



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Centro de Estudios de Postgrado

Trabajo Fin de Máster

DISEÑO DE UN SISTEMA HÍBRIDO HIDRÁULICO- FOTOVOLTAICO CONECTADO A RED MEDIANTE LA HERRAMIENTA INFORMÁTICA HOMER

Alumno/a: Mayoral Temporal, Marc

Tutor/a: Prof. D. Andrés López Valdivia
Prof. D. Blas Ogayar Fernández

Dpto: Ingeniería Eléctrica

Diciembre, 2021

RESUMEN

El actual trabajo fin de máster trata sobre la implantación de un sistema híbrido hidráulico-fotovoltaico para el autoabastecimiento energético para el municipio Jienense de Cazorla. Dicho emplazamiento consta actualmente de una minicentral hidráulica y durante el presente proyecto se va a mostrar una guía para la comprensión y utilización del software de optimización de sistemas energéticos Homer que se ha utilizado para ver la viabilidad del sistema híbrido con las características del sistema estudiado, así como los resultados obtenidos en la aplicación directa del software al caso presente.

ABSTRACT

This current master's thesis deals with the implementation of a hybrid hydraulic-photovoltaic system for self-supply energy in the municipality of Cazorla, placed in Jaén. This place already has and use a mini-hydro plant and during the present project we will show a guide for the understanding and use of the energy system optimization software called Homer, which have been used to obtain the viability of the hybrid system with the characteristics of the system of study, as well as the results obtained in the direct application of the software to the present case.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. OBJETIVO Y ALCANCE	02
2. RECOPIACIÓN BIBLIOGRÁFICA Y REFERENCIAS DE INTERÉS	04
3. MANUAL DE USO DEL SOFTWARE HOMER	08
4. DEFINICIÓN DE LAS NECESIDADES DE CONSUMO	114
5. DEFINICIÓN DE LOS SISTEMAS DE GENERACIÓN	122
6. DATOS PARA LA SIMULACIÓN	125
7. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN	135
8. ESTUDIO DE COSTES Y PÉRDIDAS	141
9. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	147
10. CONCLUSIONES	148
11. BIBLIOGRAFÍA	149

1. OBJETIVO Y ALCANCE

Durante el presente trabajo fin de máster se pretende cumplir los siguientes objetivos:

- A partir de las facturas energéticas calcular de la demanda energética y obtener las curvas de consumo.
- Mediante la utilización del software de optimización Homer, obtener el diseño óptimo de un sistema híbrido hidráulico-fotovoltaico conectado a red.
- Comprobar la eficacia del software Homer para la optimización de sistemas híbridos.

El lugar seleccionado para la implementación del software se trata de la localidad Jienense de Cazorla, situada en la Comunidad Autónoma de Andalucía, en España. (Tabla 1).

Tabla 1. Coordenadas UTM Cazorla.

Coordenadas UTM	
Zona	30
Hemisferio	Norte
Este	499674,5
Norte	4196203,5

El contenido del trabajo consta de diferentes puntos explicados brevemente a continuación:

- Revisión bibliográfica donde se comentan los aspectos más relevantes sobre el software Homer revisados a través de diversos documentos externos al presente trabajo fin de máster.

- Guía de utilización del software Homer para comprender su funcionamiento.
- Definir el consumo energético asociado a las dependencias municipales y el alumbrado público del municipio de Cazorla.
- Definir los sistemas de generación de electricidad presentes en el estudio que son sujetos a optimización mediante el software.
- Obtener las curvas de demanda energética de la dependencia municipal y el alumbrado público del municipio de Cazorla.
- Especificar los datos introducidos en el software Homer para realizar la simulación para obtener el sistema óptimo.
- Comentario sobre los resultados obtenidos al realizar la simulación mediante el software.
- Estudio de costes y pérdidas del sistema óptimo resultado de la simulación realizada.
- Breve análisis de las variables sensibles de producir cambios en la simulación.
- Conclusiones sobre el trabajo realizado, así como del funcionamiento del software empleado.
- Bibliografía sobre las fuentes consultadas para la realización del presente trabajo fin de máster.

2. RECOPIACIÓN BIBLIOGRÁFICA Y REFERENCIAS DE INTERÉS

A modo de introducción para el presente Trabajo de Fin de Máster, se ha realizado una revisión bibliográfica sobre la herramienta informática Homer, software en el que se basa el trabajo realizado. Mediante dicha revisión bibliográfica se pretende recopilar información ya existente en otros medios sobre Homer para obtener una visión sobre el estado del tema.

El software fue desarrollado en sus inicios por NREL (National Renewable Energy Laboratory) y más tarde mejorado y comercializado por Homer Energy.

Homer es un software con el objetivo de realizar simulaciones y obtener la configuración óptima para el diseño de diversos sistemas energéticos (aislados, conectados a red e híbridos) a partir de criterios técnicos, económicos y ambientales, con un número variado de fuentes energéticas renovables y no renovables, tales como:

- Sistemas fotovoltaicos
- Turbina eólica
- Baterías
- Generador diésel
- Minihidráulica
- Celda de combustible, electrolizador y tanque de hidrógeno
- Turbina hidrocinética
- Biomasa
- Carga combinada con calor
- Red eléctrica

Dimensionar correctamente un sistema híbrido es requisito indispensable para conseguir una explotación económica y tecnológicamente eficiente de los recursos disponibles.

El programa consta de tres grandes bloques:

- Simulación: A partir de la información incluida por el usuario en el programa, Homer se dedica a obtener el sistema más viable según la configuración. Los datos se simulan en intervalos de 1 hora o 1 minuto, de forma anual.
- Optimización: Una vez seleccionada una de las variables disponibles para el usuario, se encarga de optimizar el sistema simulado.
- Análisis de sensibilidad: Tiene el objetivo de determinar la importancia de una variable en el sistema diseñado y los cambios que produce en el sistema modificarla.

Los algoritmos de los que dispone te permiten comparar las diferentes configuraciones posibles de un determinado sistema teniendo en cuenta la tecnología utilizada, el coste de la energía y la disponibilidad de la misma.

Una vez introducidos los datos de simulación en el software, Homer realiza una comparación entre la demanda de energía y la que el sistema puede suministrar según la configuración seleccionada, así como el flujo energético de cada componente.

El propio software se ocupa de calcular las distintas combinaciones posibles según los componentes seleccionados para obtener la configuración óptima del sistema. Algunas de las aplicaciones más utilizadas son las siguientes:

- Simular el comportamiento de un sistema alternando según las distintas configuraciones posibles.
- A partir del LCOE (Levelized Cost Of Energy) o el coste neto de la instalación, obtener el sistema óptimo entre los estudiados.
- Realizar análisis de sensibilidad sobre la variabilidad de las alternativas disponibles que presentan incertidumbre sobre el sistema.

Homer es utilizado ampliamente entre investigadores, puesto que permite obtener las cantidades necesarias de cada tipo de fuente energética para satisfacer la demanda de diseño, de ese modo se obtiene los costos mínimos de operación y del sistema, siempre cumpliendo con las limitaciones técnicas y de emisiones. Aunque se trata de un software de pago dispone de una versión de prueba gratuita de 21 días.

Uno de los campos donde más se utiliza es en la aplicación en energía fotovoltaica. Algunos de los parámetros meteorológicos y de irradiancia que utiliza son los siguientes:

- GHI (Global Horizontal Irradiance)
- DNI (Direct Normal Irradiance)
- DHI (Diffuse Horizontal Irradiance)
- POA (Plane Of Array)
- Temperatura
- Viento
- Humedad relativa
- Albedo
-

En cuanto al diseño del sistema destacan los siguientes atributos:

- Tamaño (potencia)
- Tipo de módulos
- N° de módulos
- Conexión (serie/paralelo)
- N° inversores
- Inclinação y orientación
- Seguidor solar
- Pérdidas
- Baterías
- Datos de consumo (mensual y horario)
- Base de datos de costes
- Análisis financiero

En general se trata de una herramienta sencilla para obtener el tamaño óptimo de un sistema, pero en algunos casos no es capaz de lograr resultados precisos, por eso es recomendado acompañar su utilización con otros programas complementarios.

El uso de Homer goza de gran aceptación en el campo de la optimización y planificación con sistemas híbridos de carácter renovable, pero al disponer de librerías pre-modeladas limita el diseño de algunas variables, por eso se busca complementarlo con otro software que pueda realizar la modelización de esas variables de forma matemática y precisa.

3. MANUAL DE USO DEL SOFTWARE HOMER

A modo de introducción sobre el funcionamiento del software Homer se ha llevado a cabo una guía básica sobre los conceptos del programa que hay que tener en cuenta para poder realizar un correcto uso del software, mostrado a continuación.

Al empezar un proyecto en Homer la primera tarea a realizar es ubicar en el mapa la localización de la zona del estudio a realizar, pudiendo asignarle un nombre a dicha ubicación y una descripción si se desea (Figura 1).

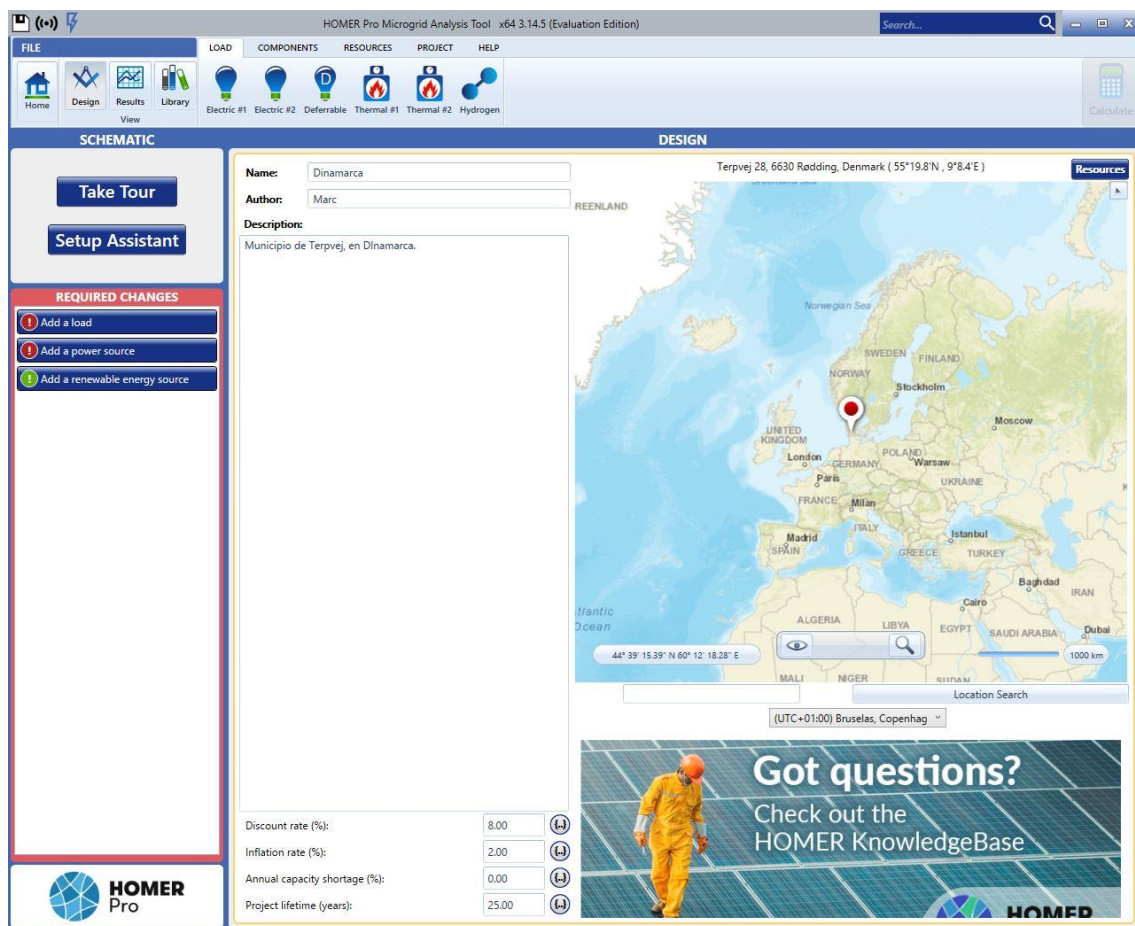


Figura 1. Selección de la ubicación.

Antes de realizar ninguna simulación, hay cuatro puntos importantes a tener en cuenta que van a determinar el devenir del estudio, y un quinto punto que trata los resultados obtenidos, se explicarán en detalle más adelante, pero a continuación se muestra una breve descripción:

- Carga: En este apartado hay que introducir la carga energética asociada al proyecto que estamos realizando.
- Recursos: Aquí hay que cuantificar los recursos energéticos de los que se disponen en la ubicación establecida, de diversa tipología si es el caso.
- Componentes: A partir de los recursos y las tecnologías disponibles, hay que decirle al programa que tipo de tecnología se va a utilizar para realizar la simulación.
- Proyecto: Una serie de aspectos relativos al momento de realizar la simulación del diseño realizado, incluye factores económicos, de emisiones, de sensibilidad o de estimaciones entre otros.
- Resultados: En este punto se puede visualizar el resultado de la simulación realizada por el software Homer a raíz de los datos introducidos en los cuatro puntos anteriores.

A continuación, una explicación más detallada para comprender como funciona cada uno de los tres puntos más importantes al iniciar un proyecto en Homer:

Carga

En el apartado de carga tenemos que introducir en el programa la carga existente en el sistema con el que vamos a trabajar en Homer, nos da la opción de introducir diferentes tipos de carga (cargas eléctricas, térmicas e hidrógeno) seleccionando la o las que hagan acto de presencia en el sistema de estudio (Figura 2).



Figura 2. Tipos de cargas seleccionables.

Carga eléctrica: Hay dos modos de introducir los datos referidos a la carga eléctrica (Figura 3), una genérica más sencilla que se basa en utilizar uno de los perfiles prediseñados disponibles (Residencial, Comercial, Industrial o Comunitario) pudiendo modificarlo a tus necesidades con datos mensuales por horas (Figura 4) y otra donde puedes importar la carga desde un archivo de texto con datos horarios diarios (Figura 5).

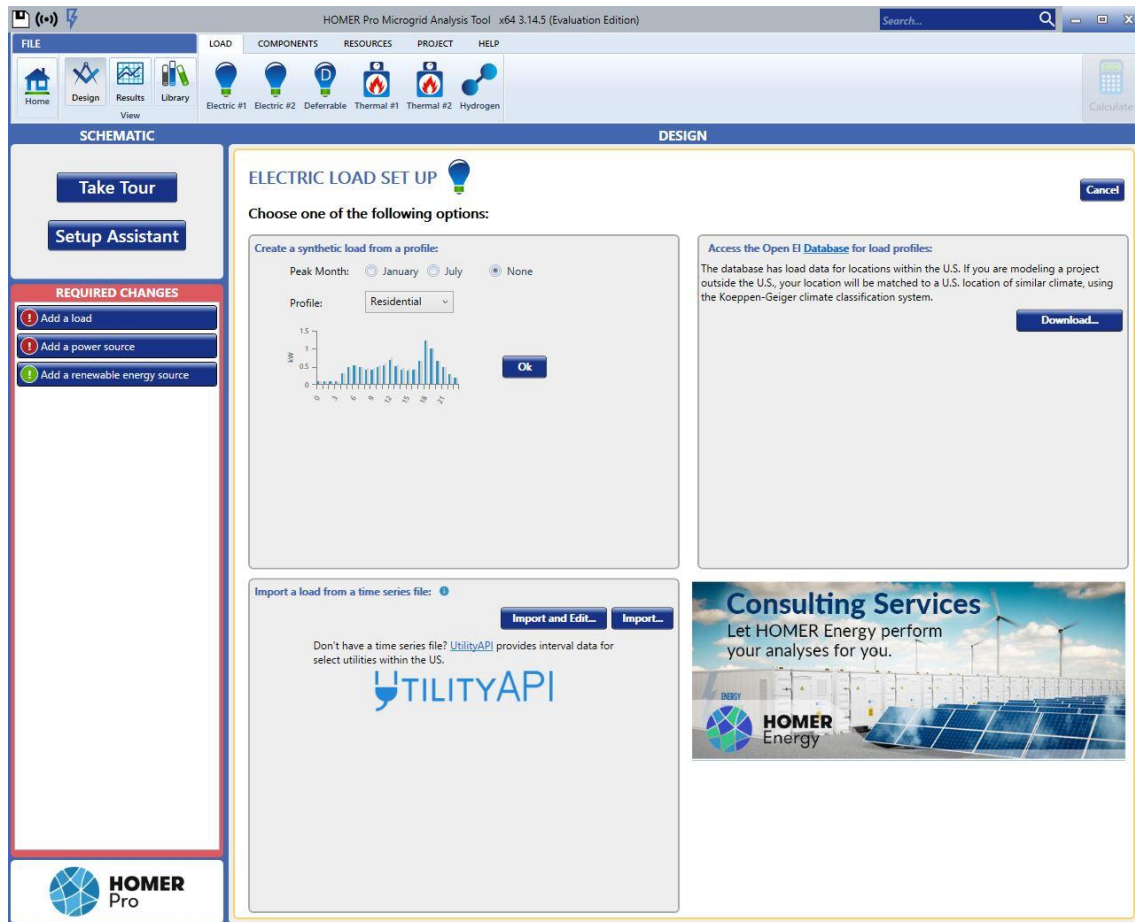


Figura 3. Entrada de datos en carga eléctrica.

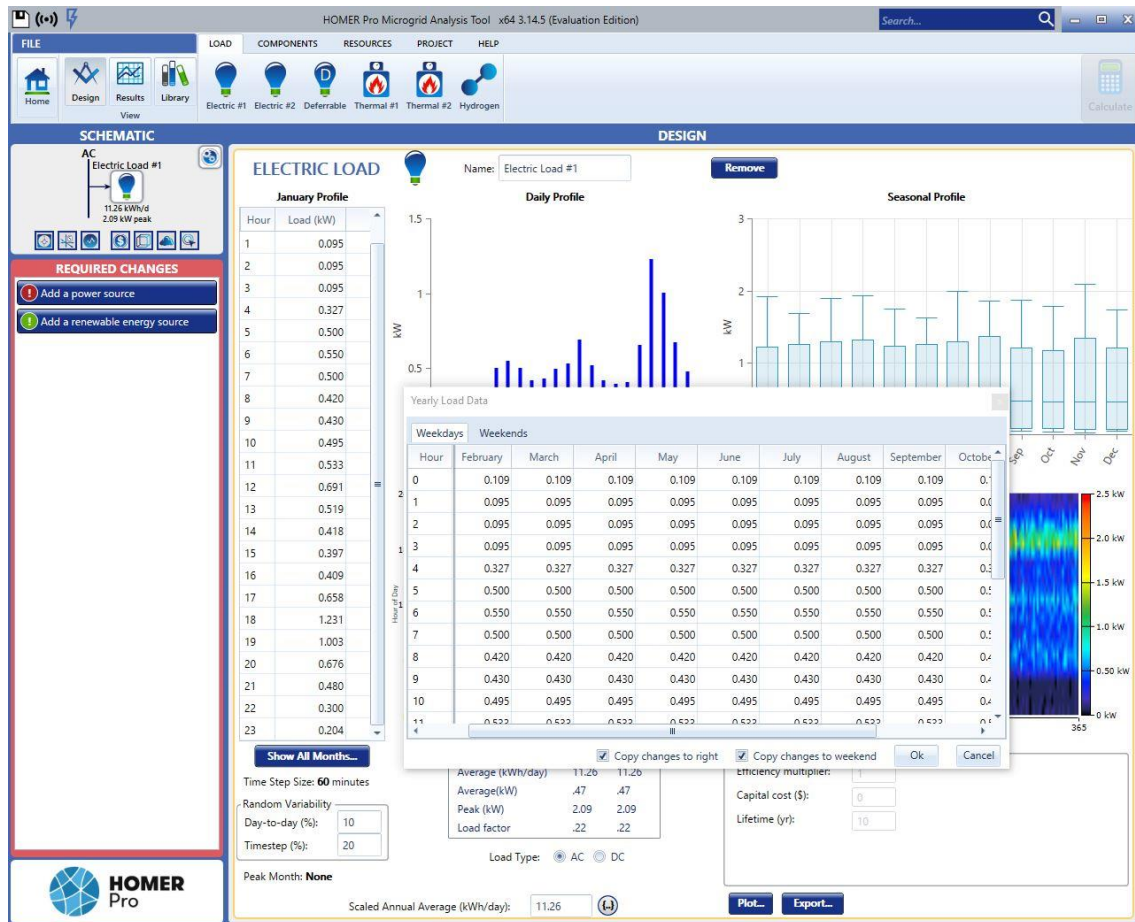


Figura 4. Modificación datos modo predefinido.

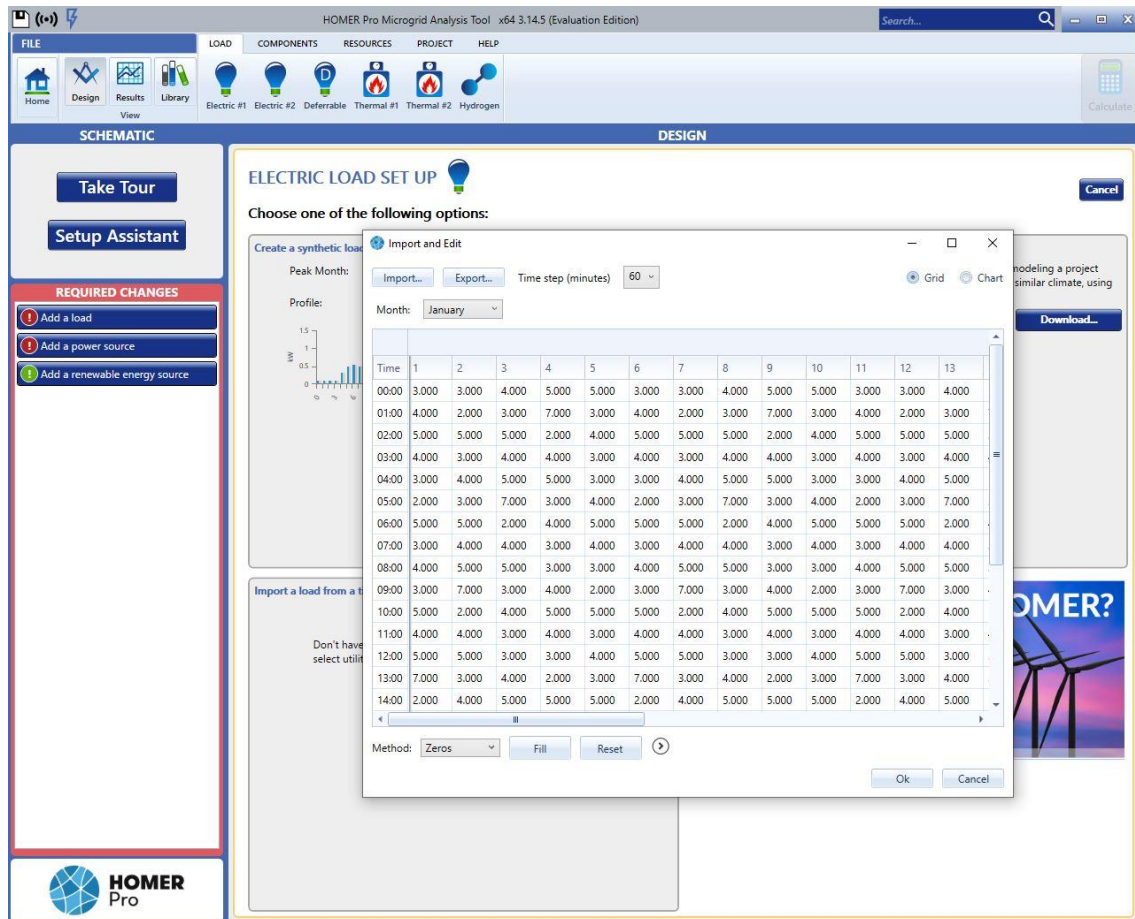


Figura 5. Introducción datos importados carga eléctrica.

El fichero de texto que contiene los valores para cada hora de cada día del año ha de tener los 8760 valores necesarios (horas anuales) listados en una única columna de texto (Figura 6). Hay otros modos pero este es el mas sencillo y rápido.

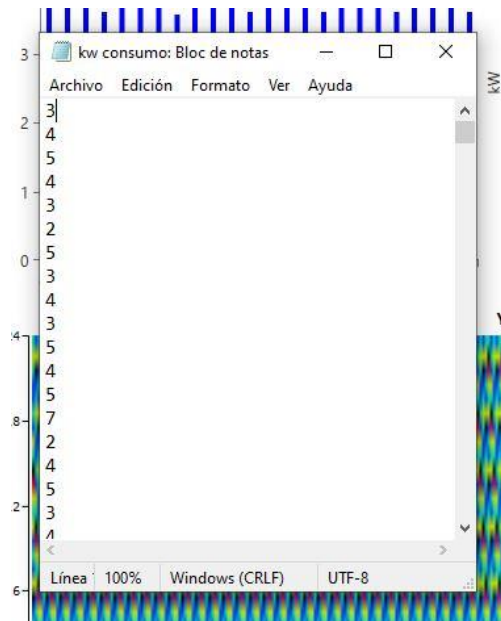


Figura 6. Formato del fichero de texto con datos del consumo.

Carga diferible: De una utilidad similar a la carga eléctrica, es una herramienta útil para utilizar los datos mensuales medios (kWh/día) para usarlos como datos de partida básicos a rellenar detalladamente más adelante en el proyecto. En este punto solo es posible introducir los datos de forma manual y simplificada (Figura 7).

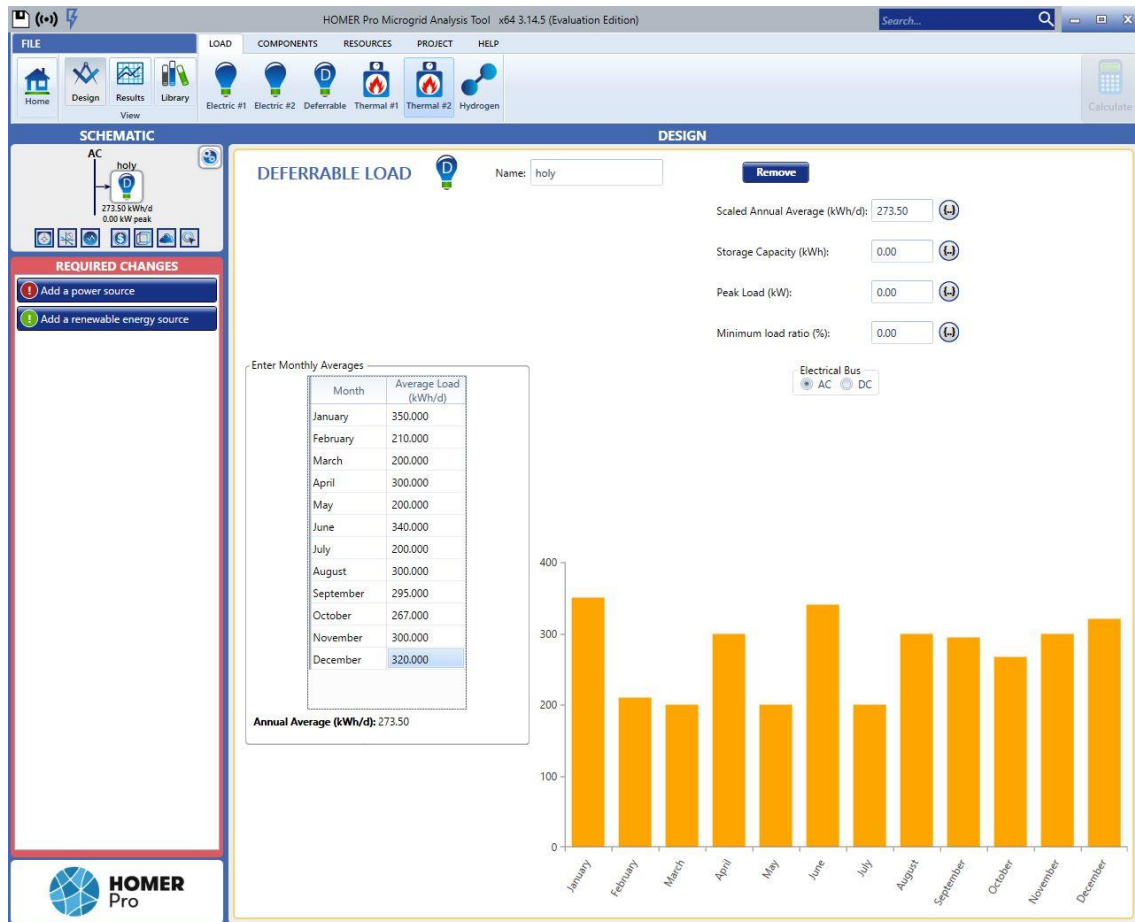


Figura 7. Introducción de datos para la carga diferida.

Carga térmica: Funciona exactamente igual que la carga eléctrica, pudiendo elegir entre los perfiles básicos prediseñados que puedes modificar, o importando la carga a partir de un fichero de texto detallado de forma horaria a lo largo del año (Figura 8).

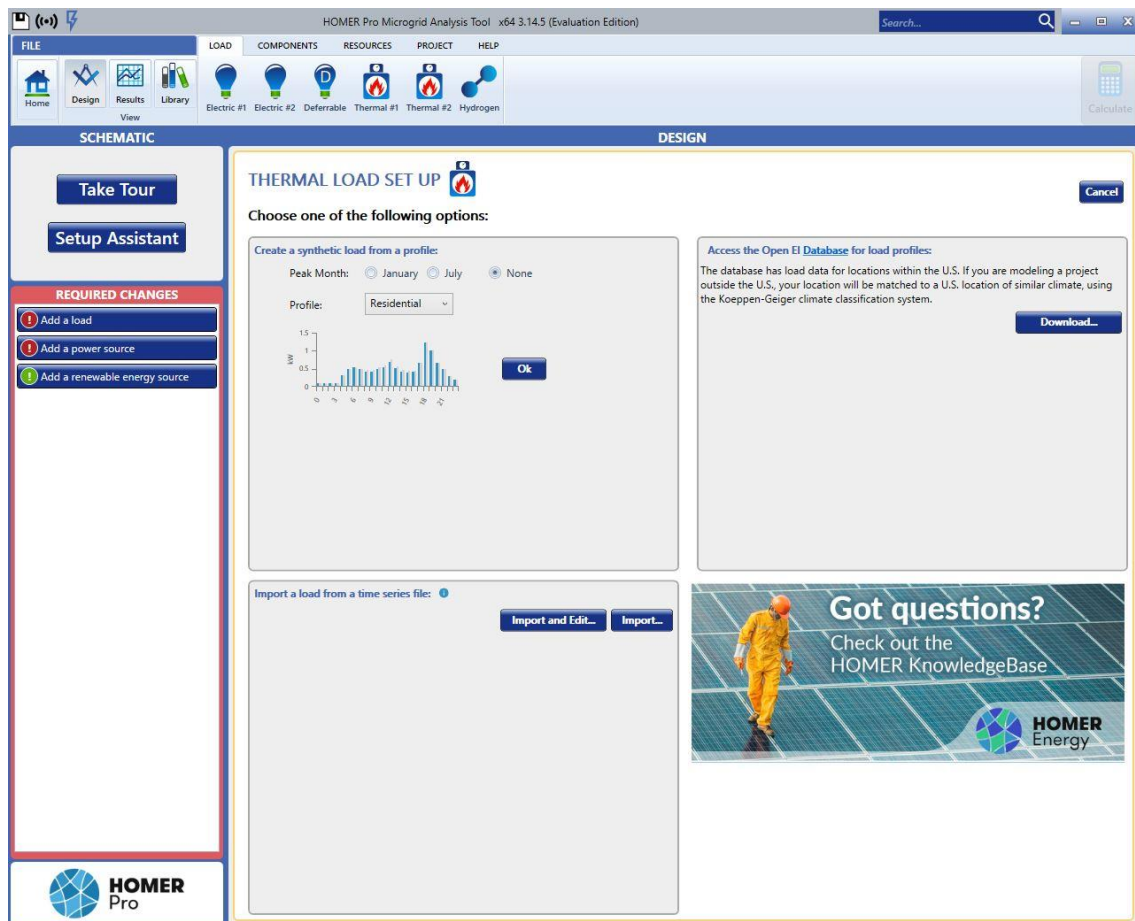


Figura 8. Entrada de datos de carga térmica.

Carga hidrógeno: Se trata del mismo sistema que la carga eléctrica y la carga térmica, se puede utilizar uno de los diseños prediseñados por el propio software o cargar datos de un archivo (Figura 9), a diferencia de la carga eléctrica y la térmica que cuantificaban la carga en kilovatios, la carga de hidrógeno es medida en kilogramos/hora.

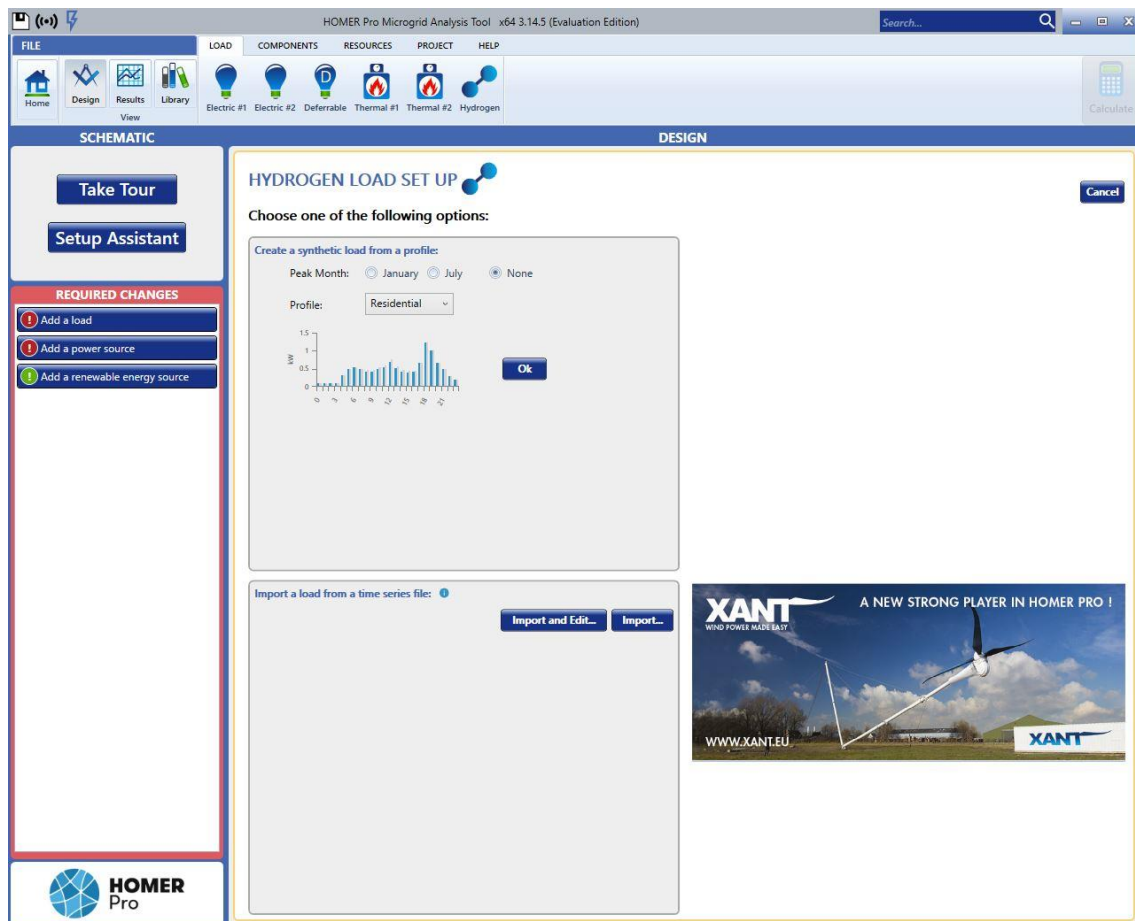


Figura 9. Entrada de datos de carga hidrógeno.

