANELES

Para tener en cuenta la degradación de los paneles con el paso del tiempo, hay que modificar el perfil de generación de los paneles fotovoltaicos, ya que, a medida que pasa el tiempo el deterioro y la suciedad acumulada harán que los paneles tengan una eficiencia menor en su generación en comparación con el momento inicial de la inversión.

Por ello el modelo implementa el deterioro de los paneles, reduciendo anualmente la generación del autoconsumo. Para ello el usuario ha de introducir al modelo el valor que considere oportuno como factor de degradación de los paneles. Este valor se ha dejado abierto como una variable de entrada, ya que depende de diversos factores externos, como el lugar donde se instalen los paneles, el nivel de cuidados que vaya a recibir, la calidad de los materiales etc.

Con este factor, se aplica al perfil de generación de cada año la siguiente corrección:

$$\text{Generacion Corregida} = \text{Generacion inicial [kWh]} \times (1 - \text{factor}\%)^{\text{año} - \text{año inicial}}$$

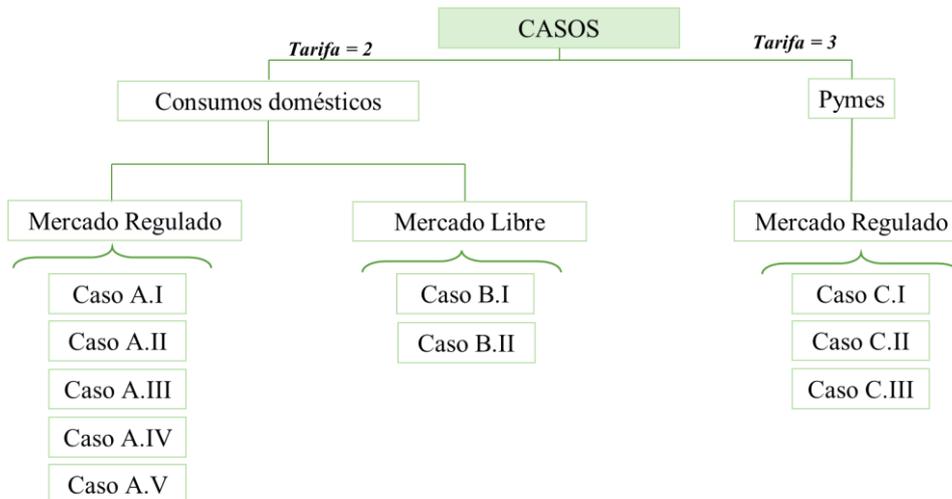
De esta manera se corrige la generación anual de los paneles, disminuyendo esta de forma lineal cada año. Se reduce la generación en el porcentaje introducido como *factor degradación* cada año.

4. APLICACIÓN DEL MODELO

En el siguiente apartado se aplica el modelo a diferentes casos con dos objetivos fundamentales: en primer lugar, comprobar la fiabilidad de la herramienta y su correcto funcionamiento y en segundo lugar, conseguir una visión más amplia y clara, fundamentada en resultados cuantitativos, acerca de las condiciones óptimas para optimizar una instalación de autoconsumo.

Puesto que la herramienta permite analizar numerosos casos modificando a su vez diversas variables, se va a dividir en dos bloques principales de análisis. Por un lado, se estudiarán los consumos domésticos y por otro lado las pequeñas y medianas empresas

La diferencia entre estos dos tipos de cliente radica principalmente en el perfil de consumo y en la energía consumida total. Las pymes consumen más energía anualmente que un consumo doméstico y dicho consumo se distribuye de manera diferente a lo largo del año, lo cual afecta a muchas de las variables de la instalación, tales como las potencias contratadas por periodo, la potencia instalada en la instalación...etc. Los casos por ejecutar se agrupan en el siguiente diagrama.



*Ilustración 29. Diagrama resumen de los casos a ejecutar en el Modelo de Autoconsumo
[Elaboración Propia, 2023]*

Para todos los casos se realiza un análisis de rentabilidad de la inversión calculando el VAN y la TIR del proyecto, para lo que es necesario determinar el valor de la tasa de descuento a aplicar. Esta está relacionada con el coste de oportunidad de la inversión y se establece también con el objetivo de garantizar una rentabilidad al proyecto, por ello se utiliza el denominado

WACC²⁵ del sector, tasa que en España oscila entre el 6 y el 9%. Para los casos que se ejecutan en este trabajo se ha seleccionado una tasa de descuento fija del 7%.

4.1 CONSUMOS DOMÉSTICOS

En instalaciones fotovoltaicas de autoconsumo doméstico, el perfil de consumo a aplicar se puede obtener a través de REE y es el correspondiente a la tarifa 2. El perfil ofrecido por REE es en kWh horario/kWh anuales, de modo que para obtener el consumo horario es necesario también estimar el consumo energético total del año. El IDAE²⁶ determina que el consumo de electricidad medio por hogar es de 3.487 kWh valor que se utilizará como el de partida para modificar la variable de energía consumida.

Dentro de los consumos domésticos distinguimos a su vez el caso de tener una tarifa contratada en el mercado regulado o en el mercado libre.

4.1.1 MERCADO REGULADO: CASO A

En primer lugar, se realizan los casos correspondientes al mercado regulado ya que permite potenciar más el uso y alcance de la herramienta, puesto que en estos casos el precio no es una variable del modelo, lo que permite modificar otras variables y estudiar su efecto en los resultados de forma independiente.

En la siguiente tabla se resumen los casos a ejecutar y los valores dados a las principales variables del modelo.

CASO	TARIFA	PVPC	P. INSTALADA [kW]	P1 [kW]	P2 [kW]	ENERGIA CONSUMIDA [kWh]	INVERSION INICIAL [€]
Caso Base	2	Sí	5	4,5	5,5	3500	5000
Caso A. II	2	Sí	7	4,5	5,5	3500	6000
Caso A.III	2	Sí	5	4,5	5,5	5500	5000
Caso A. IV	2	Sí	7	4,5	5,5	5500	6000
Caso A. V	2	Sí	8	5,5	6,5	6500	6500

Tabla 5: Casos a ejecutar y valores que toman las principales variables del modelo

Los valores que se han considerado para el coste de la inversión parten de los 1000€ por kW instalado, dicho valor es coherente con los precios actuales de instalaciones de autoconsumo, teniendo en cuenta las subvenciones que se pueden dar. A medida que aumenta la potencia instalada, se ha considerado una reducción en el precio por kW instalado.

²⁵ Weighted Average Cost of Capital, por sus siglas en ingles. Hace referencia a la tasa de descuento calculada teniendo en cuenta el endeudamiento, coste financiero y fondos propios del sector.

²⁶ Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

4.1.2 MERCADO LIBRE: CASO B

Si la tarifa elegida por el consumidor no es la regulada, este tiene la opción de pactar con la comercializadora unos precios fijos para la energía en €/kWh. Se pueden dar dos casos en el escenario de mercado libre, en el que el precio de la energía puede ser único o por otro lado puede haber un precio diferente para cada periodo, resultando en tres valores de precio distintos (en el caso de la tarifa 2.0).

Los precios de los excedentes, también se pactan con la comercializadora y pasan a ser fijos. Conviene recordar que, como se explicaba en el capítulo 3, en el caso de mercado libre, los precios se indexan a la predicción de precios del mercado diario, para que estos experimenten una variación coherente con la realidad en el largo plazo.

Algunas de las tarifas del mercado libre que presentan precios para la energía competitivos, incluyen por otro lado unos cargos extras diarios.

Basándose en los precios y tarifas ofrecidas por las principales compañías eléctricas españolas, se van a ejecutar dos casos, uno correspondiente a los precios ofrecidos actualmente por Endesa y otro con los precios ofrecidos por Iberdrola. Las diferencias entre ambos casos no serán especialmente notables, lo interesante está en compararlos con el mercado regulado.

TARIFA ENDESA		TARIFA IBERDROLA	
VARIABLE	VALOR	VARIABLE	VALOR
Tarifa	2	Tarifa	2
PVPC	No	PVPC	No
Precio energía [€/kWh]	0,151	Precio energía [€/kWh]	0,219
Cargo extra P1 [€/kW – día]	0,1023	Cargo extra P1 [€/kW – día]	0,125
Cargo extra P2 [€/kW – día]	0,0329	Cargo extra P2 [€/kW – día]	0,0293
Precio excedentes [€/kWh]	0,1055	Precio excedentes [€/kWh]	0,0559
P. instalada [kW]	5	P. instalada [kW]	8
P1 [kW]	4,5	P1 [kW]	5,5
P2 [kW]	5,5	P2 [kW]	6,5
Energía consumida [kWh]	3500	Energía consumida [kWh]	6500
Inversión inicial [€]	5000	Inversión inicial [€]	65000

Tabla 6. Tarifa de luz ofrecida por Endesa e Iberdrola y variables del modelo

El caso de la tarifa de Iberdrola se ha seleccionado para potencias contratadas ligeramente mayores, de entre 5 – 10 kW.

4.2 PEQUEÑAS Y MEDIANAS EMPRESAS: CASO C

Las pymes presentan un consumo anual considerablemente mayor que el de una vivienda, por ello la tarifa que se les aplica, así como la potencia contratada son diferentes. La potencia requerida suele oscilar entre los 12 – 19 kW, lo cual implica un consumo medio anual de entre 12000 kWh – 21000 kWh.

Las variables de la instalación también se ajustan a estos niveles de consumo, aumentando la potencia instalada de placas fotovoltaicas, con lo que aumentará también el coste de la inversión.

Para potencias superiores a 15kW, se aplica la tarifa 3.0TD y en adelante (6.1 TD, 6.2 TD, 6.3TD y 6.4 TD), las cuales no pueden acceder a la tarifa regulada de precios, por lo que los precios por energía y por potencia se pactan con la comercializadora. Los casos que se van a ejecutar son:

CASO	TARIFA	PVPC	P. INSTALADA [kW]	ENERGIA CONSUMIDA [kWh]	INVERSION INICIAL [€]
Caso C. I	3	No	15	15000	8000
Caso C. II	3	No	17	18000	9000
Caso C.III	3	No	18	19000	10000

Tabla 7. Casos que ejecutar y valores de las principales variables del modelo para PYMES.

CASO	P1 [kW]	P2 [kW]	P3 [kW]	P4 [kW]	P5 [kW]	P6 [kW]	P.MEDIA
Caso C. I	6,5	8,5	7	7	5	4,5	6,4
Caso C. II	7,5	9,5	7,5	6	5	5	6,75
Caso C.III	8,5	10,5	8	7,5	5	4	7,25

Tabla 8. Caso C: Potencia contratada en cada periodo

Para simplificar el análisis de los resultados posterior, se va a aplicar el mismo precio a los tres casos anteriores, de forma que lo único que varíe sean las variables de potencia y energía consumida.

PRECIOS CASO C		
Periodo	Energía [€/kWh]	Potencia [€/kW – día]
P1	0,2437	0,0383
P2	0,2137	0,0326
P3	0,1925	0,0110
P4	0,1811	0,0100
P5	0,1554	0,0075
P6	0,1675	0,0055
Precio excedentes	0,095 €/kWh	

Tabla 9. Precios por energía y por potencia a aplicar en el Caso C

Tras exponer los casos a ejecutar, queda claro que el tipo de instalación de autoconsumo que analiza el modelo es el autoconsumo con excedentes acogido a compensación. Que, como se recoge en el Real Decreto 244/2019²⁷, incluye todas aquellas instalaciones de autoconsumo en las que el productor y el consumidor se acogen al sistema de compensación simplificada de excedentes. A demás establece una serie de requisitos que ha de cumplir la instalación para pertenecer a esta modalidad.

1. La fuente de energía tiene que ser renovable.
2. La potencia de la instalación no puede superar los 100kW.
3. El consumidor debe de estar adherido a un solo contrato de suministro para el consumo con una comercializadora.
4. El consumidor y producto han firmado un contrato para la compensación de excedentes.
5. El consumidor no puede obtener beneficio económico ya que no es una actividad retributiva. Esto quiere decir que solo se puede compensar la energía no consumida y que la factura nunca será negativa.

²⁷ (BOE, 2019)

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en las diferentes iteraciones del modelo. Puesto que la herramienta es capaz de procesar muchos datos y presenta por lo tanto numerosos resultados diferentes, se va a presentar en primer lugar la organización de estos en un informe de Power BI, explicando así qué se presenta y analiza en cada apartado.

Posteriormente se hará un análisis de los resultados obtenidos en los diferentes casos explicados en el apartado 4 de este trabajo. Presentado la comparación de los diferentes casos.

5.1 INFORME DE RESULTADOS: POWER BI

El informe de resultados de Power BI está conectado al modelo de manera que al ejecutar un nuevo caso se carguen los datos en el informe y al actualizarlo se muestren los datos de la última ejecución.

El informe cuenta con once páginas donde se muestran los diferentes análisis realizados. Una de las principales ventajas de la herramienta Power BI es que permite filtrar y agrupar los datos (tanto por año como por mes) y modificar los elementos que se están visualizando, por ello conviene poder acceder al informe para acceder a todo el potencial de análisis que la herramienta presenta. Se adjunta como parte de este trabajo el informe obtenido tras la ejecución del Caso Base.

Para presentar el informe, se va a hacer a través del Caso Base, de manera que toda la información presentada en los siguientes puntos se corresponde a dicho caso.

En la primera página se muestra la portada del informe, con el índice de los diferentes puntos que incluye.



Ilustración 30. Portada del informe de resultados de Power BI [Elaboración propia, 2023]

A continuación, se incluye una breve descripción de lo estudiado en cada punto del informe.

1. Factura eléctrica

En esta pestaña se muestra una gráfica comparando los importes mensuales o anuales de la factura eléctrica con y sin autoconsumo. Incluye el precio medio de la energía en cada mes (en el caso de usar los precios del mercado regulado, equivaldría al precio medio mensual o anual del PVPC).

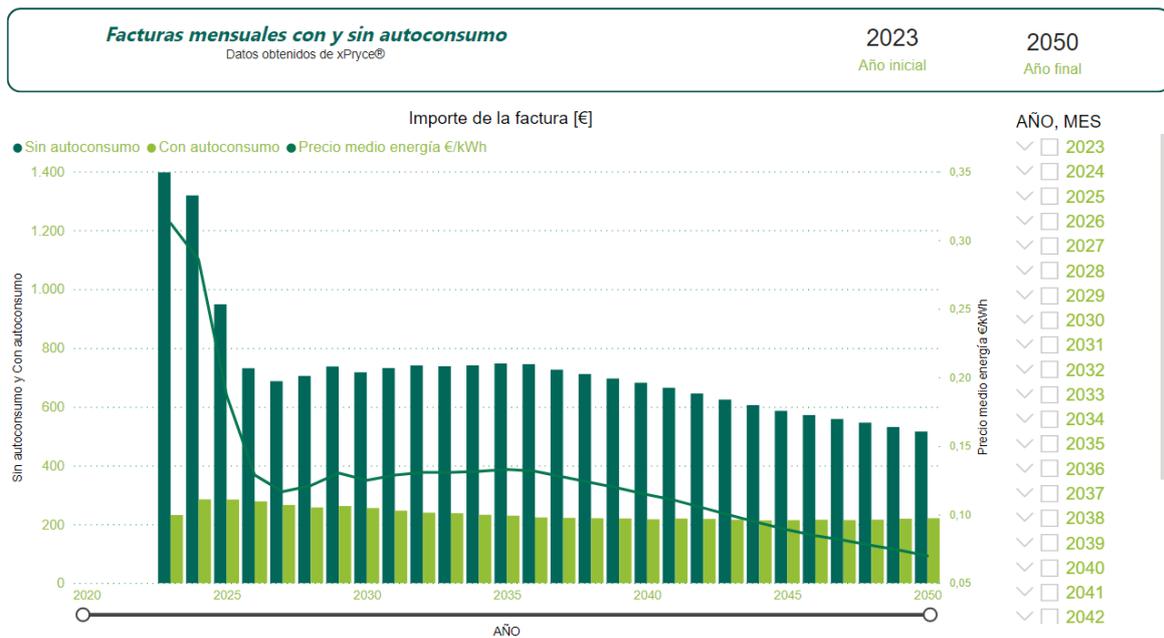


Ilustración 31. Informe de resultados: Factura eléctrica [Elaboración propia, 2023]

2. Balance generación y consumo

En esta pestaña se muestran la generación, consumo y balance (diferencia entre generación y consumo). Se puede ver la agregación anual o bajar un nivel para ver la distribución mensual.

El consumo anual es constante, y se corresponde con el valor del input (3500 kWh año), ya que el modelo parte de un consumo anual y lo distribuye según el perfil de consumo de las diferentes tarifas. Por otro lado, la generación va disminuyendo ligeramente debido a la degradación de los paneles que tanto para esta ejecución como para todas las demás, se ha establecido en una degradación anual fija del 0,5%.

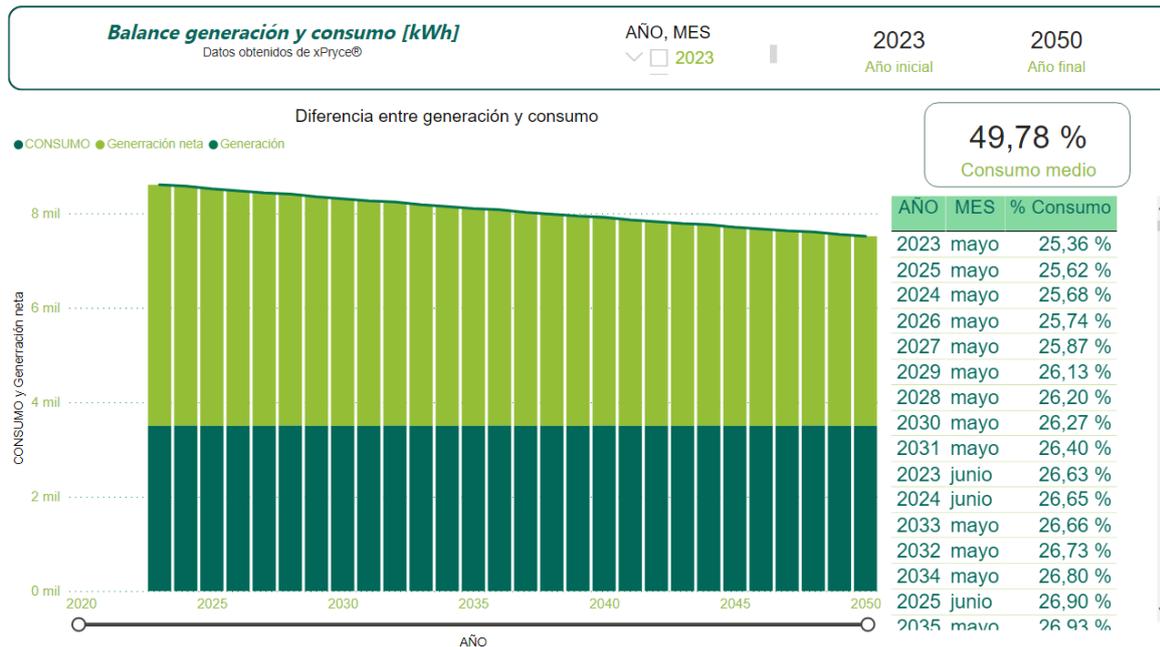


Ilustración 32. Caso Base: Balance generación y consumo [kWh] [Elaboración propia, 2023]

Resulta interesante hacer un análisis mensual en esta pestaña ya que permite ver la distribución del perfil de consumo y el perfil de generación solar a lo largo de los diferentes meses del año.

La etiqueta del consumo medio muestra la proporción de energía que se ha consumido frente a la energía que se ha generado en la instalación de autoconsumo, durante el periodo seleccionado. El caso de la imagen se trata del Caso Base y no se ha aplicado ningún filtro de periodo temporal, por lo que se está teniendo en cuenta los resultados desde el año 2023 hasta el año 2050.

Este valor del 49,78% implica que el consumo en su totalidad es menor que la generación del periodo, pero esto no implica que no se haya consumido energía de la red y que todo lo consumido haya sido generado por la instalación, ya que, gran parte de la generación se produce en momentos en los que el consumo ya está cubierto por lo que se incurre en energía excedentaria, que al no poder almacenarse se vierte a la red.

Las propias características de una instalación de autoconsumo suponen que se genere mucha energía en las horas de luz, pero ninguna en las horas de noche, por lo que durante estos momentos el usuario estará obligado a consumir energía de la red.