Recursos

Se considera recurso cualquier presencia en el entorno del sistema de estudio de alguna de las componentes seleccionables que generan o pueden aprovecharse para producir energía aprovechable para el sistema a estudiar durante la simulación, tales como; Irradiancia horizontal global, irradiancia normal directa, viento, temperatura, combustibles, hidrocínética, hídrico, biomasa y una última opción personalizable para recursos que no están predefinidos como los recién listados (Figura 10).

Varios de estos recursos se pueden calcular automáticamente mediante la base de datos del software Homer, a partir de la ubicación escogida al inicio del proyecto.



Figura 10. Tipos de recurso seleccionables.

Irradiancia Horizontal Global: La introducción de datos, al igual que sucede con los que se introducen en el apartado de *carga*, consiste en dos variantes. La primera de ellas consiste en utilizar la base de datos del propio software para que nos obtenga los valores asociados a la localización fijada al empezar el proyecto (Figura 11), la otra opción, si dispones de los datos precisos medidos de tu ubicación es importar dichos valores horarios anuales en kWh/m²/día para así aumentar la exactitud de la simulación (Figura 12).

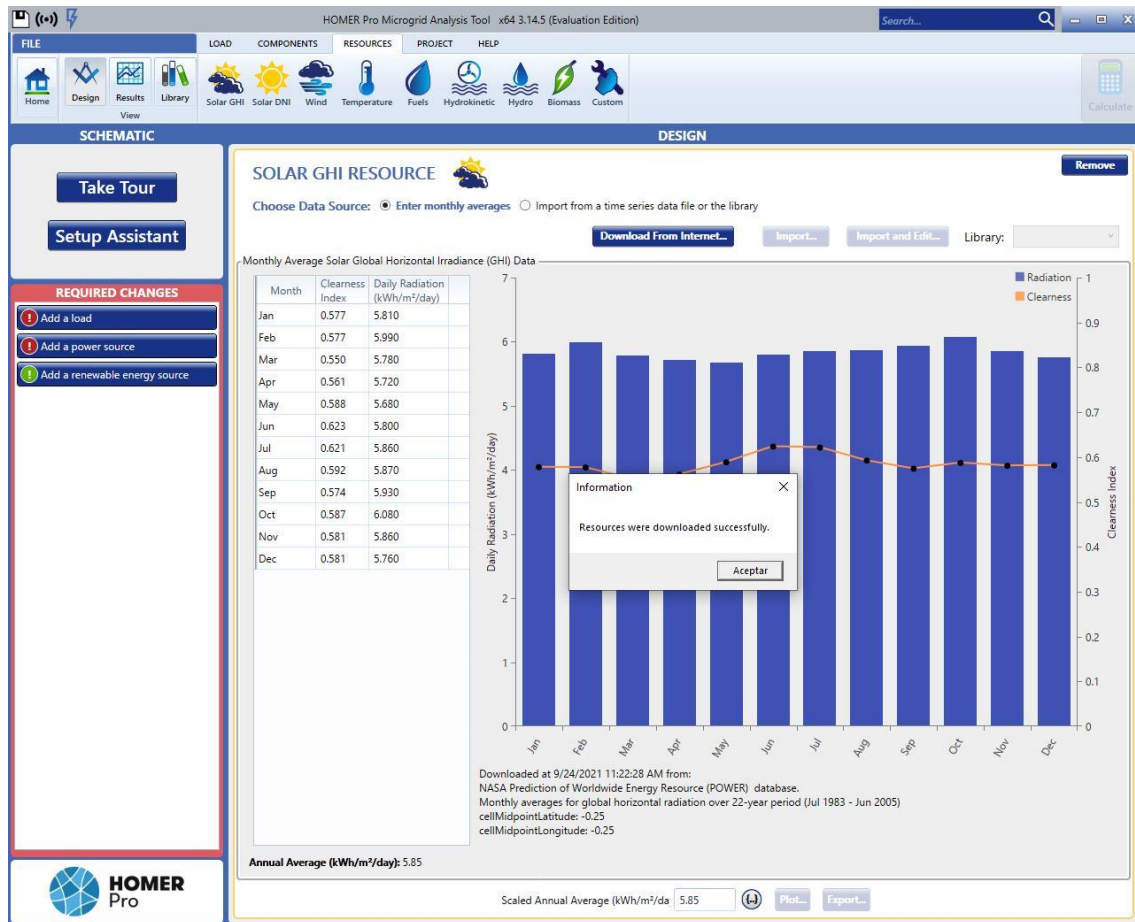


Figura 11. Carga de datos utilizando la base de datos del software.

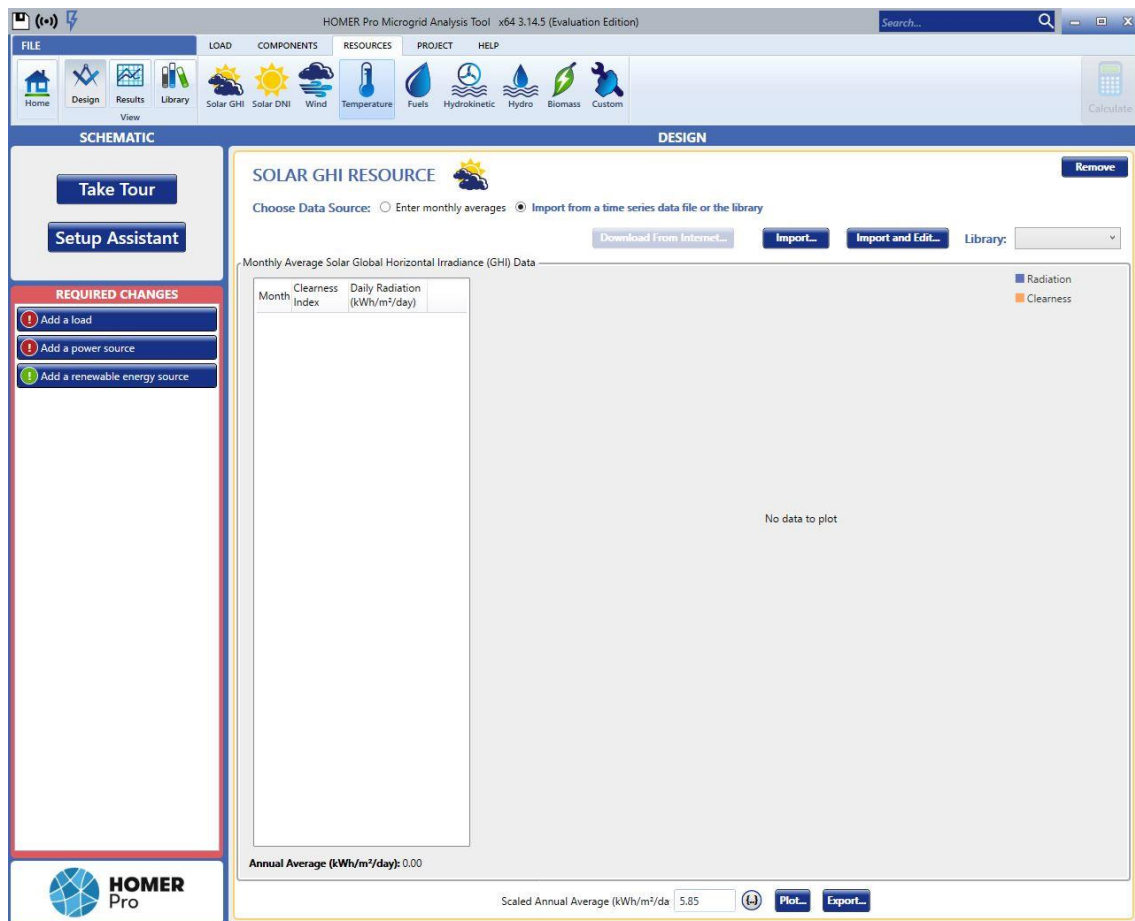


Figura 12. Importación manual de los datos necesarios.

Irradiancia Normal Directa: En este caso no existe la opción de cargar los datos de forma automática desde la base de datos que utiliza el software, de modo que la única opción que nos queda es importar los datos de forma horaria anual en kWh/m²/día (Figura 13).

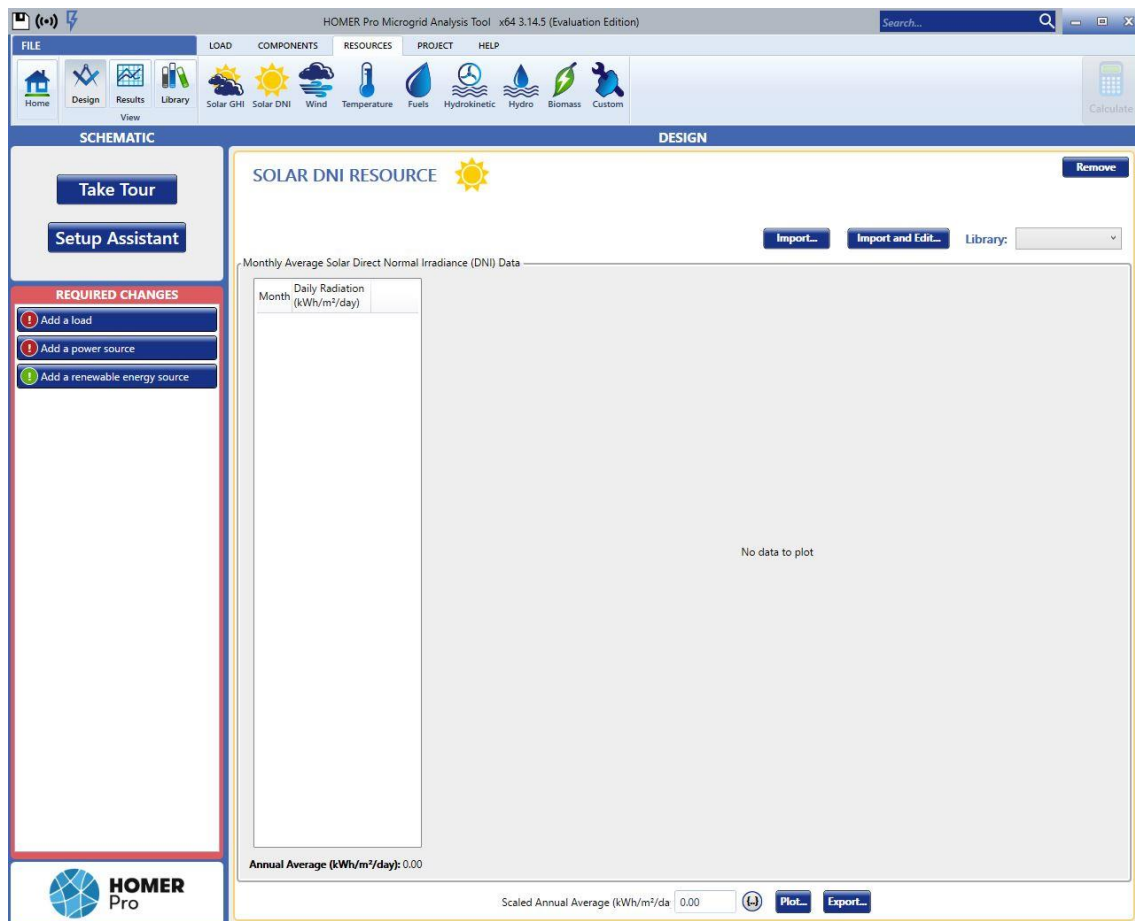


Figura 13. Importación manual de los datos necesarios.

Viento: Para el recurso eólico al igual que en varios de los recursos citados, existen dos modos de introducir los datos, un primer modo automático basado en utilizar los datos de la base de datos que utiliza el software a partir de la localización escogida para el proyecto (Figura 14), y un segundo método que se basa en importar los datos horarios anuales en m/s de la localización con total exactitud (Figura 15). Así mismo hay que introducir los valores referentes a la altitud sobre el nivel del mar y la altura del anemómetro.

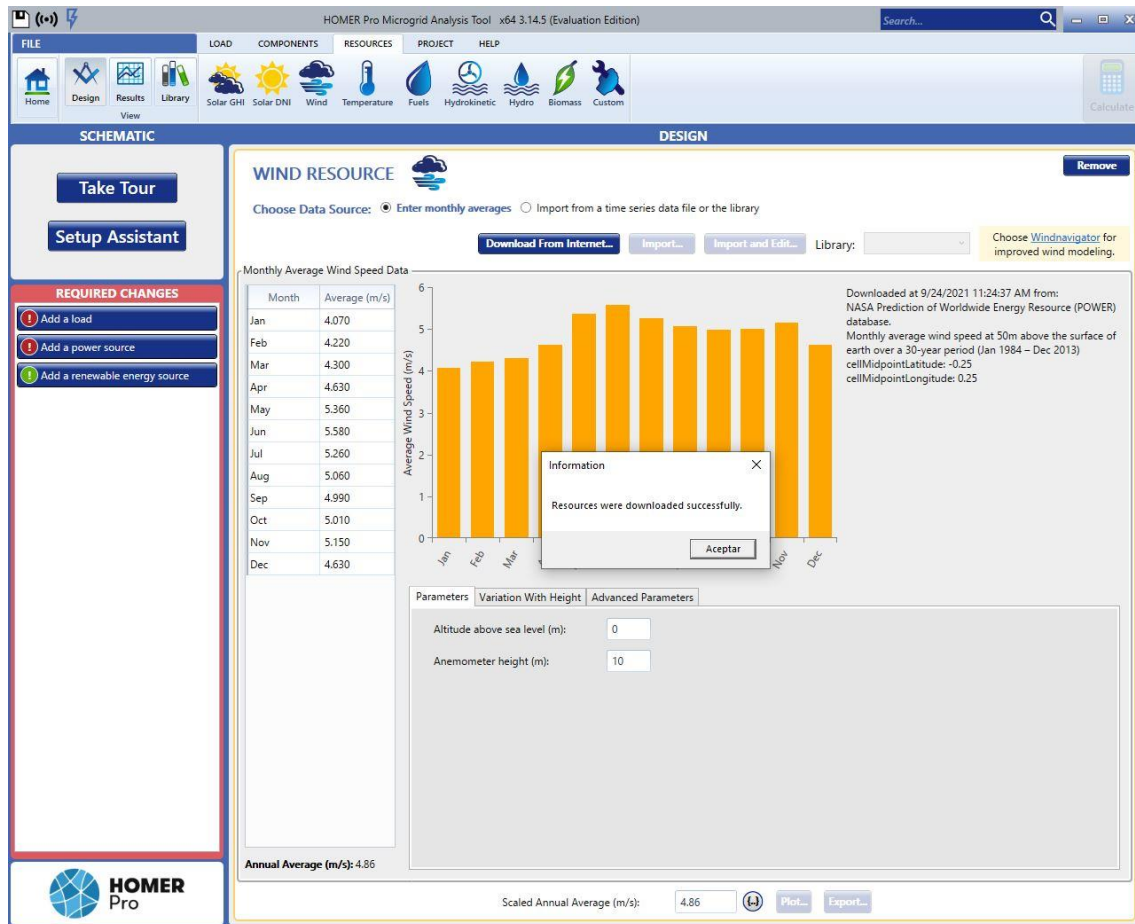


Figura 14. Carga de datos utilizando la base de datos del software.

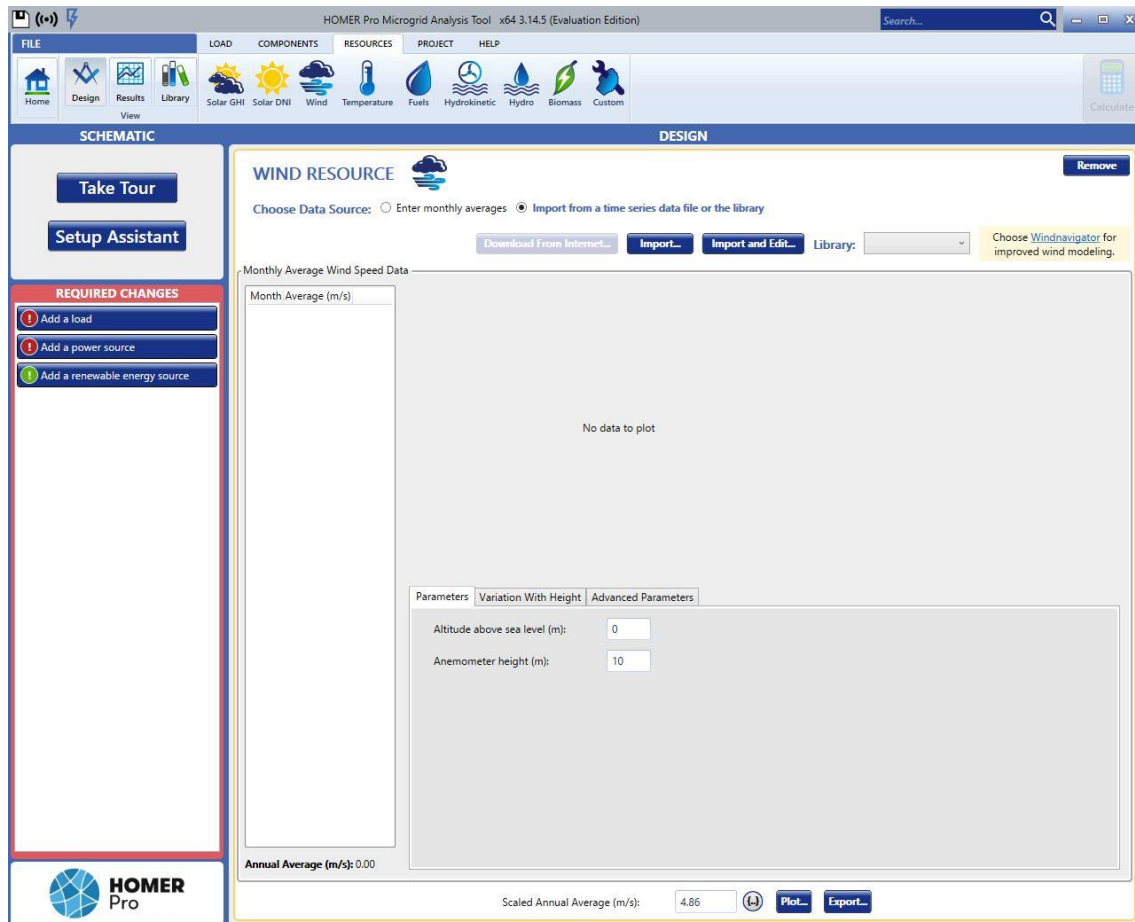


Figura 15. Importación manual de los datos necesarios.

Temperatura: Para la variable de la temperatura sucede exactamente igual que en la variable del viento, opción de utilizar la base de datos para cargar los valores correspondientes (Figura 16), o importar un archivo con datos horarios anuales en °C (Figura 17).

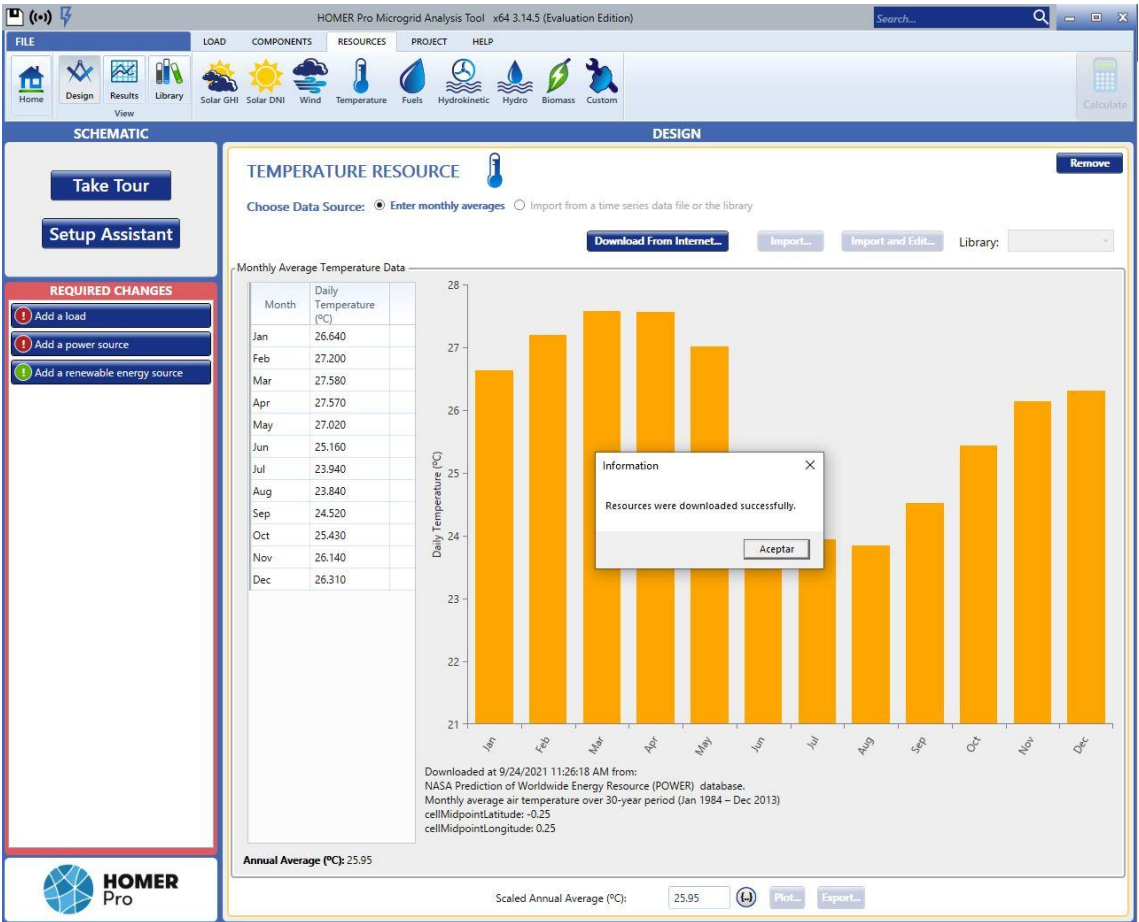


Figura 16. Carga de datos utilizando la base de datos del software.

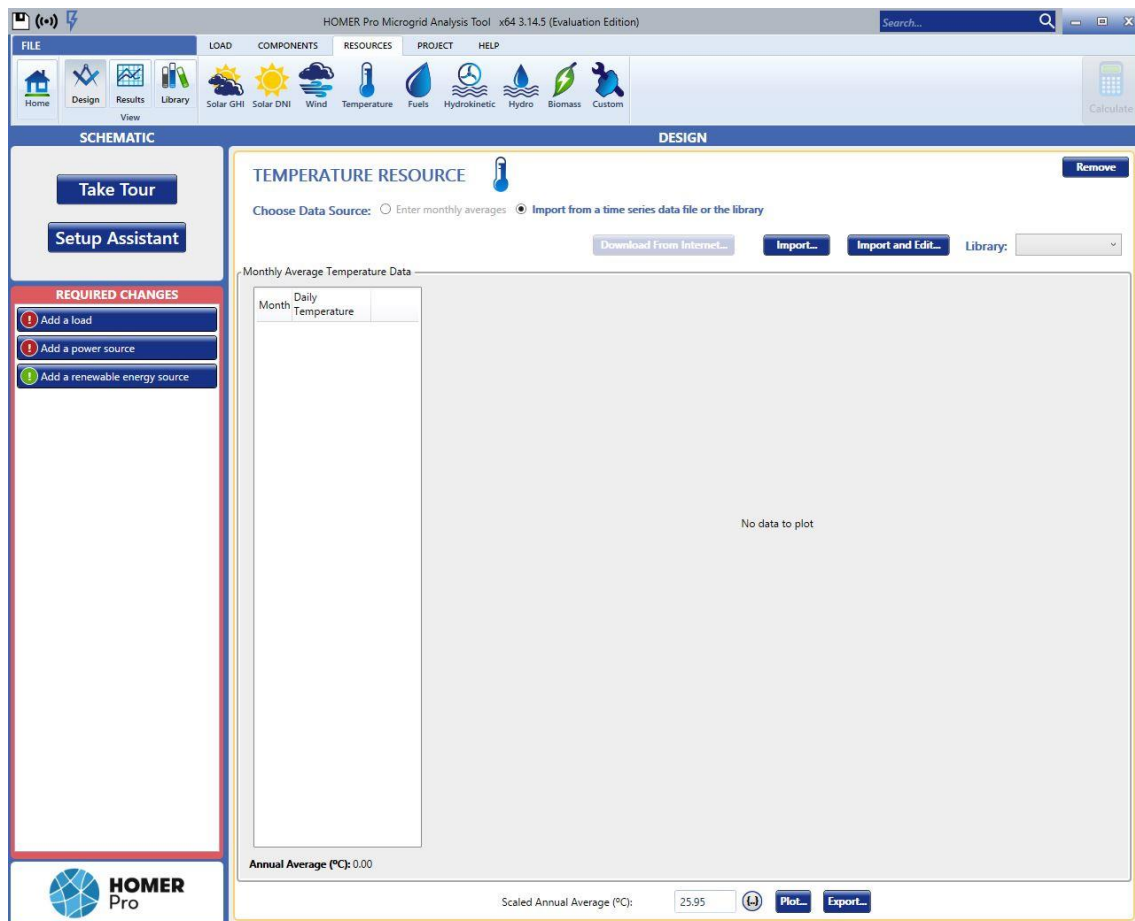


Figura 17. Importación manual de los datos necesarios.

Combustibles: Para cuantificar el recurso combustible hay que escoger el adecuado de una lista variada (Figura 18) y rellenar los datos referentes al mismo que te pide el software (Figura 19), tales como; poder calorífico inferior en MJ/kg, densidad en kg/m^3 , contenido en carbono en porcentaje, contenido en sulfuros en porcentaje, tipo de combustible, así como el precio en $\$/\text{m}^3$ y la posibilidad de marcar un límite de consumo anual en $\text{m}^3/\text{año}$.

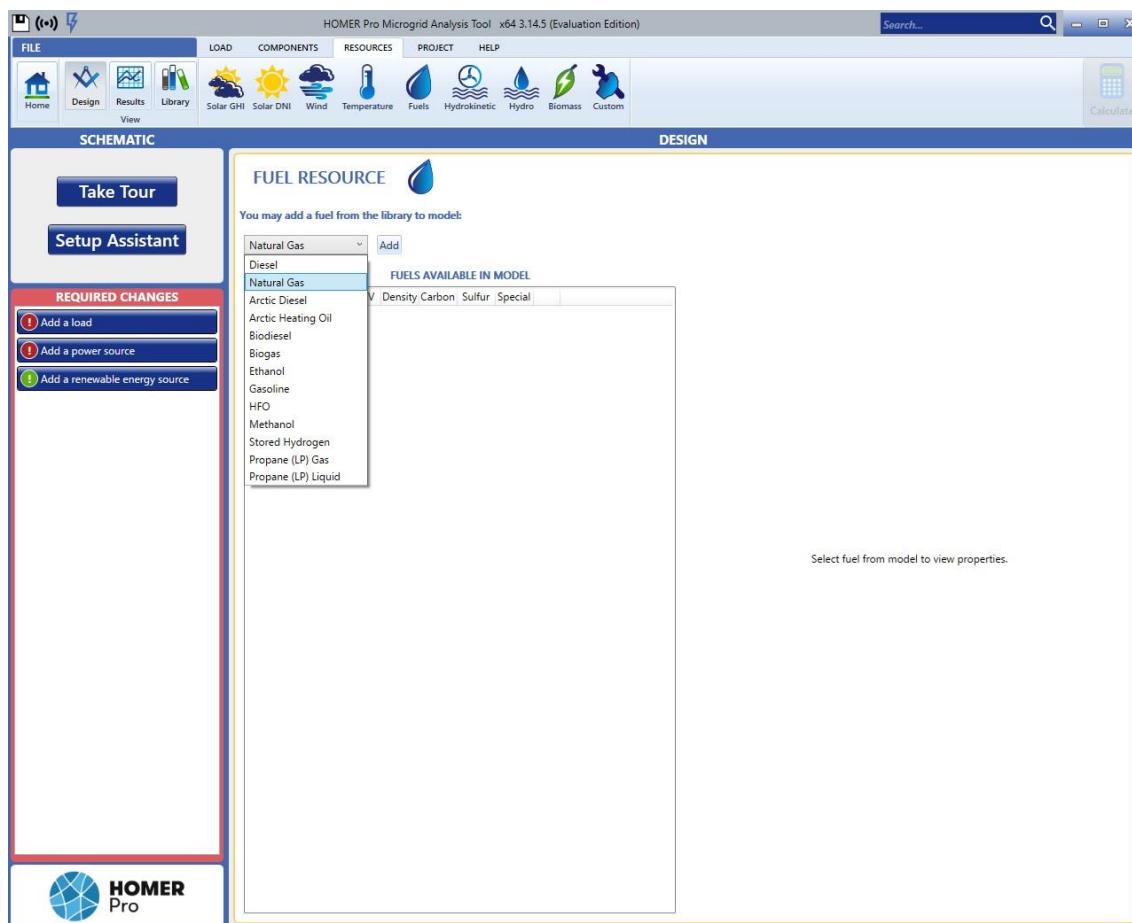


Figura 18. Selección del combustible.

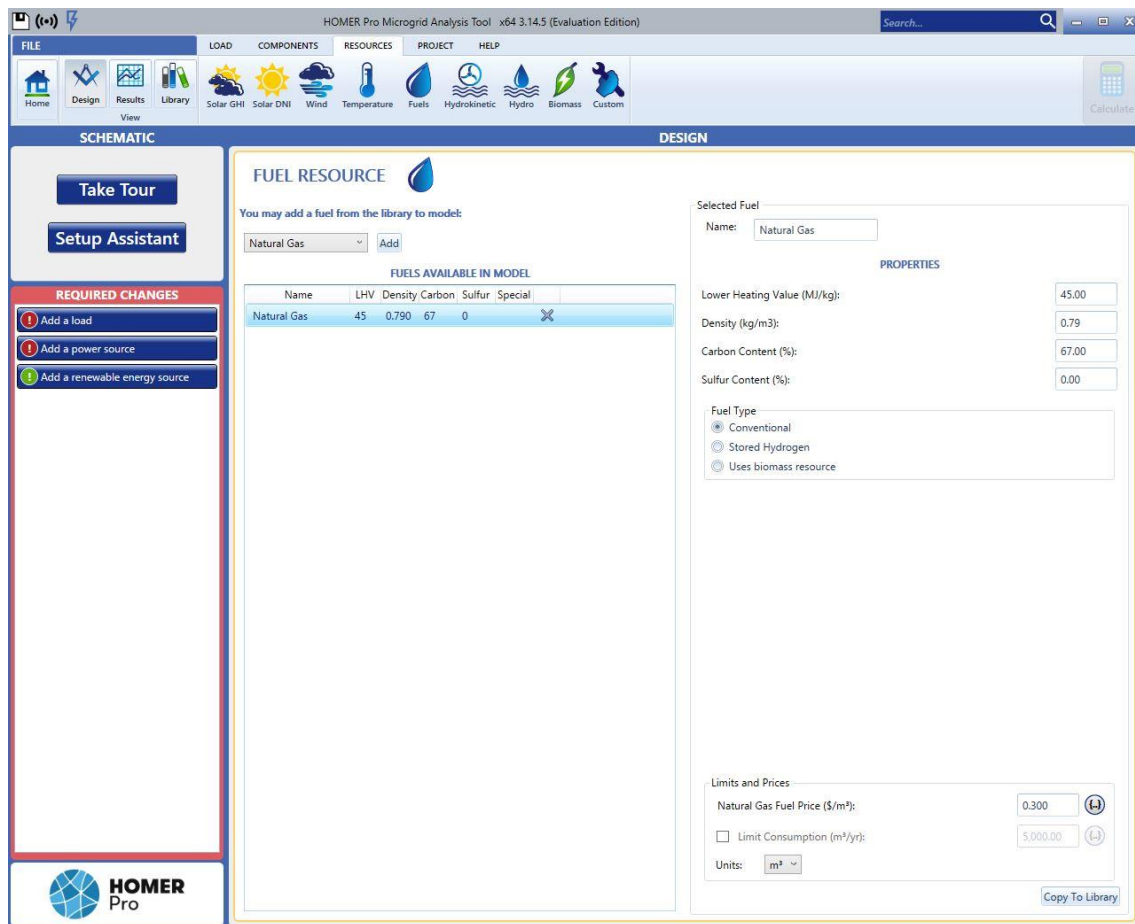


Figura 19. Configuración del combustible seleccionado.

Hidrocinética: En esta ocasión la entrada de datos se divide en dos modos, el primero es más sencillo y consta de introducir los valores medios mensuales de la velocidad del agua en m/s (Figura 20), y el segundo en importar un fichero de texto con los datos horarios anuales de la velocidad del agua en m/s (Figura 21).

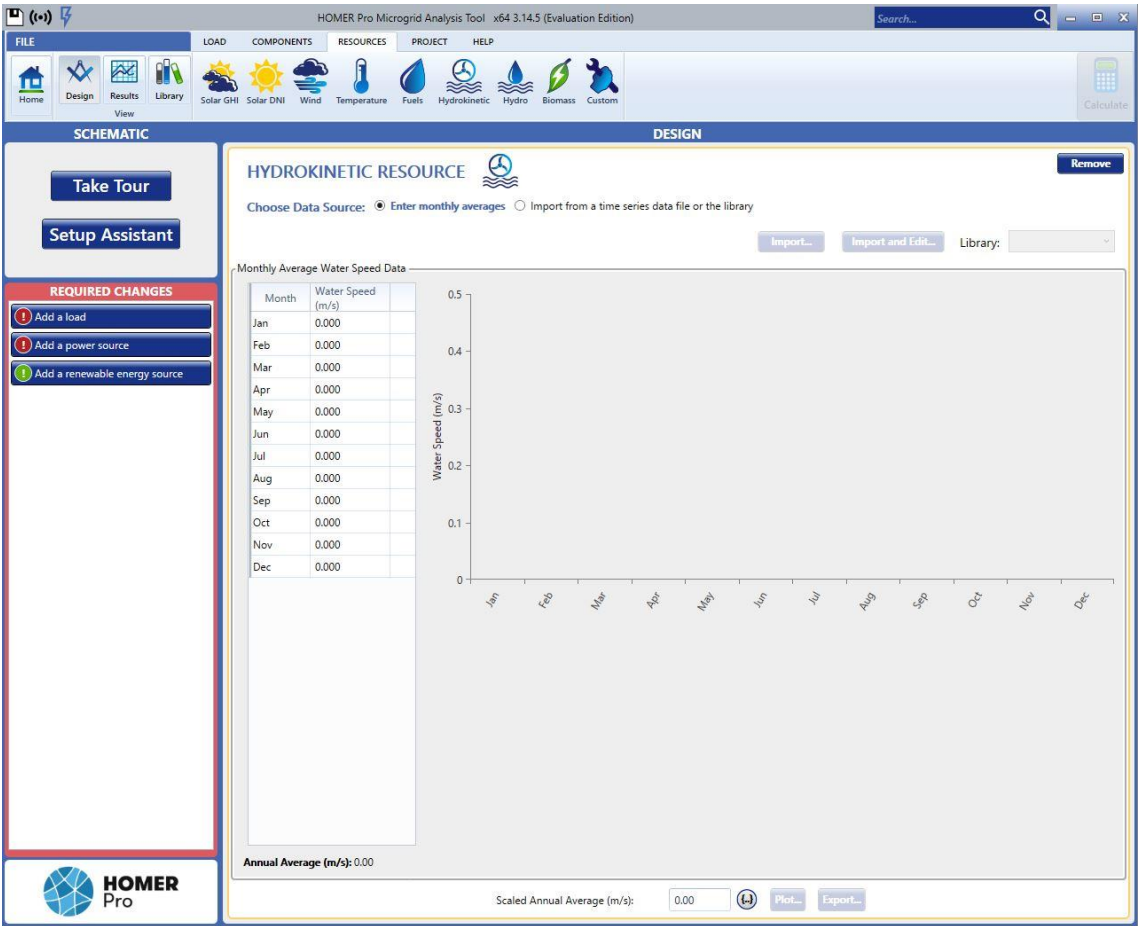


Figura 20. Agregar valores medios mensuales.

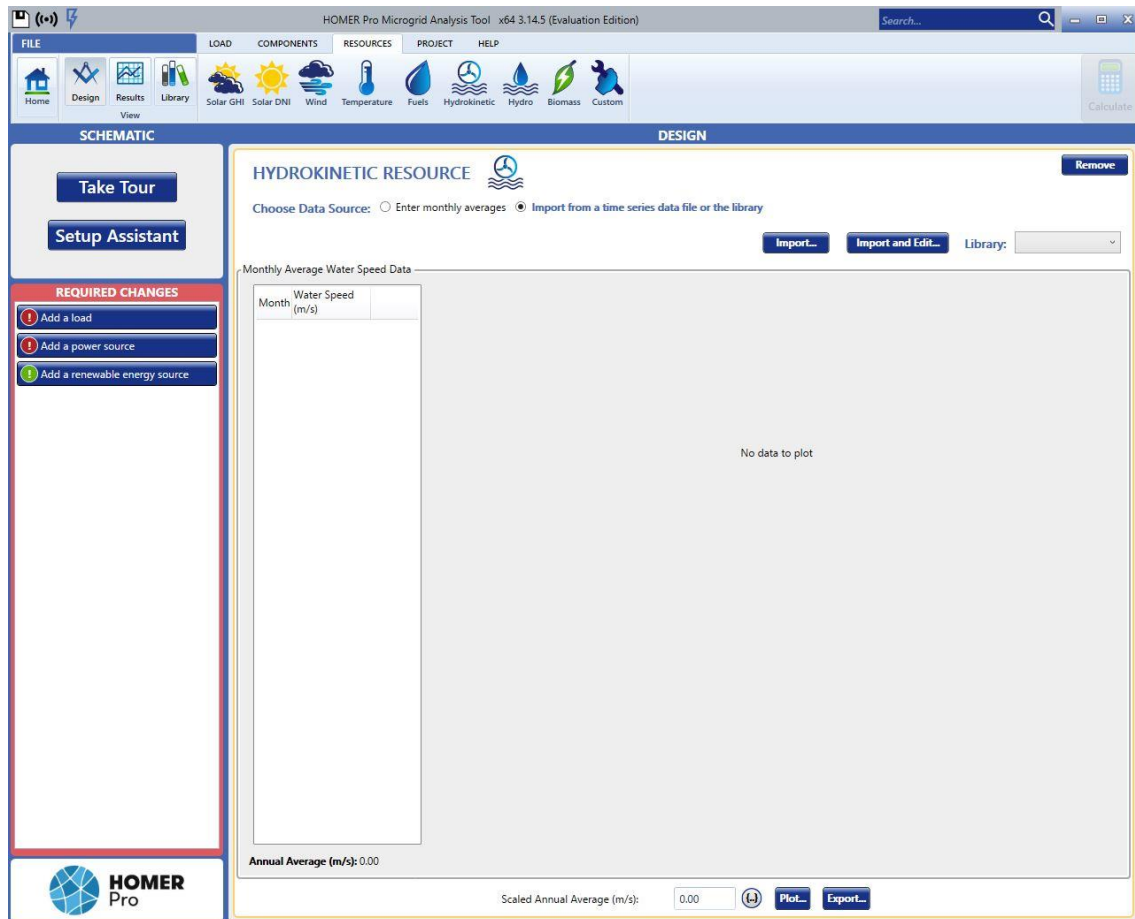


Figura 21. Importar datos desde fichero de texto.

Hidro: En este recurso se utiliza la misma metodología que para el recurso hidrocínética, dos modos de cargar los datos, el primero de ellos introduciendo manualmente la media mensual de caudal en L/s (Figura 22), y la segunda importando un fichero de datos con valores horarios anuales en L/s (Figura 23). En ambos casos hay que asignar un caudal residual en L/s.

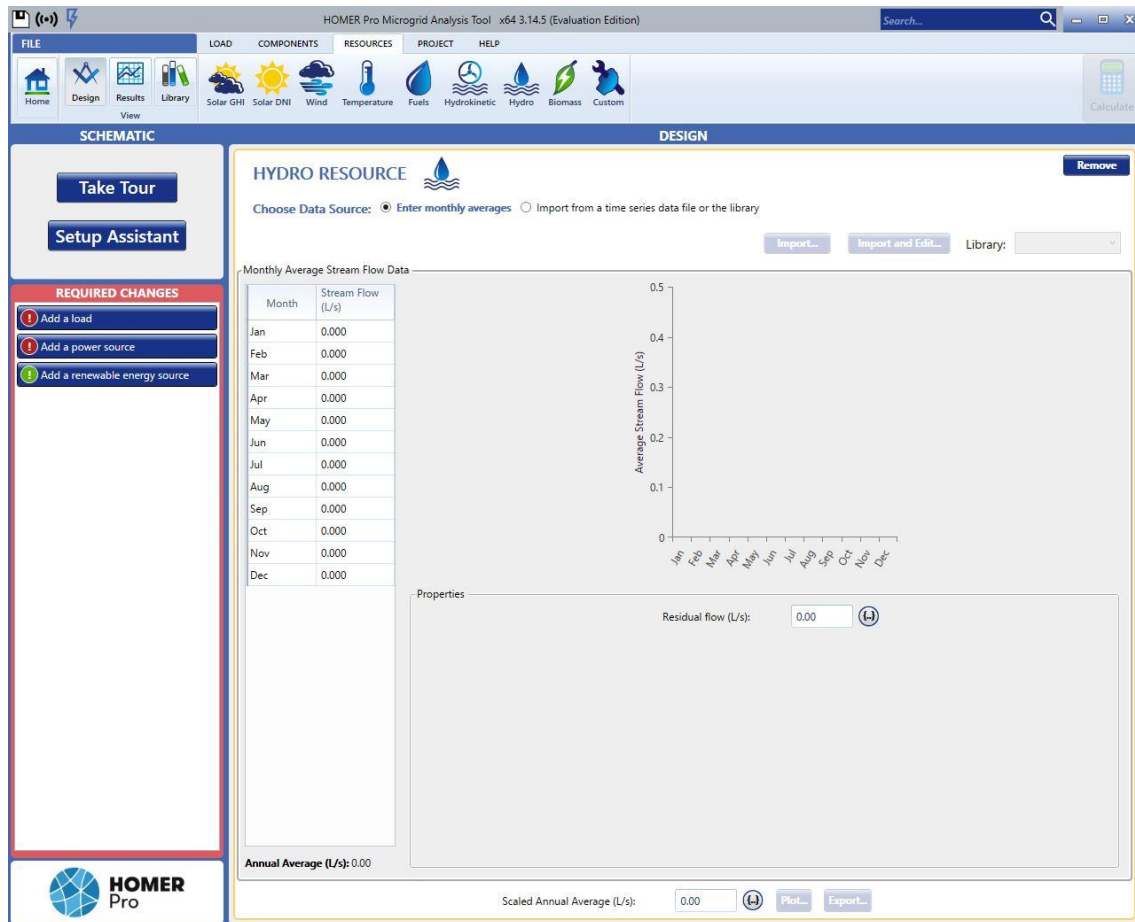


Figura 22. Agregar valores medios mensuales.

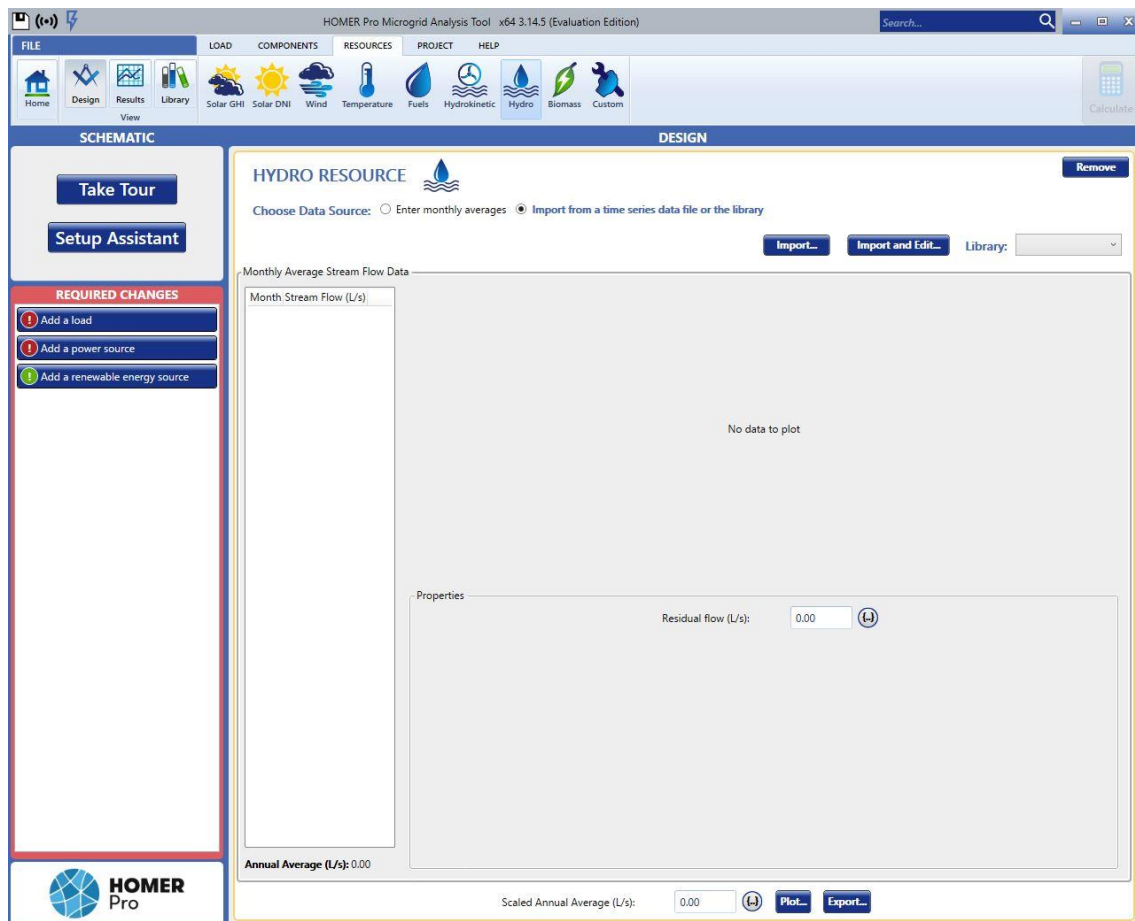


Figura 23. Importar datos desde fichero de texto.

Biomasa: En el recurso biomásico funciona similar al hídrico, se pueden introducir los valores necesarios de dos formas, mediante valores medios mensuales referente a la biomasa disponible en toneladas/día (Figura 24), o importando un fichero de texto con datos horarios anuales (Figura 25). En ambos casos hay que rellenar una información extra necesaria; precio medio en \$/tonelada, contenido en carbono porcentualmente, el ratio de gasificación en kg/kg y el poder calorífico inferior del biogás resultante en MJ/kg.

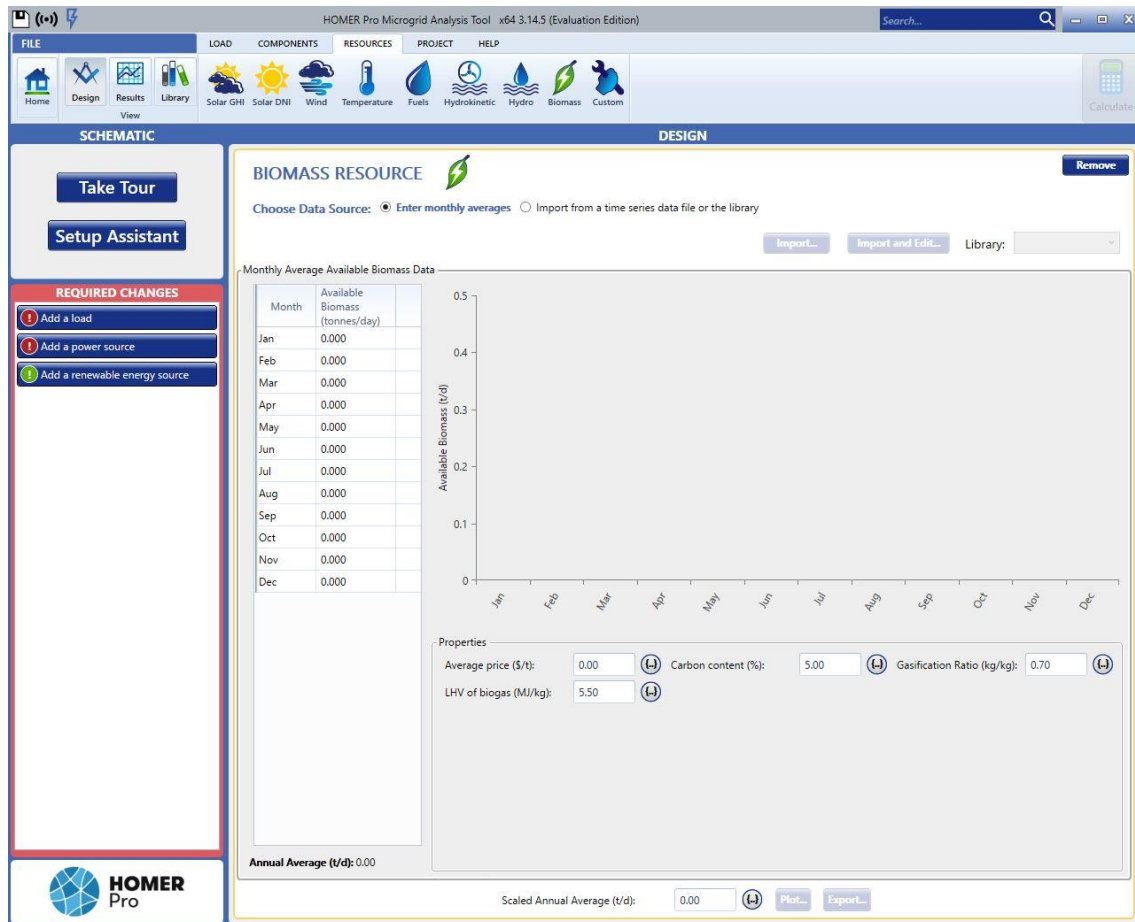


Figura 24. Agregar valores medios mensuales.

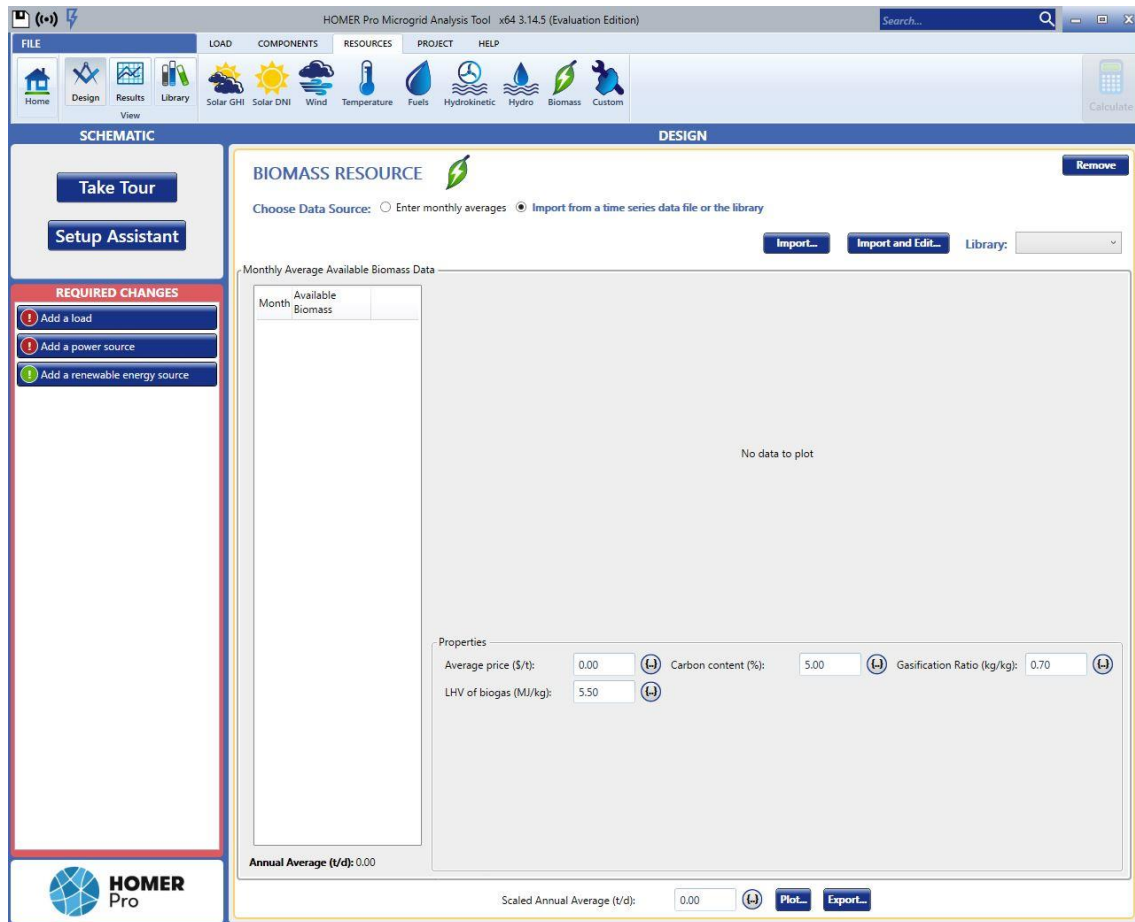


Figura 25. Importar datos desde fichero de texto.

Personalizado: Para introducir un recurso de tipo *personalizado* es necesario que previamente se halla introducido un componente de tipo *personalizado* (Figura 26) así, a partir de ese componente podemos introducir en el recurso la energía que produce anualmente, y poder contabilizarlo como un componente activo en el sistema (Figura 27).

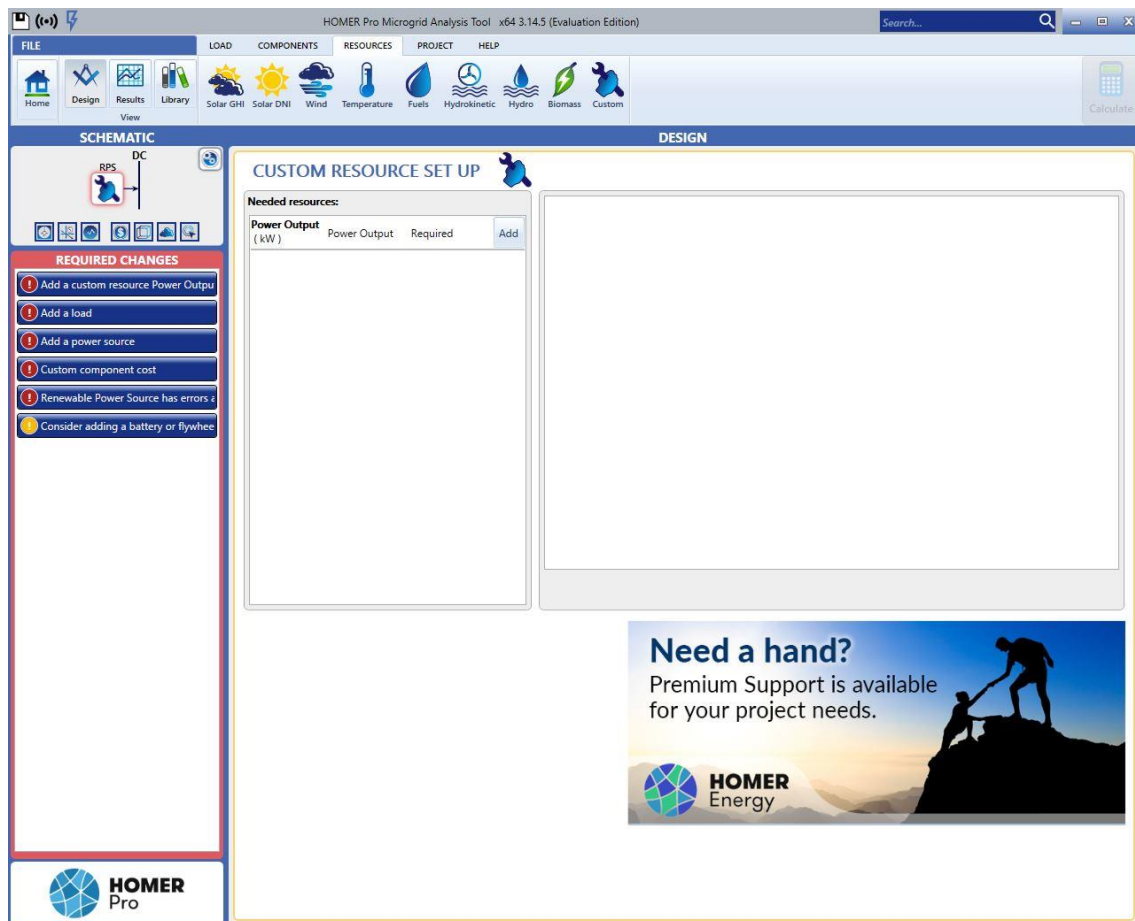


Figura 26. Selección recurso personalizado.

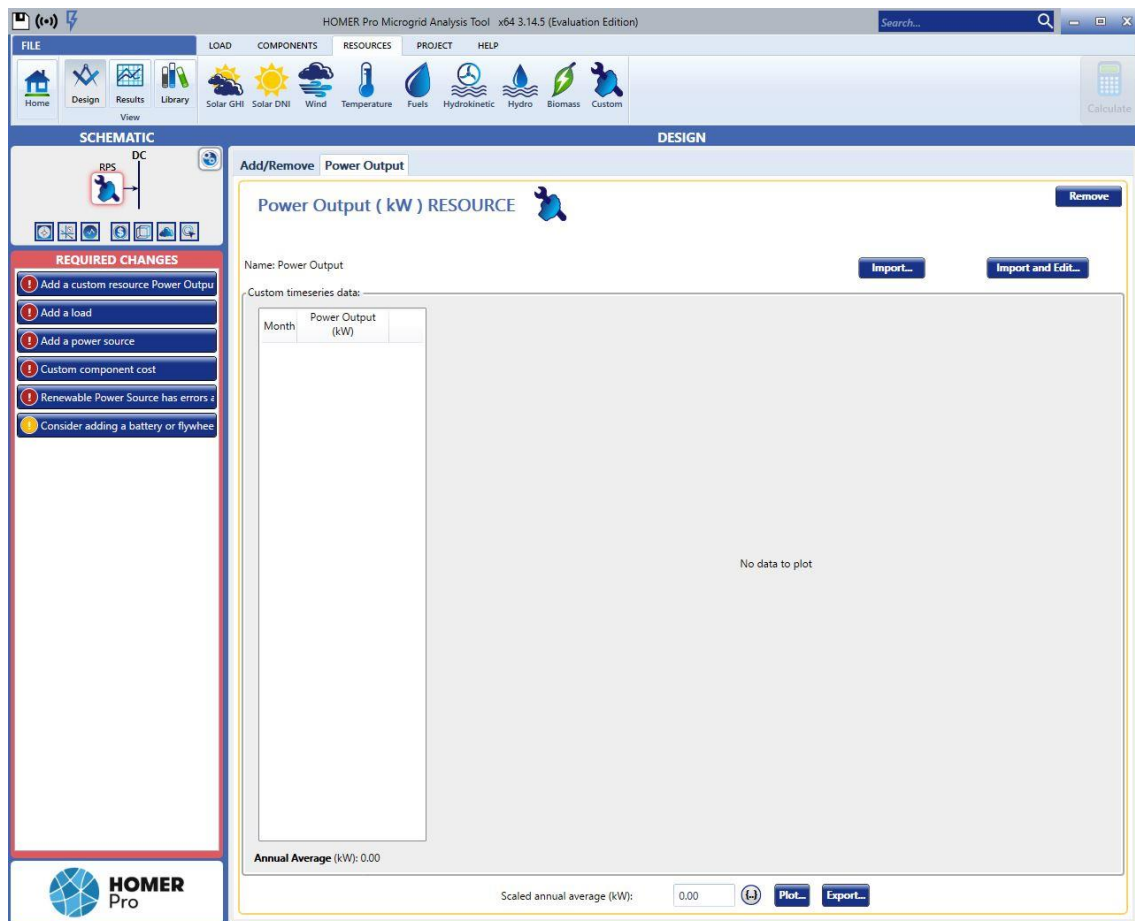


Figura 27. Modificación recurso personalizado.

Componentes

Una vez hemos especificado las cargas que vamos a tener presente en nuestro proyecto y el/los diferentes recursos de los que disponemos en la ubicación seleccionada, podemos pasar al tercer y último punto de la configuración inicial para la correcta utilización del software; los componentes (Figura 28).



Figura 28. Tipos de componentes seleccionables.

Los diferentes tipos de componentes entre los que podemos elegir son los siguientes; Generador, fotovoltaica, eólica, almacenaje, convertidor, caldera, hidráulica, reformador, electrolizador, tanque de hidrógeno, hidrocínética, red eléctrica, controlador carga térmica y un controlador para gestionar todos los componentes que coexistan en el sistema diseñado. También existe una opción de personalizar un componente en caso de que sea diferente a todos los anteriormente mencionados.

Generador: Se puede escoger entre generadores con diversos combustibles como diésel, gas natural o biogás entre otros, y con potencia variable (Figura 29). Una vez escogido el generador hay que especificar detalles del mismo tales como el coste inicial en \$, el precio del combustible utilizado en \$/L, la vida estimada en horas y otro tipo de características (Figura 30).

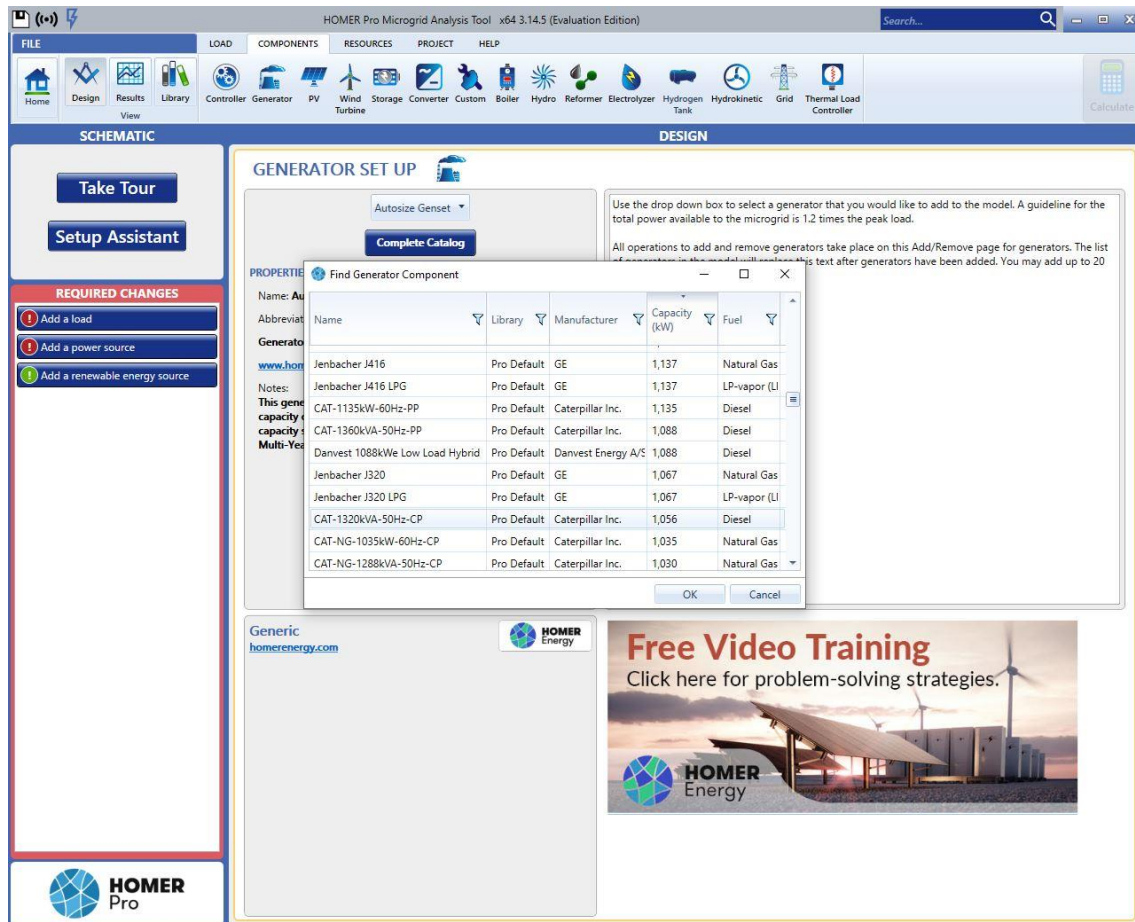


Figura 29. Selección del tipo de generador.

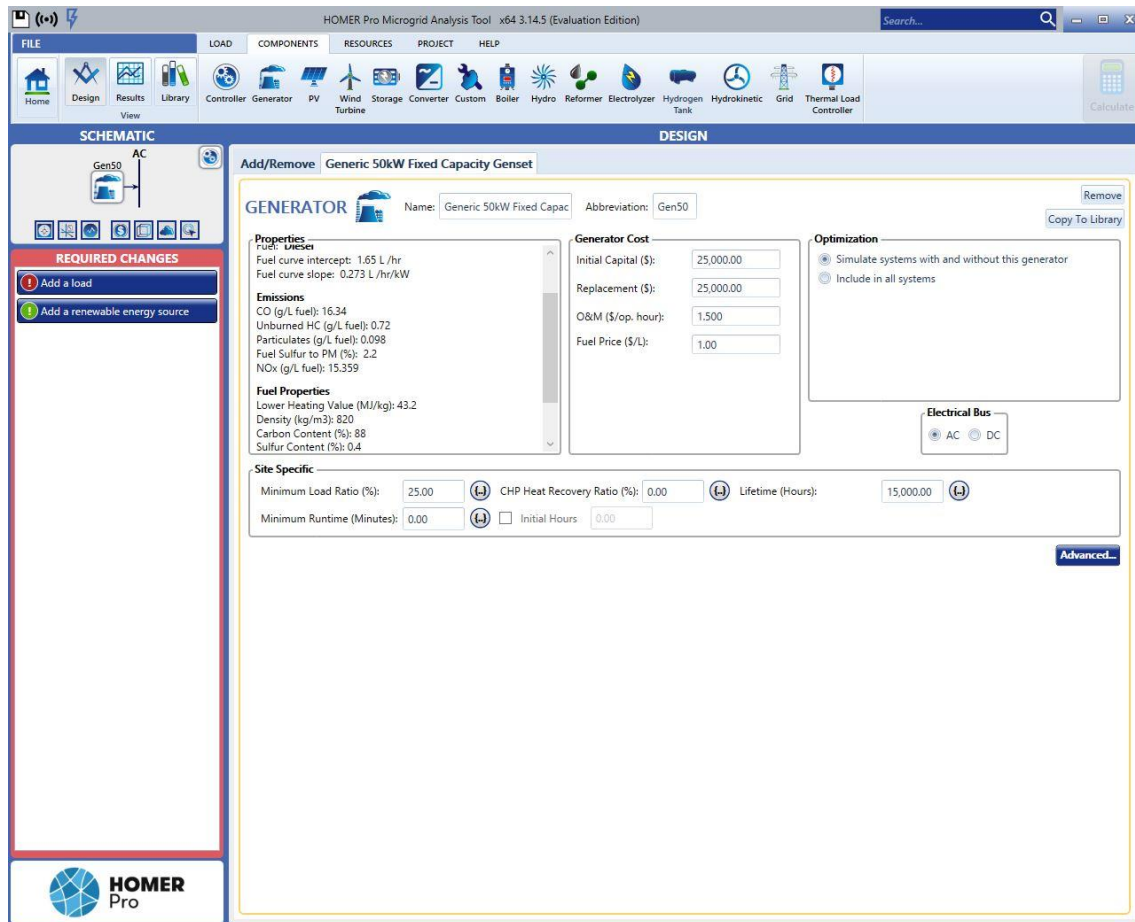


Figura 30. Características del generador.

Fotovoltaica: En definitiva, podemos escoger entre dos tipos de fotovoltaica, las placas comunes y las de concentración, en ambos casos el proceso a seguir es el mismo (Figura31).

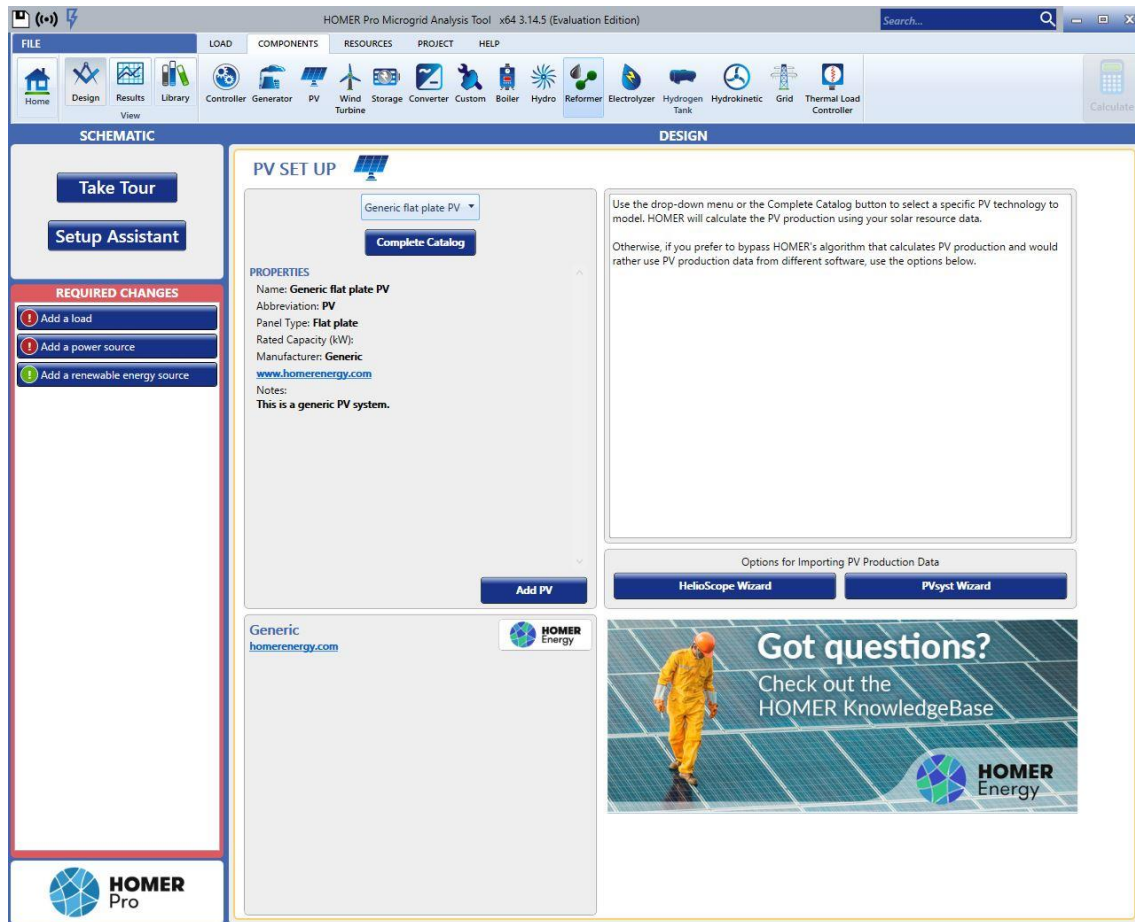


Figura 31. Selección de sistema fotovoltaico.

De forma automática los datos de producción energética son calculados a partir de la información introducida en el recurso solar especificado en el apartado *recursos*, pero existe la opción de cargar dicha producción a partir de software externo como es HelioScope y PVsyst.

Después de seleccionar el tipo de componente fotovoltaico hay que introducir manualmente información complementaria como el precio en \$, la capacidad en kW o la vida útil esperada en años (Figura 32).