Este indicador representa la eficiencia de la instalación en cuanto a la energía generada, es decir, qué porcentaje de esta se ha usado para el consumo doméstico. Como es de esperar, durante los meses en los que aumenta la generación (primavera, verano), este indicador disminuirá, puesto que la generación es mayor y el consumo se puede considerar constante o por lo menos periódico.

3. Ahorro con autoconsumo

En esta pestaña se muestra una gráfica de líneas que presenta la cantidad de dinero ahorrado con autoconsumo fotovoltaico (diferencia entre la factura mensual sin autoconsumo y con autoconsumo). También muestra los excedentes generados en cada periodo, ya que se trata de uno de los responsables principales del ahorro en la factura. La otra partida relevante que afecta en el ahorro es la disminución de los cargos y peajes variables y el resto de las partidas de la factura al ser el coste de la energía menor, por haber consumido menos cantidad de energía de la red).

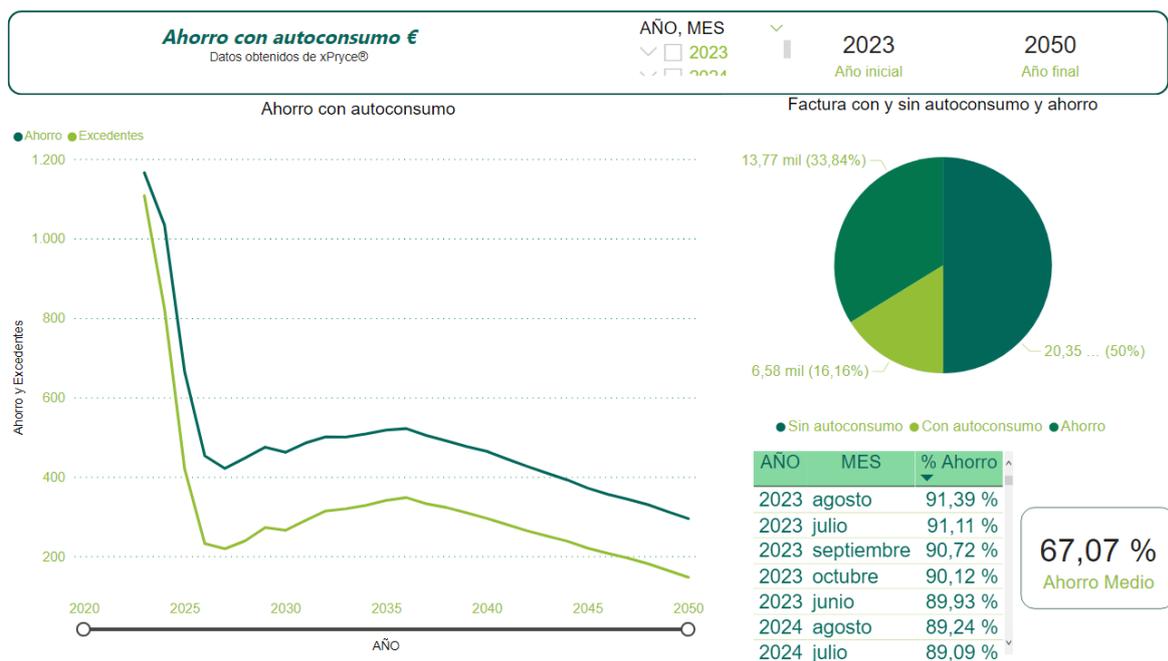


Ilustración 33. Caso Base: Ahorro obtenido con la instalacion de autoconsumo PV [Elaboración propia, 2023]

Se puede ver en el gráfico de líneas que el ahorro es proporcional a la curva de excedentes, pero que no son iguales en cuanto a importe. El importe ahorrado supera a los excedentes ya que el ahorro está formado por una parte de los excedentes (los compensados) y por la disminución en el consumo de energía de la red que a su vez afecta a los cargos, e impuestos a pagar.

Por otro lado, en el *Pie chart* se representa la factura con autoconsumo, factura sin autoconsumo y el ahorro.

El ahorro, unido al importe de la factura con autoconsumo (lado izquierdo del gráfico) igualan al importe de la factura con autoconsumo. Este gráfico resulta interesante a la hora de evaluar diferentes casos o periodos de tiempo y determinar si el ahorro aumenta o disminuye, lo que

implica una disminución o aumento respectivamente del importe de la factura con autoconsumo.

Tanto la etiqueta como la tabla presentan el porcentaje de ahorro sobre el importe de la factura sin instalación de autoconsumo. En la tabla podemos verlo de manera mensual y en la etiqueta se realiza una media del ahorro en el periodo seleccionado.

Observamos que para el caso base y teniendo en cuenta la totalidad del periodo, el ahorro es del 67%, es decir, con una instalación de autoconsumo domestico se ahorra de media el 67% del coste de la factura eléctrica desde 2024 hasta el año 2050.

En la tabla se puede observar el porcentaje de ahorro en cada mes y se ve claramente como los meses entre primavera-verano, aquellos en los que hay más horas de luz, el sol está más alto y con una posición óptima para la producción de energía, presentan un ahorro mucho mayor que los meses de invierno, con valores de ahorro del 90% en meses como julio o agosto.

4. Desglose factura

En esta pestaña se presenta una muestra el resto de las partidas de la factura eléctrica (aparte del gasto variable por el consumo de energía y los cargos y peajes variables), tanto para autoconsumo instalado como el caso de no tener autoconsumo.

Este apartado permite determinar qué porcentaje de la factura lo conforman los gastos fijos y los impuestos correspondientes y ver cuanto aporta cada uno de los elementos, así como comparar esto en la factura con y sin autoconsumo.

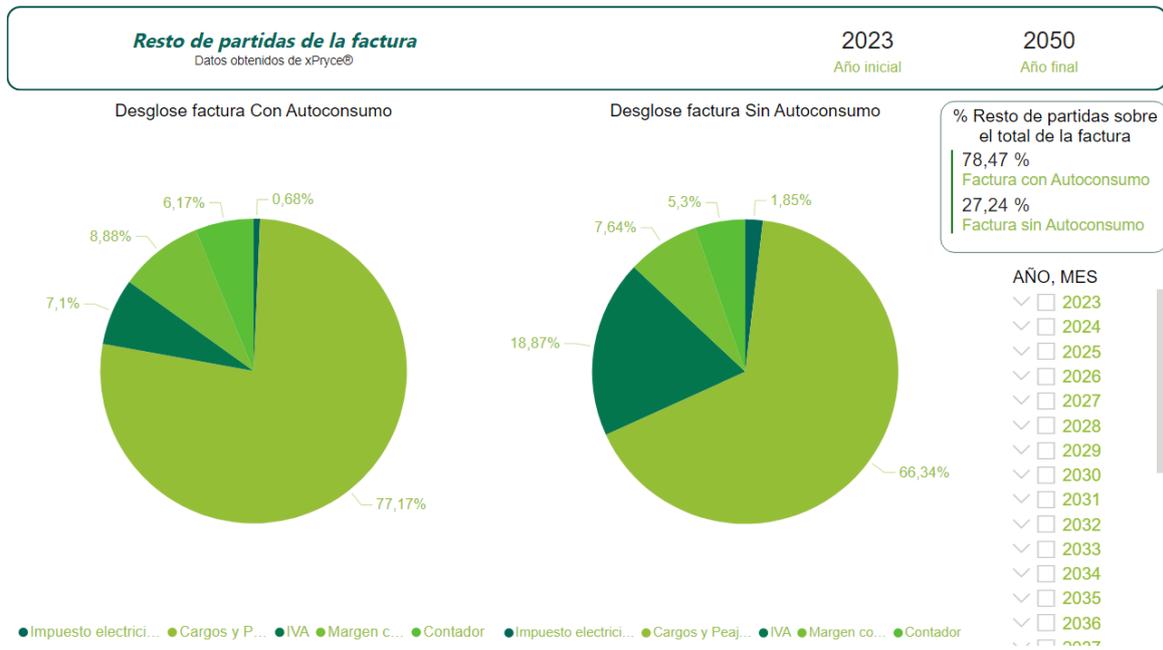


Ilustración 34. Caso Base: Desglose de la factura eléctrica, elementos fijos e impuestos [Elaboración propia, 2023]

Como se puede ver en los resultados del Caso Base, quitando el gasto variable de energía el resto de los elementos de la factura (IVA, Impuesto de electricidad, Cargos y Peajes fijos, Margen de la comercializadora y Contador), representan el 78% del importe total de la factura en el caso de tener una instalación de autoconsumo y un 27% en el caso de no tener instalación de autoconsumo.

Estos números implican que, en el caso de no tener placas instaladas, el mayor gasto de la factura es el consumo de energía de la red, en concreto supone un 73%, mientras que, al contar con una instalación de autoconsumo, el gasto en consumo de energía se reduce notablemente hasta alcanzar únicamente el 22% del importe total de la factura.

Estos números llevan a dos reflexiones, en primer lugar, que, con la instalación de autoconsumo se consigue reducir mucho el consumo de energía lo que refleja un ahorro significativo en esta partida de la factura y en segundo lugar se observa que este ahorro solo tiene lugar en el consumo de energía de la red ya que el resto de los elementos de la factura son fijos y no se pueden reducir prácticamente nada y mucho menos eliminar.

Del resto de partidas de la factura hay que mencionar que únicamente varían de un caso a otro (con y sin autoconsumo) el IVA y el impuesto de electricidad, ya que actúan sobre el total de la factura, teniendo en cuenta el gasto de energía. El resto de los elementos, son fijos y no dependen de la energía consumida, por lo que sus valores son iguales en ambos casos.

5. Análisis de excedentes [€ y kWh]

En esta pestaña se representa el gasto variable de energía frente a los excedentes generados. Los excedentes pueden descontarse de la factura hasta alcanzar como máximo el coste variable de energía. Representar ambos en la gráfica permite analizar visualmente la compensación de excedentes, ya que cuando se vean excedentes superando al coste variable (ese mes o año) se estará regalando parte de la energía generada a la red, mientras que si el coste de energía supera a los excedentes se va a reducir del importe de la factura todos los excedentes generados. Es recomendable analizar este gráfico con granularidad mensual, puesto que la compensación de excedentes tiene lugar mes a mes.

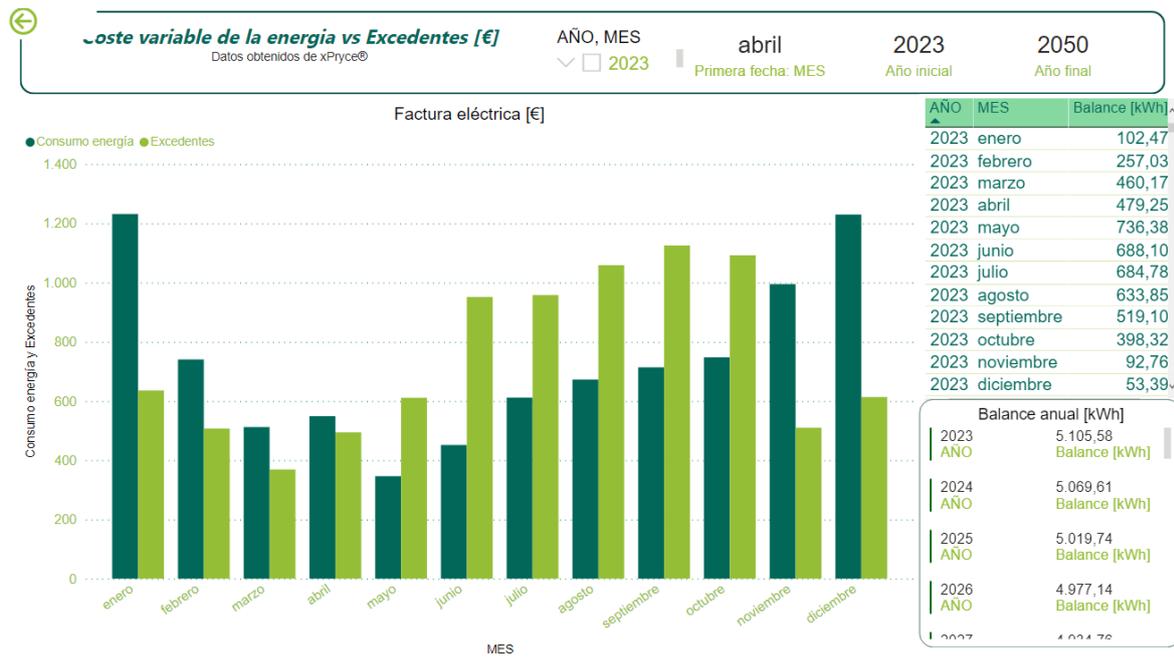


Ilustración 35. Caso Base: Compensación de excedentes, coste variable de la energía vs excedentes generados [Elaboración propia, 2023]

De manera visual se puede determinar qué meses del año se generan más excedentes que los que se pueden compensar, ya que la cantidad a compensar es el valor mínimo entre los dos valores mostrados en la gráfica. Los meses en los que el importe de los excedentes (barra verde clara) superan al importe del coste de la energía consumida (barra verde oscura), se está dejando de compensar la diferencia entre el coste de energía y los excedentes generados. Esto equivale a una cantidad de energía que se ha generado en la instalación, que no se ha consumido y por ello se ha volcado a la red, pero que no ha tenido ningún tipo de compensación económica puesto que en ese mes ya se ha cubierto el coste de la energía consumida de la red.

Se puede observar en la gráfica que los meses en los que se regala energía a la red, se corresponde con los meses de mayo a octubre, los meses del año con más horas de luz.

En las tablas de la derecha se puede ver el balance de generación de cada mes (tabla de arriba) y el balance anual en la etiqueta de abajo. Este valor se incluye para aportar visibilidad acerca de cuánto más se ha generado en kWh en un periodo concreto y tener este valor en mente cuando se vea la relación entre excedentes y gasto variable (€) durante el mismo periodo.

En la siguiente página del informe se continúa con el análisis de excedentes y se muestra el reparto de los excedentes generados; qué importe se ha compensado y qué importe no se ha compensado y por tanto se ha regalado a la red.

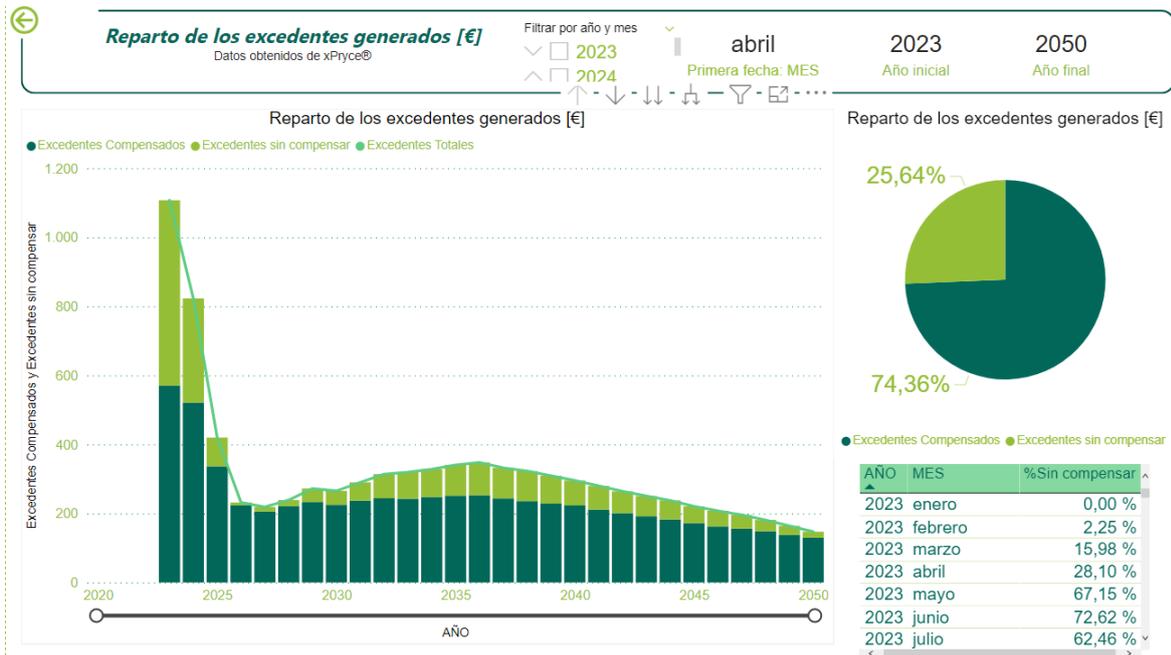


Ilustración 36. Caso Base: Reparto de los excedentes generados [€]. Importes compensado vs sin compensar [Elaboración propia, 2023]

En esta página se presenta sobre un gráfico de barras apiladas los excedentes totales, diferenciando entre la parte que se compensa (verde oscuro) y la parte que no (verde claro). Observamos su distribución a lo largo de los años y bajando un nivel más en el gráfico, se observaría su distribución mensual.

En el Pie chart se muestra el conjunto del reparto de excedentes para el periodo seleccionado. Se observa que para el periodo total de 2023-2050, tres cuartos de los excedentes se compensan y el otro cuarto se queda sin compensar.

Abajo en la tabla se muestra para cada mes el porcentaje de excedentes sin compensar. Se observa en la tabla como este porcentaje va aumentando durante los meses de mayo a octubre, coincidiendo con los meses en los que se regala mayor cantidad de energía a la red, como se había visto en la pestaña anterior. Lógicamente esto ha de coincidir, ya que en esta pestaña se analiza en profundidad los excedentes que se mostraban en la primera.

Para acabar con el análisis de excedentes, el informe cuenta con otra pestaña en la que se presentan los mismos gráficos que en la anterior, pero analizando los excedentes desde el punto de vista en energía generada, en vez de desde el punto de vista económico que se venía analizando hasta ahora.

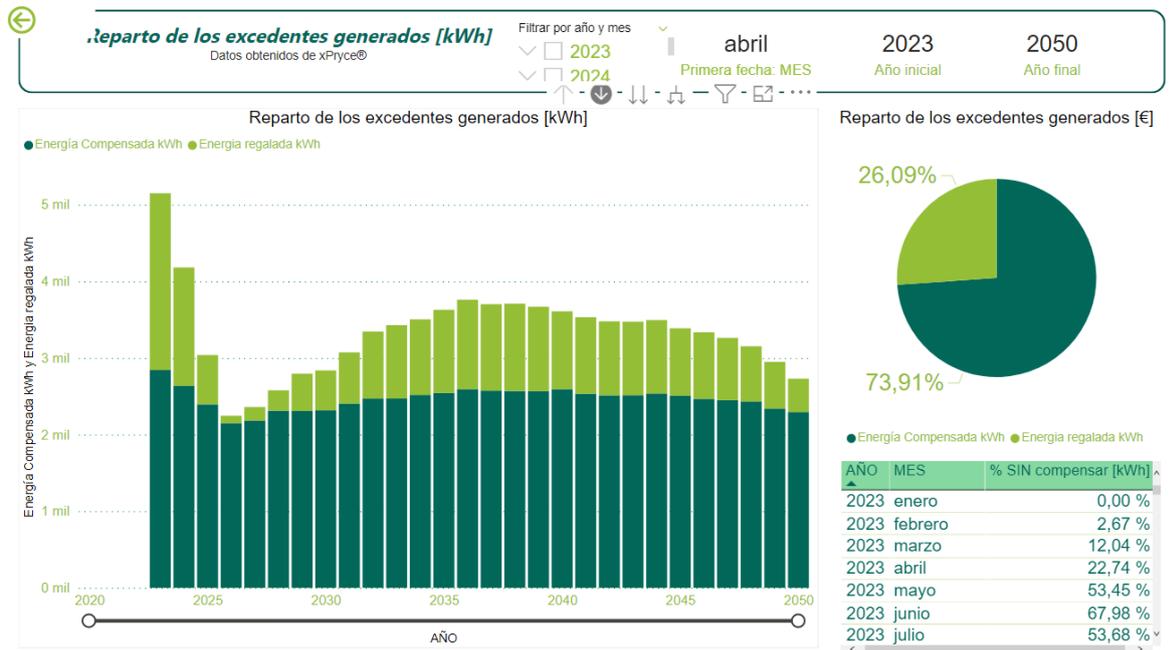


Ilustración 37. Caso Base: Reparto de los excedentes generados [kWh]. Importes compensado vs sin compensar [Elaboración propia, 2023]

La compensación de excedentes en el modelo (basado en el funcionamiento real) se realiza con importes en €, por lo que para pasar a kWh hay que realizar una conversión de unidades que permita obtener la energía equivalente a la que hacen referencia esos importes. La metodología seguida se presenta más adelante en el apartado 5.3 Análisis de excedentes.