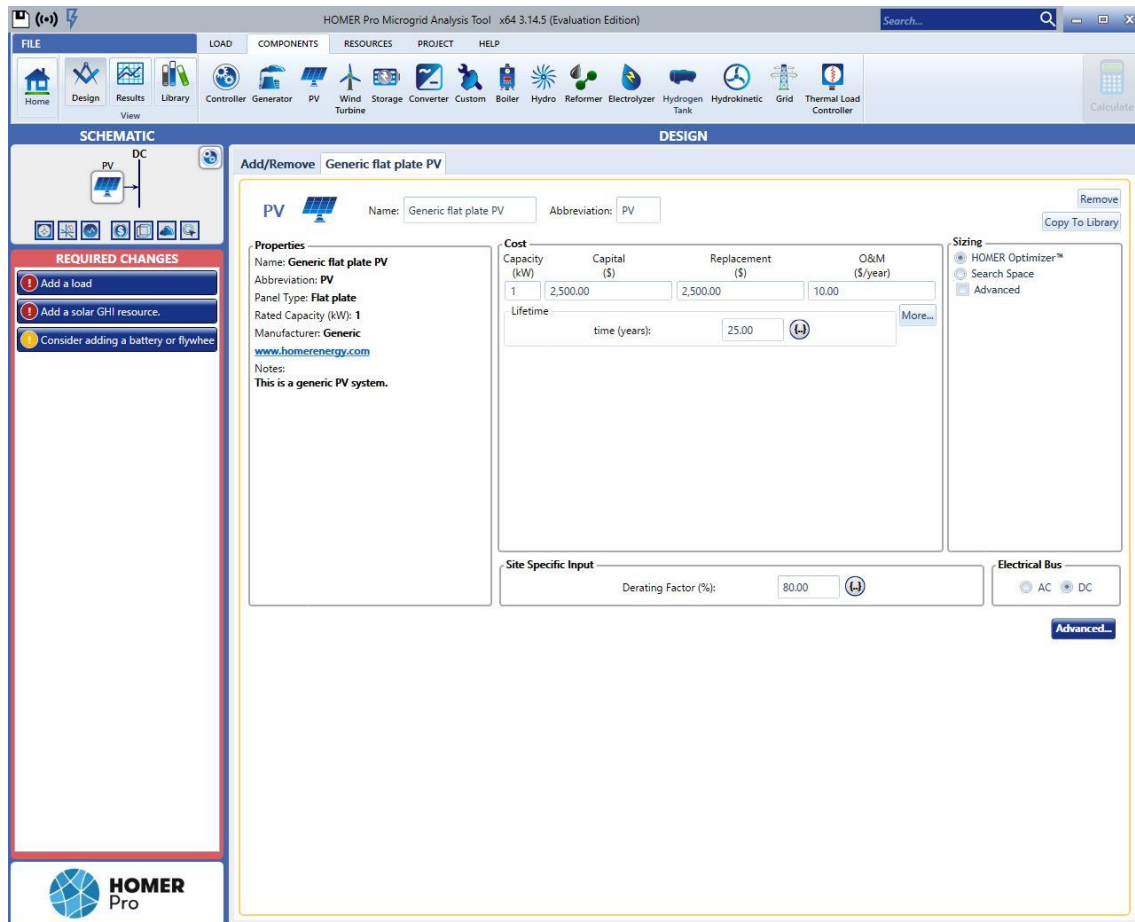


Figura 32. Configuración sistema fotovoltaico.

El último paso es ajustar las propiedades avanzadas del sistema a utilizar, referentes al seguidor del punto de máxima potencia (Figura 33), a la orientación (Figura 34) y la temperatura (Figura 35).

PV Advanced Properties

MPPT Orientation Temperature

☐ Explicitly model Maximum Power Point Tracker

Lifetime (years): 15.00

Costs

Size (kW)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/year)
1	\$0.00	\$0.00	\$0.00

Click here to add new item

Sizing

☐ Converter load capacity

☒ Capacity (kW)

PV/Conv. Ratio: 1

Size (kW): 1

☐ Use Efficiency Table?

Efficiency (%): 95

Input Percentage (%)	Efficiency (%)
Click here to add new item	

Ok

Figura 33. Ajustes avanzados del MPPT.

PV Advanced Properties

MPPT Orientation Temperature

Ground Reflectance (%): 20.00

Tracking System: No Tracking

☒ Use default slope Panel Slope (degrees): 0.00

☒ Use default azimuth Panel Azimuth (degrees West of South): 180.00

Ok

Figura 34. Ajustes avanzados de orientación.

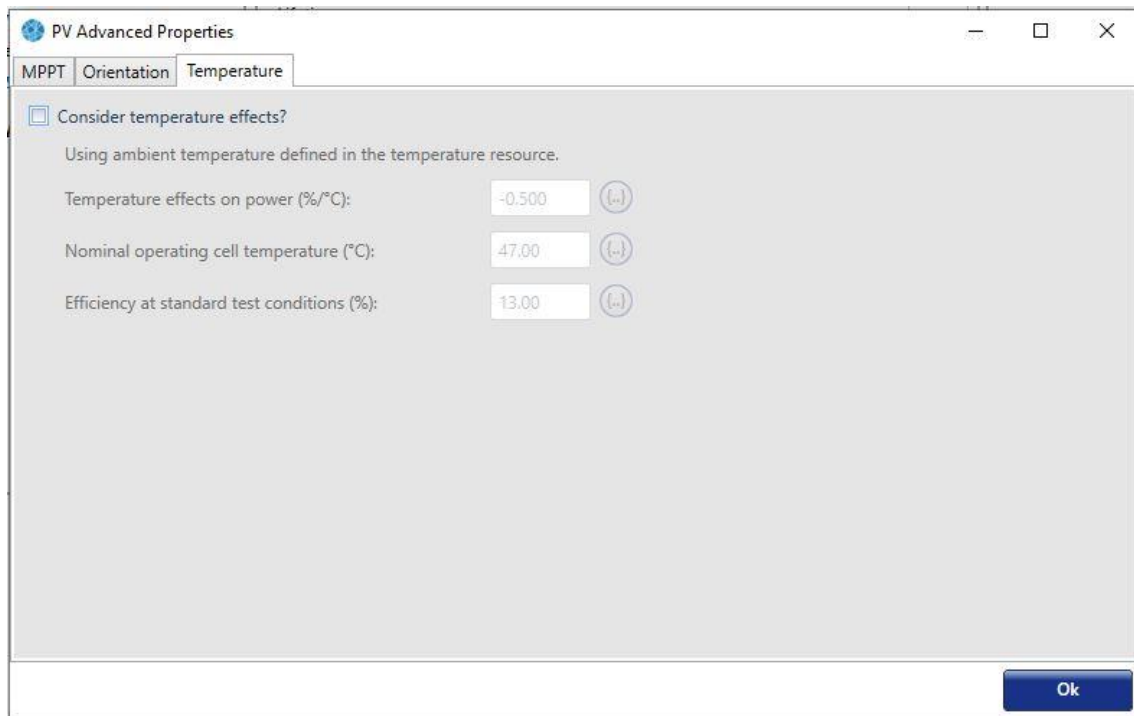


Figura 35. Ajustes avanzados de temperatura.

Eólica: Al igual que sucede con la fotovoltaica, hay que escoger una turbina eólica del desplegable para iniciar con los ajustes de la misma (Figura 36), en este caso no se puede importar datos de recurso eólico desde software externo, por lo que el propio programa Homer determinara la potencia generada a partir de los datos introducidos en el apartado *recurso eólico*. A continuación, hay que introducir los ajustes correspondientes de la turbina eólica, tales como; cantidad, coste en \$ o la altura del buje entre otros (Figura 37).

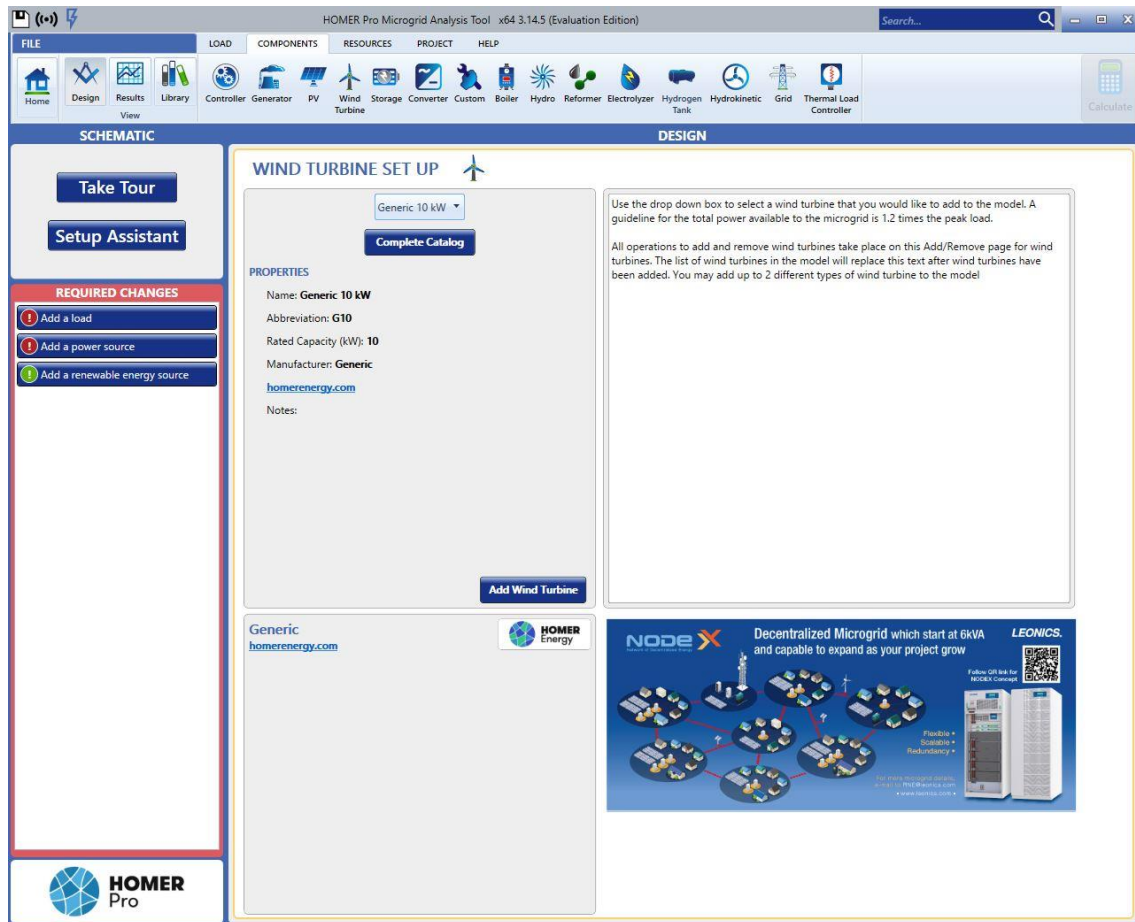


Figura 36. Selección de turbina eólica.

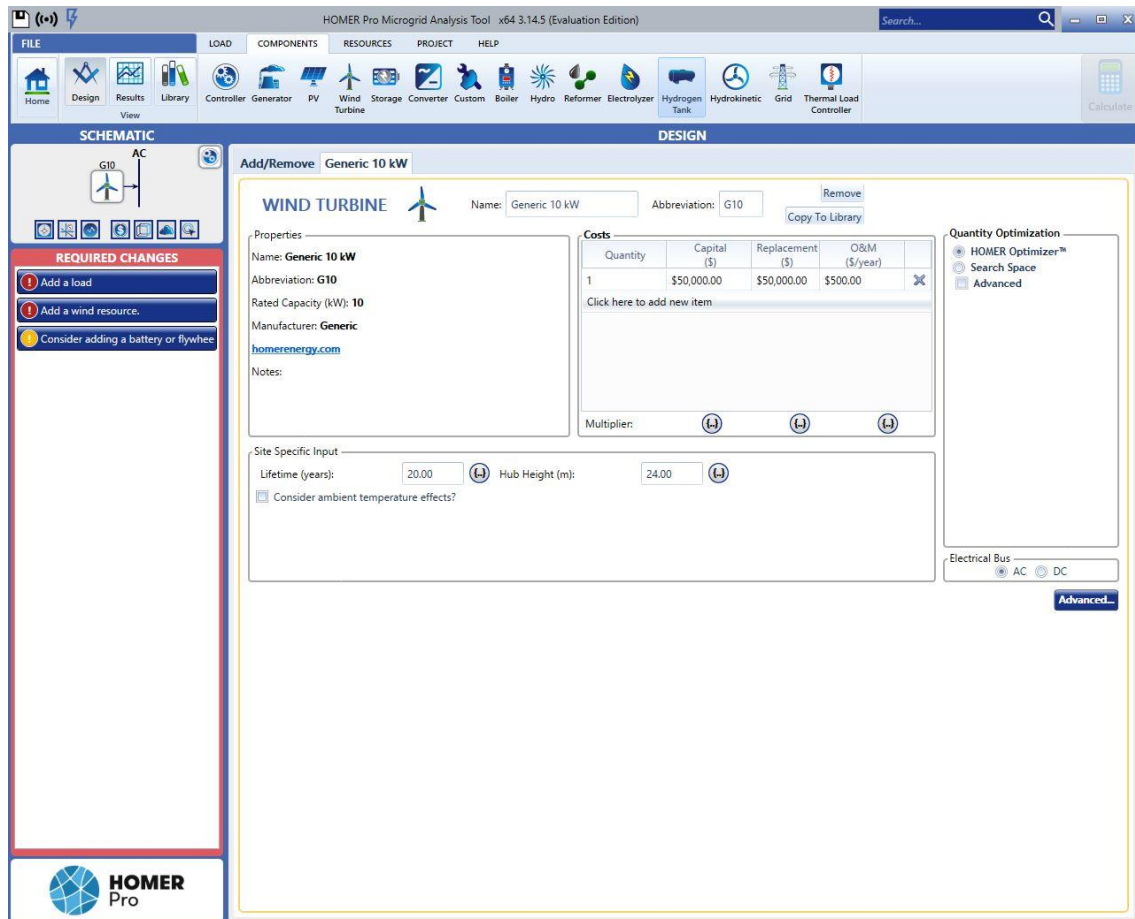


Figura 37. Configuración turbina eólica.

Una vez realizado estos ajustes básicos de la turbina, tenemos que detallar las propiedades avanzadas de la misma para la curva de potencia (Figura 38), las pérdidas de la turbina (Figura 39) y la tabla de mantenimiento (Figura 40).

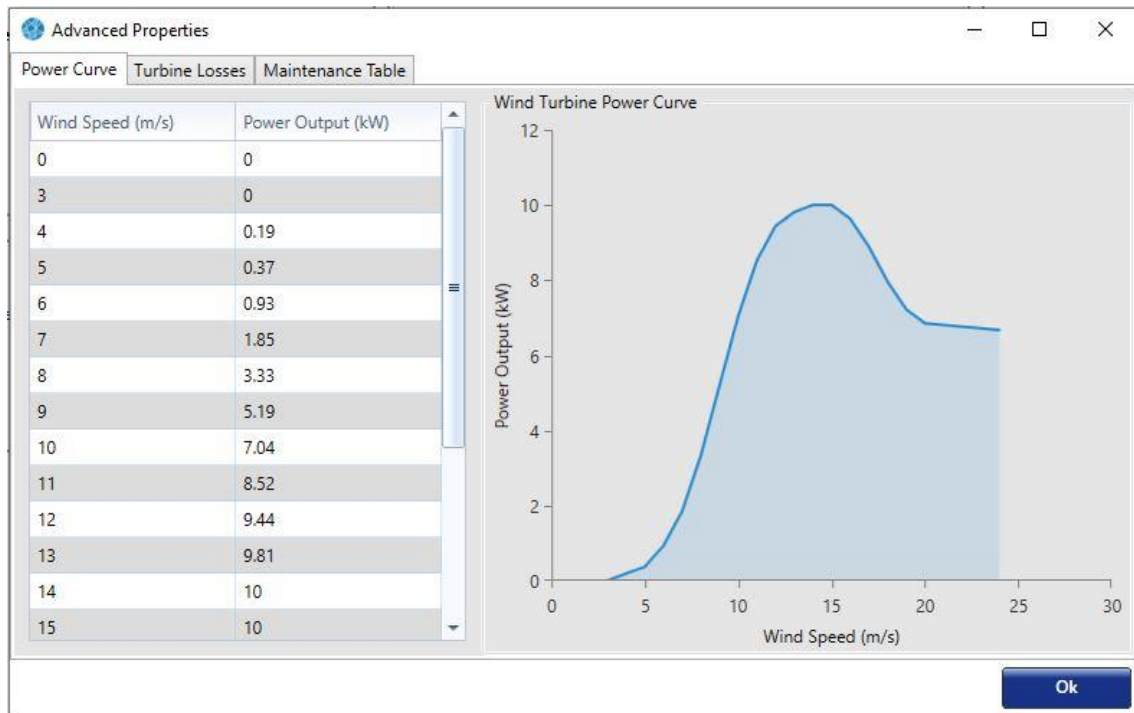


Figura 38. Ajustes avanzados curva de potencia.

The screenshot shows the 'Advanced Properties' window with the 'Turbine Losses' tab selected. It contains several input fields for different types of losses, all currently set to 0. An information icon with a note states: 'Loss factors combine multiplicatively rather than additively.'

Loss Type	Value (%)
Availability Losses (%)	0
Turbine Performance Losses (%)	0
Environmental Losses (%)	0
Other Losses (%)	0
Overall Loss Factor (%)	0
Wake Effects Losses (%)	0
Electrical Losses (%)	0
Curtailement Losses (%)	0

Figura 39. Ajustes avanzados pérdidas turbina.

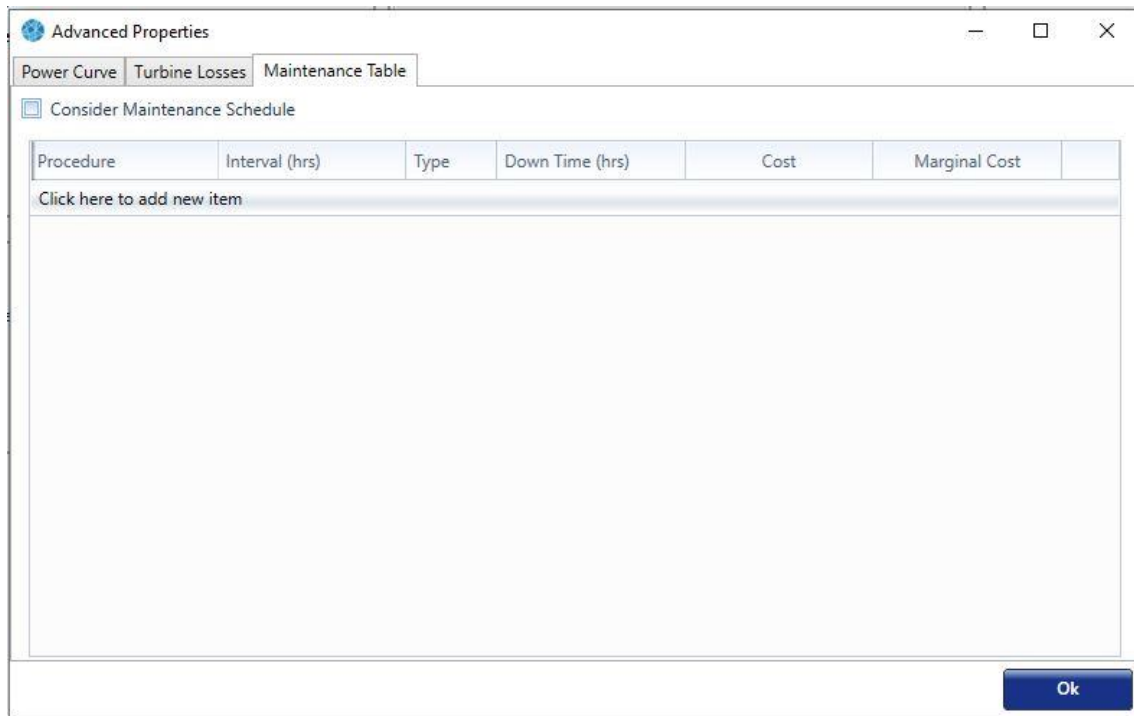


Figura 40. Ajustes avanzados tabla mantenimiento.

Almacenaje: Para el sistema de almacenaje puedes seleccionar un tipo de sistema genérico y ajustarlo a las necesidades o escoger de entre un catálogo el sistema que vas a utilizar (Figura 41). En el caso de haber escogido uno genérico hay que adaptarlo a valores referentes a el precio en \$, la cantidad, la vida útil en años o el rango de utilización que va a tener estipulado (Figura 42).

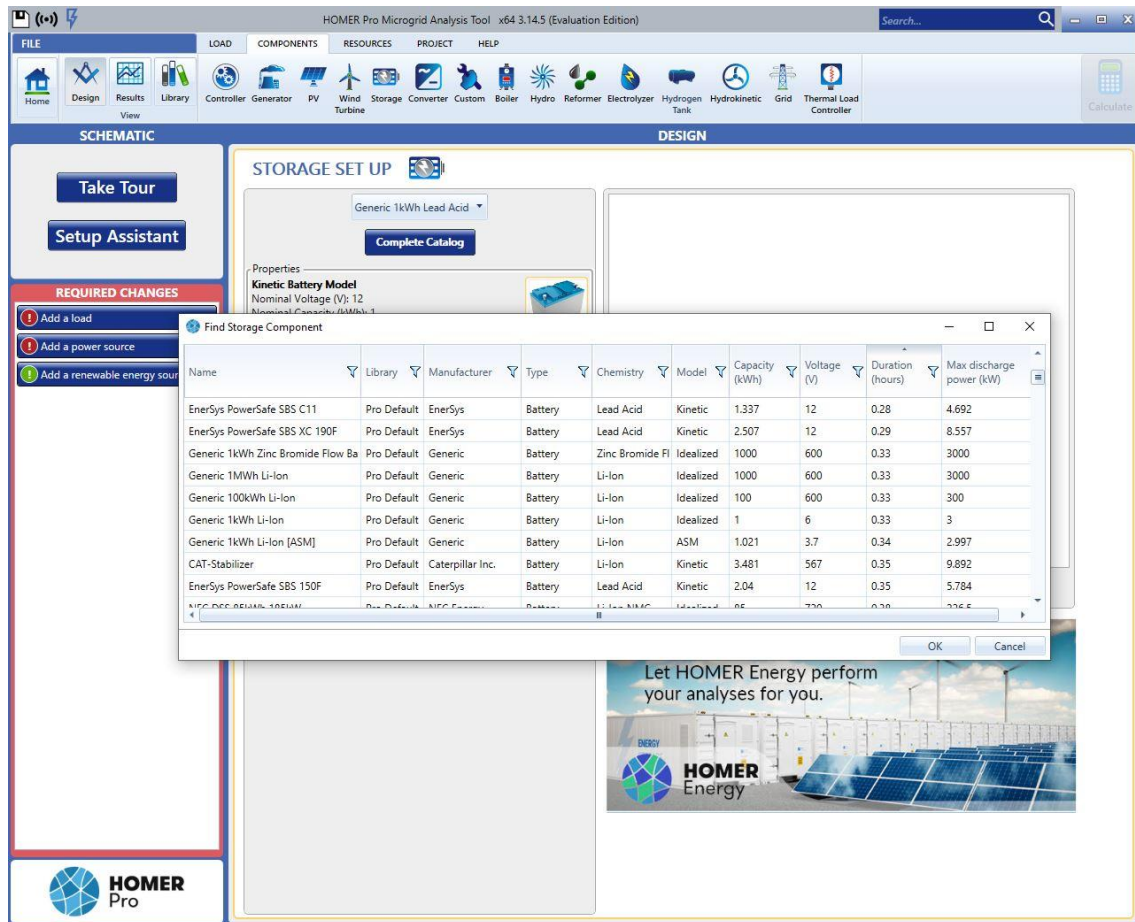


Figura 41. Selección tipo de sistema de almacenaje.

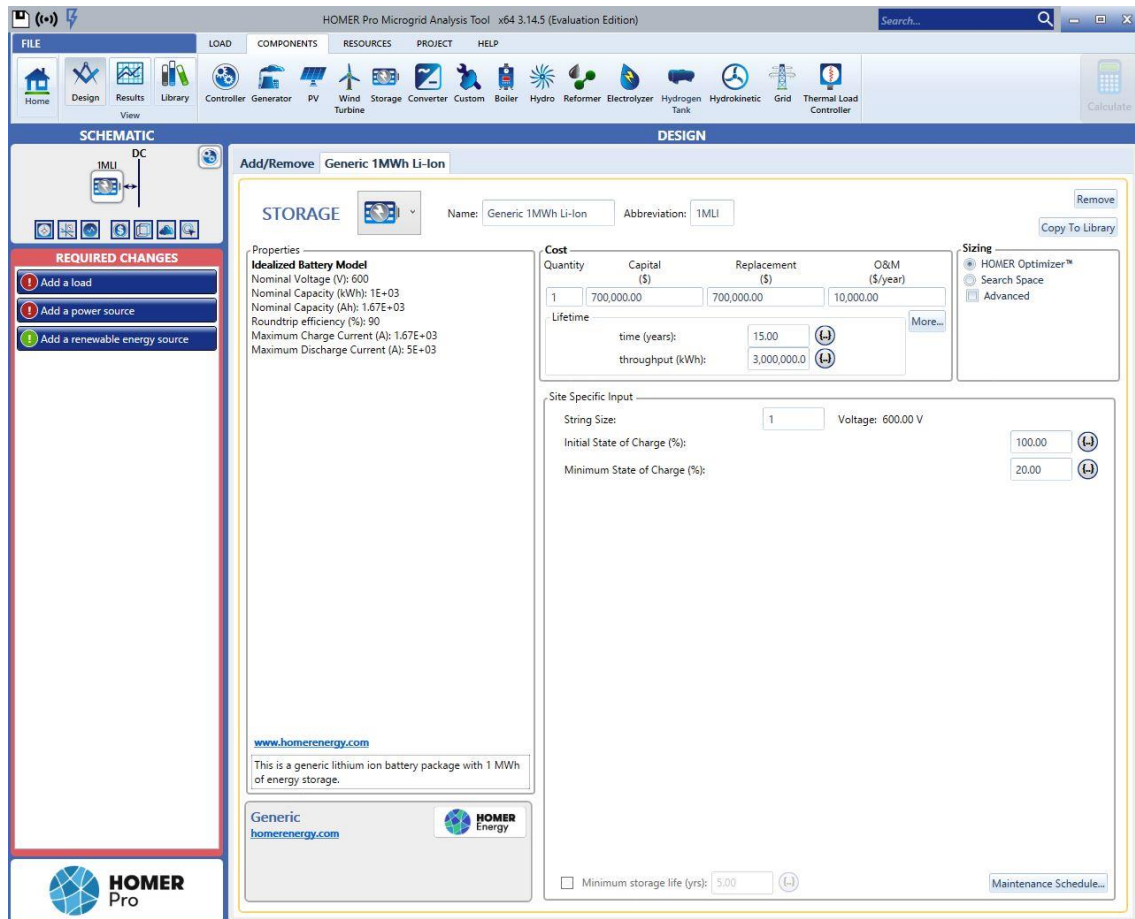


Figura 42. Características del sistema de almacenaje.

Convertidor: A la hora de escoger el convertidor, al igual que sucede en los componentes anteriores, se puede optar por escoger uno genérico para ajustarlo posteriormente, o seleccionar uno de la lista de convertidores comerciales de las que dispone el software (Figura 43). Si se ha optado por uno genérico, hay que proceder a complementar los datos necesarios para su correcta configuración, tales como el precio en \$, la cantidad o la eficiencia en porcentaje entre otros (Figura 44).

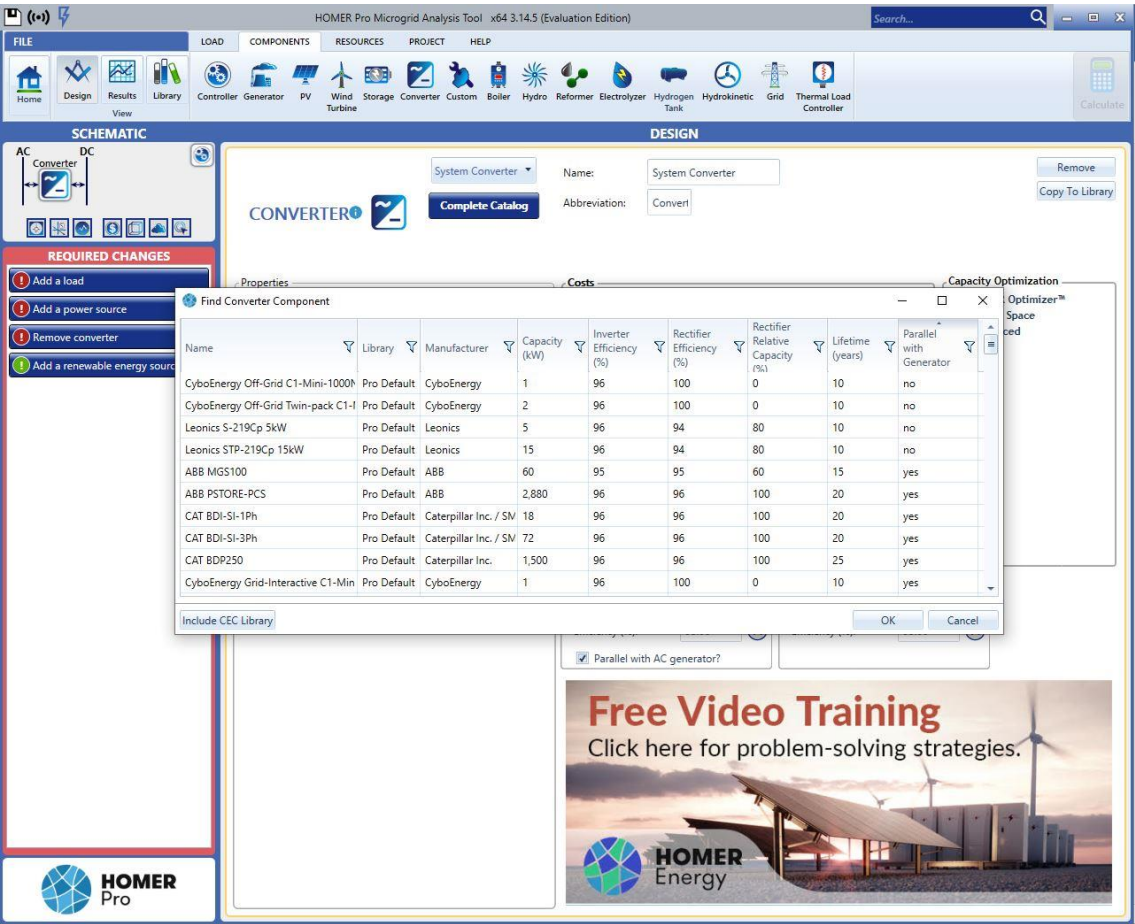


Figura 43. Selección tipo de convertidor.

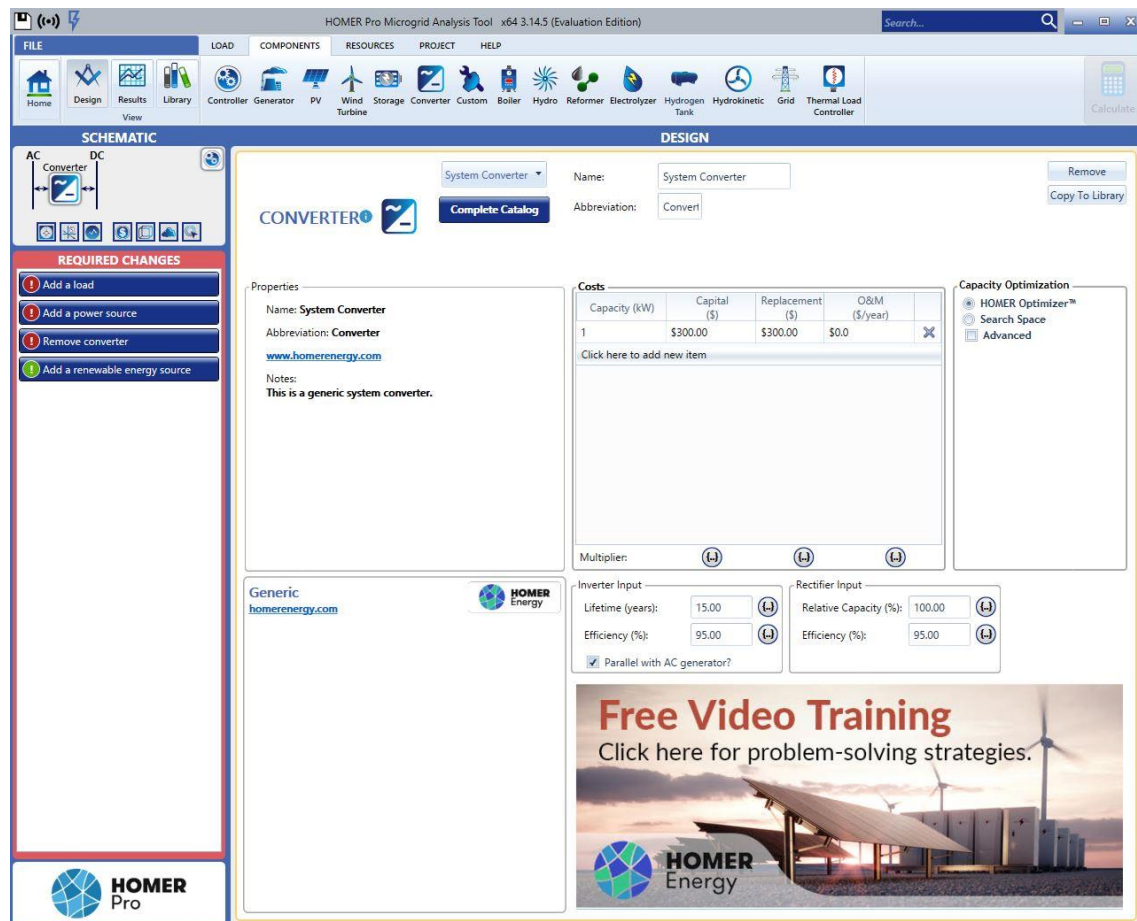


Figura 44. Características del convertidor.

Caldera: En el caso de las calderas, hay que introducir los valores relacionados con las emisiones de las mismas, así como la eficiencia (Figura 45), posteriormente hay que seleccionar de una lista desplegable el tipo de combustible que va a utilizar (Figura 46), finalmente, ajustar las propiedades del combustible seleccionado (Figura 47) tales como; poder calorífico inferior en MJ/kg, la densidad en kg/m^3 o el porcentaje en carbono y sulfuros, sin olvidar el precio en \$/L.

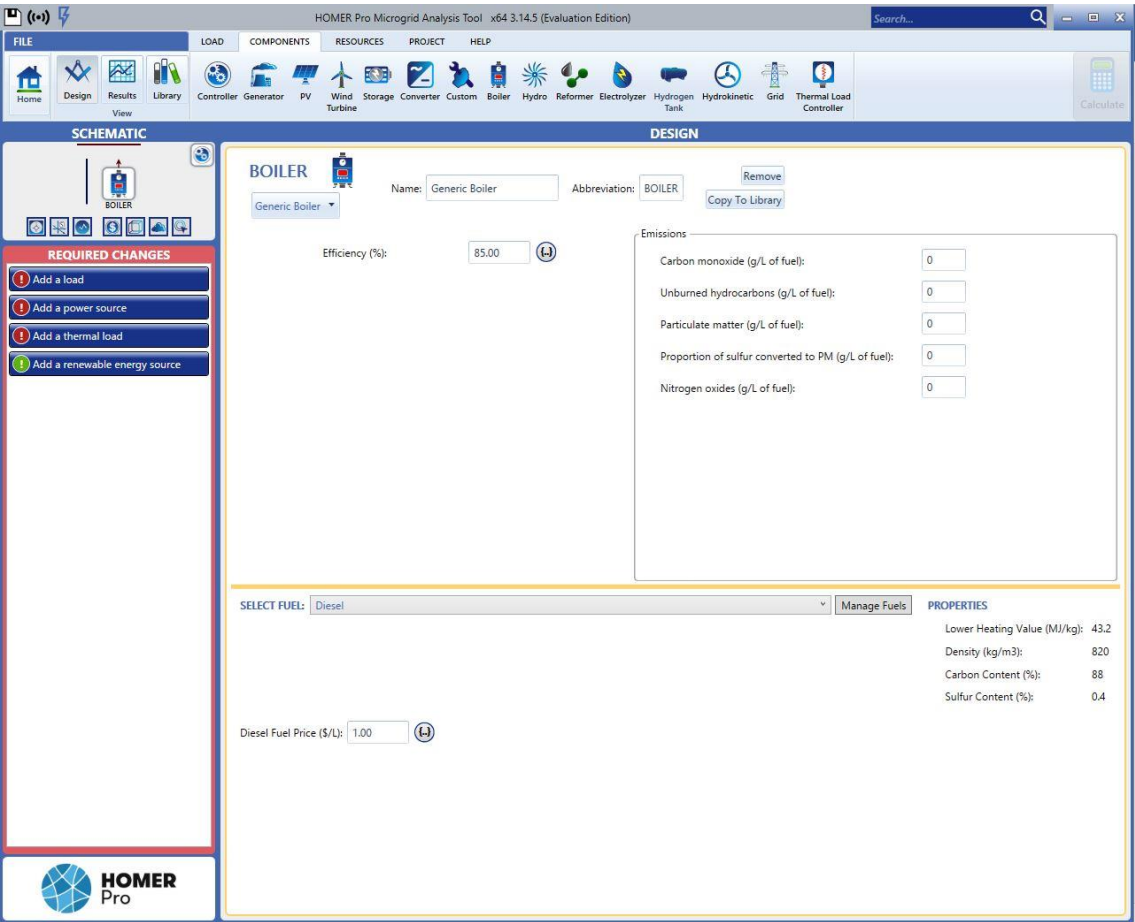


Figura 45. Características de la caldera.