6. Análisis de precios

Se incluye también en el informe una pestaña para visualizar el precio de la energía en todo el periodo, por ser datos fundamentales en el análisis de este trabajo.

Como se ha explicado anteriormente, las predicciones del precio del Mercado Diario provienen del modelo xPryce de Simulyde. Gracias a esta predicción de los precios de la energía se puede realizar el cálculo del PVPC.

En este apartado del informe se incluyen cuatro variables de precio diferentes que afectan al en el modelo de análisis de autoconsumo.

- Precio energía: el precio medio de la energía en cada mes (en el caso de usar los precios del mercado regulado, equivaldría al precio medio mensual del PVPC).
- Precio de los excedentes: Precio que aplica en la compensación de excedentes. Siempre es menor que el precio de la energía.

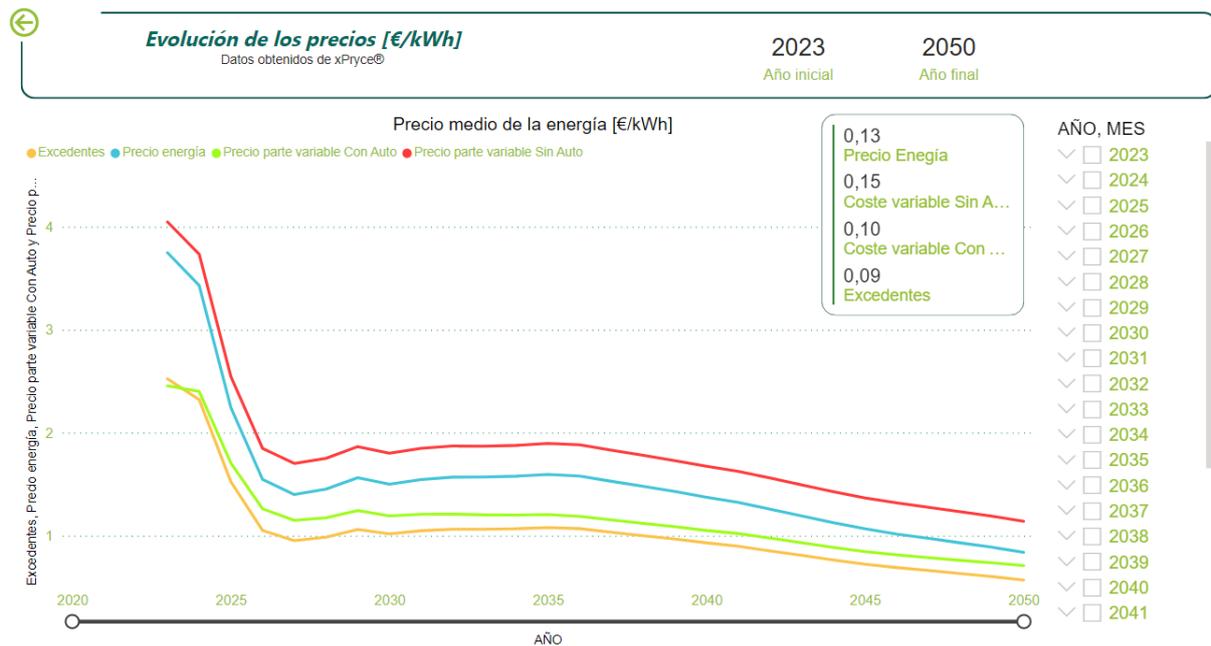


Ilustración 38. Caso Base: Precio de la energía aplicado en la Herramienta de Autoconsumo [€/kWh] [Elaboración propia, 2023]

A efectos prácticos, se incluye también un añadido del precio de la energía que representa el precio medio de la parte variable de la energía (tiene en cuenta el PVPC y los cargos y peajes variables). Es decir, incluye tanto el Precio de la energía, como los cargos y peajes variables. Estos datos se han calculado en el modelo y reflejan el dinero pagado por la energía consumida en cada caso.

- Precio medio real Con Autoconsumo: Agregado del precio de la energía más los cargos y peajes variables, en el caso de instalación de autoconsumo.

$$\text{Precio real C. A} = \frac{\text{Coste energía consumida } \text{€} + \text{Cargos y peajes VAR}}{\text{Energía consumida C. A}}$$

- Precio medio real Sin Autoconsumo: Agregado del precio de la energía más los cargos y peajes variables, en el caso de no tener instalación de autoconsumo.

$$\text{Precio real S. A} = \frac{\text{Coste energía consumida } \text{€} + \text{Cargos y peajes VAR}}{\text{Energía consumida S. A}}$$

Se puede observar en la gráfica que, en una instalación con autoconsumo, el precio efectivo por energía consumida es menor que el precio de la energía. Esto lo que implica es que gracias a la instalación de autoconsumo se ha conseguido pagar un precio menor que el del mercado regulado por cada kWh incluyendo los cargos y peajes.

Se ha decidido incluir estos datos de precios ya que a nivel practico son los valores de coste (€/kWh) que realmente aplican en la factura eléctrica, y sobre estos se produce la reducción de los excedentes.

También resulta interesante comentar cómo se prevé una bajada considerable de los precios de la energía en los próximos años. Tras los precios máximos alcanzados en 2022-2023, debido a diferentes factores políticos y socioeconómicos como la guerra de Ucrania o el Covid 19, se prevé que los precios se estabilicen y bajen en los próximos años, tal y como se muestra en la Ilustración 24.

7. Análisis de la inversión

En este apartado se presenta un análisis de la inversión en autoconsumo para el caso ejecutado. Con la inversión realizada, los precios y las tarifas seleccionadas y el consumo establecido se estudia qué rentabilidad se está obteniendo con la inversión en la instalación de autoconsumo, considerando el ahorro obtenido como los beneficios de la inversión.

Para realizar el análisis de la inversión se ha optado por el uso de las métricas financieras del VAN y la TIR, indicadores financieros que permiten determinar el beneficio y la rentabilidad de una inversión.

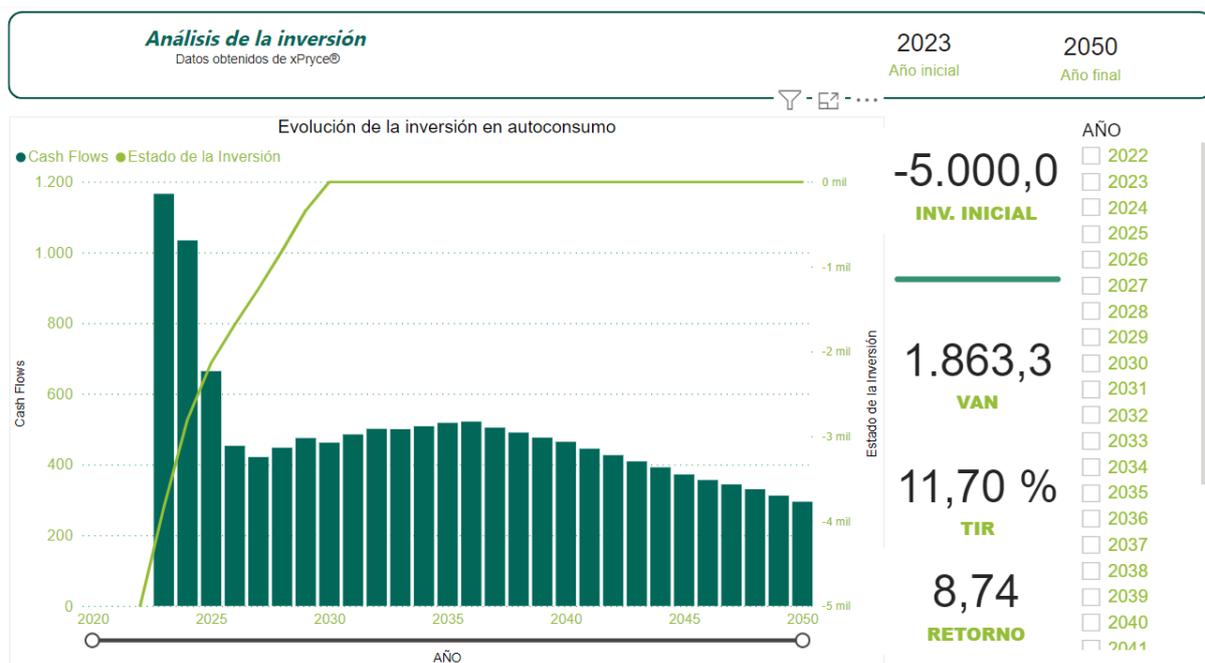


Ilustración 39. Análisis de la inversión en autoconsumo: VAN y TIR [Elaboración propia, 2023]

Se muestra una gráfica con la evolución de los flujos de caja del proyecto, dichos flujos de caja se corresponden al ahorro generado anualmente por la instalación de autoconsumo. Los primeros años los flujos son mayores, debido a que el ahorro es mayor puesto que los precios de la energía son más altos, a partir del año 2025 se observa como los flujos de caja se vuelven considerablemente más estables.

Esto demuestra que, ante situaciones de precios de la energía muy altos, derivadas de factores impredecibles, resulta muy rentable contar con instalaciones de autoconsumo, ya que permite

desligarse del mercado y ser ajeno a los altos precios. Los picos en el precio de la energía (como los vividos en los últimos años) son muy difíciles de predecir, pero, como se ha visto, no es imposible que ocurran ni que se repitan en los próximos años, por lo que el atractivo de este tipo de instalaciones aumenta considerablemente ante situaciones de desconocimiento, ya que permite cubrir el riesgo de precios extremadamente altos.

En la gráfica también se muestra la línea del estado de la inversión, en la que se muestra cómo se va recuperando esta con los años, hasta llegar a 0, en este caso alrededor del año 2030. Este periodo de tiempo que se tarda en recuperar la inversión inicial se conoce como el retorno de la inversión y se muestra también en el informe, a la derecha como valor numérico. Un retorno de 8,74 implica que en aproximadamente 9 años se ha recuperado toda la inversión.

Por último, se incluyen los valores obtenidos del VAN y de la TIR. El VAN representa el valor actual neto del conjunto de los flujos de caja futuros generado en el proyecto de inversión. Cuando es positivo indica que el proyecto es rentable ya que este genera más ingresos que el coste de capital invertido, en cambio cuando es negativo el proyecto no es rentable ya que no cubre el coste de la inversión realizada.

Por otro lado, la TIR proporciona la rentabilidad porcentual esperada de la inversión. Si el VAN determinaba si era rentable, la TIR determina cuánto. La TIR permite comparar la rentabilidad de diferentes inversiones. El inversor analizará la TIR obtenida y si esta es mayor a la tasa de retoro requerida y es atractiva frente a otras posibles inversiones disponibles en el mercado, el inversor se decantará por ese proyecto y no por otros.

En este caso se obtiene un VAN positivo y una TIR de 11,7%, un valor que cubre la tasa de descuento del 7% aplicada y que comparado con otras inversiones disponibles como las letras del tesoro español (generan alrededor del 3,3%) o los bonos a 5 años (3,4%²⁸), resulta mucho más atractivo.

Por último, en esta parte del informe se incluye también un análisis comparativo de las medidas de rentabilidad en los diferentes casos, de manera que se pueda ver como varían los valores del VAN y la TIR frente a las diferentes variables de entrada como la potencia instalada, la inversión inicial o la energía consumida.

5.2 ANÁLISIS DE LOS CASOS

En este apartado se presenta de manera más breve los resultados obtenidos en el resto de los casos ejecutados, centrándose sobre todo en el ahorro obtenido, la distribución de los excedentes y en el análisis de la inversión de cada caso.

²⁸ Según la página oficial del Tesoro Público del Gobierno de España. (diciembre 2023)

5.1.1 CASO A.II

Con respecto al caso base, en esta ejecución, aumenta la potencia instalada de 5kW a 7kW aumentando por tanto la inversión inicial de 5000€ a 6000€. A continuación, se presentan los principales resultados obtenidos.

En este caso, para más potencia, se espera un consumo mayor para poder rentabilizar ese incremento de la inversión inicial.

Con estos datos de entrada, se puede observar que se genera mucha más energía que la que realmente se necesita, de hecho, solo el 36% de la energía se usa para el consumo. Esto no es lo más eficiente ya que la energía que se vuelca a la red está valorada por mucho menos que la consumida.

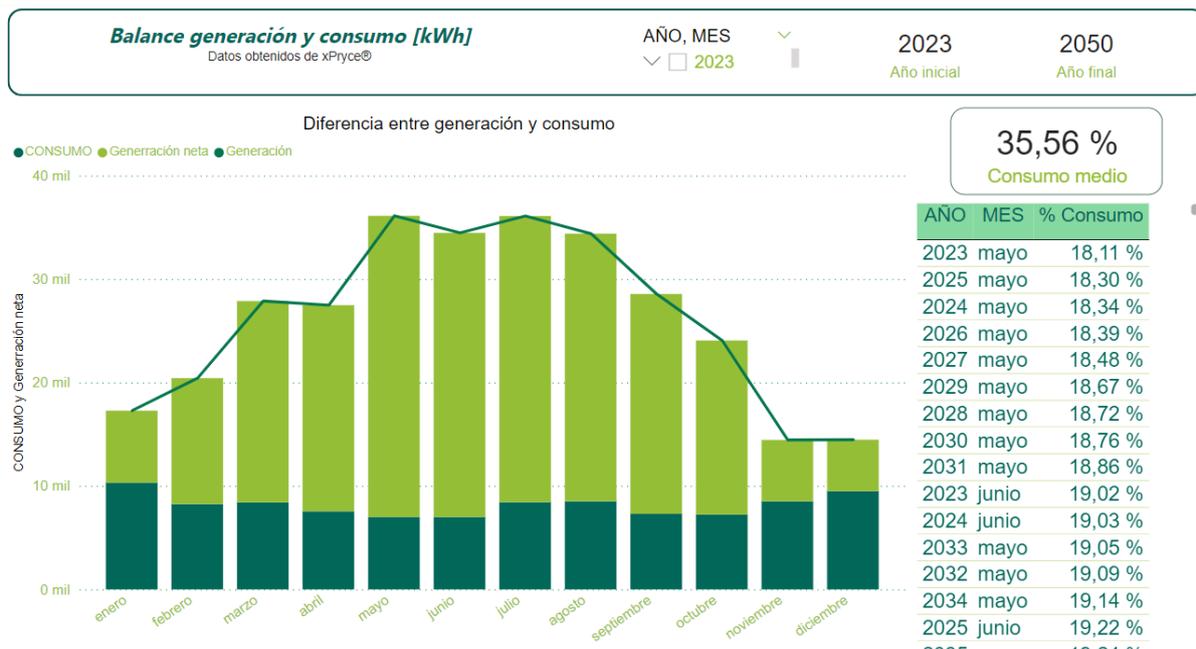


Ilustración 40. Caso A II: Balance generación y consumo [Elaboración propia, 2023]

El porcentaje de ahorro respecto a la factura si no hubiese autoconsumo es considerablemente alto; para este caso se está ahorrando casi el 75% de lo que costarían las facturas eléctricas si no hubiese instalación de autoconsumo instalada.

Analizando los excedentes se puede observar la consecuencia de generar mucha más energía de la consumida: gran parte de esta energía se vuelca a la red en forma de excedentes, pero una vez se llega al máximo se dejan de percibir dichos excedentes, resultando en que un 41% de la energía en este caso, no ha sido compensada.

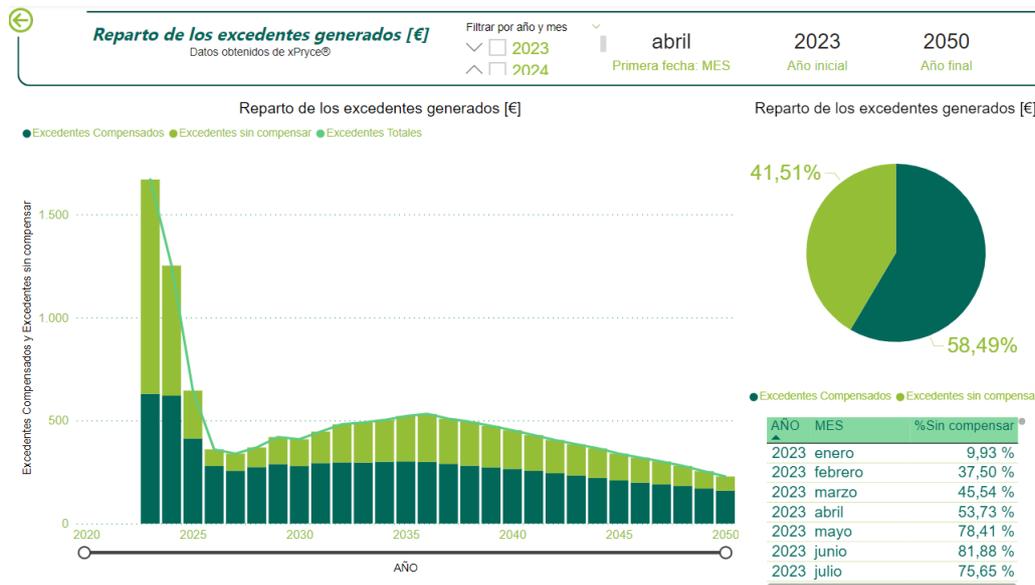


Ilustración 41. Caso A II: Reparto de los excedentes generados [Elaboración propia, 2023]

La inversión sigue siendo rentable pero las métricas de análisis son ligeramente peores que las obtenidas en el caso base.

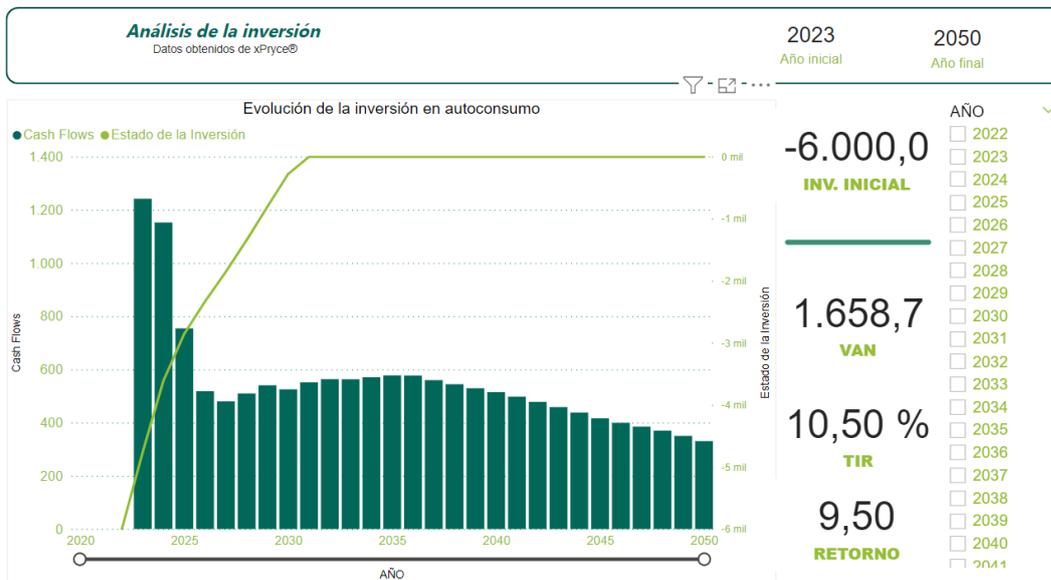


Ilustración 42. Caso A II: Análisis de la inversión [Elaboración propia, 2023]

En este caso en el que el consumo es constante con respecto al caso base, pero se aumenta la capacidad instalada observamos que, aunque se puede generar más energía, esta se desperdicia mucho más, habiendo muchos más excedentes sin compensar en este caso. Esto unido a que la inversión inicial es mayor, conlleva que la inversión (aunque sigue siendo rentable) es peor en términos de rentabilidad que la del caso base, ya que se tarda más en recuperar la inversión y la TIR obtenida es ligeramente menor.

5.1.2 CASO A.III

El caso ejecutado presenta la misma potencia instalada que el caso base (5kw) por lo que la inversión es también la misma y un consumo anual considerablemente más alto, pasando de los 3500kwh a 5500 kWh.

Con respecto al caso anterior, en el que se veía que la potencia instalada era demasiada, se ha bajado de nuevo la potencia a los 5kw iniciales manteniendo el consumo más elevado, para determinar si con los 5 kW se puede hacer frente a 5500 kWh de consumo anual rentabilizando al mismo tiempo la inversión en la instalación de autoconsumo.