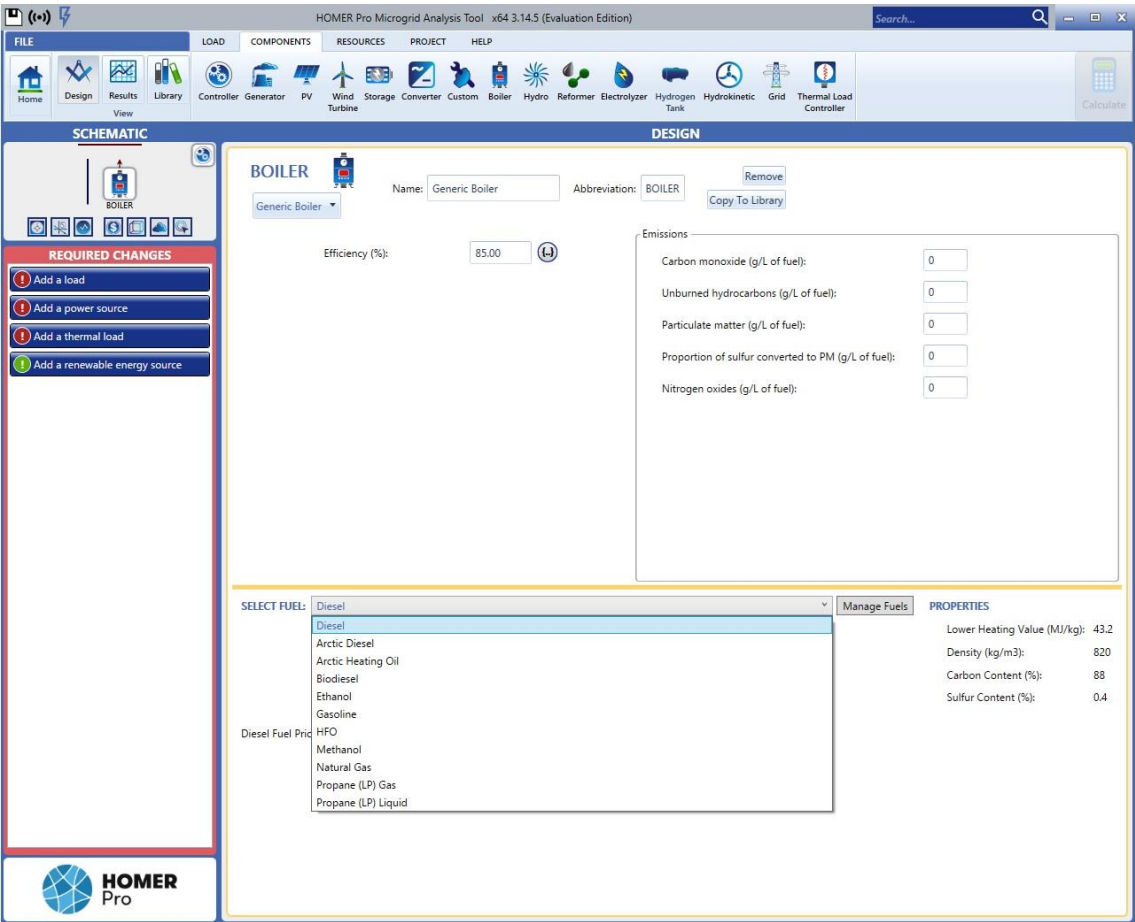


Figura 46. Selección combustible de la caldera.

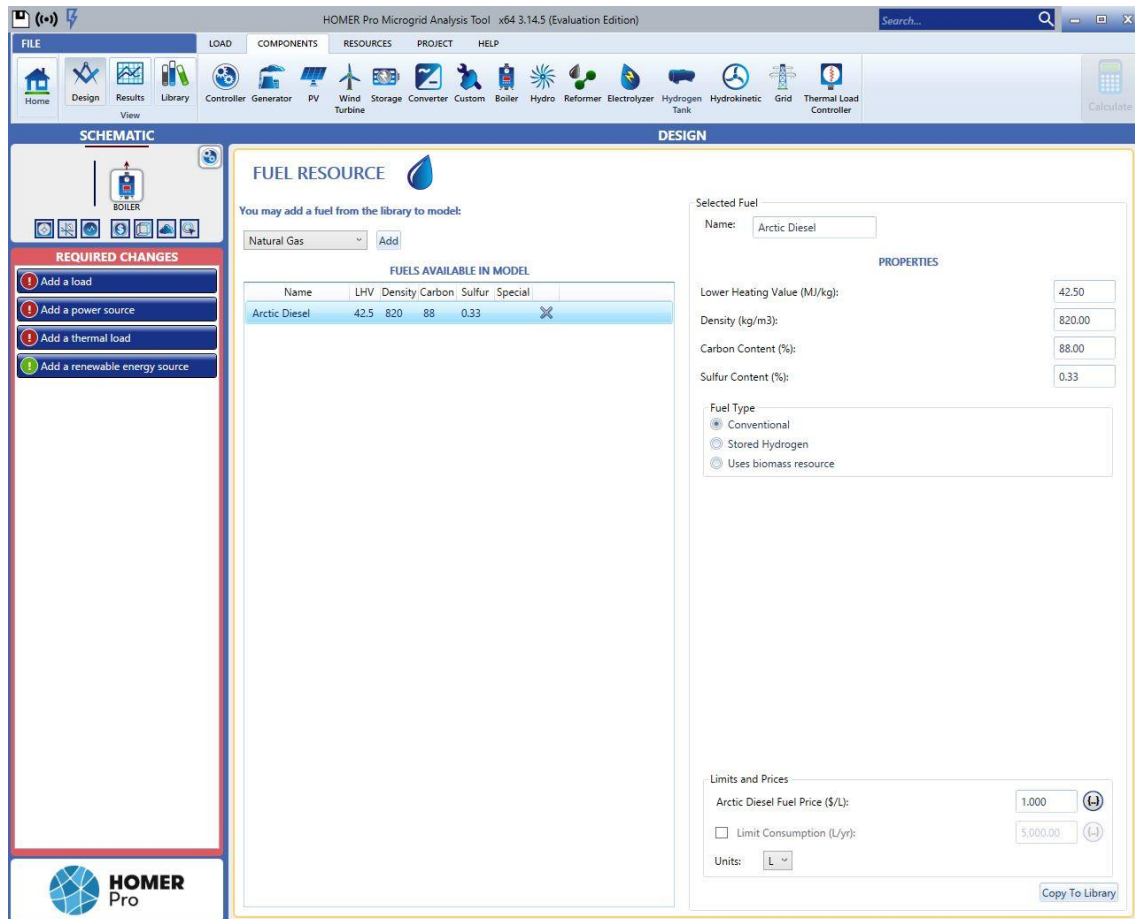


Figura 47. Ajustes del combustible de la caldera.

Hidráulica: Para el componente hidráulico hay que escoger una turbina de las opciones posibles en el listado, variando por lo general en la potencia (Figura 48), una vez seleccionada se rellenan los datos precisos tales como; coste en \$, vida útil en años, el salto neto en m o el caudal en L/s entre otros (Figura 49).

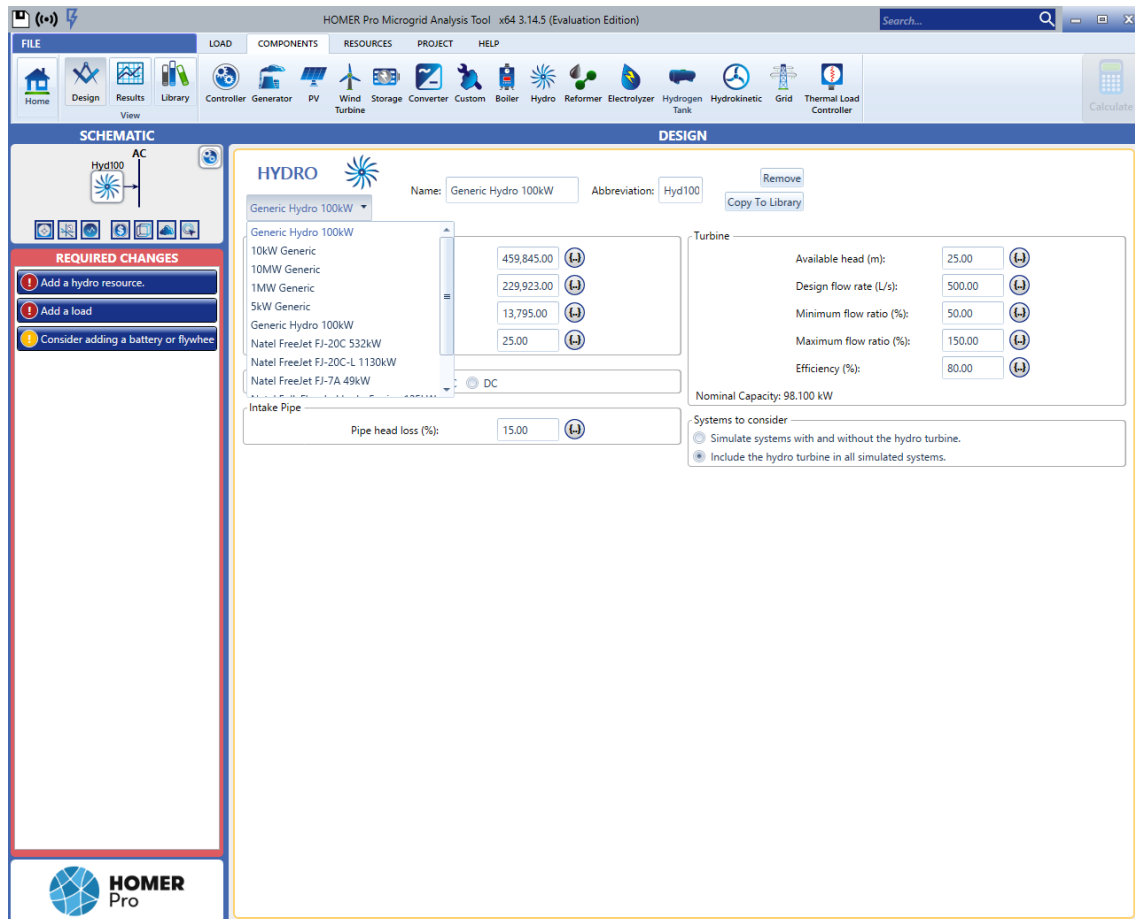


Figura 48. Selección tipo de turbina hidráulica.

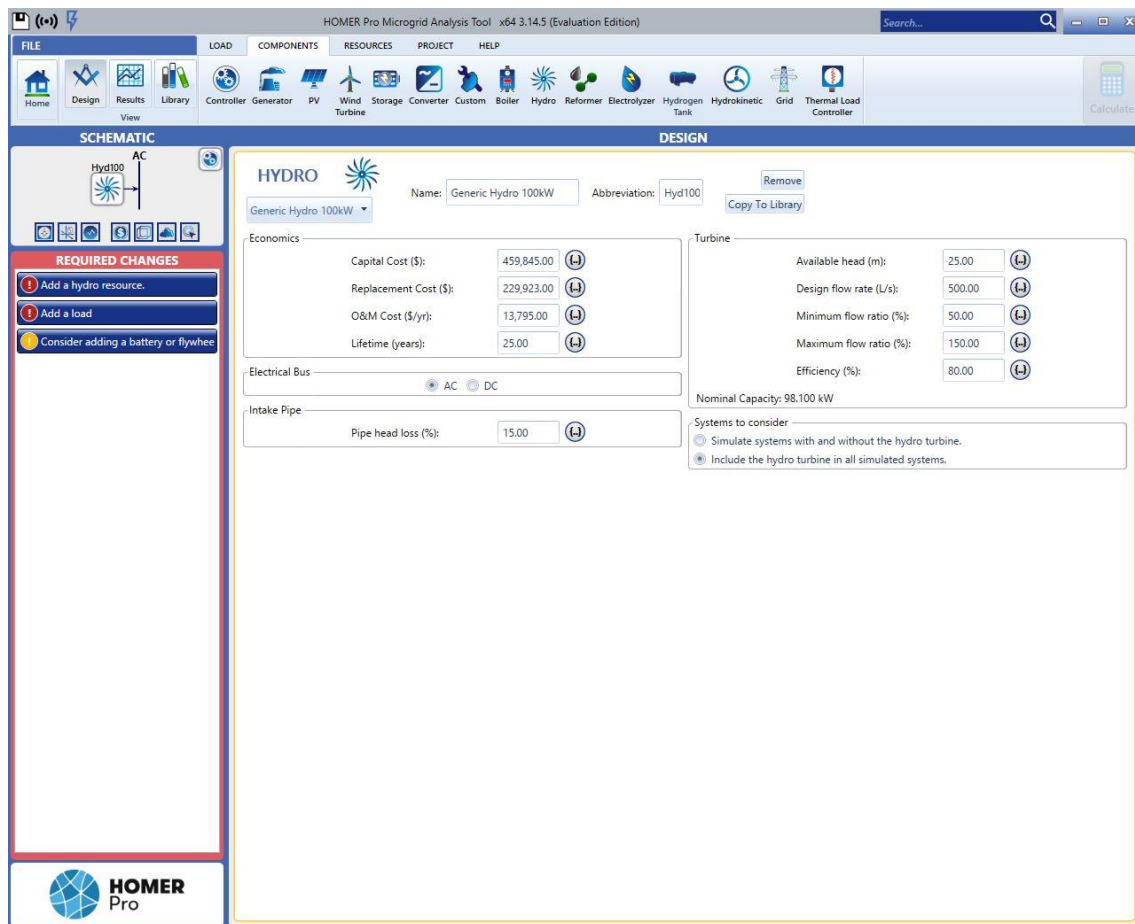


Figura 49. Configuración turbina seleccionada.

Reformador: Hay que introducir las características de nuestro reformador en el software, empezando por ajustes básicos como la capacidad en kW, el coste en \$ o la eficiencia del mismo entre otros (Figura 50). El siguiente paso es escoger del listado el tipo de combustible que utiliza el reformador (Figura 51) y, por último, los ajustes correspondientes al combustible utilizado como el poder calorífico inferior en MJ/kg o la densidad en kg/m^3 entre otros (Figura 52).

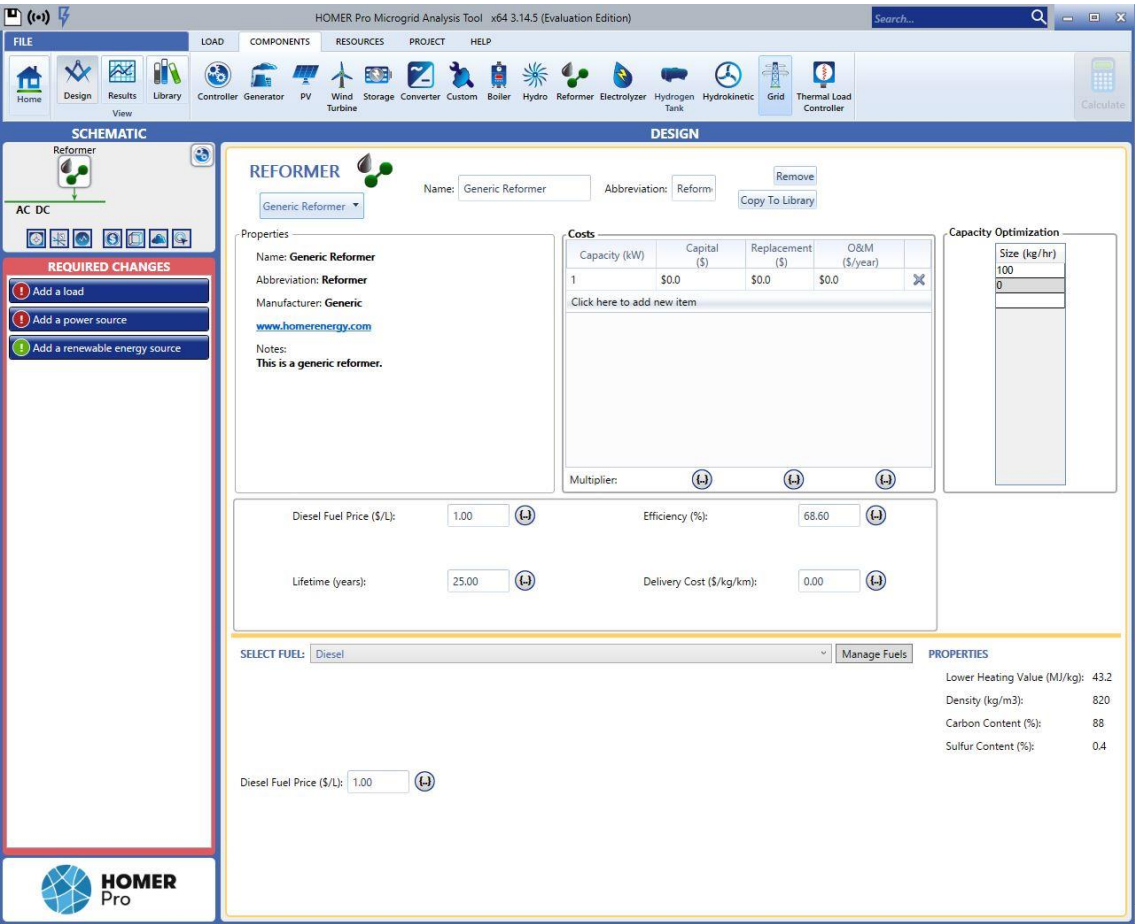


Figura 50. Características del reformador.

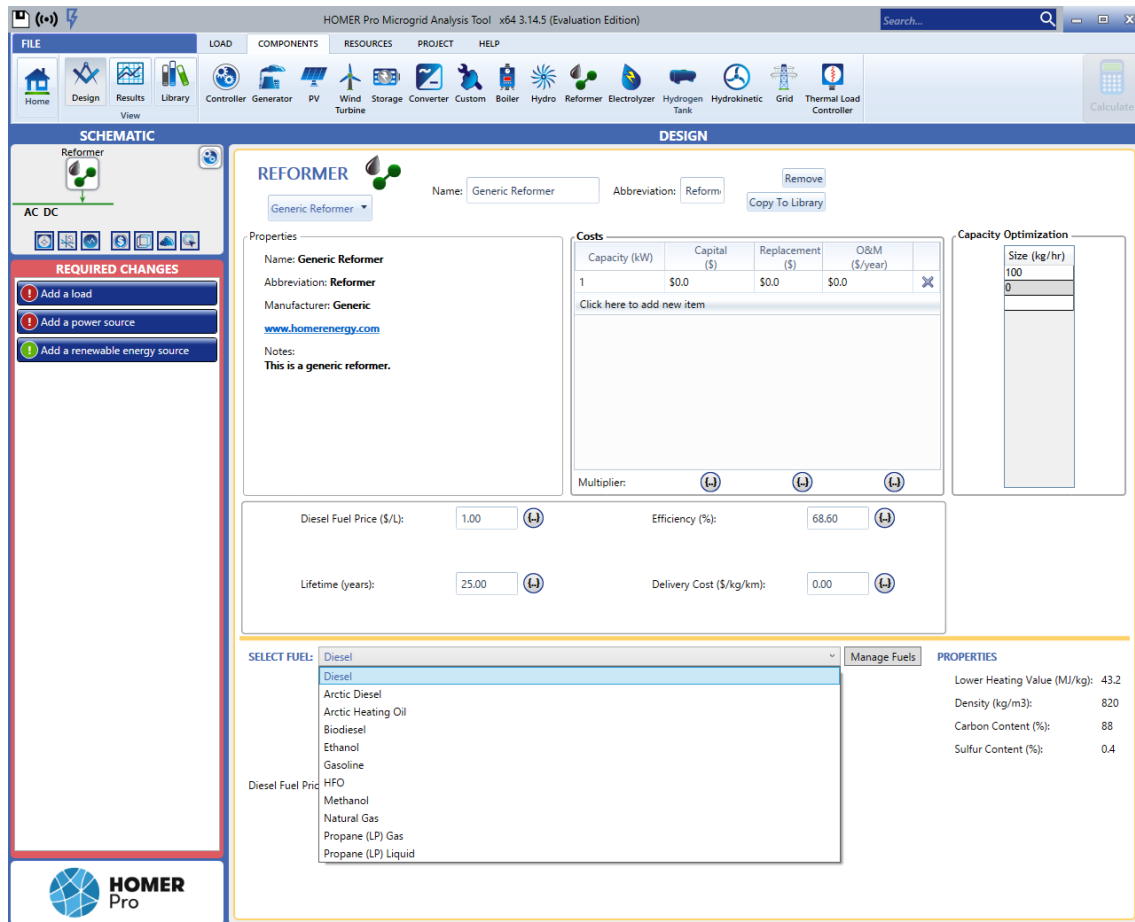


Figura 51. Selección del tipo de combustible a utilizar.

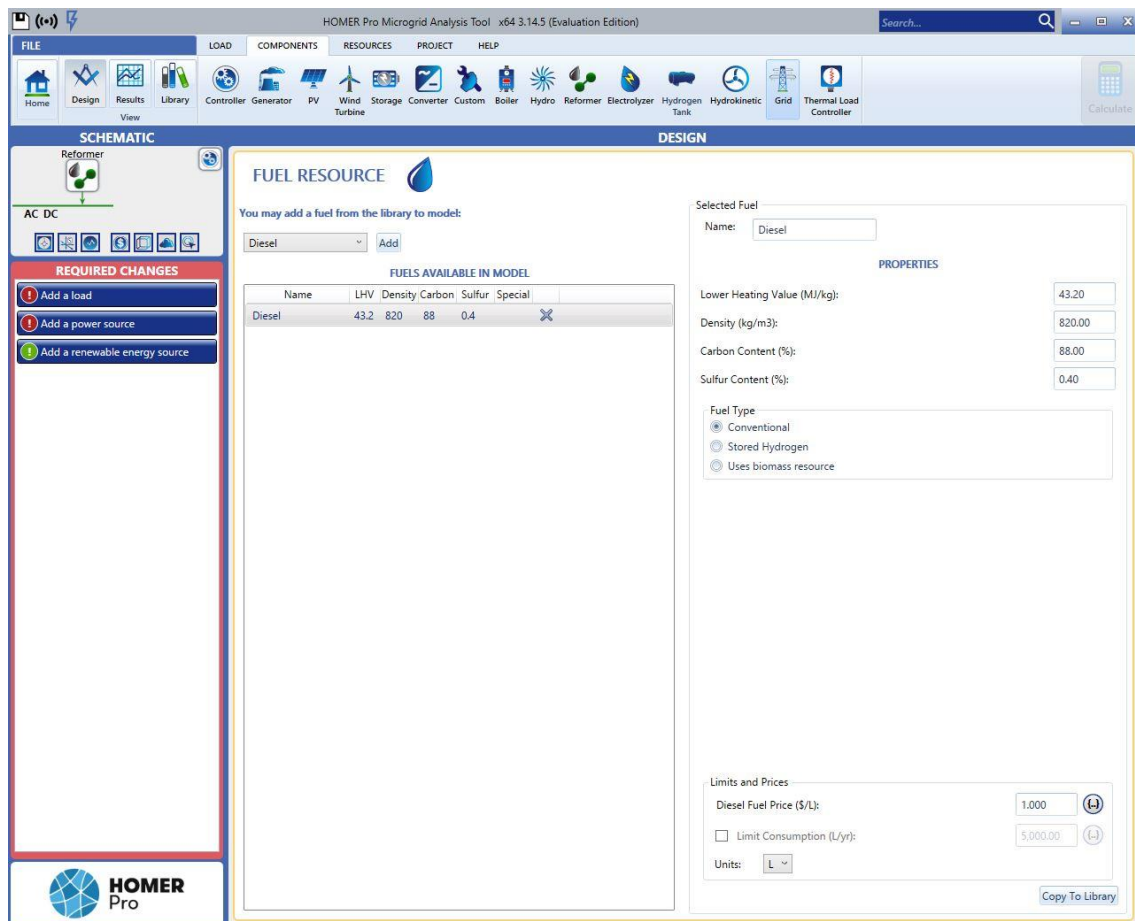


Figura 52. Características del combustible utilizado.

Electrolizador: A la hora de seleccionar el electrolizador hay que introducir una serie de características del mismo tales como la capacidad en kW, el coste en \$, y aspectos técnicos como la vida útil en años, la eficiencia en porcentaje y la carga mínima en porcentaje también (Figura 53).

A diferencia de los demás componentes este dispone de un gráfico donde variar su funcionamiento mediante 3 pasos:

- Seleccionar modo: Forzado u optimizado.

- Seleccionar periodo de tiempo: Si va a funcionar todos los días, solo los fines de semana o solo entre semana.
- Marcación operaciones: en caso de forzarlo, seleccionar en el cuadro cuando va a estar actuando el rectificador.

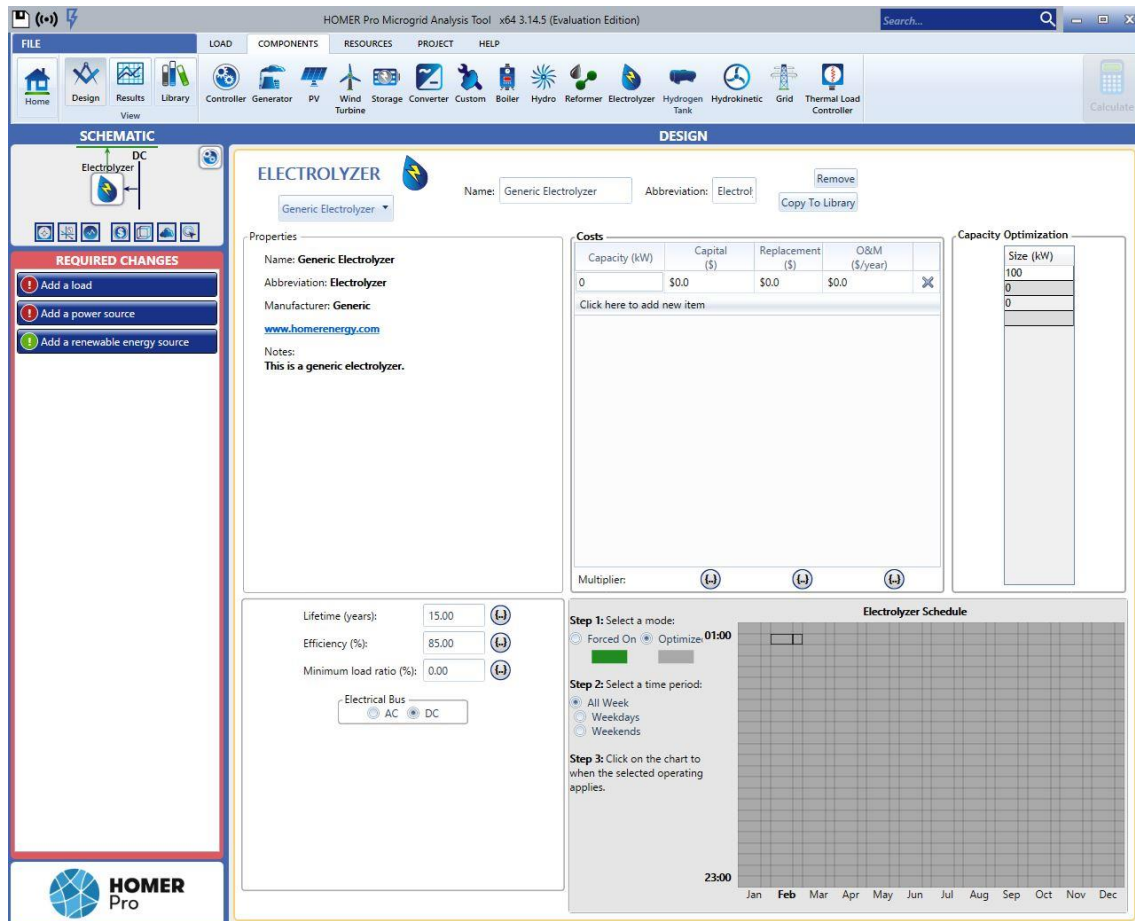


Figura 53. Ajustes del electrolizador.

Tanque de hidrógeno: De forma parecida a la metodología del electrolizador, tenemos que introducir una serie de características tales como el tamaño en kg, el coste en \$, y aspectos técnicos como la vida útil en años, o el volumen inicial del tanque en porcentaje sobre el total (Figura 54).

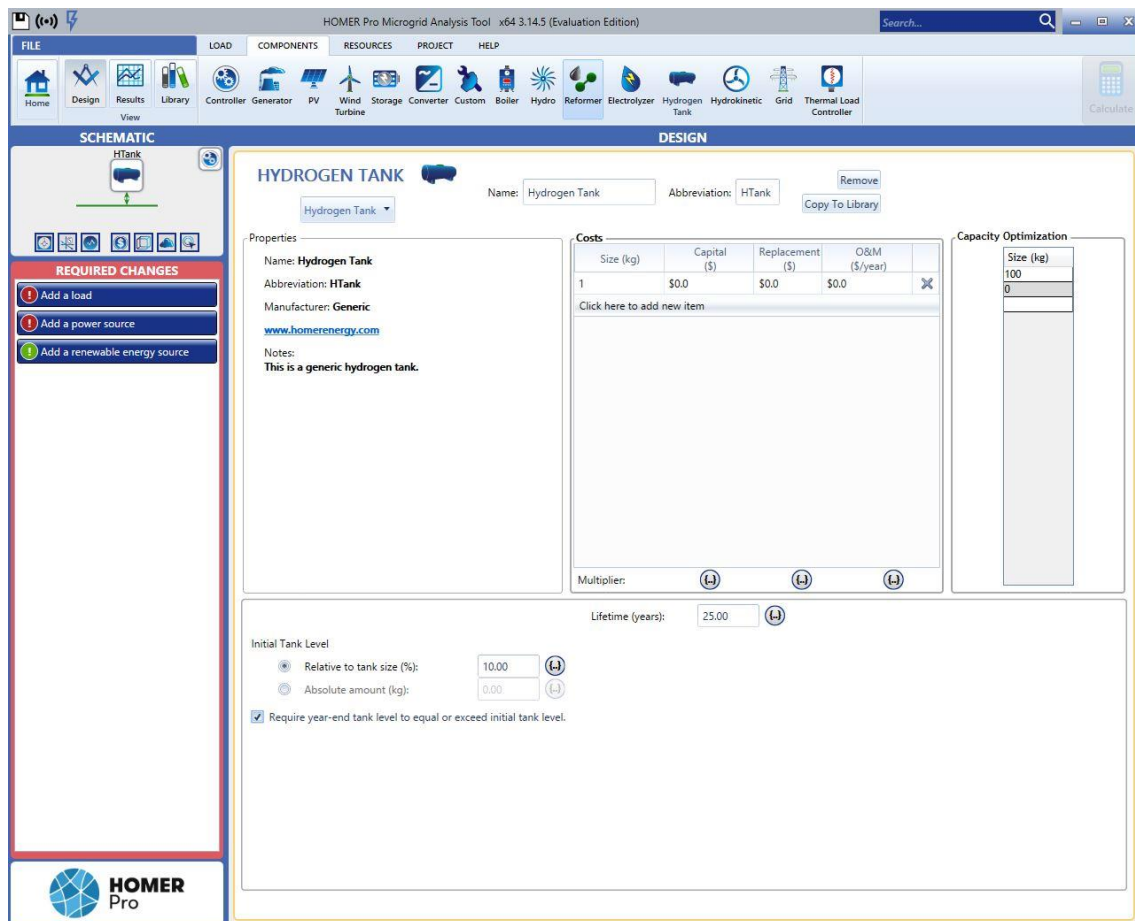


Figura 54. Ajustes del tanque de hidrogeno.

Hidrocinética: Para este componente hay que elegir de una lista desplegable el tipo de turbina correcta que utilizaremos (Figura 55), y rellenar la información correspondiente como la cantidad, el coste en \$ o la vida útil en años. En este caso según el modelo de turbina seleccionada hay que rellenar una tabla al final de la página (Figura 56) donde debemos introducir la potencia generada en kW según la velocidad del agua en m/s.

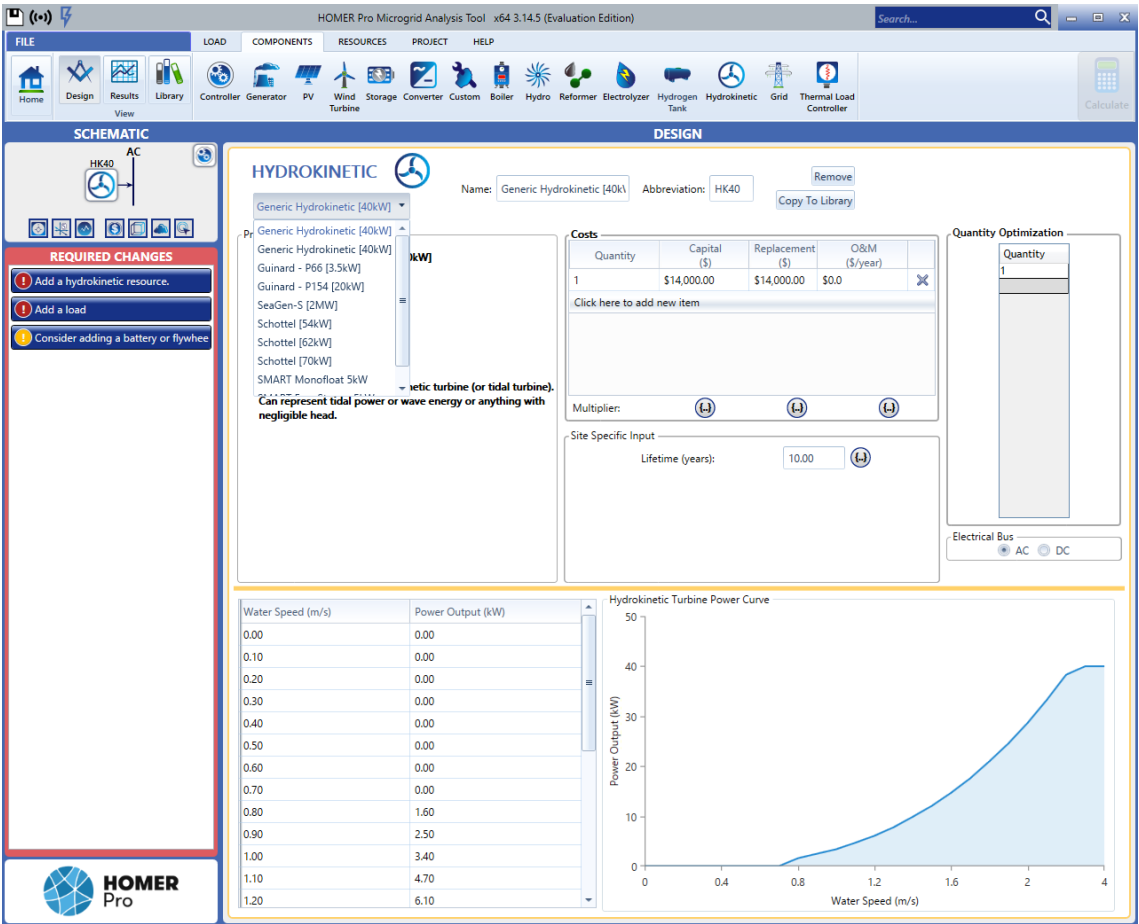


Figura 55. Selección tipo de turbina hidrocinética.