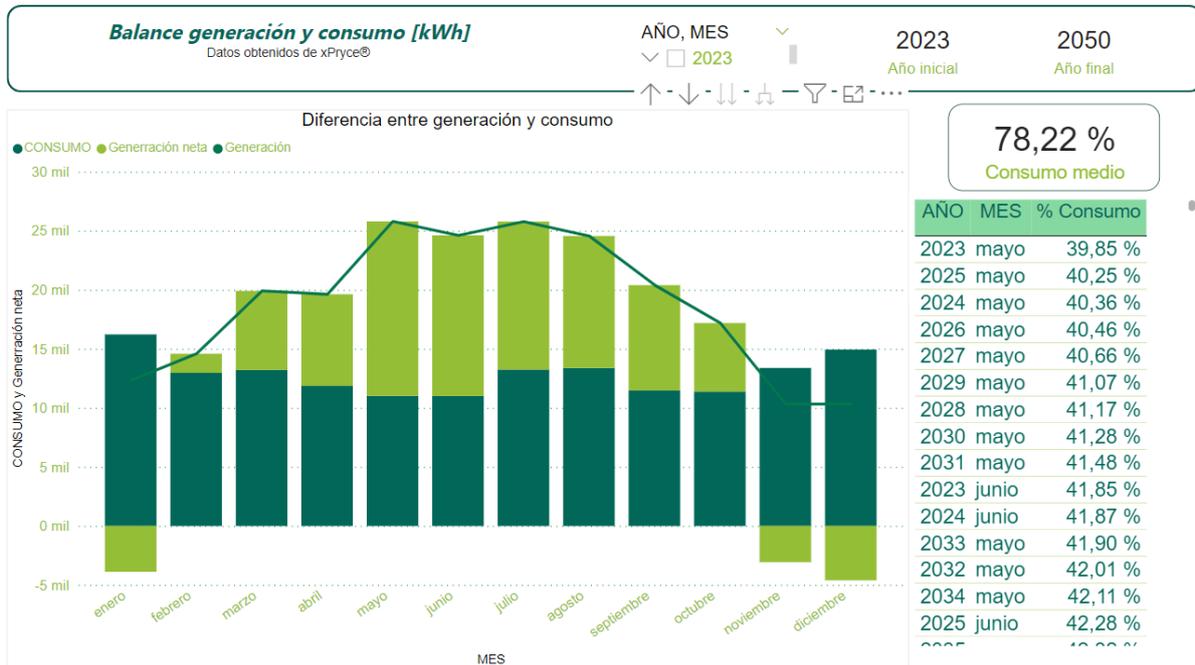


Ilustración 43. Caso A III: Balance generación y consumo [Elaboración propia, 2023]

Si se observa el balance de generación y consumo observamos como en este caso hay meses en los que ni siquiera se ha llegado a cubrir el consumo con lo generado (la gráfica mostrada es el agrupado de todos los meses de entre 2023 y 2050, representando así unos valores resumen de todo el periodo). Esto implica que se realiza una generación mucho más acorde a las necesidades de consumo del domicilio.

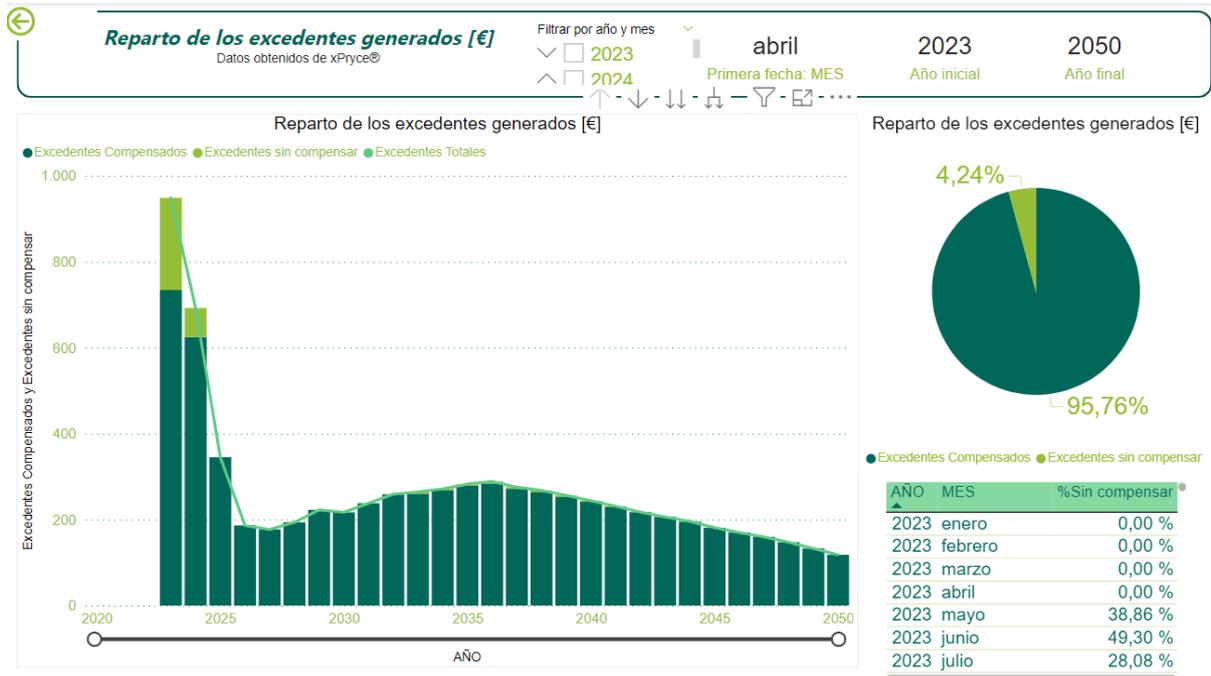


Ilustración 44. Caso A III: Reparto de los excedentes generados [Elaboración propia, 2023]

Respecto al caso anterior, con estos datos de entrada se pretende optimizar la generación de la instalación de autoconsumo para que el consumo vaya más acorde a las necesidades reales, de manera que se generen menos excedentes no compensados.

En este caso únicamente se dejan de percibir el 4,24% de los excedentes generados lo que optimiza notablemente la instalación. Para llegar a estos valores habrá muchos meses en los que se podría haber generado más cantidad de energía para cubrir el consumo, pero un aumento de potencia para ello implica que también se genere más energía en los momentos en los que el domicilio no puede consumirla y observando los resultados de este caso se puede concluir que resulta más eficiente adaptar la potencia instalada al consumo de manera que la generación no sea mucho mayor que el consumo.

Además, cuanto mayor sea la potencia instalada mayor es la inversión inicial, lo que perjudica los retornos de la inversión, por lo que en este caso en el que se mantienen los 5kW de potencia instalada, la inversión inicial no aumenta con respecto al caso base, y al haber optimizado los excedentes se llega a resultados de rentabilidad considerablemente mejores.

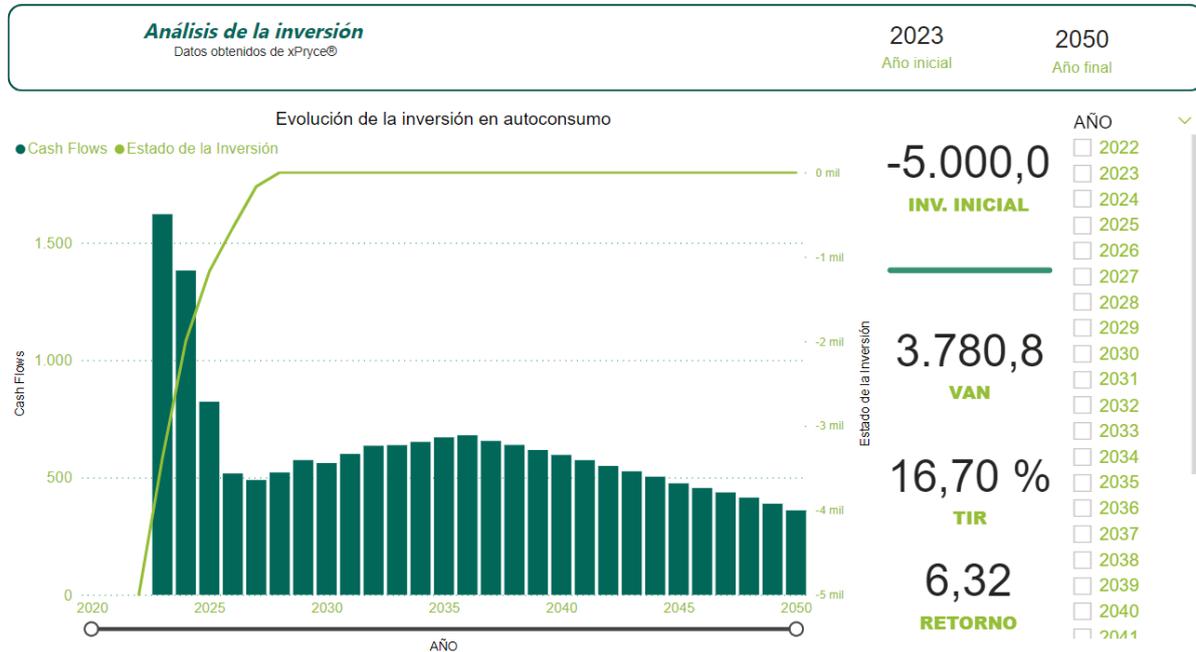


Ilustración 45. Caso A III: Análisis de la inversión [Elaboración propia, 2023]

5.1.3 CASO A.IV

La potencia instalada se encuentra en 7kw y el consumo en 5500kwh anuales. Con respecto al caso base se han aumentado ambas medidas y con respecto al caso anterior se ha aumentado la potencia instalada manteniendo el consumo.

Con respecto a la inversión inicial, esta va acorde a la potencia instalada, por lo que ha aumentado respecto al caso base y respecto al caso anterior, estando en un valor de 6000€.

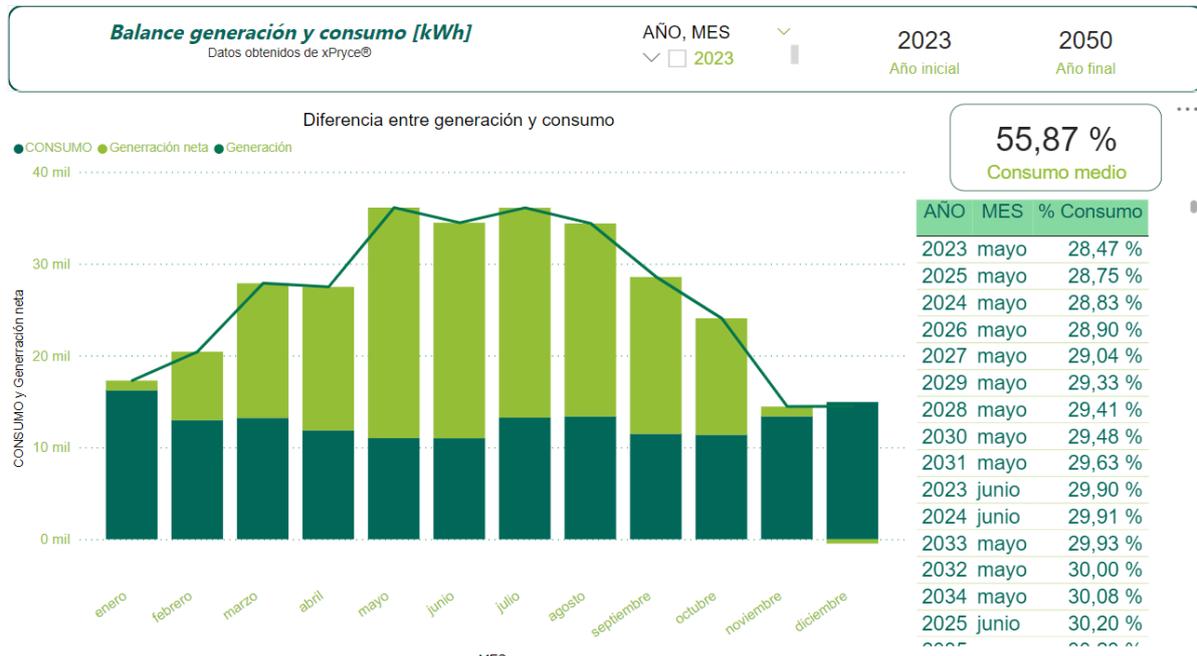


Ilustración 46. Caso A IV: Balance generación y consumo [Elaboración propia, 2023]

Como era de esperar el consumo medio disminuye respecto al caso anterior, estando en un 56% aproximadamente puesto que con una mayor cantidad de potencia instalada la energía generada aumenta. Si se compara con el caso base, el porcentaje de consumo frente a la generación es mayor en este caso puesto que el consumo anual de la vivienda es mayor.

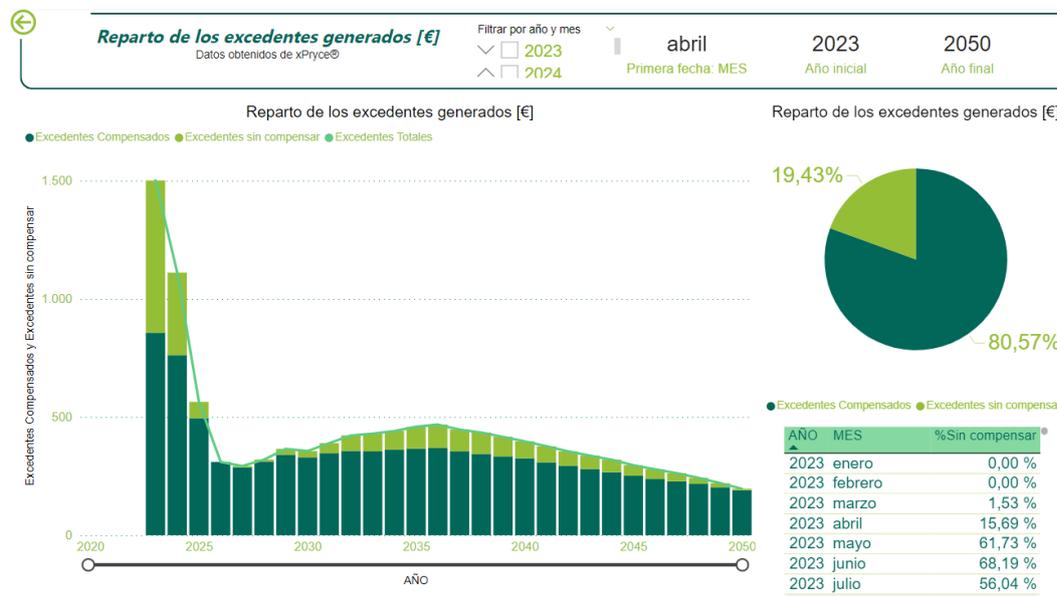


Ilustración 47. Caso A IV: Reparto de los excedentes generados [Elaboración propia, 2023]

Con respecto a la distribución de excedentes, se acerca más al caso base que al caso anterior. Se vierte a la red sin compensación casi el 20% de los excedentes generados.

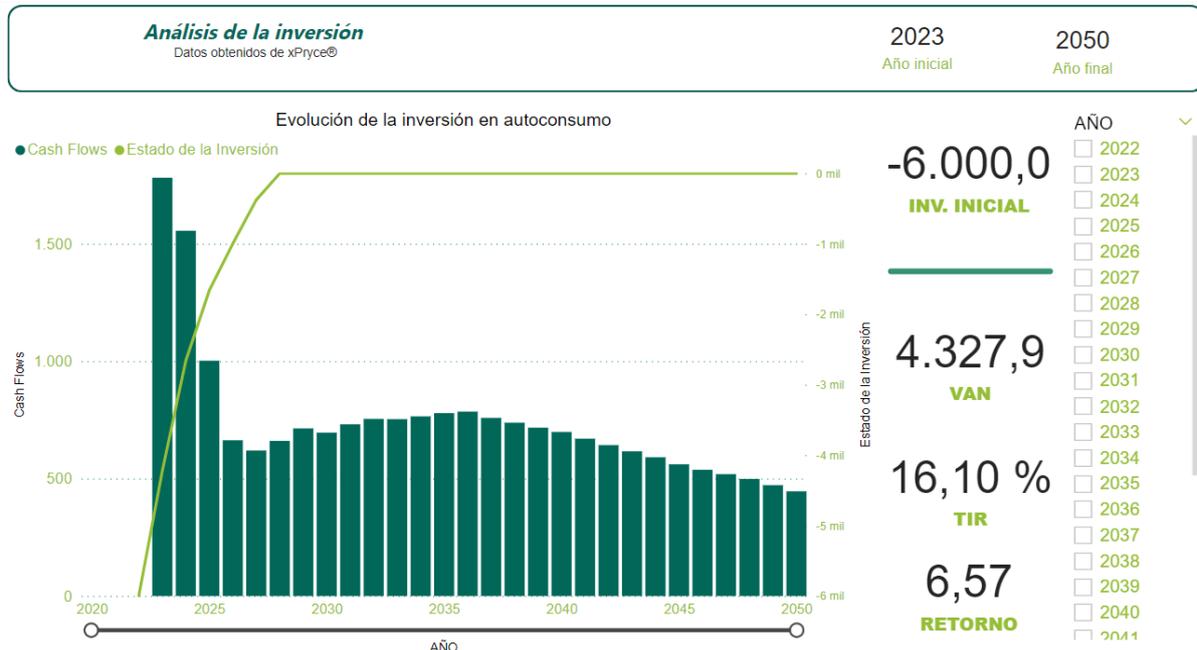


Ilustración 48. Caso A IV: Análisis de la inversión [Elaboración propia, 2023]

Con todo esto, se puede observar que la inversión se recupera en menos de 7 años y con una rentabilidad del 16%, quedando por encima del caso base, pero por debajo del caso A III. Por lo que se puede concluir que para un mismo consumo de 5500 kWh anuales resulta más interesante tener una potencia instalada más baja para rentabilizar la inversión.

5.1.4 CASO A.V

Para este último caso del mercado regulado, se analiza un consumo anual mayor (6500 kWh) para una potencia instalada de 8kw, lo que implica una mayor inversión inicial, concretamente de 6500€.

El porcentaje de consumo respecto a la energía generada es considerablemente bueno (en torno al 58%), lo que para una instalación de autoconsumo es normal. En los meses de invierno prácticamente se igualan generación y consumo, al disminuir la generación debido a las horas de sol.

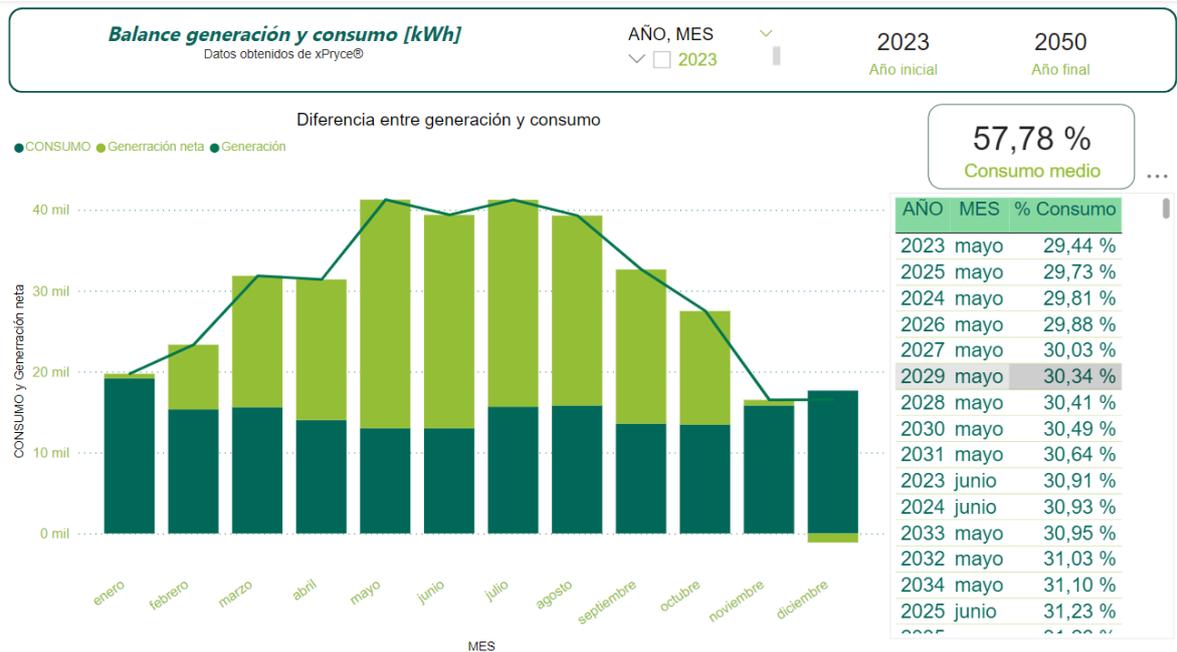


Ilustración 49. Caso A V: Balance generación y consumo [Elaboración propia, 2023]

Puesto que la potencia instalada es coherente con el consumo anual de la vivienda, se observa que la mayor parte de los excedentes generados se compensa, por lo que se está haciendo un uso eficiente de la energía generada, en vez de regalar a la red gran parte de ella.

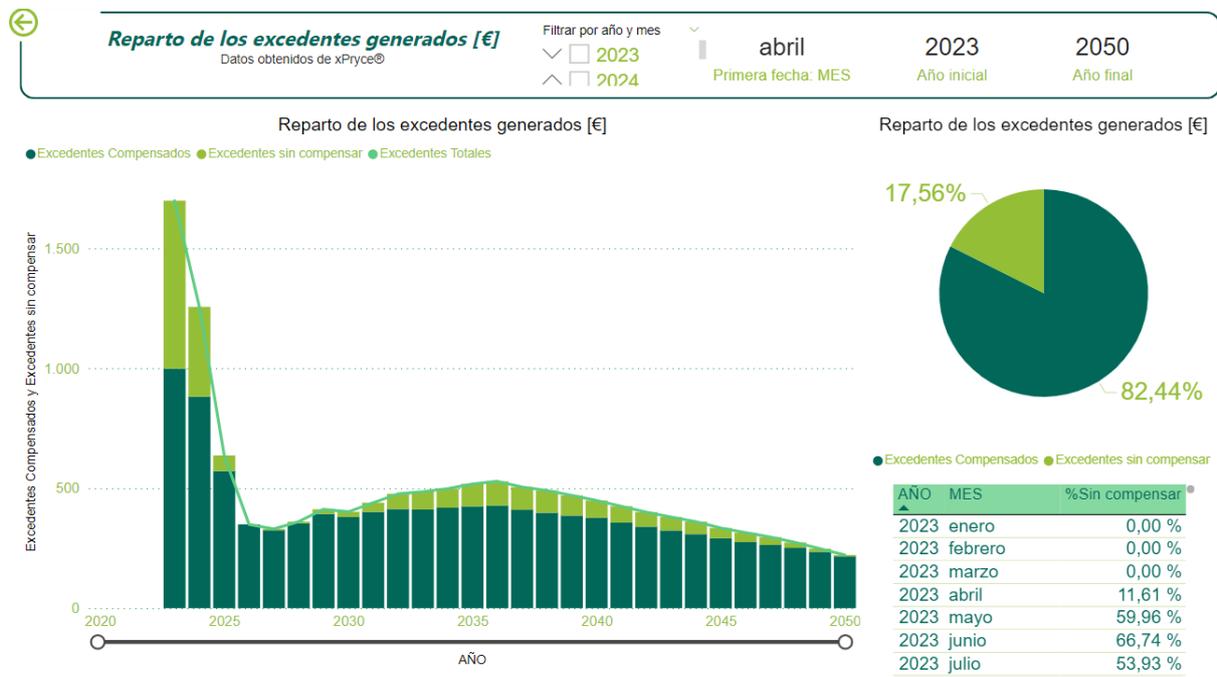


Ilustración 50. Caso A V: Reparto de los excedentes generados [Elaboración propia, 2023]

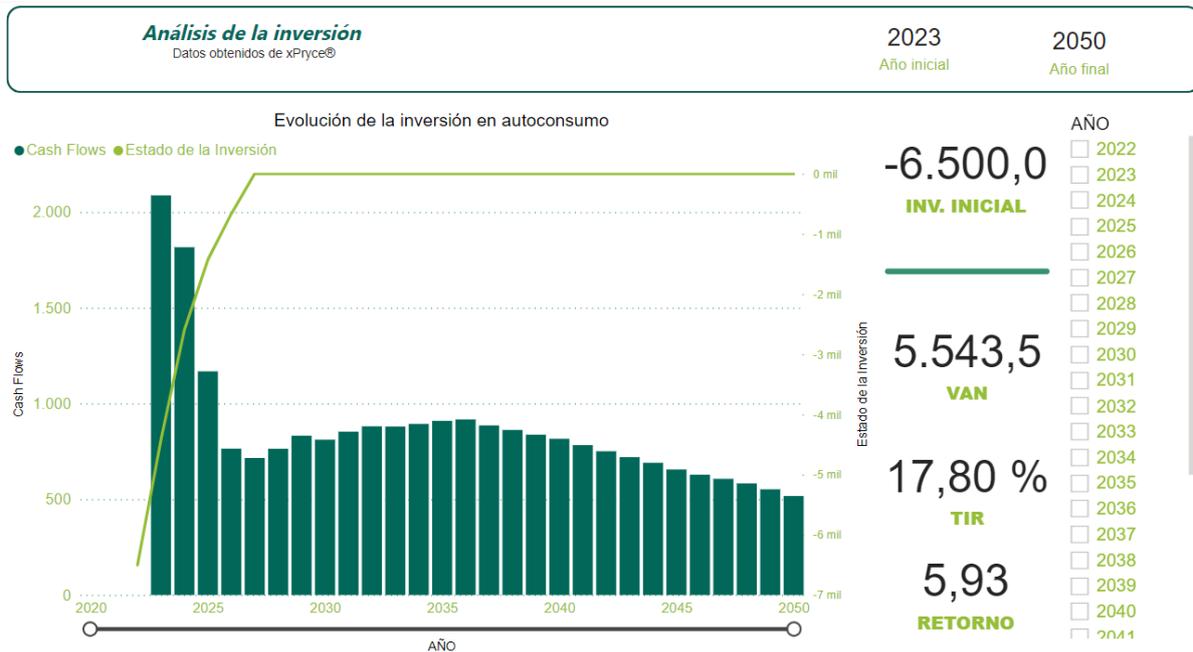


Ilustración 51. Caso A V: Análisis de la inversión [Elaboración propia, 2023]

La rentabilidad obtenida es, sin duda, la más alta de los casos ejecutados hasta el momento, lo cual se debe a varias razones. En primer lugar, la potencia instalada va acorde al consumo de la vivienda, por lo que no se vuelca excesiva energía a la red que se queda sin compensar.

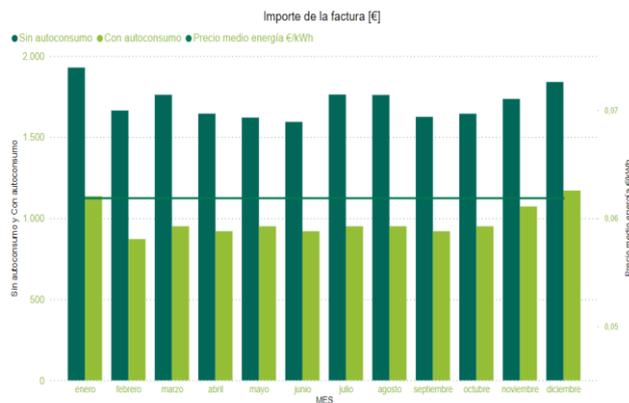
Por otro lado, el ahorro en este caso es mayor que en los otros, puesto que, si no hubiese instalación de autoconsumo, consumir 6500 kWh anuales supondría unos costes mayores que consumir los 5500 kWh que se consumían en el caso A II. De hecho, el caso A II presenta un reparto óptimo de los excedentes, ya que presenta menos energía que se queda sin compensar, pero en consecuencia al haber generado menos, también pierde parte del ahorro. Por ello la rentabilidad de este caso es ligeramente mayor y el retorno de la inversión más rápido.

El objetivo está en encontrar el equilibrio entre las variables de entrada que permitan optimizar el ahorro y la distribución de excedentes para maximizar la rentabilidad de la inversión. Como se ha podido observar hasta ahora se trata de una línea muy fina la que separa los mejores casos.

5.1.5 CASO B.I

Los siguientes dos casos se corresponden con el mercado libre, en el que existe un único precio para la energía consumida que se pacta con la comercializadora correspondiente. Para la ejecución del caso se han seleccionado los precios ofertados por Endesa²⁹.

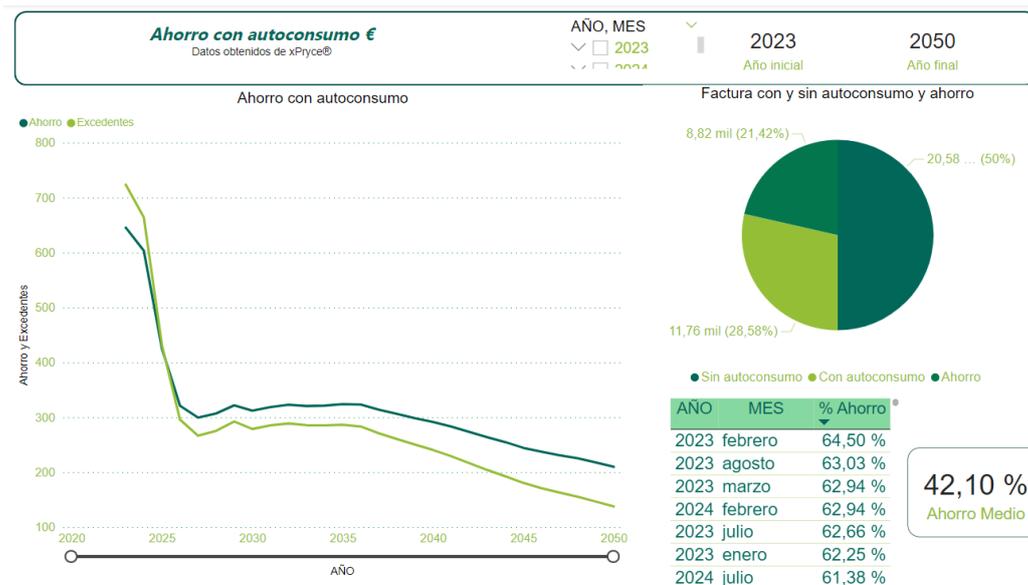
El resto de las variables de entrada se han mantenido iguales a las del caso base (potencia instalada 5 kW, energía consumida 3500 kWh/año, potencia contratada 4,4 y 5,5 kW), de manera que las ejecuciones del Caso B se comparen con el caso base y entre ellas.



Se observa que, para las condiciones pactadas, el precio es fijo de forma anual. El modelo indexa el precio pactado a la variación del mercado diario según xPryce, pero dicha variación se calcula de manera anual, por lo que los precios son fijos cada año. Observando la siguiente imagen se puede ver cómo el precio es constante para todos los meses del año, aunque para cada año sea un precio diferente.

Ilustración 52. Caso B I: Importe de la factura y precio

El consumo medio en este caso es muy similar al del caso base, se encuentra en torno al 45% de la energía generada por lo que el consumo representa una buena parte de la generación. La diferencia entre este caso y el caso base, radica en el ahorro que se puede obtener.



²⁹ Obtenidos en diciembre de 2023, de su pagina web oficial, Donde publican las tarifas que ofertan con los precios de potencia y de energía.

Ilustración 53. Caso B I: Ahorro obtenido con la instalación de autoconsumo PV [Elaboración propia, 2023]

Se puede observar en la imagen, que el ahorro con respecto a la factura sin autoconsumo es del 42%, mientras que en el caso base se alcanzaba un 67%. Esta notable disminución en el ahorro se debe a que el precio fijo perjudica la rentabilidad de la instalación de autoconsumo, ya que esta se basa en el ahorro con respecto a los momentos de precio más altos de la energía.

Además, las tarifas fijas van acompañadas de unos cargos extras por potencia que se cobran diariamente. El gasto procedente de este nuevo cargo perjudica enormemente la rentabilidad de la instalación, ya que sobre él no pueden actuar los excedentes generados, por lo que es un gasto fijo añadido que se debe de pagar en la factura independientemente de la generación de la instalación. El concepto de añadir un gasto fijo a la factura eléctrica va en contra de la optimización de la instalación de autoconsumo, ya que es un concepto que no se puede rebajar.

Con respecto al reparto de los excedentes generados, se observa que también empeoran con respecto al caso base en el que solo se dejaban de compensar el 25%, mientras que en este caso se alcanza un 52% de los excedentes sin compensar. Esto es también consecuencia del gasto fijo añadido, ya que hay menos importe en la factura sobre el que puedan actuar los excedentes.

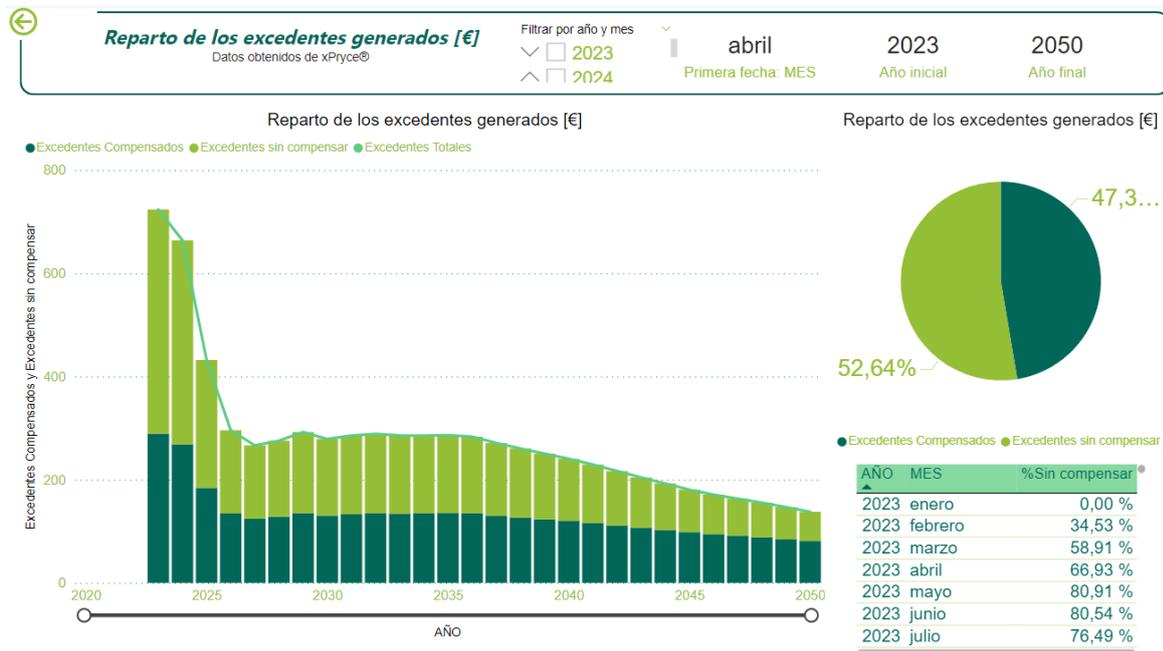
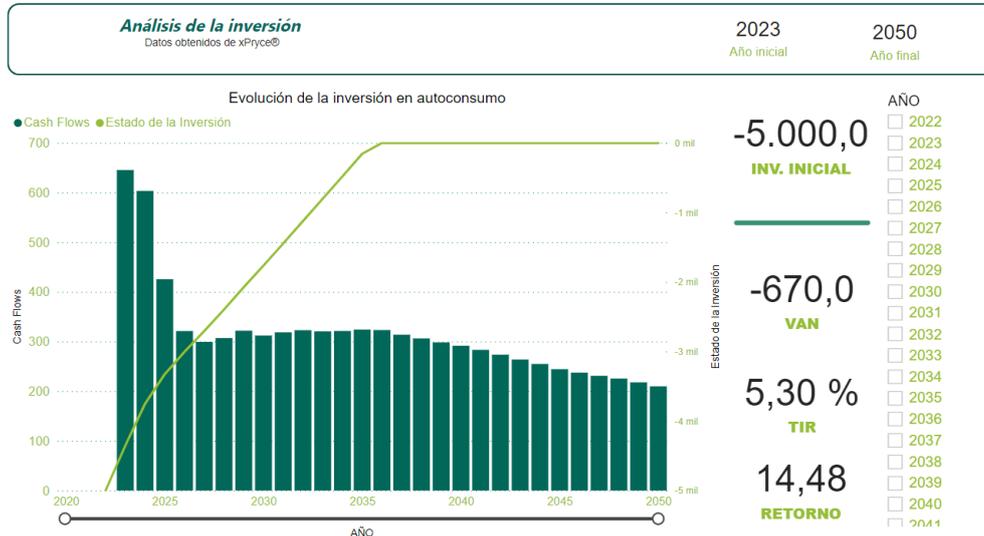


Ilustración 54. Caso B I: Reparto de los excedentes generados [Elaboración propia, 2023]

Con todo esto al analizar la inversión se puede ver que para este caso no es rentable, ya que presenta un VAN negativo y se puede ver que el tiempo de retorno es muy alto.

En definitiva, con estas condiciones de precios y costes de inversión no resulta interesante desde el punto de vista económico, lo cual se debe que la rentabilidad de una instalación de



autoconsumo está en disminuir al máximo los costes fijos de la factura y optimizar la generación con el consumo para autoabastecerse lo máximo posible.

Ilustración 55. Caso B I: Análisis de la inversión [Elaboración propia, 2023]

5.1.6 CASO B.II

Para esta ejecución del modelo se toman los datos de la Tarifa ofrecida por Iberdrola para una potencia instalada de 8kW y un consumo mayor de 6500 kWh anuales (mayor que en el caso anterior).

A diferencia del caso anterior, en este, la inversión si se considera rentable desde el punto de vista financiero, ya que las métricas del VAN y del TIR son optimistas, como se puede observar en la imagen.

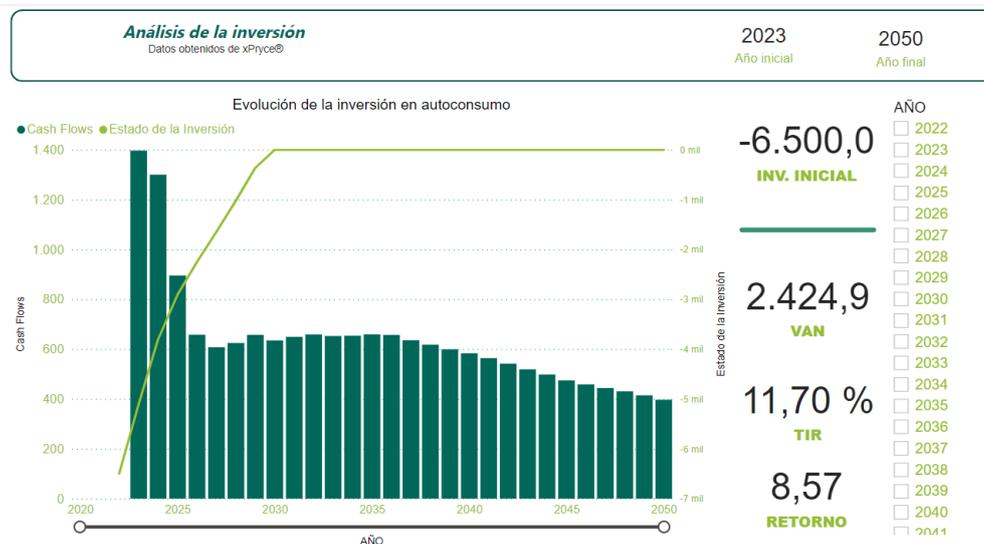


Ilustración 56. Caso B II: Análisis de la inversión [Elaboración propia, 2023]

Las razones que hacen que este caso sí que sea rentable con respecto al anterior son varias. En primer lugar, es importante las diferencias en las variables de entrada de ambos casos. Para el caso B.II, la potencia instalada es mayor porque el consumo es mayor y como se ha visto a lo largo del trabajo, cuanto mayores son el consumo y la potencia instalada, más rentable es la instalación, siempre que se haga un consumo óptimo de la generación. Aun siendo los precios de este caso ligeramente mayores que los pactados en el caso B.I, el ahorro conseguido para las condiciones establecidas es mayor, aumentando notablemente la rentabilidad de la instalación.

Por otro lado, aumenta también la proporción de energía que se usa para el consumo individual. Casi el 60% de la energía generada se usa para el consumo lo que implica pocas “pérdidas” en forma de excedentes compensados (no son estrictamente pérdidas, pero están valorados a menor precio) y sin compensar.