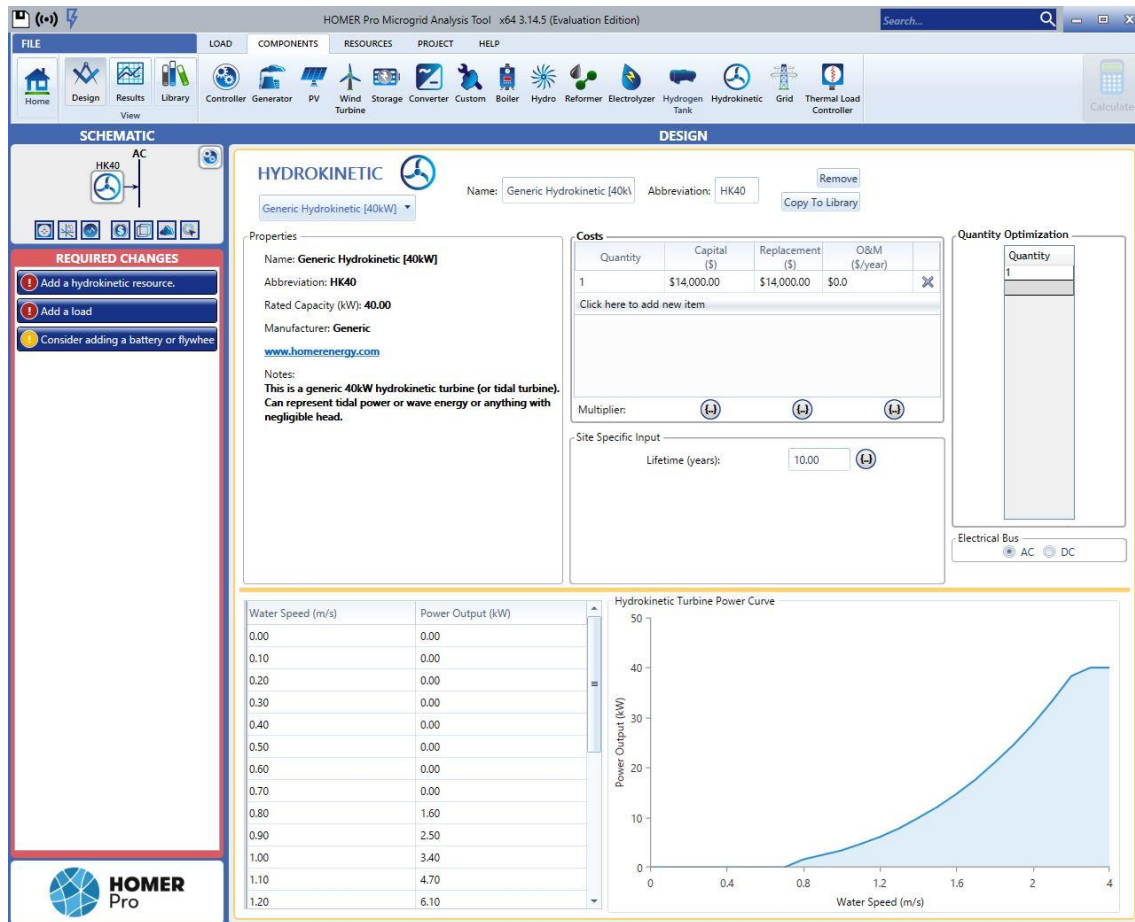


Figura 56. Configuración de la turbina hidrocinética.

Red eléctrica: En el caso de que el sistema en el que trabajamos esté conectado a la red o este previsto que así sea, hay que configurarlo también. En este caso hay cuatro maneras de llevarlo a cabo, una más sencilla basada en introducir el precio de compra y el de venta de la energía en \$/kWh (Figura 57) para el cálculo necesario del software.

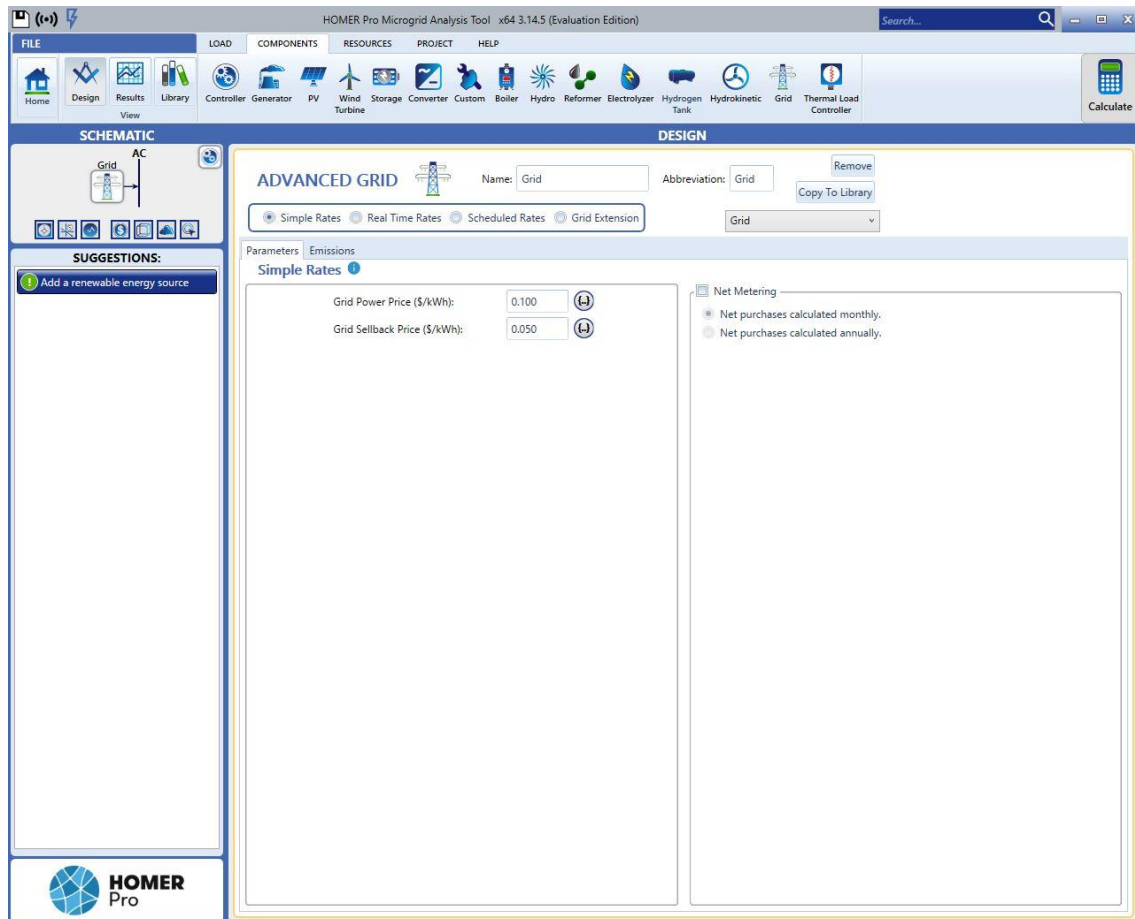


Figura 57. Configuración simple.

Un segundo modo de mayor complejidad utilizando datos reales de demanda y generación ya conocidos donde se puede ajustar otros parámetros más en detalle (Figura 58).

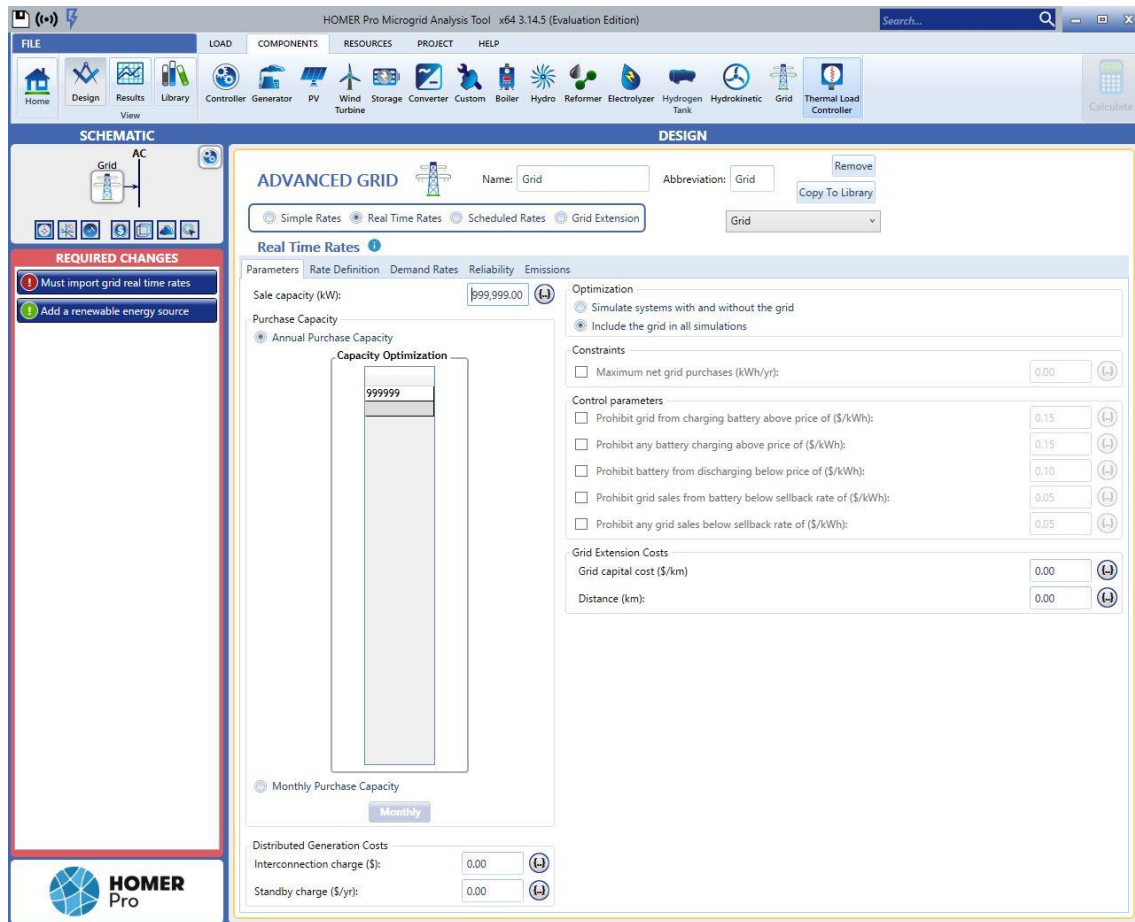


Figura 58. Configuración tiempo real.

Un tercer modo que comparte similitudes con el segundo, pero más reducido en complejidad (Figura 59).

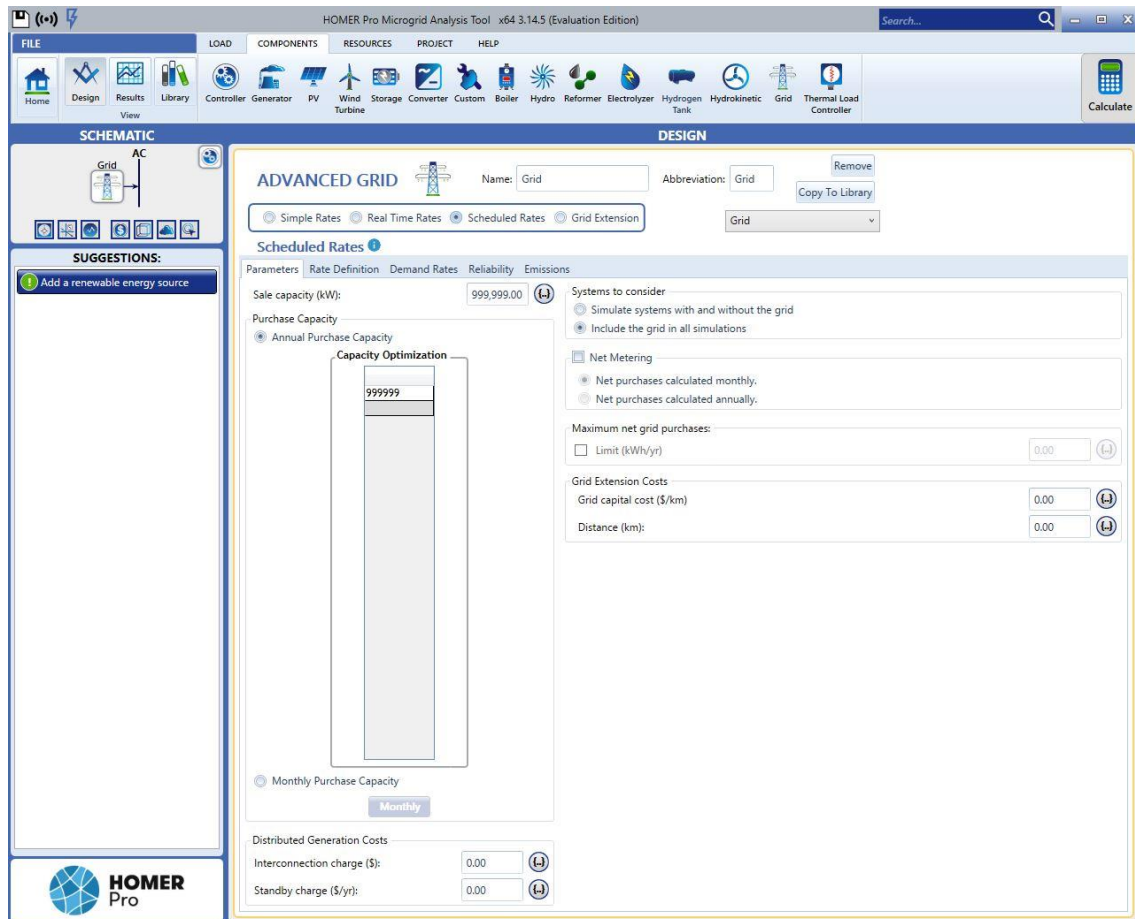


Figura 59. Configuración programada.

Y un último que se utiliza en caso de tener que ampliar la red eléctrica ya existente hasta la ubicación de nuestro proyecto (Figura 60).

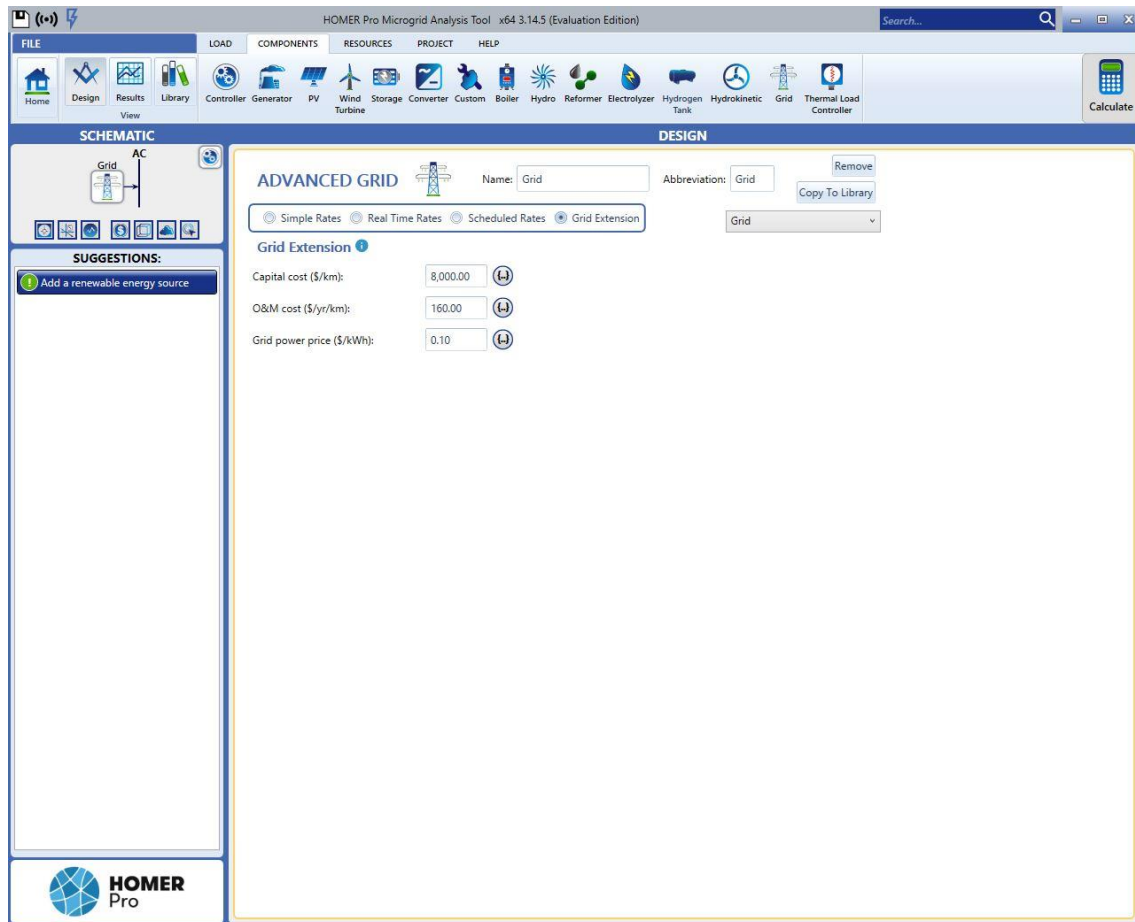


Figura 60. Extensión de la red existente.

Controlador carga térmica: Para este componente requiere especificar la capacidad en kW, el coste en %, el coste de operación y mantenimiento anual en \$ y el período de vida útil (Figura 61).

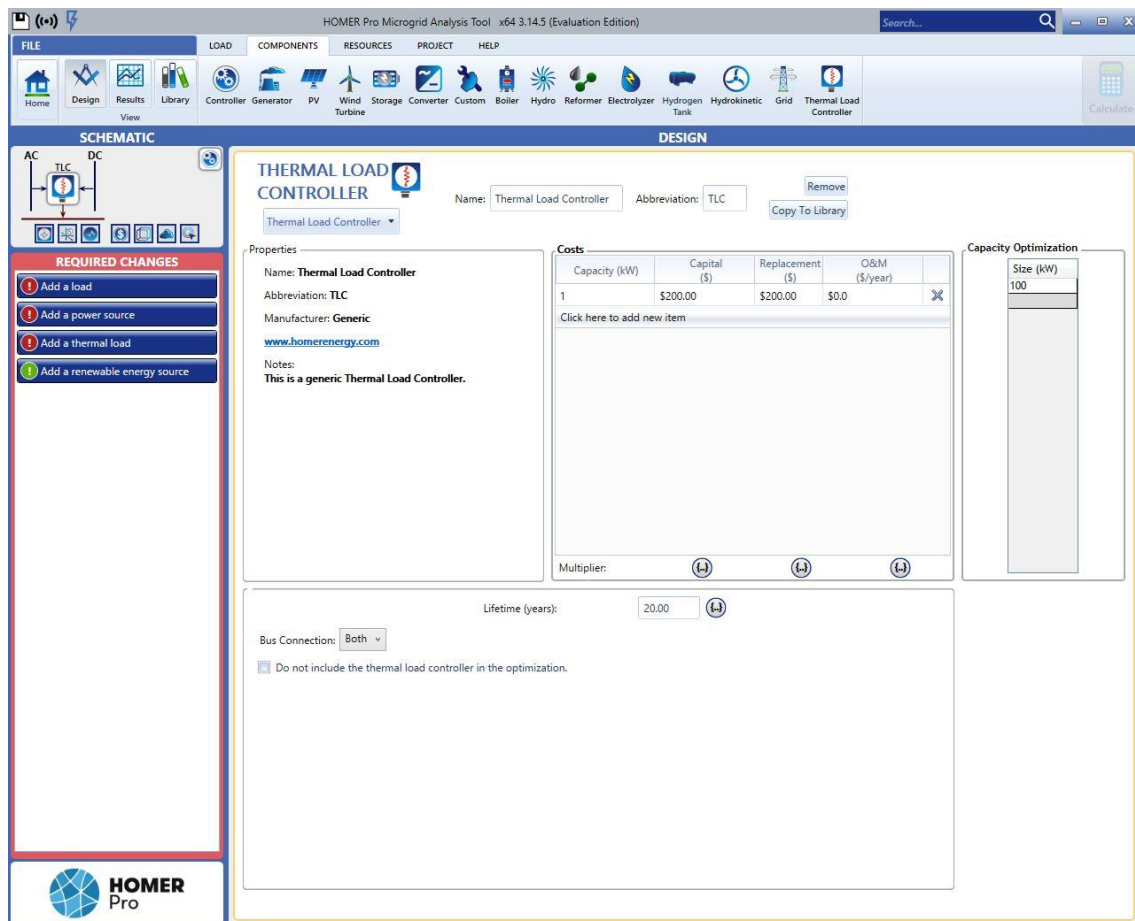


Figura 61. Ajustes controlador carga térmica.

Personalizado: En el caso de que dispongamos de algún tipo de componente que no haya sido descrito con anterioridad podemos utilizar el *personalizado* que nos da la opción de introducir información básica sobre nuestro componente no descrito para poder utilizarlo en el software de simulación., hay que seleccionar una de las variables propuestas por el Homer para rellenar la información correspondiente (Figura 62).

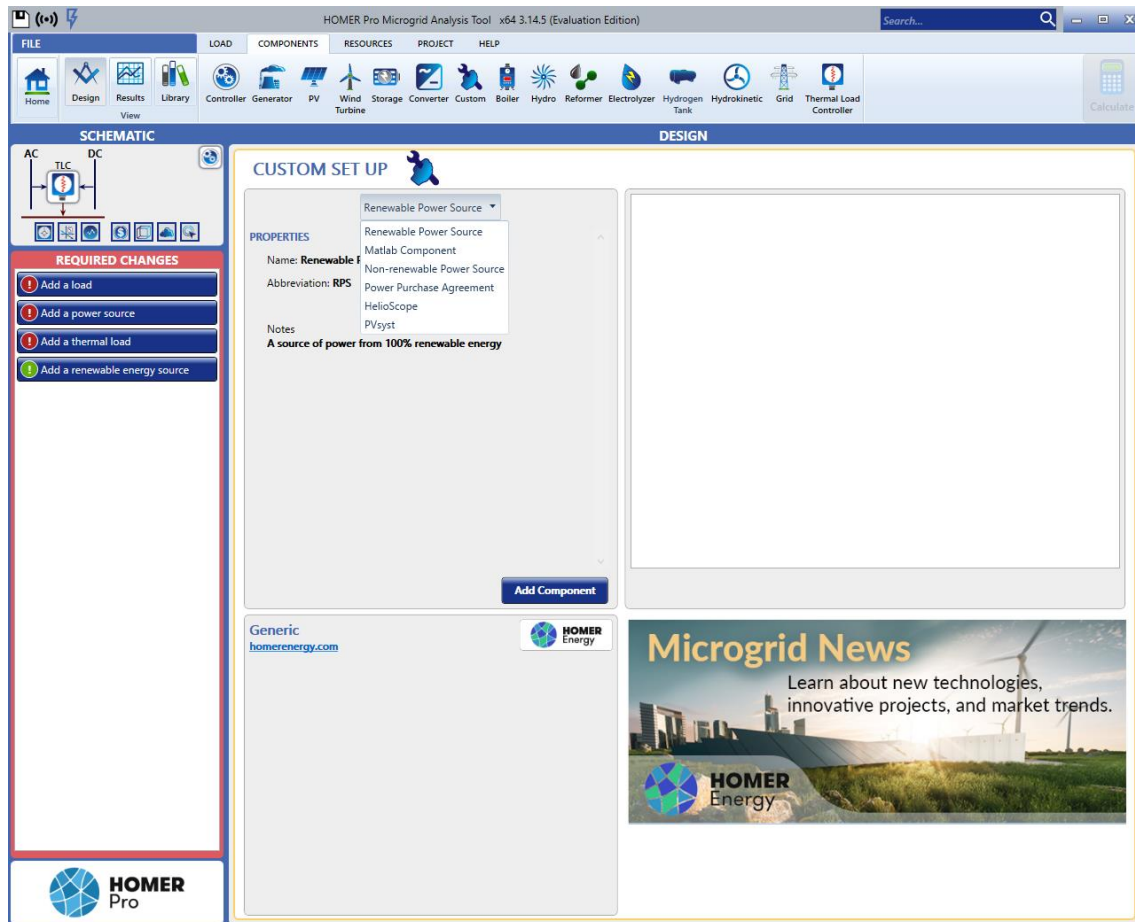


Figura 62. Variables de elección en componente personalizado.

La primera opción es introducir datos de un recurso renovable como la potencia en kW, el coste en \$, o la vida útil en años entre otros (Figura 63).

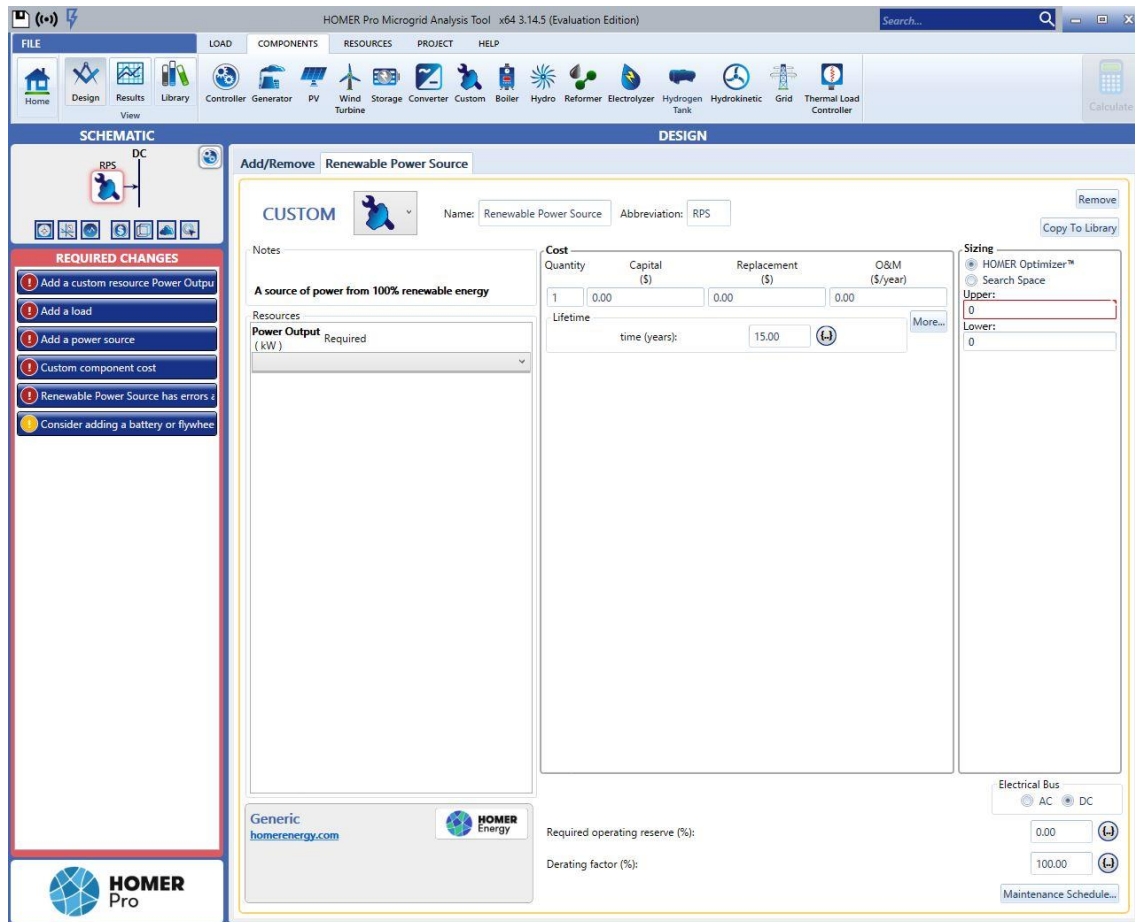


Figura 63. Recurso renovable personalizado.

El segundo modo es utilizando un recurso previamente definido en el software Matlab, donde introduciremos el coste en \$, la vida útil en años o el porcentaje de renovable entre otros datos (Figura 64).

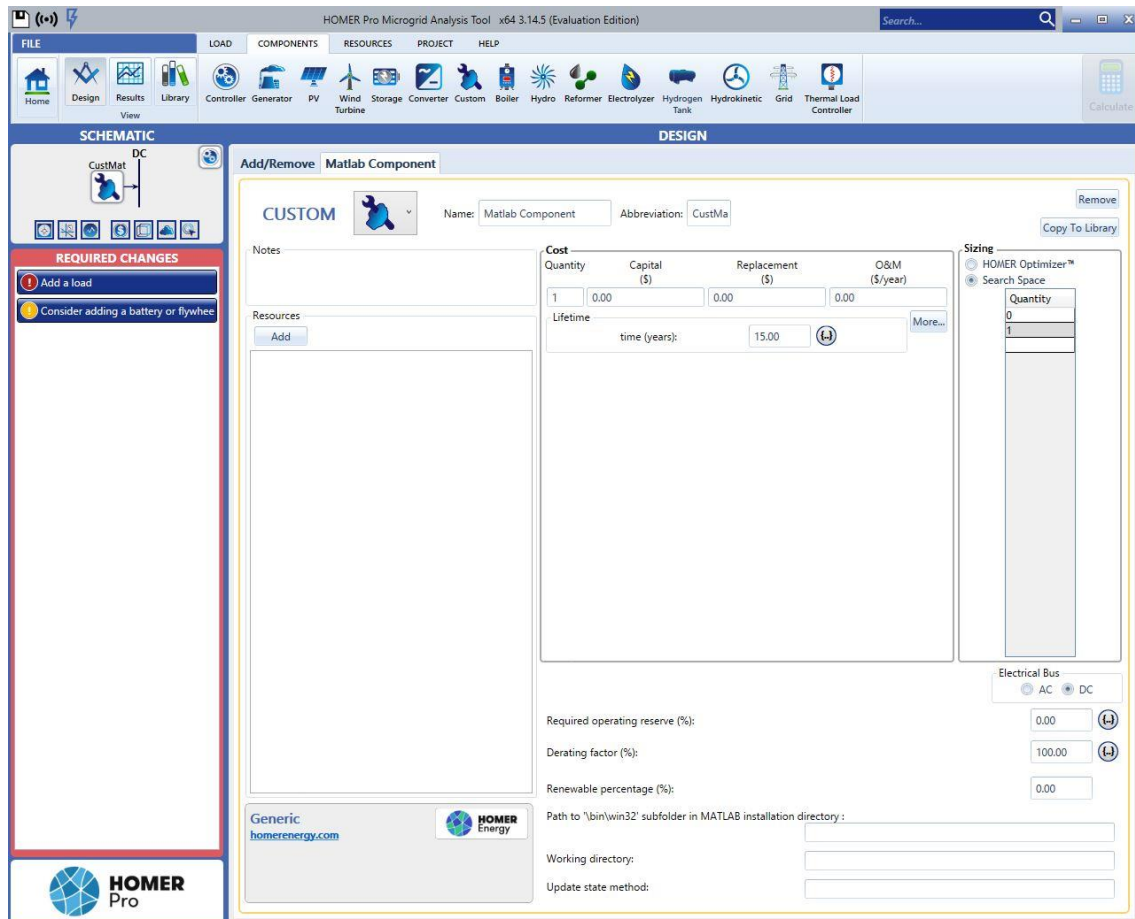


Figura 64. Matlab personalizado.

El tercero se trata de un recurso no renovable, donde hay que introducir datos como la potencia en kW, el coste en \$, o el coste de operación y mantenimiento anual en \$ entre otros (Figura 65).

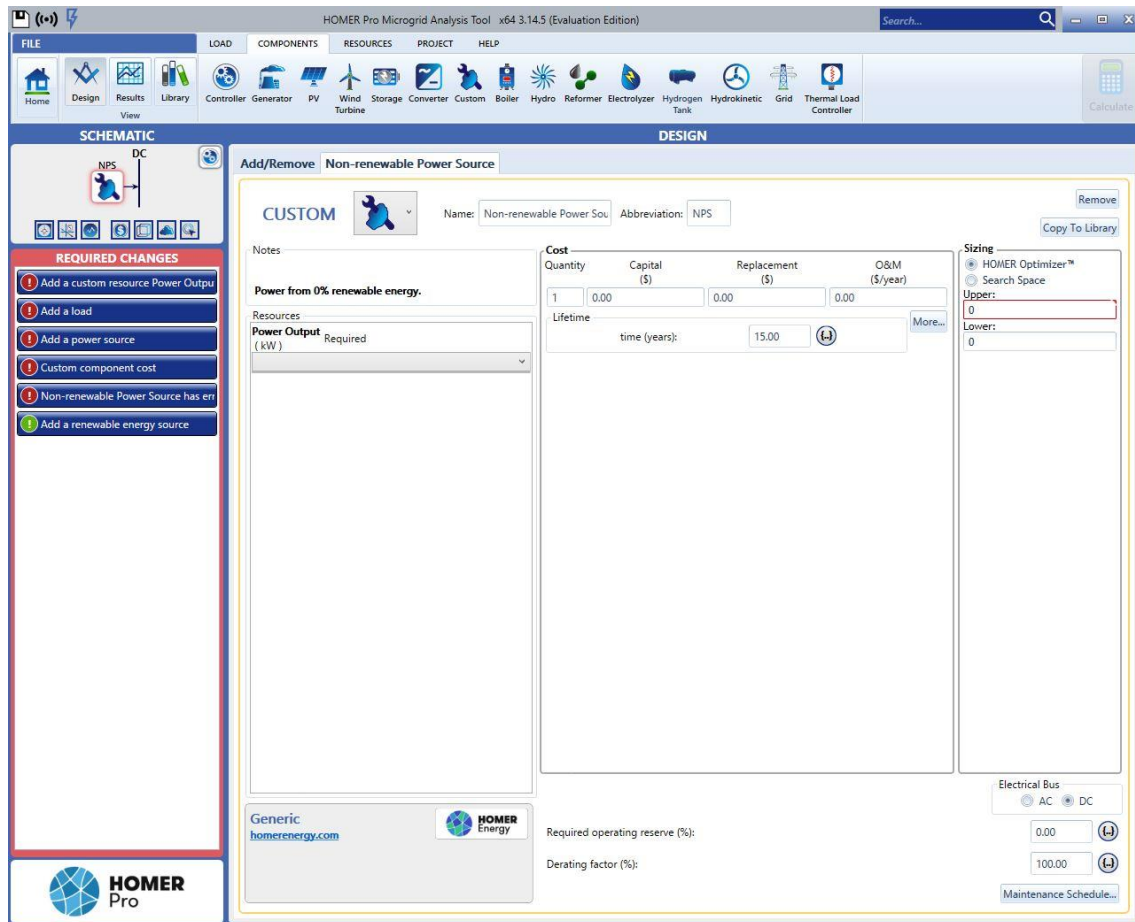


Figura 65. Recurso no renovable personalizado.

El cuarto de trata de un contrato de compra de energía donde una vez más nos pide introducir la potencia en kW, el coste en \$, la vida útil en años o el precio de compra de la energía en \$/kWh (Figura 66).