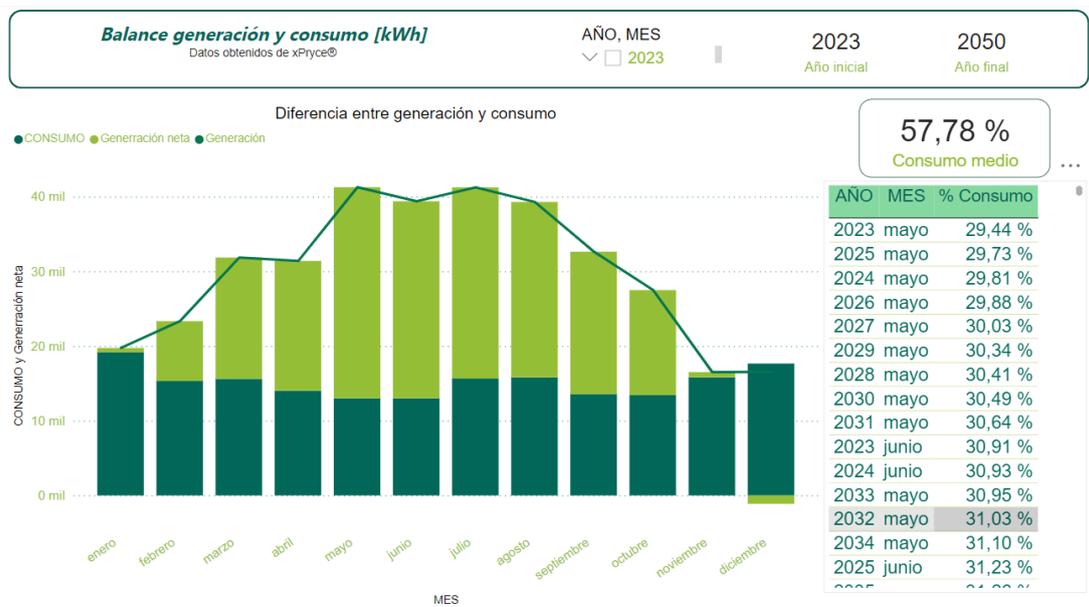


Ilustración 57. Caso B II: Balance generación y consumo [Elaboración propia, 2023]

El ahorro obtenido respecto a la factura sin autoconsumo es del 47%, también mayor que en el caso anterior (42%). Aunque el aumento no sea drástico hay que considerar que, debido a las necesidades de consumo de este caso, la factura presenta valores mensuales considerablemente mayores, por lo que el mismo porcentaje de ahorro implica un flujo ahorro anual numéricamente mayor.

Otro punto que mejora mucho en este caso es el reparto de excedentes. De toda la energía que no se usa para consumo el 92% se compensa en forma de excedentes, disminuyendo el importe de las facturas mensuales. Este uso optimizado de los excedentes afecta positivamente a la rentabilidad de la instalación.

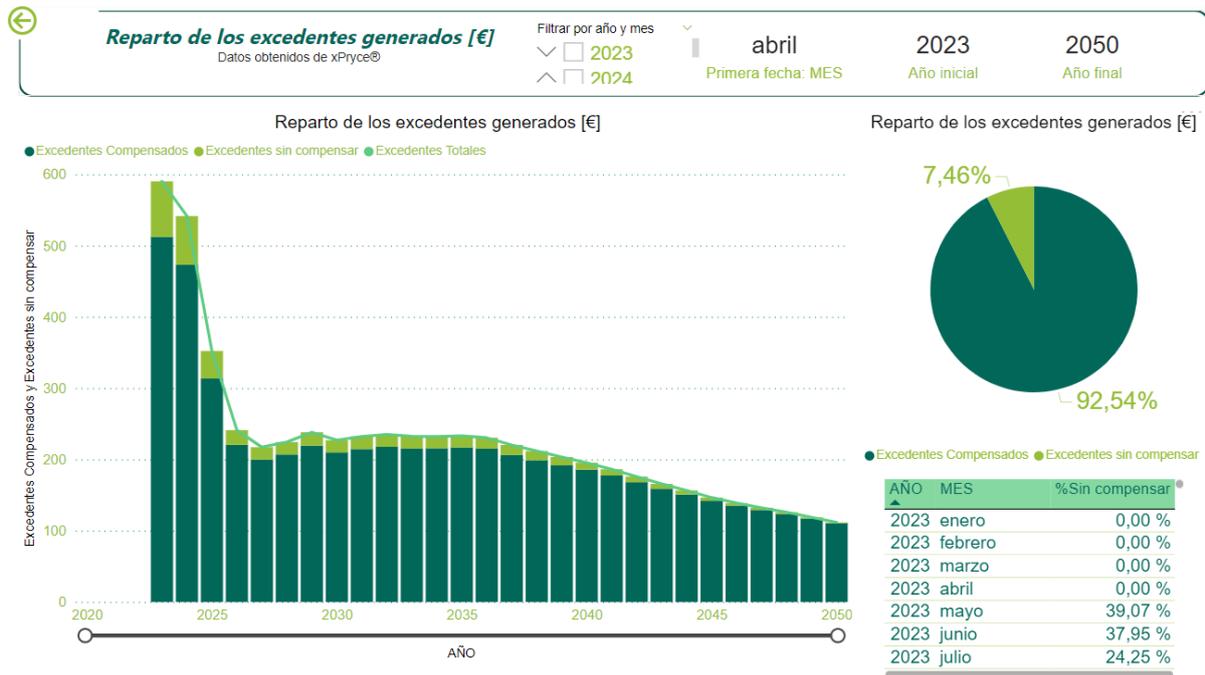


Ilustración 58. Caso B II: Reparto de los excedentes generados [Elaboración propia, 2023]

En definitiva, lo que hace que este caso sea rentable y el Caso B I no, son fundamentalmente dos factores. El primero, que se consigue usar más de la mitad de la energía generada para el consumo de la vivienda y el segundo, que del resto de energía se compensa en forma de excedentes, es decir, se ha aprovechado de una manera u otra casi toda la energía generada. Este es el objetivo último que hay que perseguir para optimizar una instalación de autoconsumo: aprovechar toda la energía generada.

5.1.7 CASO C.I

El Caso C aplica a pequeñas y medianas empresas con consumos anuales mayores y a los que aplica la Tarifa 3.0TD. Para este tipo de tarifas solo aplica el mercado libre y las potencias instaladas han de ser mayores de 15 kW.

El perfil de consumo asociado también difiere del de la tarifa 2.0TD, ya que deja de ser el perfil de consumo típico de una vivienda, para ser un consumo representativo de una pequeña empresa.

Para el primer caso de este grupo se ha considerado una energía anual consumida de 15000 kWh, una potencia instalada de 15 kW y una potencia contratada media en los seis periodos de 6,4 kW.

En los resultados de esta ejecución se observan valores muy buenos de consumo medio y de ahorro respecto a la factura sin autoconsumo. De toda la energía generada el 68% se usa para cubrir el consumo de la pyme, lo que implica que el consumo de la red disminuye mucho,

favoreciendo los costes de la factura. En la imagen siguiente, se puede ver que el ahorro conseguido gracias a la instalación de autoconsumo es del 61%, lo que refleja que de media en todo el periodo, se consigue reducir la factura en un 61%.

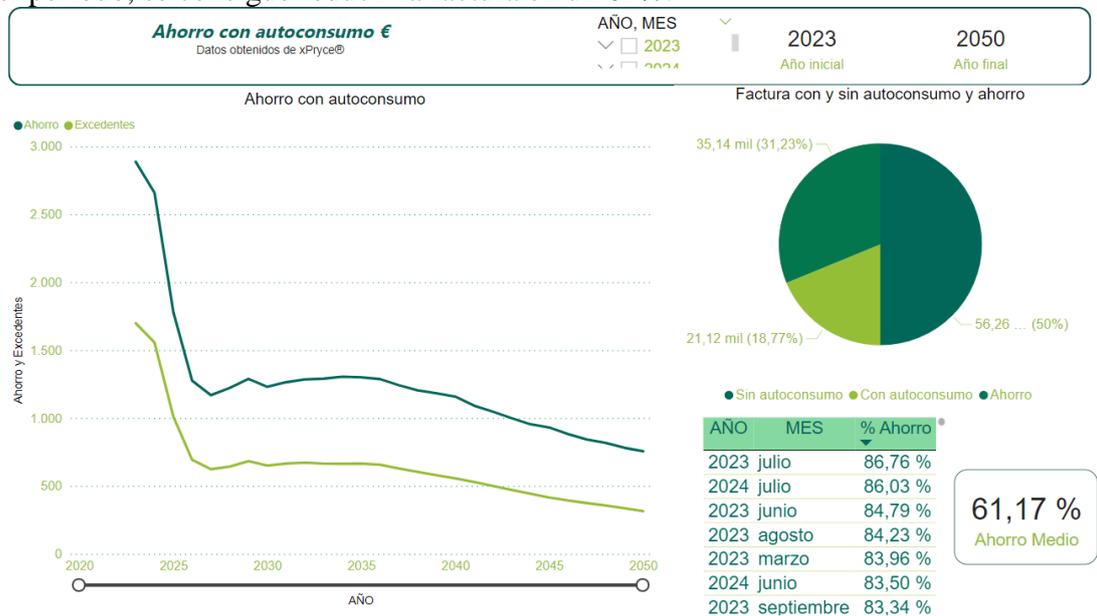


Ilustración 59. Caso C I: Ahorro obtenido con la instalacion de autoconsumo PV [Elaboración propia, 2023]

Se observa en el grafico circular, que la conversión de la factura sin autoconsumo es mayoritariamente ahorro y el 40% restante lo representa el importe de la factura con autoconsumo.

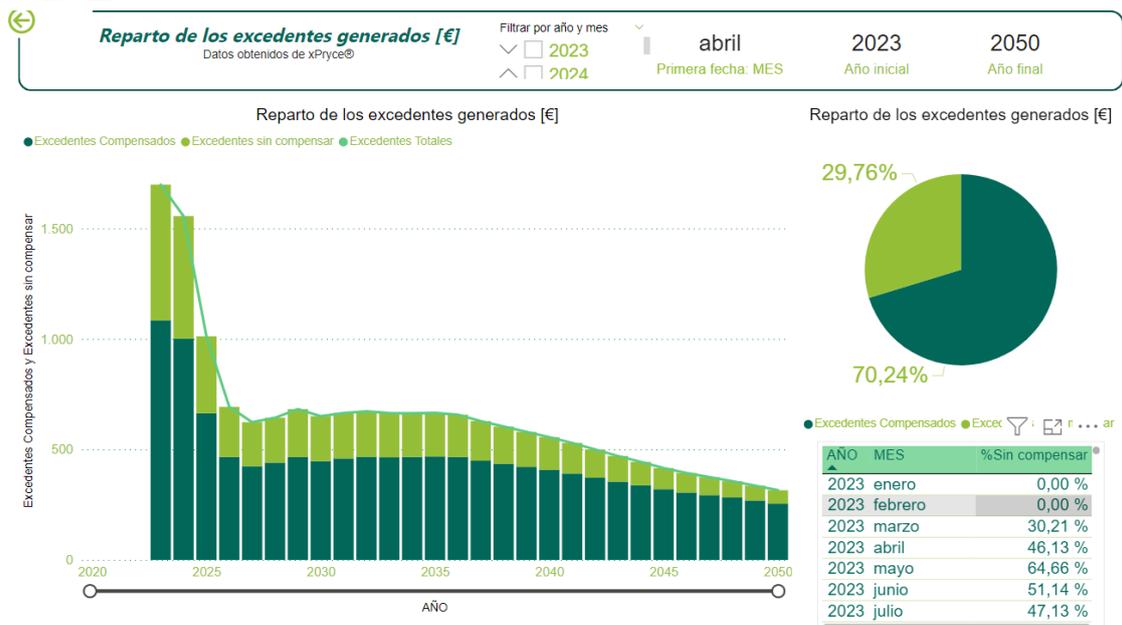


Ilustración 60. Caso C I: Reparto de los excedentes generados [Elaboración propia, 2023]

Respecto al reparto de excedentes se puede ver que la mayor parte de estos se consiguen compensar, quedando casi el 30% restante sin compensación. Si bien no es el mejor caso en cuanto al reparto de excedentes, la proporción es considerablemente buena y unido al buen aprovechamiento de la energía generada, configuran un caso rentable desde el punto de vista de la inversión.

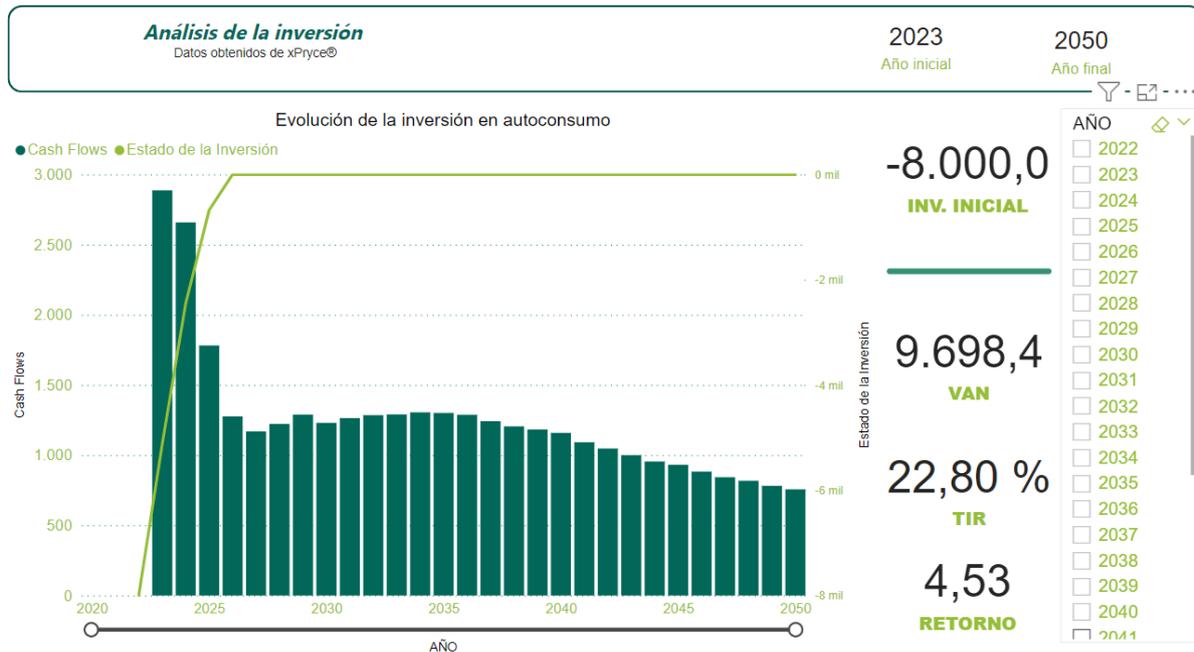


Ilustración 61. Caso C I: Análisis de la inversión [Elaboración propia, 2023]

Las métricas de análisis de la inversión presentan los mejores resultados en cuanto a rentabilidad de todos los casos ejecutados hasta el momento. El retorno de la inversión es muy rápido, gracias a que los primeros años el ahorro es notable, puesto que el precio de la energía se encuentra fuera de los parámetros normales, lo que rentabiliza notablemente una instalación de autoconsumo.

5.1.8 CASO C.II

En este caso, manteniendo los precios de la energía y de potencia del caso C.I, se aumenta el consumo anual hasta 18000 kWh y aumenta la potencia instalada hasta 17kW.

La primera mejora que se observa respecto al caso anterior está en que se consigue hacer un uso más efectivo de la energía generada, ya que se consume casi un 73% de toda la energía. Se puede ver en la gráfica que durante los meses de invierno (menos luz solar), el consumo supera a la generación, lo cual representa que la instalación no está sobredimensionada, ya que conviene no generar mucha más energía de la que se puede usar.

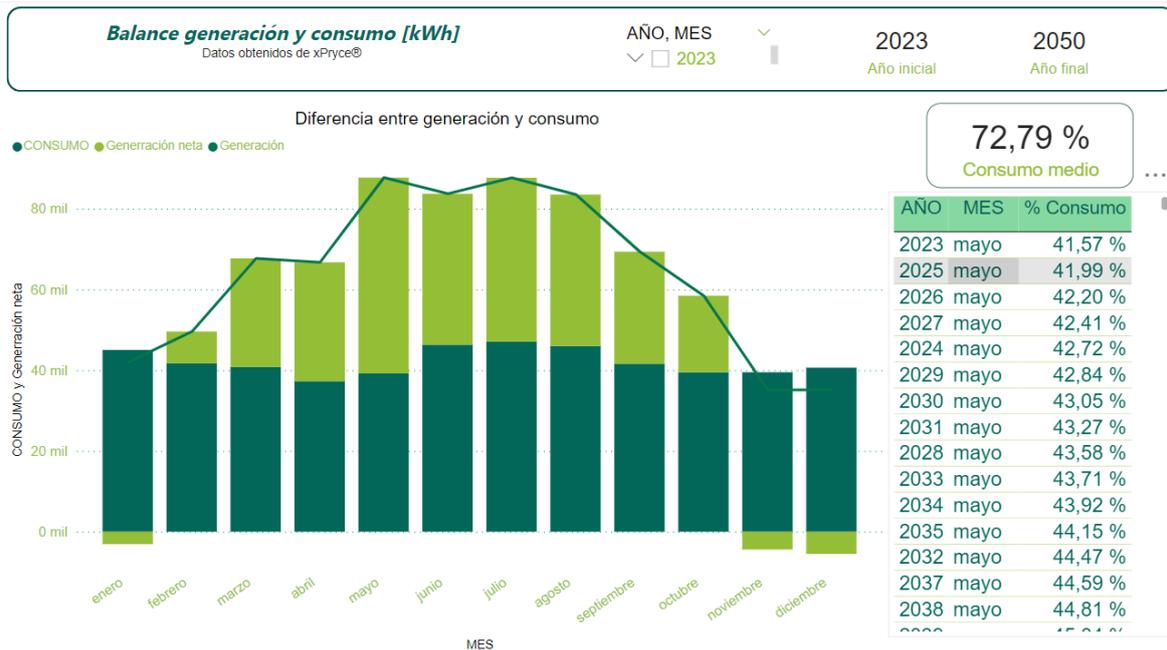


Ilustración 62. Caso C II: Balance generación y consumo [Elaboración propia, 2023]

El porcentaje de ahorro que se consigue respecto a la factura sin autoconsumo es del 62%, por lo que es prácticamente igual al caso anterior. Aunque la proporción de ahorro sea la misma, el importe no lo es, ya que en este caso al tener un consumo mayor la factura es mayor (tanto con autoconsumo como sin él) que en el caso anterior, lo que supone que una misma porción de ahorro suponga un importe ahorrado mayor.

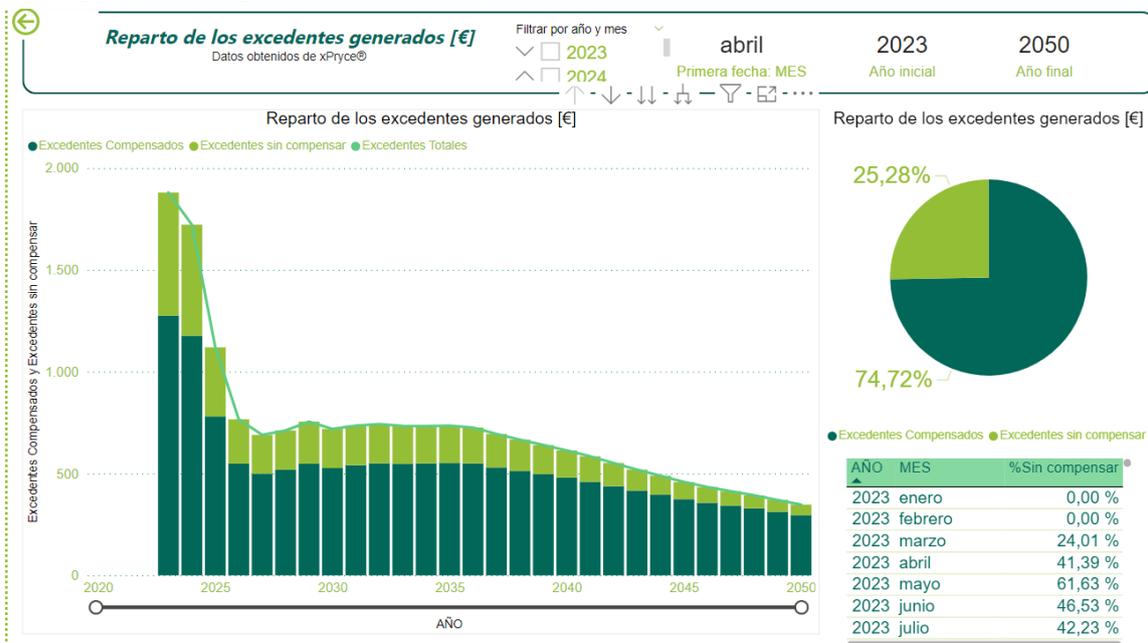


Ilustración 63. Caso C II: Reparto de los excedentes generados [Elaboración propia, 2023]

El uso de la energía excedentaria también mejora respecto al caso C.I, consiguiendo aprovechar en forma de excedentes casi el 75% de toda la energía que no se ha podido usar para el consumo. Con todo esto, el análisis de la inversión queda de la siguiente forma.

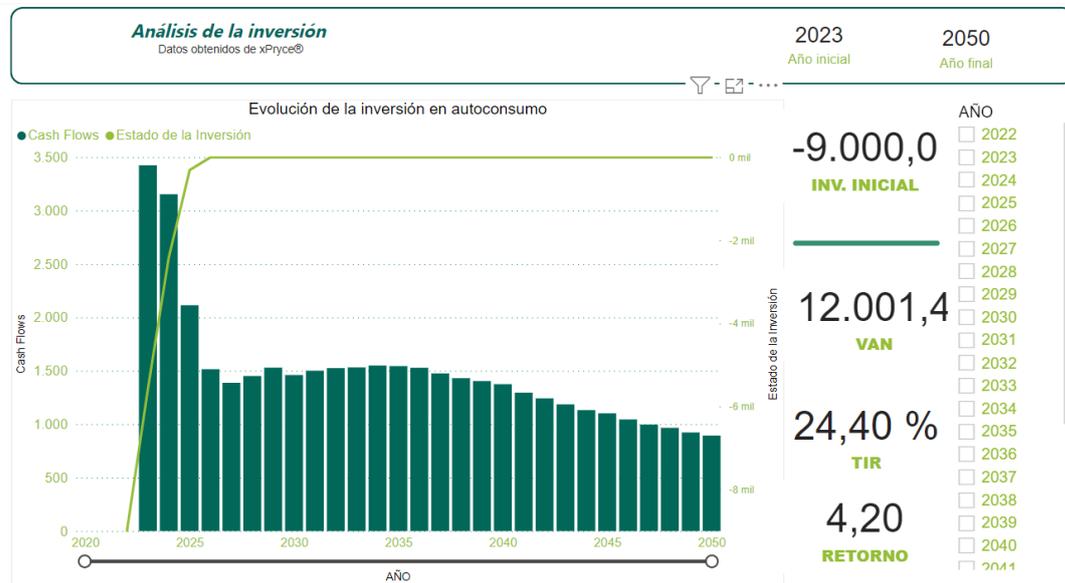


Ilustración 64. Caso C II: Análisis de la inversión [Elaboración propia, 2023]

La eficiencia con respecto a la energía generada y al reparto de excedentes de este caso, quedan reflejas en las métricas financieras, en las que se puede ver que se trata de una inversión muy rentable y con retorno muy rápido, minimizando en gran medida el riesgo de la inversión.

5.1.9 CASO C.III

El último caso por ejecutar en el caso de las pymes presenta un consumo de 19000 kWh anuales con una potencia instalada de 18kW, lo que supone una inversión inicial ligeramente superior a los casos C.I y C. II. Los precios de la energía y los excedentes son los mismos.

Los resultados obtenidos son muy similares a los del Caso C. II. El consumo medio empeora ligeramente pasando del 72,79% del caso anterior a 72,57%. A efectos prácticos en el estudio de la rentabilidad esa disminución no afecta, pero resulta interesante ver que con estos valores de consumo y potencia instalada se empieza a aprovechar peor la energía generada, lo que lleva a pensar que el punto máximo de consumo de la energía generada se encuentre en torno a los valores de potencia y consumo introducidos para el caso C. II. En cuanto al reparto de los excedentes, ocurre lo mismo, empeora sutilmente respecto al caso anterior, con un 25,53% de los excedentes generados sin compensar, frente al 25,28% que se tenía antes.

El porcentaje de ahorro respecto a la factura sin autoconsumo está de nuevo en torno al 62%, lo que indica que en los tres casos del grupo C, se consigue reducir la factura eléctrica en casi la misma proporción respecto a la factura que se tendría sin instalación de autoconsumo. Recordando que, aunque la proporción sea la misma, los importes no lo son, ya que estos aumentan cuanto mayor sea el consumo realizado.

El análisis de la inversión también va acorde a lo visto en los resultados. La inversión es muy rentable, pero esta ligeramente por detrás que la del caso C.II, con una TIR un poco más pequeña y un retorno ligeramente mayor.

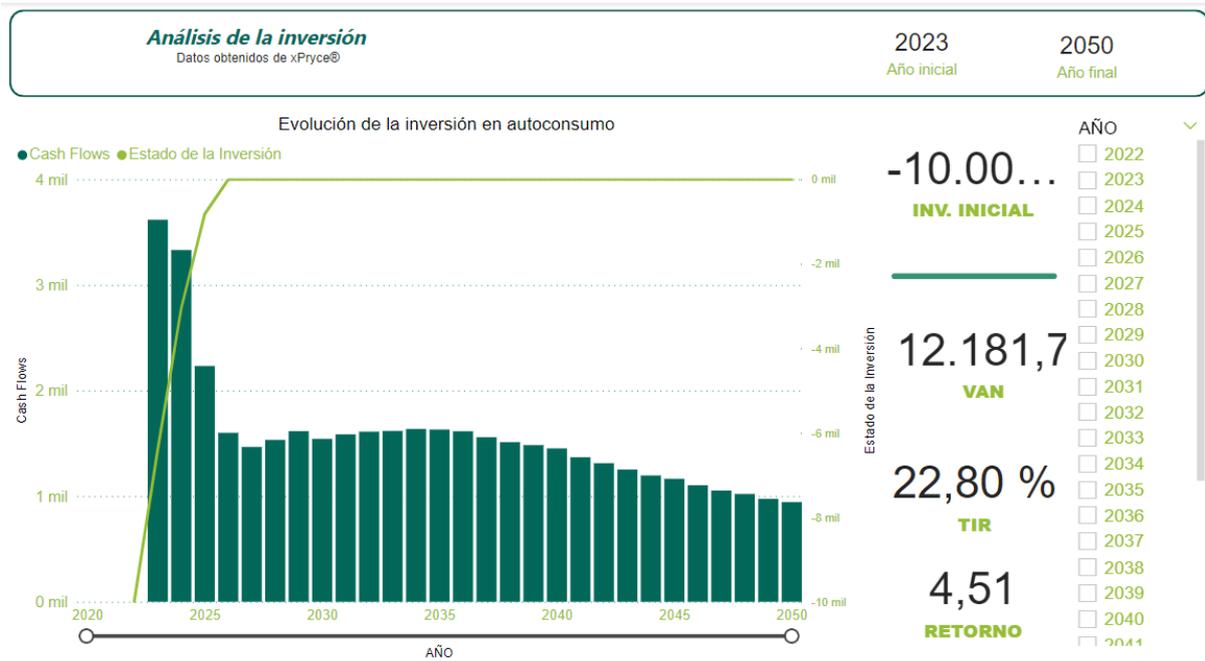


Ilustración 65. Caso C III: Análisis de la inversión [Elaboración propia, 2023]

Los resultados obtenidos tras comparar estos dos últimos casos llevan a pensar que se ha alcanzado el límite de potencia instalada y consumo anual a partir del cual deja de aumentar la rentabilidad de la inversión.

Lo visto hasta el momento en los diferentes casos indicada en líneas generales que cuanto mayor es la potencia instalada más rentable era la inversión. Esto ha quedado demostrado que ocurre, pero gracias a estos dos últimos casos se puede determinar que hay un límite y sobre todo que existe una fuerte relación entre la potencia instalada y el consumo anual que hay que optimizar para poder maximizar la rentabilidad de la inversión.

En este último caso, está ocurriendo que la potencia instalada de 18kW es demasiada para el consumo de 19000 kWh-año, lo que hace que el uso de la energía generada en la instalación no sea lo más eficiente posible, siendo mejor la eficiencia energética de la instalación del caso C. II.

5.2 ANÁLISIS DE LA INVERSIÓN

Tras presentar todos los casos ejecutados en el trabajo, en este apartado se recopilan los resultados principales de todos ellos para tener una visión conjunta que permita realizar un análisis comparativo entre ellos.

Para determinar qué caso resulta el más interesante como inversión, se van a comparar los valores de la TIR de cada caso, obteniendo así un orden de los casos más rentables. Una vez se tenga esta primera lista de casos con mayor rentabilidad, se estudiarán los elementos y factores que hacen que sea financieramente más interesante. En la siguiente tabla se recogen los principales resultados de cada caso, así como las variables de entrada (en gris) que afectan en mayor medida a los resultados.

Casos	Consumo [kWh]	P.Instalada [kW]	Inversión inicial	VAN	TIR	Retorno	Consumo	Ahorro	Excedentes compensados
Consumos domésticos - PVPC									
Caso A.I	3500	5	5 000 €	1 863.30 €	11.70%	8.74	49.8%	67.1%	74.4%
Caso A.II	3500	7	6 000 €	1 658.70 €	10.50%	9.5	35.6%	74.8%	58.5%
Caso A.III	5500	5	5 000 €	3 780.80 €	16.70%	6.32	78.2%	58.8%	95.8%
Caso A.IV	5500	7	6 000 €	4 327.90 €	16.10%	6.57	55.9%	70.4%	80.6%
Caso A.V	6500	8	6 500 €	5 543.50 €	17.80%	5.93	57.8%	69.3%	82.4%
Consumos domésticos - Mercado libre									
Caso B.I	3500	5	5 000 €	-670.00 €	5.30%	14.48	42.1%	42.1%	47.4%
Caso B.II	6500	8	6 500 €	2 424.90 €	11.70%	8.57	57.8%	47.0%	92.5%
Pymes									
Caso C.I	15000	15	8 000 €	9 698.40 €	22.80%	4.53	68.2%	61.2%	70.2%
Caso C.II	18000	17	9 000 €	12 001.40 €	24.40%	4.2	72.8%	61.9%	74.7%
Caso C.III	19000	18	10 000 €	12 181.70 €	22.80%	4.51	72.6%	61.4%	74.5%

Tabla 10. Recopilación de los resultados obtenidos para todos los casos. [Elaboración propia, 2023]

En la tabla se puede observar las métricas financieras obtenidas (VAN, TIR y retorno de la inversión) así como los principales indicadores de cada caso.

El porcentaje de consumo representa la relación entre la energía consumida y la generada por la instalación; se trata de una medida que refleja la eficiencia en el dimensionamiento de la instalación.

El porcentaje de ahorro muestra la relación entre el ahorro obtenido y el importe de la factura que se obtendría sin contar con la instalación de autoconsumo, es decir, representa el porcentaje de ahorro obtenido en el periodo de estudio. Con este indicador hay que tener en cuenta, a la hora de realizar un análisis comparativo que, de un caso a otro el porcentaje de ahorro puede disminuir mientras que el importe ahorrado puede aumentar. Al calcular el porcentaje de ahorro respecto al importe de la factura sin autoconsumo, se pueden dar casos de mayor consumo en

los que aumenta el coste de la factura sin autoconsumo, lo que puede implicar que el porcentaje de ahorro sea menor, aunque el importe real de este sea mayor que el de otro caso.

Por último, los excedentes compensados muestran la proporción de excedentes totales que han recibido compensación en el periodo. El resto de los excedentes se habrán volcado a la red sin recibir ninguna compensación económica.

Estas tres medidas permiten justificar y entender los resultados de rentabilidad obtenidos ya que representan tanto la eficiencia de la instalación en cuanto a la generación y el consumo como la eficiencia en el uso de los excedentes, es decir, la eficiencia en el dimensionamiento de la instalación. Una buena gestión de la energía generada aumenta la rentabilidad de la inversión.

En la tabla 15 (Recopilación de los resultados obtenidos para todos los casos), marcado con un código de colores, se observan los resultados de rentabilidad obtenidos en los diferentes casos, en verde se ven los mejores resultados y a medida que empeoran el color va siendo más rojo. Gracias a esta degradación de colores, se puede observar de un vistazo que, de los tres casos ejecutados, en el que se obtienen mejores resultados es en el de las pymes, las ejecuciones del Caso C. En segundo lugar, estaría el Caso A, consumos domésticos y PVPC y muy seguido el Caso B con precios del mercado libre.

Las principales razones que llevan a estos resultados son entre otras que, a mayor potencia instalada, siempre que vaya acompañada de un aumento en el consumo, aumenta la rentabilidad de la instalación. Por ello el Caso C, en el que se suponen potencias instaladas mayores, se obtienen rentabilidades más altas. Por otro lado, el Caso B, en el que los precios de la energía son fijos, presenta un coste fijo diario adicional (cargos extras), coste sobre el que no pueden actuar los excedentes por lo que se está incluyendo en la factura un coste que no se puede ni reducir ni eliminar, empeorando notablemente la rentabilidad de la instalación para potencias instaladas más bajas.

La rentabilidad de la instalación está en optimizar la eficiencia de la energía generada, idóneamente usando la mayoría para el consumo propio y la restante compensándola a través de los excedentes. Esto se puede ver de forma numérica en los valores de porcentaje de consumo y el porcentaje de excedentes compensados. En la siguiente grafica se observa la variación de estas medidas frente a la evolución de la TIR, para los casos ejecutados.

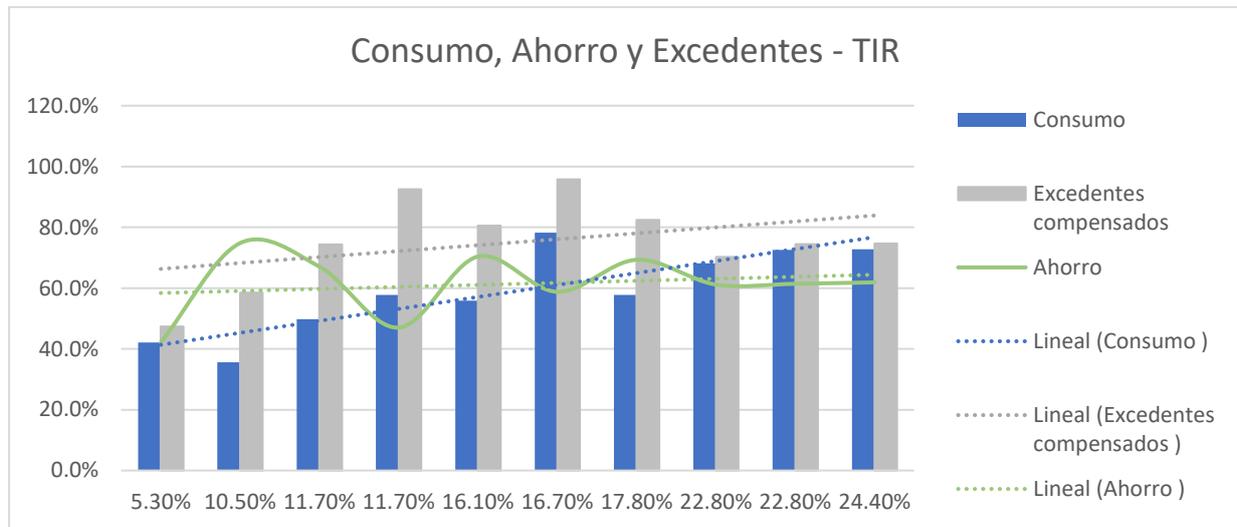


Ilustración 66. Indicadores de Consumo, Ahorro y Excedentes frente a la TIR obtenida [Elaboración propia, 2023]

Se observa, como era de esperar, que la tendencia es que se obtienen mayores rentabilidades en los casos de mayor porcentaje de consumo, ahorro y excedentes compensados.

Para maximizar la rentabilidad se requiere que tanto el indicador de consumo como el de los excedentes compensados se encuentren entre el 60%-80%. Es necesario optimizar ambos puntos para optimizar la instalación, valores muy altos solamente de uno de ellos no es suficiente para optimizar la rentabilidad.

Se observa en la gráfica que los tres mejores casos ejecutados, presentan ambos indicadores por encima del 60% y con valores muy similares.

Si analizamos la línea de ahorro, observamos que presenta un carácter más sinusoidal, por lo que se puede deducir que afecta en menor medida a la TIR. Recordemos que esto se debe a que el porcentaje de ahorro es una medida relativa para el análisis de la inversión, puesto que lo que afecta realmente es el importe real ahorrado, más que el porcentaje de ahorro obtenido.

Aun así, sí que se observa que, a medida que se alcanzan valores máximos de rentabilidad la curva del ahorro comienza a estabilizarse en torno al 60%, lo que indica que maximizar la TIR supone ahorros estables y relativamente constantes.

Es decir, un caso en el que el ahorro obtenido con la instalación de autoconsumo sea del 100% con respecto a no tener autoconsumo, no tiene por qué implicar máxima rentabilidad en la inversión, ya que se tienen que dar también buenos resultados en el consumo y en la compensación de excedentes.

En definitiva, la curva del ahorro tiene menor pendiente que las otras dos, por lo que se llega a la conclusión de que afecta en menor medida a la TIR obtenida. En cambio, el consumo y los excedentes incrementan acorde a la TIR.

Se observa que se maximiza la rentabilidad cuando mayor es la potencia instalada y el consumo, y cuando la eficiencia de la instalación tanto en el consumo de la energía generada como en la compensación de excedentes se encuentra en valores de entre el 65%-85%. Para una potencia instalada relativamente alta y sobre todo acorde al consumo, se puede conseguir una eficiencia en la instalación de casi el 80% lo que asegura que la rentabilidad de la inversión sea muy buena, con valores de la TIR entorno al 15% y superiores.

5.3 ANÁLISIS DE EXCEDENTES

Como se ha visto hasta ahora, el reparto de los excedentes cumple un papel fundamental en las instalaciones de autoconsumo, afectando directamente a la rentabilidad de la inversión. En este apartado se presenta un análisis de los excedentes, basado en lo visto en los resultados y se explica la forma de realizar el estudio de los excedentes en el modelo, tanto en € como en kWh.

En el ámbito de los excedentes energéticos, es común la creencia de que cuanto más energía se genere, mejor, ya que el dueño de la instalación puede consumirla o venderla a la red. No obstante, la realidad es diferente. Si bien es cierto que en caso de un alto consumo conviene generar la mayor cantidad posible para cubrirlo, no siempre se remunera la energía generada en exceso. Este hecho es desconocido para muchos, y aunque las instalaciones fotovoltaicas domésticas pueden resultar muy beneficiosas también tienen ciertas limitaciones.

En primer lugar, la idea de que la energía generada es gratuita no es exacta, dado que existen ciertos cargos fijos que siempre deben ser pagados en la factura eléctrica. Es cierto que gracias a los paneles se puede ahorrar mucho al dejar de consumir energía de la red, pero al final del mes la factura nunca será cero.

Esto se observa muy bien en el apartado de Desglose de la Factura, en el que se puede ver que en el caso de no tener autoconsumo al rededor del 75% del importe de la factura es el gasto por la energía consumida, y es solo sobre esta parte sobre la que se puede aplicar la compensación de excedentes. El otro 25% representan costes fijos a los que se incurre también en el caso de tener un sistema de autoconsumo. De hecho, se observa que la partida de Cargos y Peajes Fijos es igual en ambos casos (con y sin autoconsumo). Esto es así ya que este gasto depende de los kW contratados con la comercializadora.

Conviene realizar el matiz de que dichos costes fijos (que no se pueden eliminar con un sistema de autoconsumo), sí se pueden reducir un poco gracias a que tanto el IVA como el impuesto de electricidad, dependen del importe total de la factura, siendo menores por tanto en el caso de autoconsumos. El resto de las partidas de la factura (cargos y peajes fijos, margen de la comercializadora y contador) presentan los mismos importes en una instalación con y sin autoconsumo.

En segundo lugar, es importante tener en cuenta que existe un límite en cuanto a los excedentes generados. La cantidad de energía que se puede compensar presenta un límite superior, por lo

que, una vez alcanzado el límite, la energía vertida a la red no se compensa. La pregunta es: ¿Cuánta energía se regala y cuándo ocurre esto?

- ¿Cuándo se regala energía a la red?