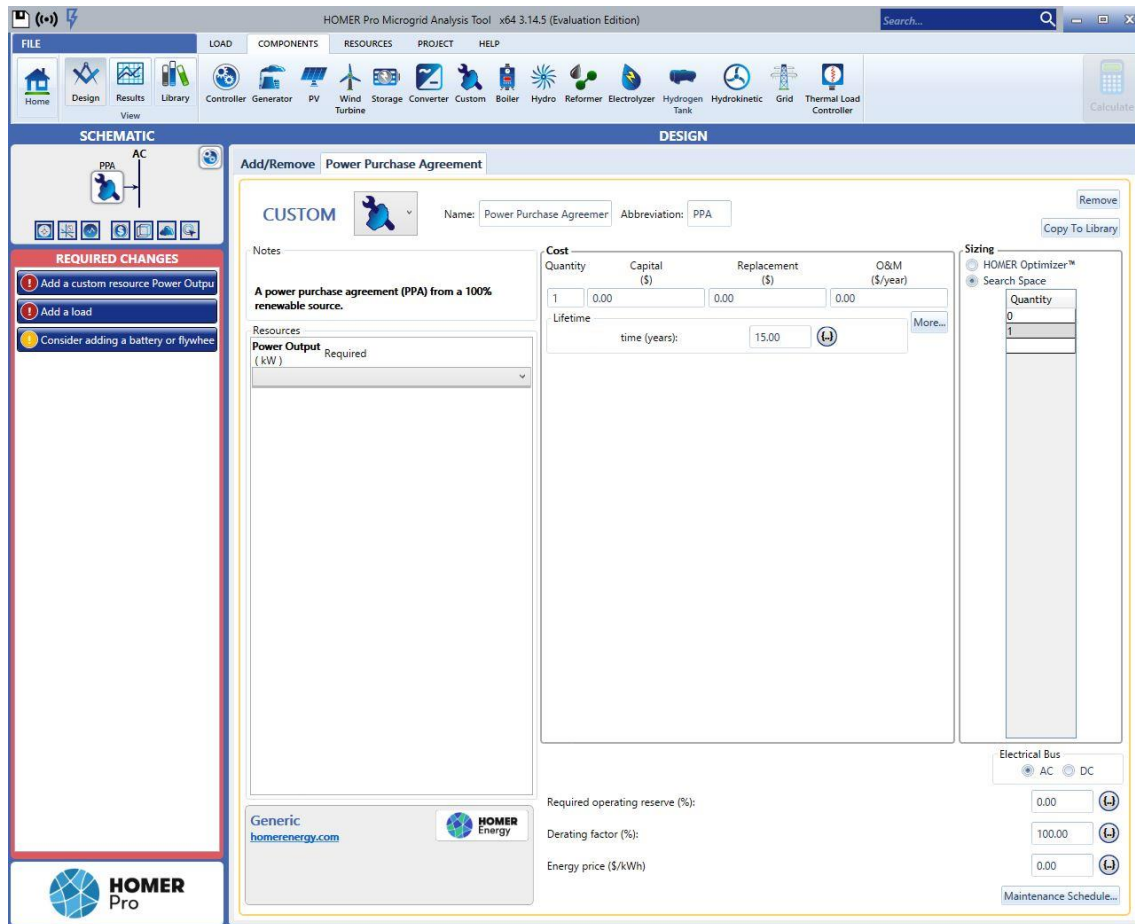


Figura 66. Contrato compra energía personalizado.

El quinto se trata de utilizar datos traídos de HelioScope, donde hay que introducir la potencia en kW, el coste en \$, la vida útil en años o el coste de operación y mantenimiento anual en \$ (Figura 67).

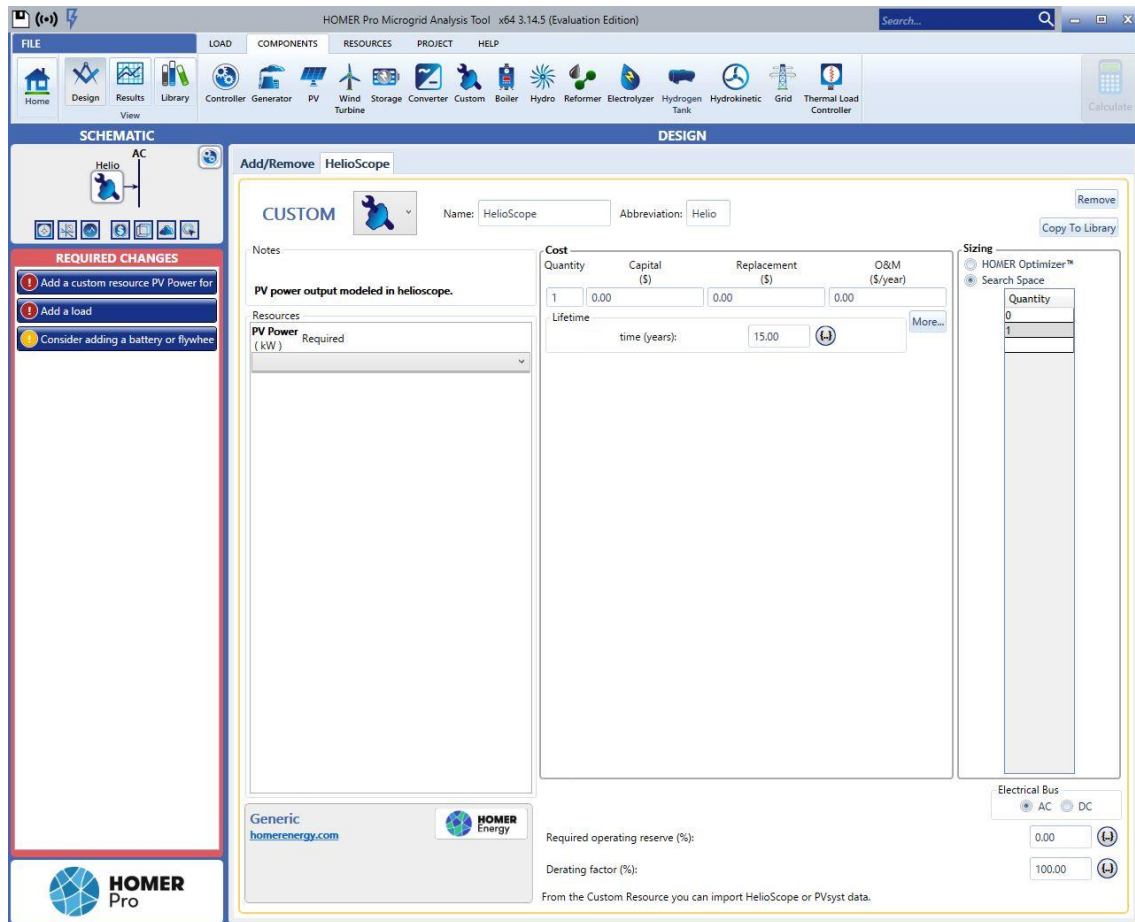


Figura 67. HelioScope personalizado.

El sexto y último en utilizar datos traídos de PVsyst y consiste en el mismo método que el de HelioScope, introducir datos como potencia en kW, coste en \$, coste de operación y mantenimiento anual en \$ o la vida útil en años (Figura 68).

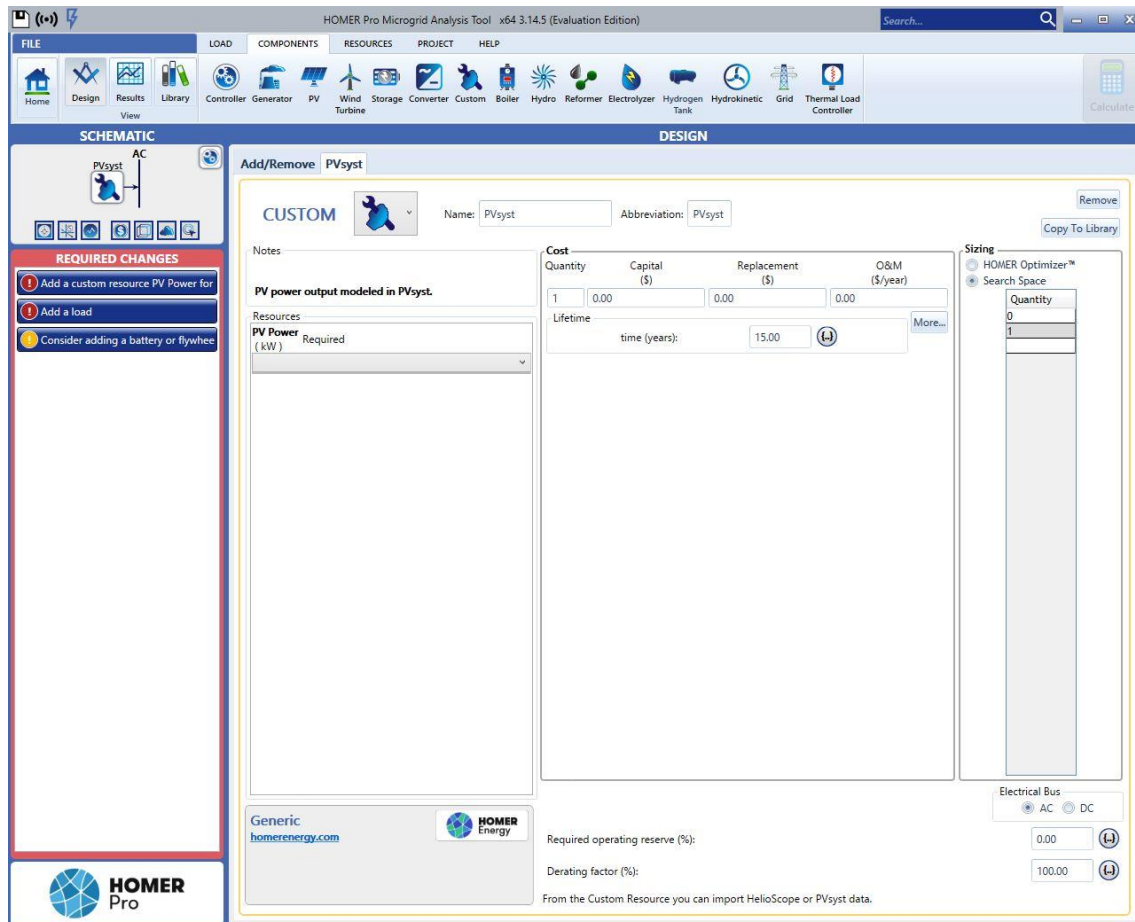


Figura 68. PVsyst personalizado.

Controlador: Este componente llamado controlador sirve para que especifiques como el sistema diseñado en Homer funciona durante la simulación. Puedes añadir varios controladores dentro de los que te ofrece el software (Figura 69) de modo que puedas comparar los resultados de cada uno de ellos.

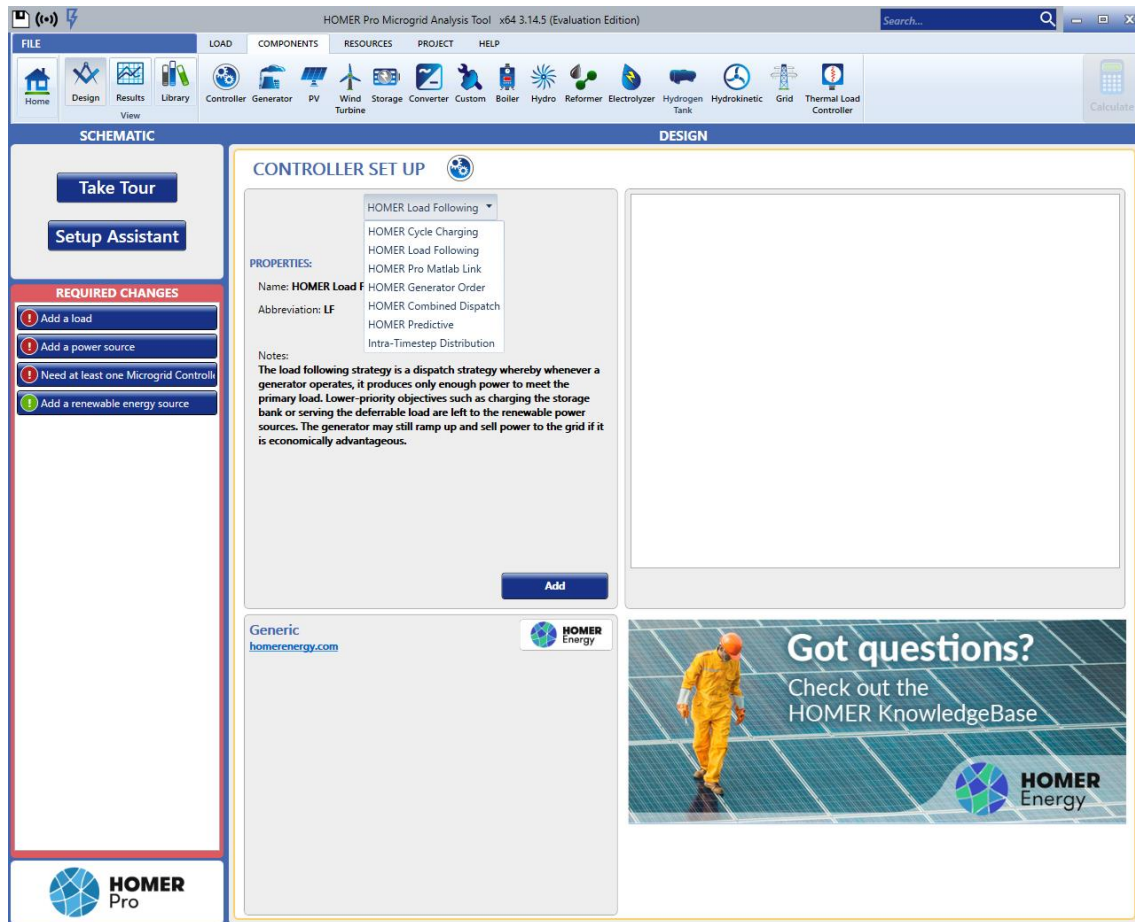


Figura 69. Lista de controladores.

Los controladores son detallados a continuación:

- Ciclo de recarga (Figura 70): cuando cualquiera de los generadores sea requerido, funcionará a toda capacidad, y el excedente servirá para recargar las baterías. Es un método especialmente útil si el componente de energía renovable es muy bajo o nulo.

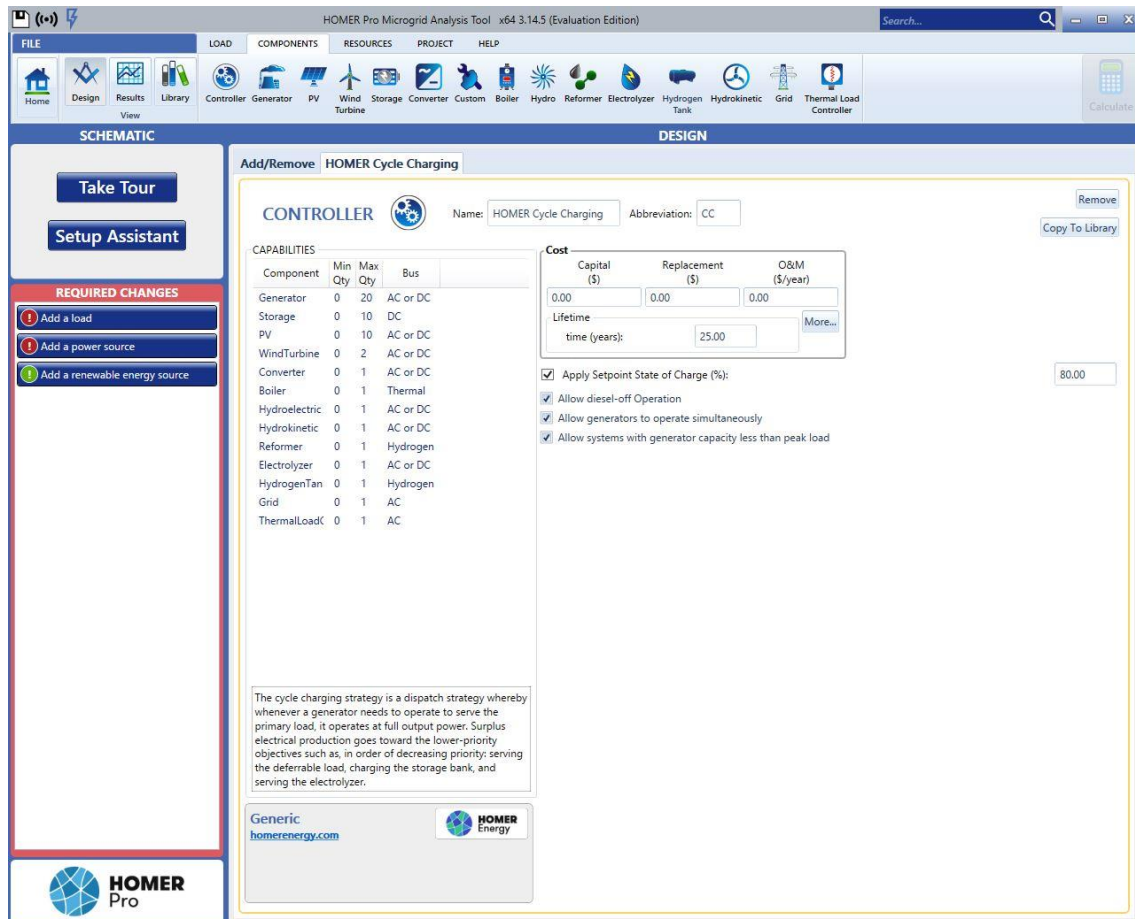


Figura 70. Ciclo de recarga.

- Seguimiento de la carga (Figura 71): Cuando un generador es requerido, produce solo energía para satisfacer la demanda existente. Especialmente útil para sistemas con una gran cantidad de energía renovable o que exceda la carga.

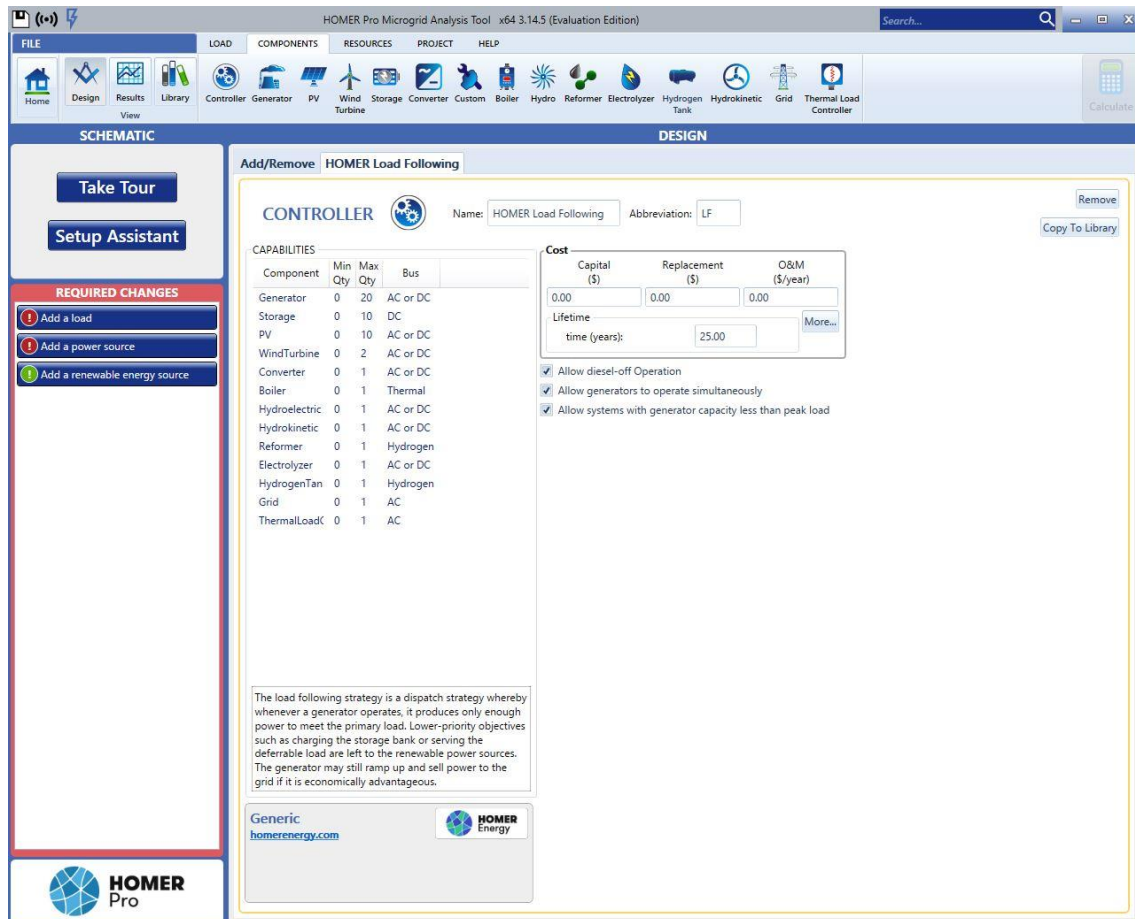


Figura 71. Seguimiento de la carga.

- Enlace a Matlab (Figura 72): Te permite escribir tu propio algoritmo de simulación a partir del software externo Matlab.

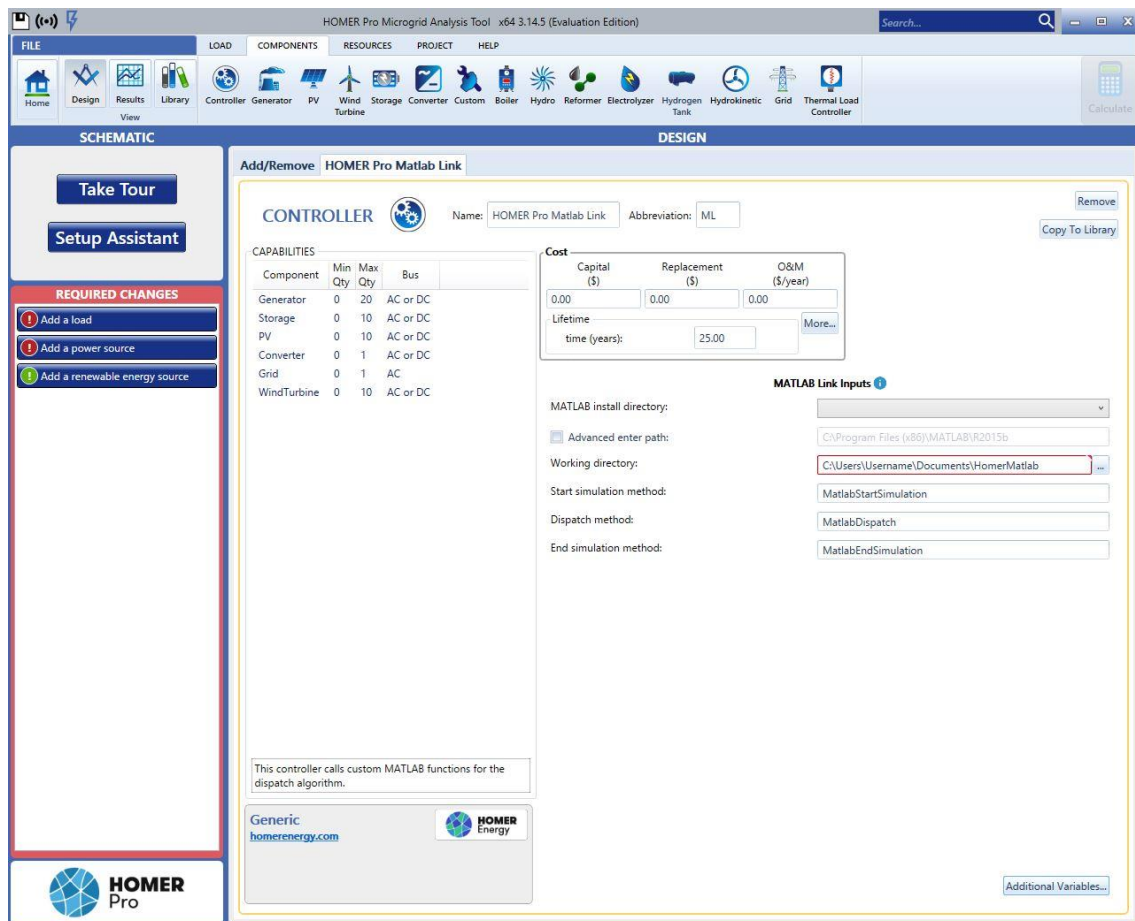


Figura 72. Enlace a Matlab.

- Orden de generadores (Figura 73): Permite seleccionar el orden de actuación de los diferentes componentes generadores de los que dispongas en tu sistema en función de la demanda. Solo se puede utilizar si dispones de generadores, fotovoltaica, turbinas eólicas, convertidor y/o sistemas de almacenaje.

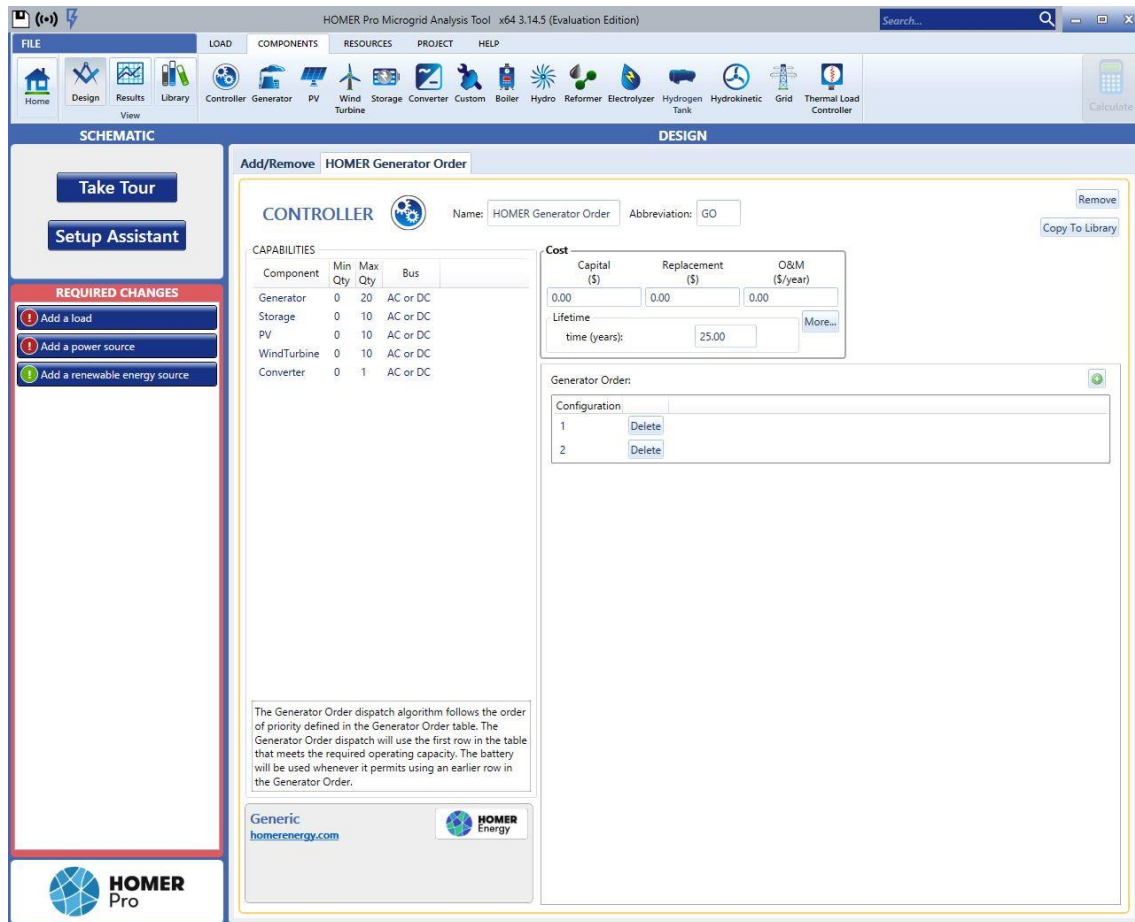


Figura 73. Orden de generadores.

- Entrega combinada (Figura 74): Permite mejorar el rendimiento sobre el ciclo de carga y el seguimiento de la carga, haciendo un uso más eficiente del generador.

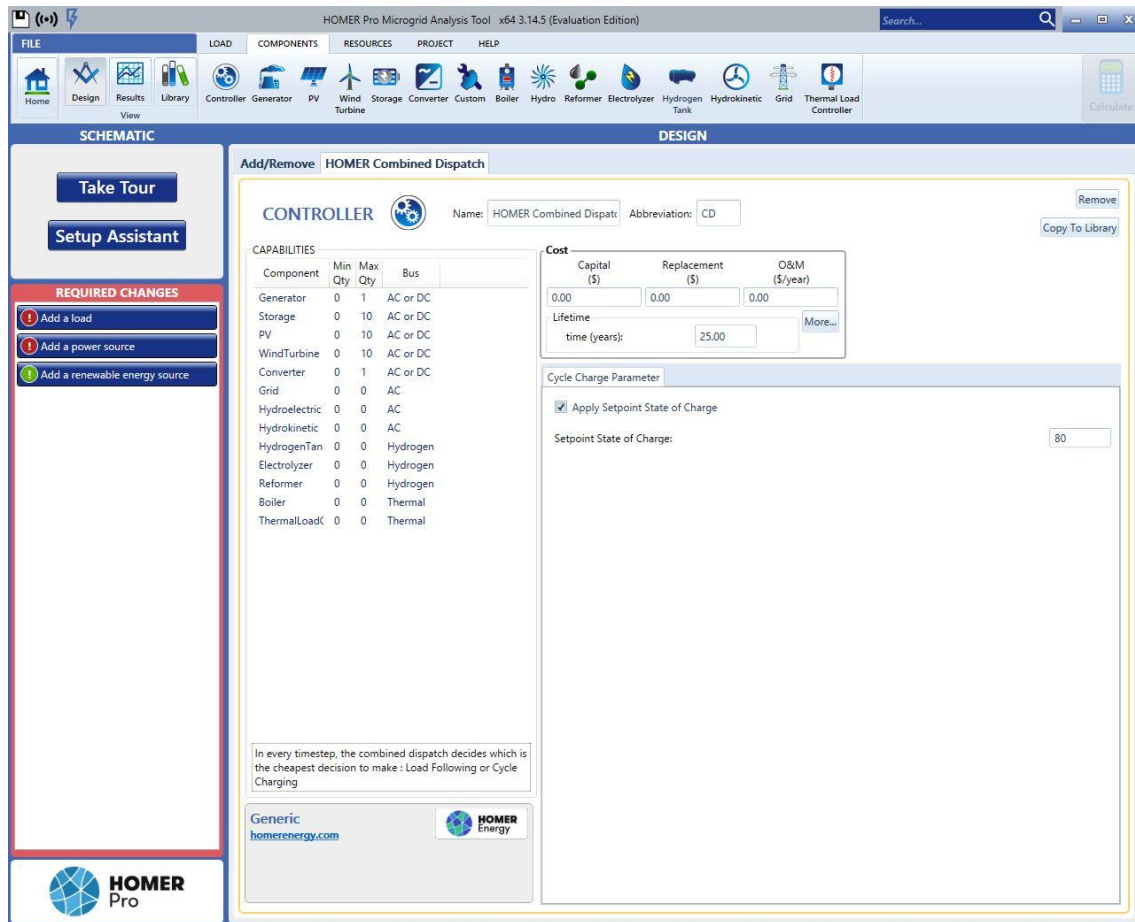


Figura 74. Entrega combinada.

· Previsión de entrega (Figura 75): Utiliza algoritmos de estrategia de entrega, como conocen la demanda eléctrica y térmica introducida, así como la disponibilidad eólica y solar, permite conseguir resultados con un menor coste de operación del sistema comparada con otras estrategias de Homer Pro.

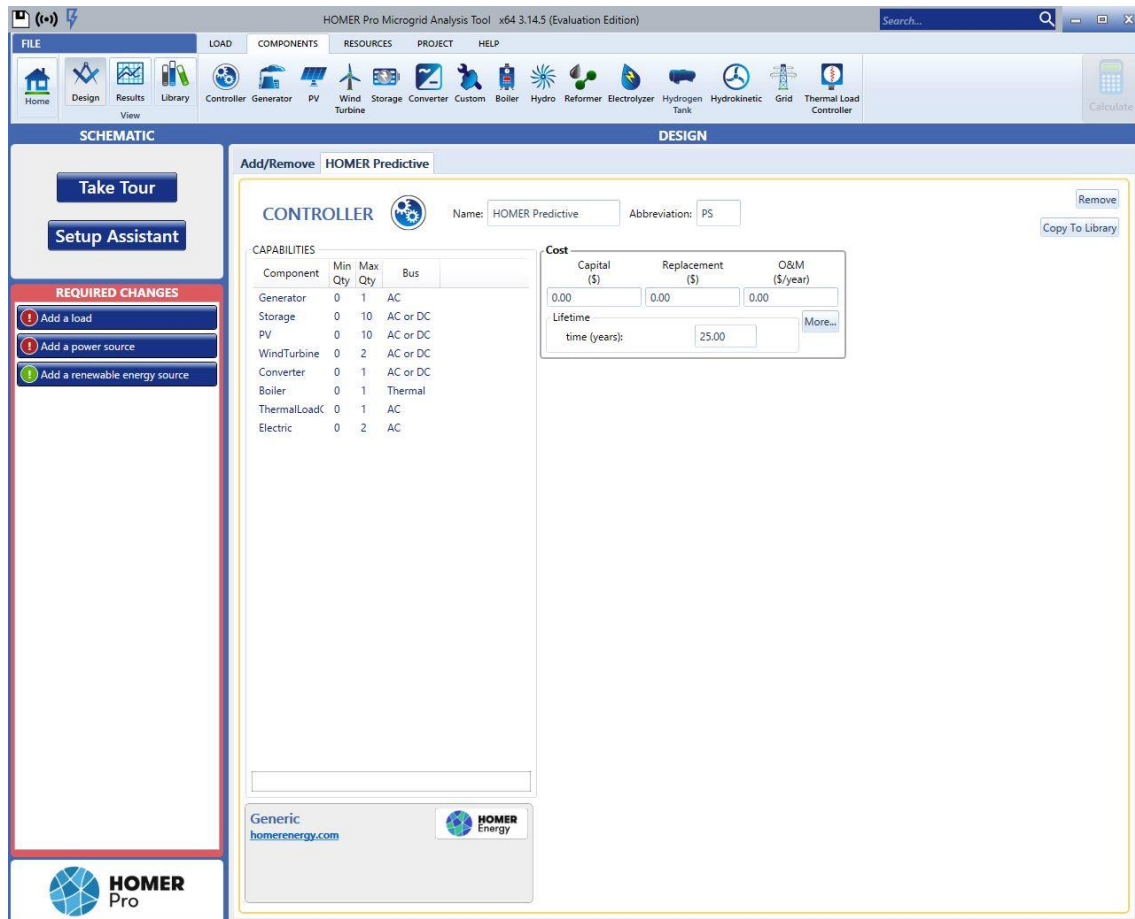


Figura 75. Previsión de entrega.

- Distribución temporal (Figura 76): Este algoritmo utiliza datos del National Renewable Energy Laboratory para considerar los efectos de la variación en el recurso solar sobre la producción de energía de los diferentes sistemas para obtener una simulación más precisa.