Para responder esta cuestión, es necesario aclarar que los excedentes se producen cuando la generación supera el consumo y se vierte energía a la red. Esta energía se valora al precio de excedente y se remunera al usuario reduciendo su gasto variable en la factura. Sin embargo, al final del mes, lo obtenido por los excedentes cubrirá como máximo el importe del gasto en energía consumida más sus cargos y peajes variables. Si los excedentes superan este coste, se estaría regalando la diferencia a la red. En conclusión, la energía generada se regala a la red cuando los excedentes ya han cubierto el gasto variable de la factura de ese mes.



Ilustración 67. Diagrama que representa la compensación máxima por excedentes generados

El caso representado en el diagrama refleja la situación en la que los excedentes generados superan al gasto variable de energía, la otra situación que se puede dar es que los excedentes generados (€) sean menores que el gasto variable de energía. En este caso, se compensarían todos los excedentes y la parte no compensada del gasto variable se pagaría en la factura de ese mes.

- ¿Cuántos excedentes (€) no se compensan? ¿Y energía (kWh)?

El sistema de compensación de excedentes en la factura se realiza en importes monetarios, es decir, se determina el valor de la energía generada y no consumida por el usuario (excedentes) y con este importe se compensa el gasto variable de energía. En definitiva, de los excedentes totales parte serán excedentes compensados y parte serán excedentes regalados a la red.

- Excedentes totales [€]: La diferencia entre la generación y consumo (hora a hora) y valorada a precio de excedentes.
- Excedentes compensados [€]: Será el valor mínimo entre los excedentes totales generados y el gasto variable de energía incurrido en el mes.
- Excedentes no compensados [€]: La diferencia entre los excedentes totales y los compensados.

Para determinar la energía equivalente al importe (en euros) compensado o no compensado, hay que tener claro los precios a los que se están valorando los excedentes.

Los excedentes compensados (€) representan la remuneración obtenida (en forma de ahorro en la factura) por haber generado energía y haberla vertido a la red. Es decir, reflejan cuánto se ha reducido el gasto variable de energía en la factura eléctrica de un mes. Este gasto variable está valorado al precio real de la energía consumida (que tiene en cuenta tanto el PVPC como los cargos y peajes variables). Por ello para calcular la cantidad de energía que representan los excedentes compensados, se tiene que valorar al precio real de la energía consumida, para obtener la energía equivalente compensada por el usuario.

$$\text{Energía compensada [kWh]} = \frac{\text{Excedentes compensados [€]}}{\text{Precio real energía}}$$

Por otro lado, la energía no compensada representa el importe monetario que el usuario deja de recibir por energía que ha vertido a la red, por lo tanto, hace referencia a energía que se vierte a la red la cual se valora a precio de excedentes.

$$\text{Energía No compensada [kWh]} = \frac{\text{Excedentes sin compensar [€]}}{\text{Precio excedentes}}$$

Entender el funcionamiento de la compensación de excedentes es fundamental para optimizar la instalación de autoconsumo puesto que el impacto que tienen sobre la rentabilidad es muy alto. Como se ha presentado en el *Análisis de la Inversión*, es necesario que la energía generada que no se haya usado para el consumo (excedentes generados), se Maximizar la cantidad de energía compensada es fundamental, ya que toda aquella energía generada que se queda sin compensar es un gasto para el usuario, ya que se vuelca de manera gratuita a la red.

El desarrollo de baterías que permitan almacenar este exceso de energía generada supondrá un cambio drástico en cuanto a los excedentes en las instalaciones de autoconsumo, ya que el concepto de excedentes dejará de existir como tal. No se tratará de una energía sobrante que se vierte a la red, sino que se podrá consumir en otro momento en el que la generación sea menor (por ejemplo, durante la noche). El uso de las baterías supondrá un antes y un después en el ámbito energético.

Para acabar, es importante subrayar que, aunque el reparto de excedentes sea una parte fundamental en el estudio de la rentabilidad de una instalación de autoconsumo, esta no es la única. Como se ha explicado a lo largo del capítulo, en el análisis de la rentabilidad de una instalación de autoconsumo se tienen que estudiar diversos factores (potencia instalada, eficiencia en el dimensionamiento, TIR, etc.) para poder determinar si la instalación es rentable o no y en qué medida.

6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

En el presente trabajo se expone el desarrollo de una Herramienta de Autoconsumo Fotovoltaico, que permite calcular a futuro los importes de la factura eléctrica de domicilios o pymes que cuenten con autoconsumos fotovoltaicos.

Los autoconsumos fotovoltaicos, permiten a los consumidores generar su propia energía eléctrica. Gracias a este tipo de tecnologías, se puede llegar a reducir el coste de la factura de electricidad, independizarse de las fuentes de energía externa y contribuir a la descarbonización del sistema.

El desarrollo de este modelo puede ayudar a los consumidores a tomar decisiones informadas acerca de si invertir en una instalación de estas características. Además, permite realizar un estudio de cómo potenciar la rentabilidad de una instalación de autoconsumo, puesto que permite analizar en profundidad cada una de las partes que componen la factura eléctrica.

La funcionalidad principal de la herramienta está destinada a realizar un estudio en el largo plazo de la rentabilidad de una inversión en autoconsumo fotovoltaico. Permite comparar las rentabilidades obtenidas en diferentes casos (potencia instalada, tarifa, inversión inicial, etc.), de forma que se pueda tomar una decisión acertada a la hora de realizar una inversión de estas características.

El estudio llevado a cabo en el proyecto, con el que se demuestra el funcionamiento y alcance de la herramienta, se basa en estudiar a dos tipos de cliente: consumidores domésticos (con PVPC y en el mercado libre) y pymes. Para todos los casos, la tasa de descuento aplicada en el análisis de la inversión es del 7%, la correspondiente al WACC del sector en España.

El total de los 10 casos analizados trata de instalaciones de autoconsumo con excedentes acogidos a compensación. En los casos en los que el precio de la energía sea el del PVPC, los excedentes se valoran al precio del mercado diario. Los casos acogidos al mercado libre presentan un precio pactado para los excedentes, que es pactado con la comercializadora. Para ser coherentes con la evolución a futuro de los precios del mercado eléctrico, al precio fijo de los excedentes se le aplica la variación que presenta el precio del pool.

Los resultados obtenidos en cada caso se vuelcan de manera automática a Power BI, donde se elabora un informe completo con un total de 11 páginas. Se presenta en el trabajo cada página de dicho informe para los resultados del Caso Base. El análisis del resto de casos se lleva a cabo a través de un análisis comparativo entre ellos, focalizándose principalmente en un análisis de la inversión y de los excedentes. Para profundizar en todo el alcance de la herramienta es necesario tener acceso al informe de Power BI, por lo que se adjunta, como parte de este trabajo, el informe de resultados del Caso Base.

Tras ejecutar y analizar todos los casos se observa que el Caso C (pymes) son los casos con mayor rentabilidad, seguido del Caso A (consumos domésticos con PVPC) y por último el Caso B (consumos domésticos en el mercado libre). Para maximizar la rentabilidad de una instalación de autoconsumo fotovoltaico, se llega a las siguientes conclusiones:

- En los casos de mayor potencia instalada de autoconsumo, se ha considerado un consumo energético mayor. Por tanto, al ahorrar en un consumo mayor, aumenta la rentabilidad de la instalación. Es decir, cuanto mayor sea la potencia instalada de la instalación, mayor será la TIR obtenida, siempre que la potencia instalada sea coherente con el consumo de la vivienda o local.
- Se puede determinar un umbral de consumo a partir del cual la instalación deja de ser considerada rentable. Como se ha mencionado a lo largo del trabajo, la rentabilidad de la instalación es mayor, cuanto mayor es la proporción de electricidad que el usuario deja de comprar a la comercializadora. Cabe recordar también que, si la potencia contratada se mantiene, los términos fijos de la factura son los mismos, independientemente de que se consuma más o menos energía. Por tanto, se observa que para consumos inferiores a los 3000 kWh anuales, la rentabilidad de la instalación disminuye notablemente.
- La rentabilidad de la instalación se apoya en el dimensionamiento de la instalación. Es decir, la rentabilidad de la instalación aumenta con la proporción de energía que el usuario es capaz de generar con su instalación fotovoltaica y, por tanto, deja de consumir de la red y deja de comprar a la comercializadora.
- Ante la ausencia de baterías y por las características propias de las instalaciones fotovoltaicas (generan durante las horas de sol), es inevitable que haya momentos en los que la generación supere al consumo, por lo que se generan excedentes. Para maximizar la rentabilidad, hay que optimizar el uso de esta energía excedentaria, buscando que se compense en su mayoría. Los excedentes que no se compensen, son energía generada regalada a la red, lo que representa la ineficiencia de la instalación desde el punto de vista de la inversión.
- En definitiva, para maximizar la rentabilidad de la instalación, el objetivo que hay que perseguir, es aprovechar al máximo toda la energía generada, ya sea a través del consumo de esta o a través de excedentes.
- Hay que destacar que la rentabilidad de la instalación se dispara en ocasiones en las que se producen subidas drásticas en el precio de la energía. Los picos en el precio de la energía disparan la rentabilidad de este tipo de instalaciones, ya que el ahorro aumenta considerablemente. Las instalaciones de autoconsumo permiten no solo cubrirse ante el riesgo de subidas de precios de la energía, sino que en estos momentos es cuando más rentables son.

- Suponiendo que se mantuviese un aumento del 5% anual en el precio de la electricidad (tendencia conservadora de lo ocurrido en los últimos 10 años). La rentabilidad de las instalaciones de autoconsumo está prácticamente garantizada

La herramienta de análisis de autoconsumo desarrollada permite determinar las características que ha de tener una instalación para maximizar su rentabilidad. Permite profundizar en los cálculos de la factura eléctrica y comprender los elementos que influyen y en qué medida. Su alcance es muy variado, permite desde ayudar a usuarios a tomar decisiones de inversión en instalaciones de autoconsumo, hasta elaborar informes de consumo, generación y precios de un domicilio o local.

Esta versión de la herramienta presenta interesantes puntos de mejora y futuro desarrollo, que permitirán pulir y perfeccionar el modelo hasta ahora desarrollado. Entre las principales líneas futuras de investigación encontramos:

- Incluir la opción de seleccionar diferentes geografías en España. Actualmente se usa un único perfil de generación, el cual puede variar en función del lugar en el que nos encontremos (las horas equivalentes de una instalación en el norte de España no son las mismas que en Andalucía). Incluir diferentes perfiles de generación que se adecuen, más al lugar donde se encuentra la instalación de autoconsumo, de manera que los resultados sean más precisos.
- Incluir perfiles de consumo precisos para las tarifas de alta tensión (6.1TD, 6.2TD, 6.3TD Y 6.4TD), de forma que se puedan ejecutar casos para potencias contratadas superiores a 15kW y tensiones mayores a 1kV.
- Automatizar el cálculo del PVPC. Actualmente, se calcula externamente al código de Python el peso que presenta el precio del mercado diario sobre el valor final del PVPC y este valor, según la hipótesis para el cálculo del PVPC, es el que se utiliza para determinarlo. En futuras versiones, resultaría interesante automatizar este proceso, de manera que se carguen al modelo los archivos de eSios de todos los componentes del PVPC y el propio modelo ejecute el cálculo del PVPC desde cero.
- Incluir en el modelo la opción de añadir a la instalación baterías para la energía generada. Esto es una opción cada vez más utilizada por los consumidores que mejora notablemente la rentabilidad de la instalación. Aunque todavía las baterías tienen recorrido de mejora y sus precios son considerablemente altos no hay duda de que van a ser parte fundamental de cualquier instalación de generación.
- Perfeccionar las condiciones de los contratos con las comercializadoras, incluyendo en el modelo aspectos como penalizaciones por exceso de potencia.
- Actualizar la regulación pertinente que se haya renovado con la llegada del 2024. Entre otras cosas habría que modificar, los peajes publicados para este año (los cargos del

2023 se extienden al 2024), el perfil de consumo y los nuevos valores del Impuesto especial de Electricidad y el IVA. Otra opción interesante es conectar el modelo con las fuentes donde se publica toda esta información, de forma que se actualice de manera más sencilla que manualmente.

- Desde el 1 de enero de 2024 se aplica una nueva estructura para el cálculo del PVPC, publicada en el Real Decreto 446/2023 del 13 de junio. Como línea futura, convendría estudiar esta nueva metodología y adaptarla al modelo.

7. RELACIÓN CON LOS ODS

La transición energética tiene un papel protagonista en el panorama político, ambiental y económico actual. Se está potenciando notablemente la transición de los combustibles fósiles a las energías renovables. En España las medidas establecidas en el PNIEC (Plan Nacional Integrado de Energía y Clima) prevén que el 81% de la producción de energía eléctrica en 2030 sea de fuentes renovables.

Como se puede observar, actualmente hay mucha conciencia acerca de la transición energética y del medioambiente. Se busca llegar a una situación en la que se pueda reducir los niveles de contaminación a la vez que se mantiene o aumenta el nivel de consumo energético. Todos los esfuerzos que se están llevando a cabo están alineados con algunos de los ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU). El que presenta una relación más fuerte con el tema aquí tratado es el séptimo ODS, que pretende “*Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna*”

El trabajo desarrollado está muy alineado con este objetivo ya que pretende potenciar la buena toma de decisiones a la hora de decidir invertir en instalaciones de autoconsumo, de manera que los consumidores se sientan cómodos con la decisión y se potencie el número de instalaciones de autoconsumo fotovoltaico. Apostando así por una transición a fuentes de energía más limpias.

En comunidades de vecinos cada vez se ven más instalaciones de autoconsumo compartidas, de forma que se puedan beneficiar todos los vecinos de una generación sostenible. En este sentido, este trabajo, pretende también fomentar el desarrollo de comunidades autosuficientes y solidarias con el medioambiente. El ODS número 11, que pretende “*Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles*”, incluye actividades como la descrita, a través de la cual, se fomenta la mejora y el desarrollo de las ciudades.

Como se venía comentando, existe una relación directa entre la transición energética y el cambio climático y sus consecuencias. La transición energética ampara medidas para frenar las consecuencias negativas del cambio climático y como bien sabemos, todos nos debemos de involucrar en esta misión. Fomentar la inversión en instalaciones de autoconsumo y dar a conocer todo lo que las rodea, es una muy buena forma de alinearse con el ODS número 13 (“*Objetivo 13: Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos*”), puesto que permite a más parte de la sociedad implicarse y aportar su granito de arena en la generación de energía sostenible, paliando así los efectos del cambio climático.

Por último, la implantación y el desarrollo de instalaciones de autoconsumo fotovoltaicas permite mejorar el crecimiento económico de la sociedad en el sentido de que se potencia la creación de empleo, tanto en la instalación, como en la parte previa de asesoramiento y posterior mantenimiento y resolución de incidencias. En este sentido, el tema desarrollado recoge los puntos fundamentales amparados bajo el octavo ODS, por el que se busca “*Promover el*

crecimiento económico inclusivo y sostenible, el empleo y el trabajo decente para todos". Además, fomenta el desarrollo de tecnologías novedosas que todavía presentan un gran camino de mejora y desarrollo. Por ejemplo, las instalaciones con almacenamiento todavía se encuentran en fases preliminares y su eficiencia va a mejorar considerablemente con el tiempo, pero esta mejora solo es posible si se potencian este tipo de inversiones y se fomenta su implantación y desarrollo.

8. BIBLIOGRAFÍA

Appa Renovables . 2022. *Informe Anual de Energías Renovables 2022.* Madrid : s.n., 2022.

BOE. 1997. *Ley 54/1997, de 27 de noviembre, del Sector Eléctrico.* 1997.

BOE . 2013. *Ley 24/2013, de 26 de diciembre, del Sector Eléctrico.* 2013.

BOE. 2019. *Real Decreto 244/2019, de 5 de abril. Real Decreto 244/2019, de 5 de abril, por el que se regulan las condiciones administrativas, técnicas y económicas del autoconsumo de energía eléctrica.* 2019.

Casamitjana, Octavi Rifaterra. 2018. *Análisis de la financiación de proyectos renovables.* s.l. : Escuela Técnica Superior de Ingeniería ICAI, 2018.

Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia, Resolución de 15 de diciembre. 2022. *Resolución de 15 de diciembre de 2022, de la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia, por la que se establecen los valores de los peajes de acceso a las redes de transporte y distribución de electricidad de aplicación a partir del 1 de enero de.* s.l. : BOE, 2022.

Edmundo R. Lizarzaburu Bolaños, Kurt Buerno Farfán, Conrado Diego. *Introducción a las finanzas: Teoría y Práctica.* s.l. : Universidad de Valladolid.

Energía y Sociedad . 2021. *El marco normativo español. Energía y Sociedad .* [En línea] 2021. <https://www.energiaysociedad.es/manual-de-la-energia/2-2-el-marco-normativo-espanol/>.

Energía y Sociedad. 2022. *Los peajes de acceso y cargos: estructura, costes y liquidación de los ingresos. Energía y Sociedad.* [En línea] Agosto de 2022. <https://www.energiaysociedad.es/manual-de-la-energia/7-1-los-peajes-de-acceso-y-cargos-estructura-costes-y-liquidacion-de-los-ingresos/>.

Gaspar Atienza, Rodrigo Berasategui, Marcos Botella y José Guardo. *La financiación de proyectos de energías renovables.* s.l. : Departamento Mercantil de Garrigues.

Gustavo Adolfo Pizon Mejia, Javier Ricardo Rodriguez Suarez. 2000. *Project Finance .* s.l. : Pontificia Universidad Javeriana , 2000.

Irene Roqueñí, Nieves Roqueñí J.Valeriano Alvarez, J.Manuel Mesa Minersa. *Utilización de herramientas informáticas en el análisis de sensibilidades para la financiación de proyectos.* s.l. : Universidad de Oviedo.

Jiménez Rabinal, Guillermo. 2020. *Project Finance: Sector de las Energías Renovables.* TFG CUNEF 2020.

Luis Garvía Vega. 2008. El "Project Finance" Conceptos básicos. s.l. : Universidad Pontificia de Comillas ICAI, 2008.

Ministerio de Industria, Energía y Turismo, Real Decreto 216/2014. 29 de marzo de 2014. *Real Decreto 216/2014, de 28 de marzo, por el que se establece la metodología de cálculo de los precios voluntarios para el pequeño consumidor de energía eléctrica y su régimen jurídico de contratación.* s.l. : BOE, 29 de marzo de 2014.

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Orden TED/1312. 29 de diciembre de 2022. *Orden TED/1312/2022, de 23 de diciembre, por la que se establecen los precios de los cargos del sistema eléctrico de aplicación a partir del 1 de enero de 2023 y se establecen diversos costes regulados del sistema eléctrico para el ejercicio 2023.* s.l. : BOE, 29 de diciembre de 2022.

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Resolución de 22 de diciembre . 2022. *Resolución de 22 de diciembre de 2022, de la Dirección General de Política Energética y Minas, por la que se aprueba el perfil de consumo y el método de cálculo a efectos de liquidación de energía, aplicables para aquellos puntos de medida tipo 4 y tipo 5.* s.l. : BOE, 2022.

Naturgy. 2022. ¿Cómo funciona el sistema eléctrico español? [En línea] 13 de Diciembre de 2022. https://www.naturgy.es/hogar/blog/como_funciona_el_sistema_electrico_espanol.

Red Eléctrica Española. 2024. Precio voluntario para el pequeño consumidor (PVPC). [En línea] 2024. <https://www.ree.es/es/actividades/operacion-del-sistema-electrico/precio-voluntario-pequeno-consumidor-pvpc>.

Rixtel, Sarai Criado y Adrian van. 2008. *La financiación estructurada y las turbulencias financieras de 2007-2008: Introducción general.* s.l. : Banco de España , 2008.

Saavedra, Isabel Enseñat. Junio 2022. El mercado eléctrico mayorista español. Madrid : Universidad Pontificia de Comillas, ICAI, Junio 2022.

Som Energía . 2024. La tarifa 2.0TD periodos. *Som Energía* . [En línea] Diciembre de 2024. <https://es.support.somenergia.coop/article/1004-la-tarifa-2-0td>.

Universidad Politécnica de Madrid. Energía y Sociedad. [En línea] <https://www.energiaysociedad.es/manual-de-la-energia/7-1-los-peajes-de-acceso-y-cargos-estructura-costes-y-liquidacion-de-los-ingresos/>.

Villaverde, Melissa Fernandez. Financiación de proyectos de energías renovables mediante Project Finance. s.l. : Universidad de Oviedo . Vol. Trabajo de fin de Master .