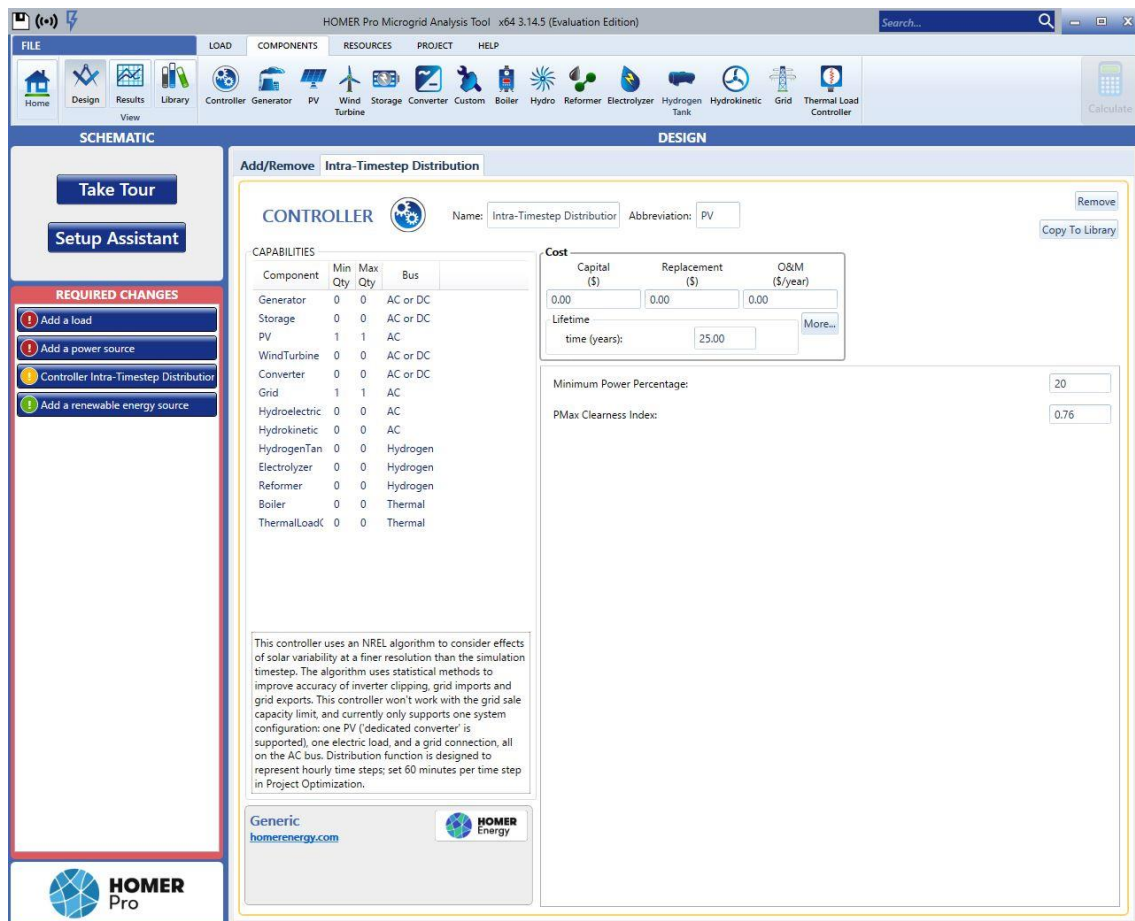


Figura 76. Distribución temporal.

Proyecto

En el apartado del proyecto hay una serie de factores y variables (Figura 77) que afectan al mismo y es necesario complementar para poder realizar la correcta simulación del sistema diseñado mediante los pasos anteriormente descritos en la presente memoria, se van a explicar uno a uno a continuación:

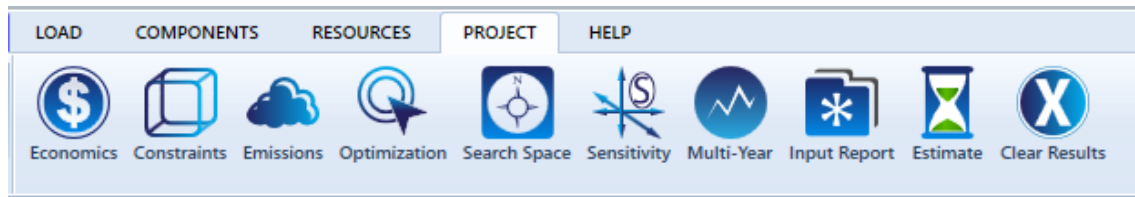


Figura 77. Variables del proyecto seleccionables.

Economía: Es necesario introducir un conjunto de información económica sobre el sistema diseñado para poder realizar una correcta simulación por el software Homer, permite la modificación de la divisa a utilizar en la simulación (Figura 78).

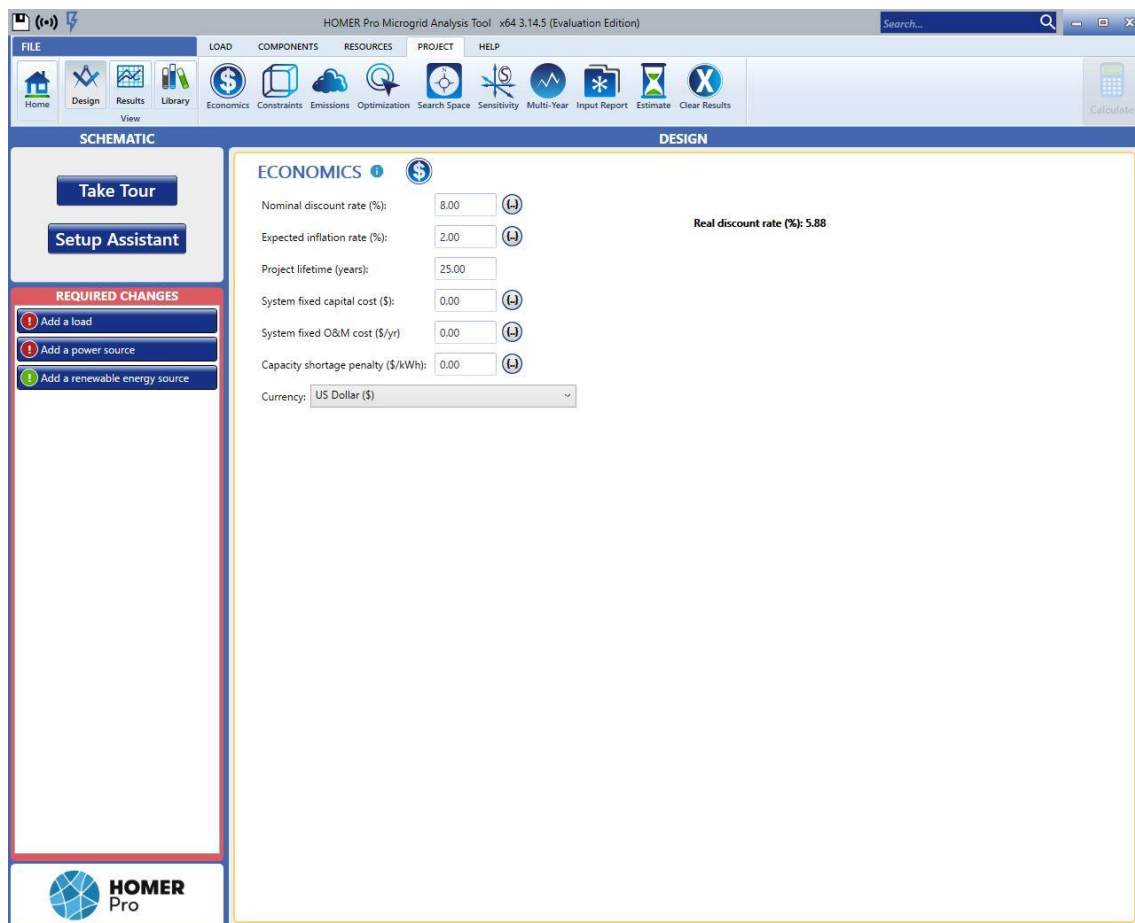


Figura 78. Parámetros económicos.

Limitaciones: Su utilidad es modificar las limitaciones necesarias para el funcionamiento del sistema diseñado, el propio software Homer descarta las configuraciones que no cumplen con las limitaciones estipuladas (Figura 79).

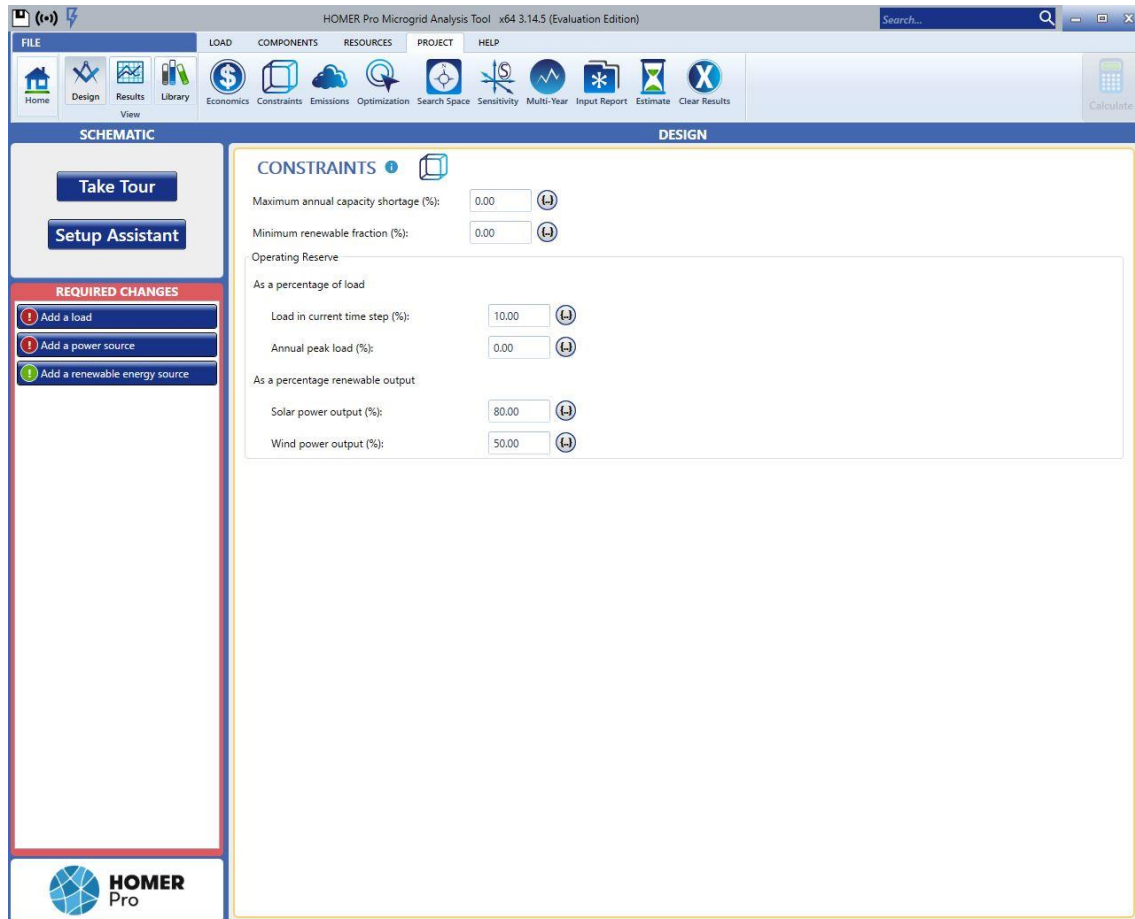


Figura 79. Concreción de las limitaciones del sistema.

Emisiones: Permite ajustar las penalizaciones económicas en caso de excederse de un determinado límite de emisión para diferentes tipos de emisiones contaminantes, para ello debemos introducir los límites que existan en nuestra ubicación del sistema diseñado (Figura 80).

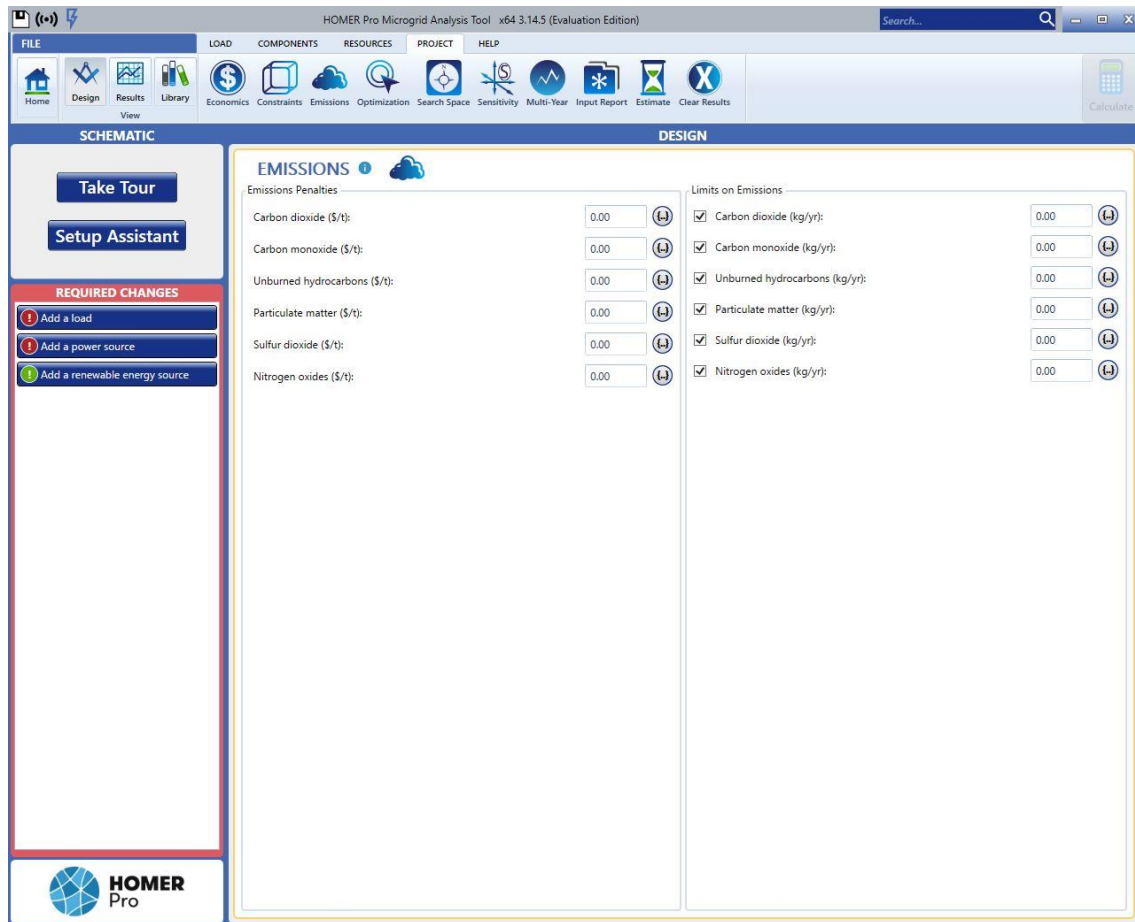


Figura 80. Configuración referente a las emisiones.

Optimización: Este apartado permite ajustar la optimización de la simulación, se distingue entre los ajustes de la optimización y del optimizador, únicamente se requiere complementar y marcar las casillas deseadas y se realizará la simulación pertinente (Figura 81).

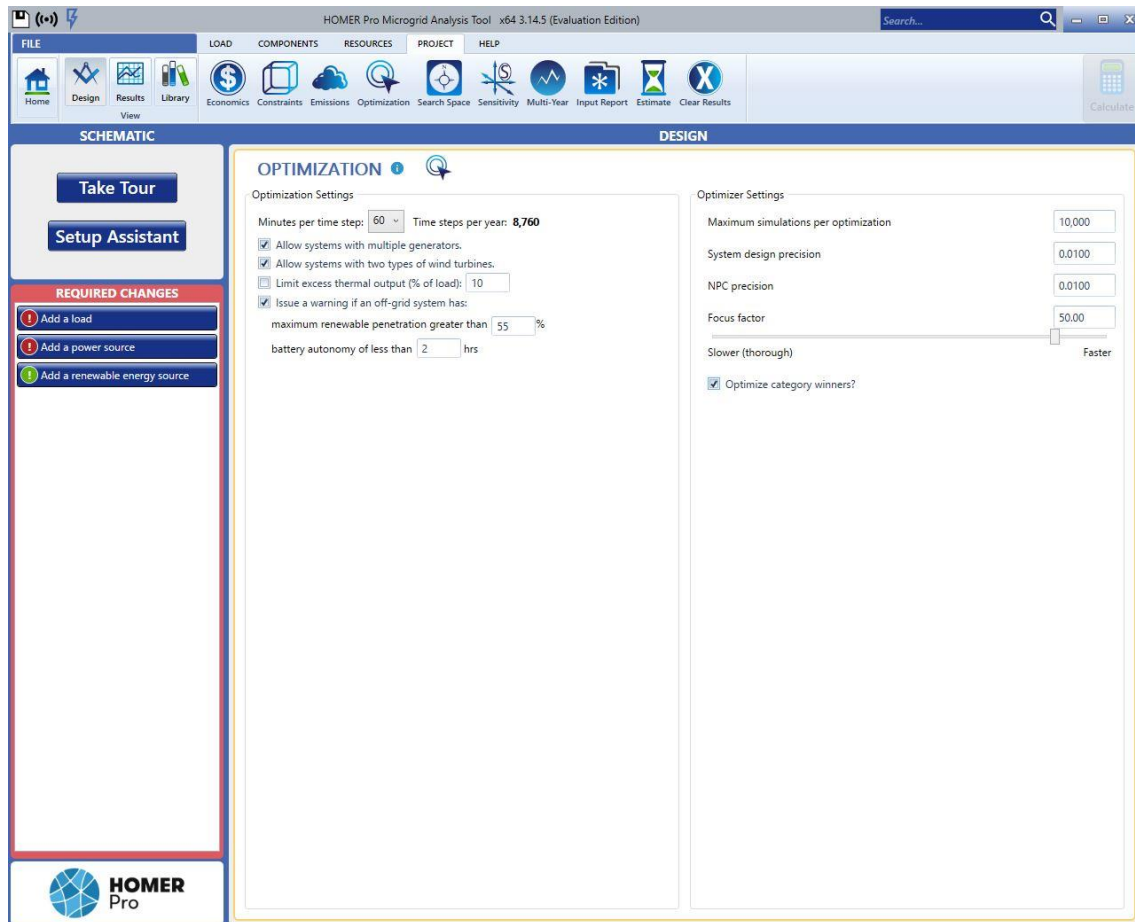


Figura 81. Ajustes optimizador y optimización.

Espacio de búsqueda: Permite definir valores como la capacidad (potencia) o la cantidad (unidades) de los componentes que has ido introduciendo a lo largo del diseño del sistema mediante Homer. De modo que puedes modificar los valores asignados a cada uno de los componentes en este apartado rápidamente sin necesidad de ir a buscar cada componente uno por uno para modificarlo (Figura 82).

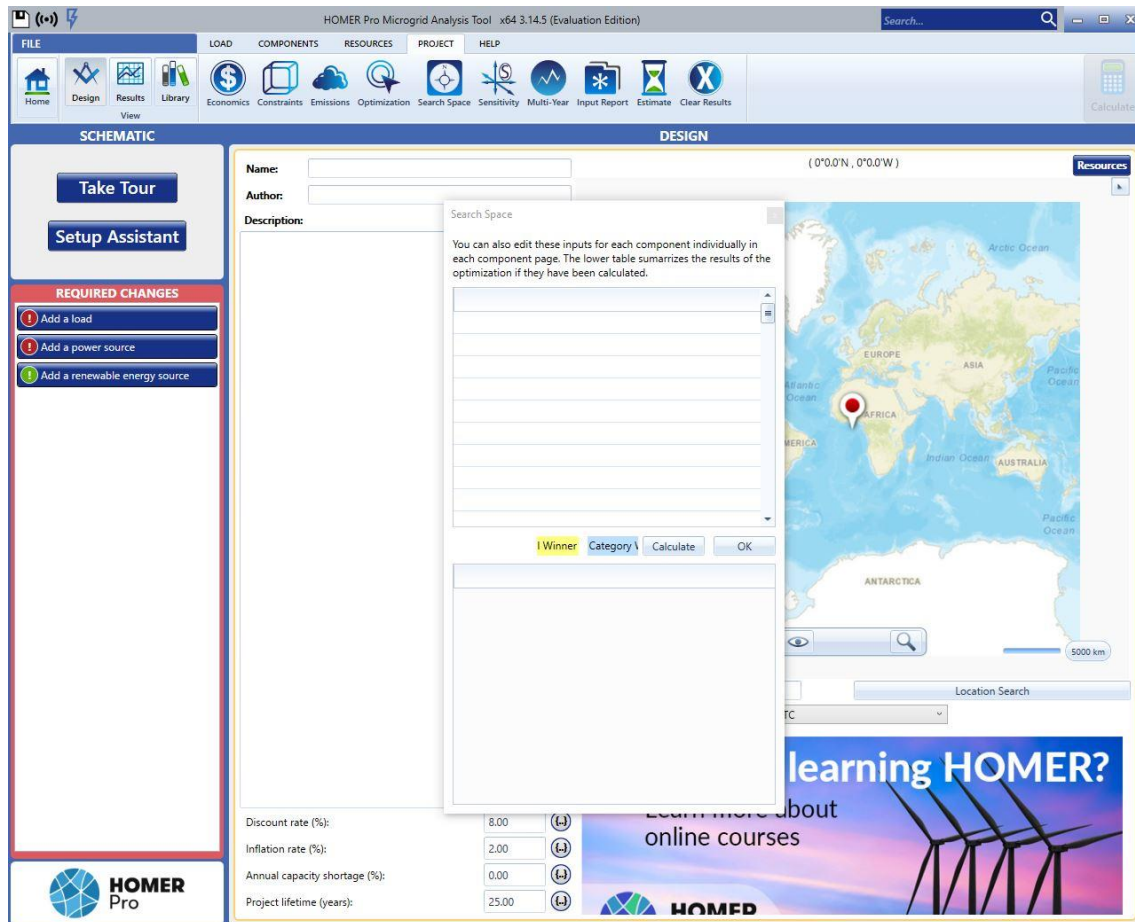


Figura 82. Búsqueda detalles básicos de los componentes.

Sensibilidad: En este apartado puedes visualizar todas las variables con sensibilidad que has introducido a lo largo del diseño del sistema con Homer y modificar dichos parámetros si fuese necesario (Figura 83).

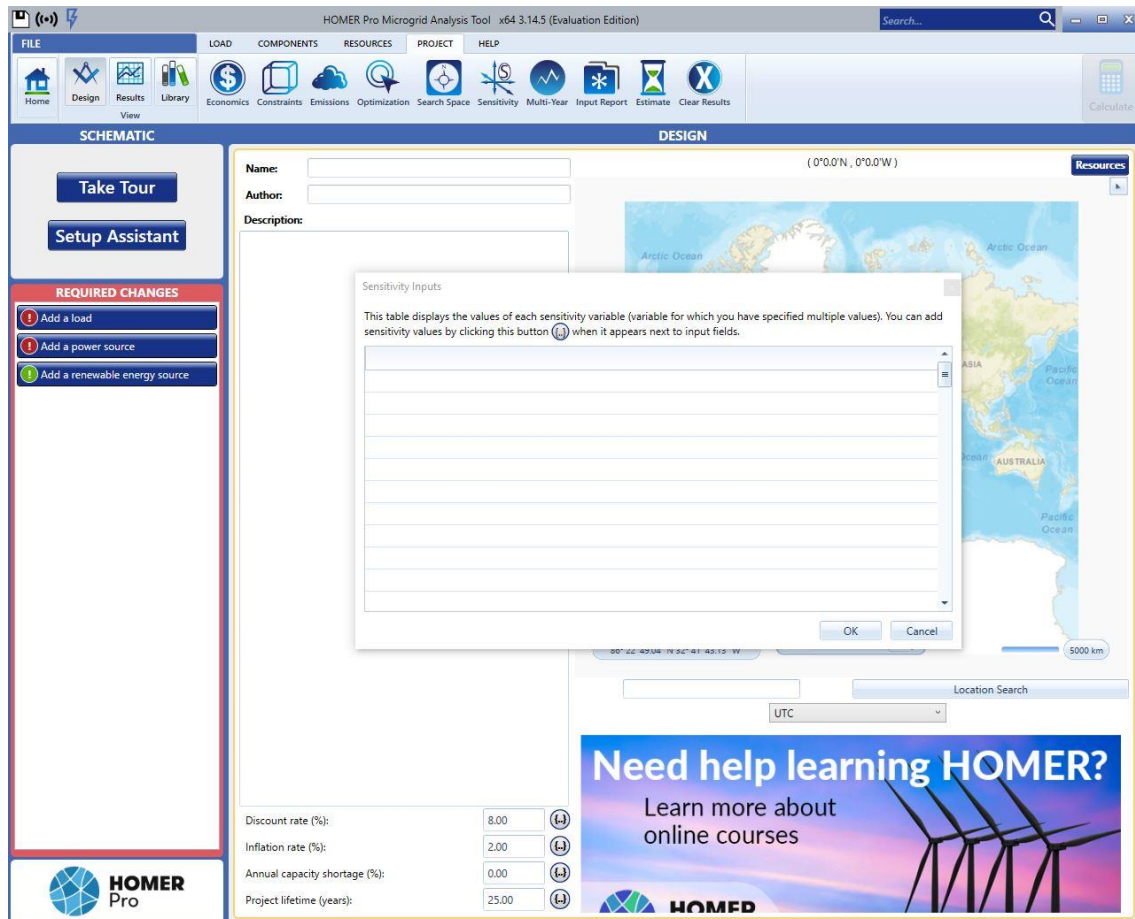


Figura 83. Modificación de parámetros con sensibilización.

Previsión: En este apartado se puede activar para especificar la vida útil del sistema diseñado en años (Figura 84), así como el coste de operación y mantenimiento del sistema de forma fija o variable (Figura 85).

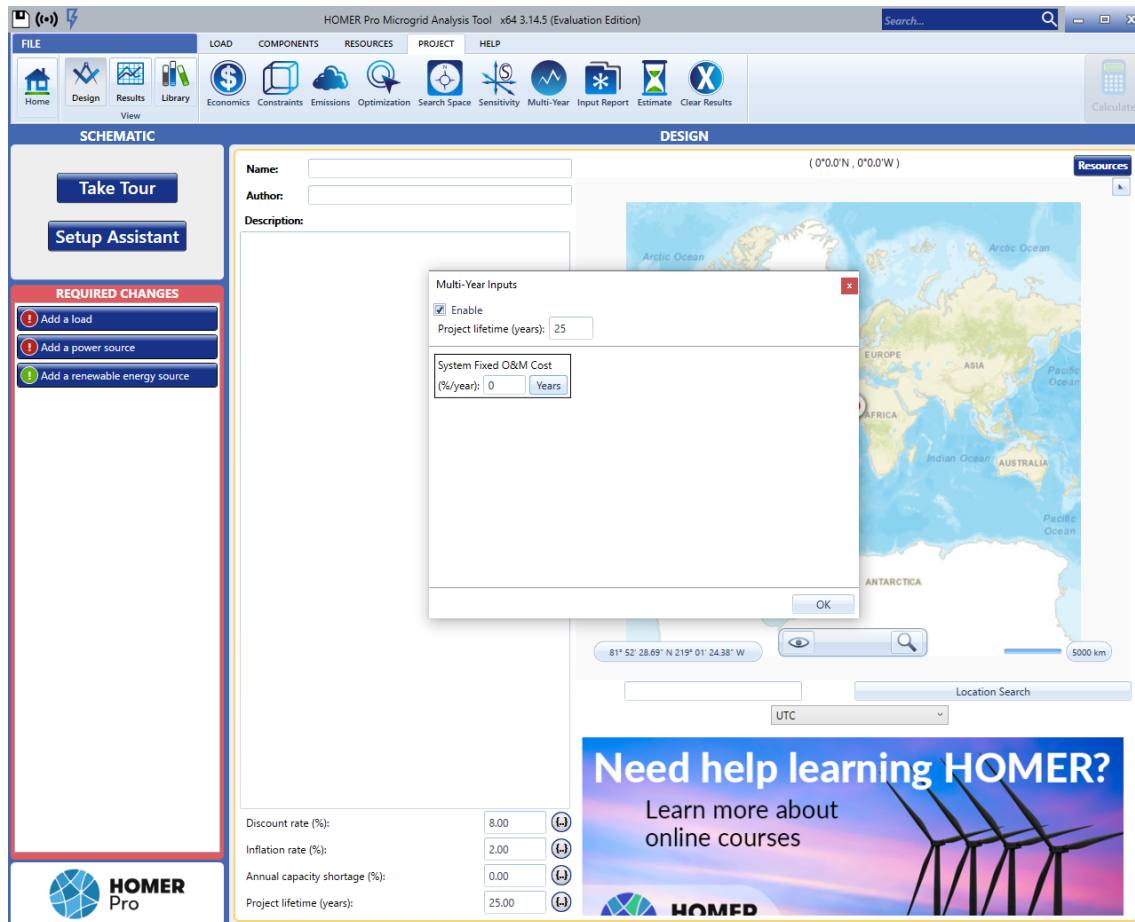


Figura 84. Ajustes de la previsión futura del sistema diseñado.

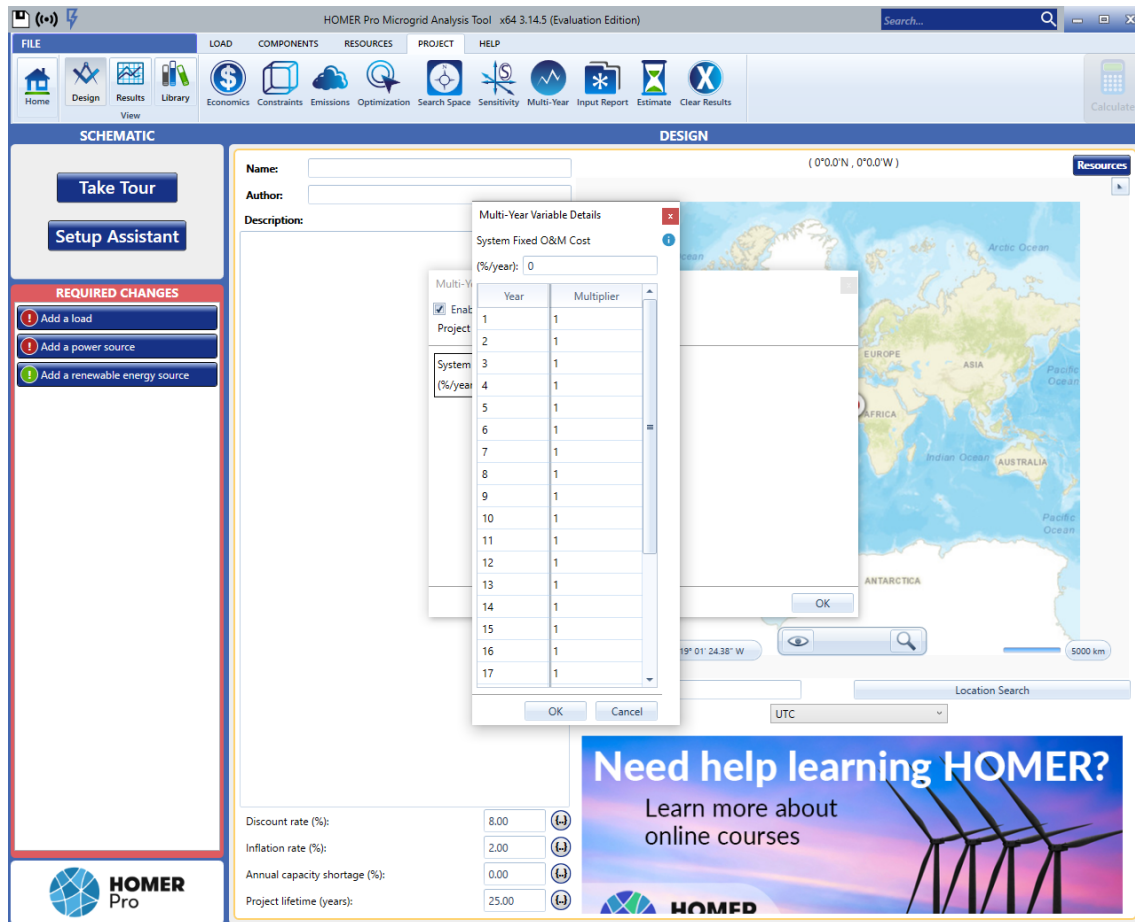


Figura 85. Ajustes de los costes de operación y mantenimiento.

Informe: Crea un informe y lo guarda en formato “HTML” para poder visualizarlo en el navegador web, incluye características e información más relevante del sistema diseñado durante el proceso explicado de utilización.

Estimar: Esta casilla tiene la función de realizar una estimación rápida del proyecto una vez se han introducido todos los parámetros necesarios.

Limpiar resultados: Se utiliza para vaciar y limpiar los resultados una vez estimados, así se puede llevar a cabo una nueva simulación una vez modificados los parámetros deseados después de la estimación inicial.

Resultados

Para realizar una explicación del apartado *Resultados* de la forma más clara posible se ha cogido un ejemplo proporcionado por el propio software Homer, el ejemplo seleccionado tiene la descripción de “Casa en Montana desconectada de la red”. Las características de diseño del mismo se encuentran a continuación:

- Carga: Como se puede observar en la figura (Figura 86) se puede observar datos de la carga, una media anual de 10 kWh/día y una potencia pico de 1,65 kW.



Figura 86. Carga del ejemplo.

· Recursos: Dispone de datos de diferentes recursos energéticos; de Irradiancia Horizontal Global (Figura 87) con una media anual de 4 kWh/m²/día, de recurso eólico (Figura 88) con una media anual de 5.76 m/s, de temperatura (Figura 89) con una media anual de 5,48°C y de combustible (Figura 90) utilizando Gasolina a un precio de 0,25 \$/L.

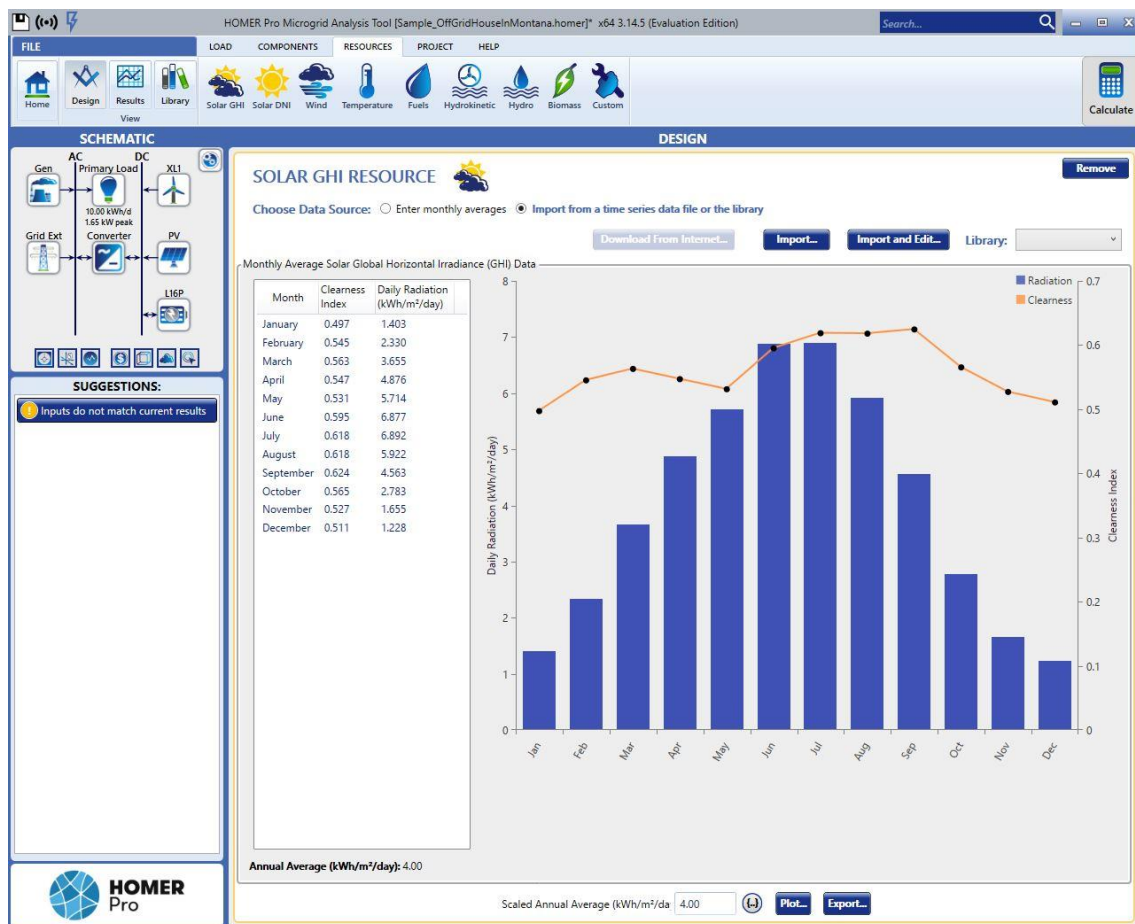


Figura 87. Recurso solar ejemplo.

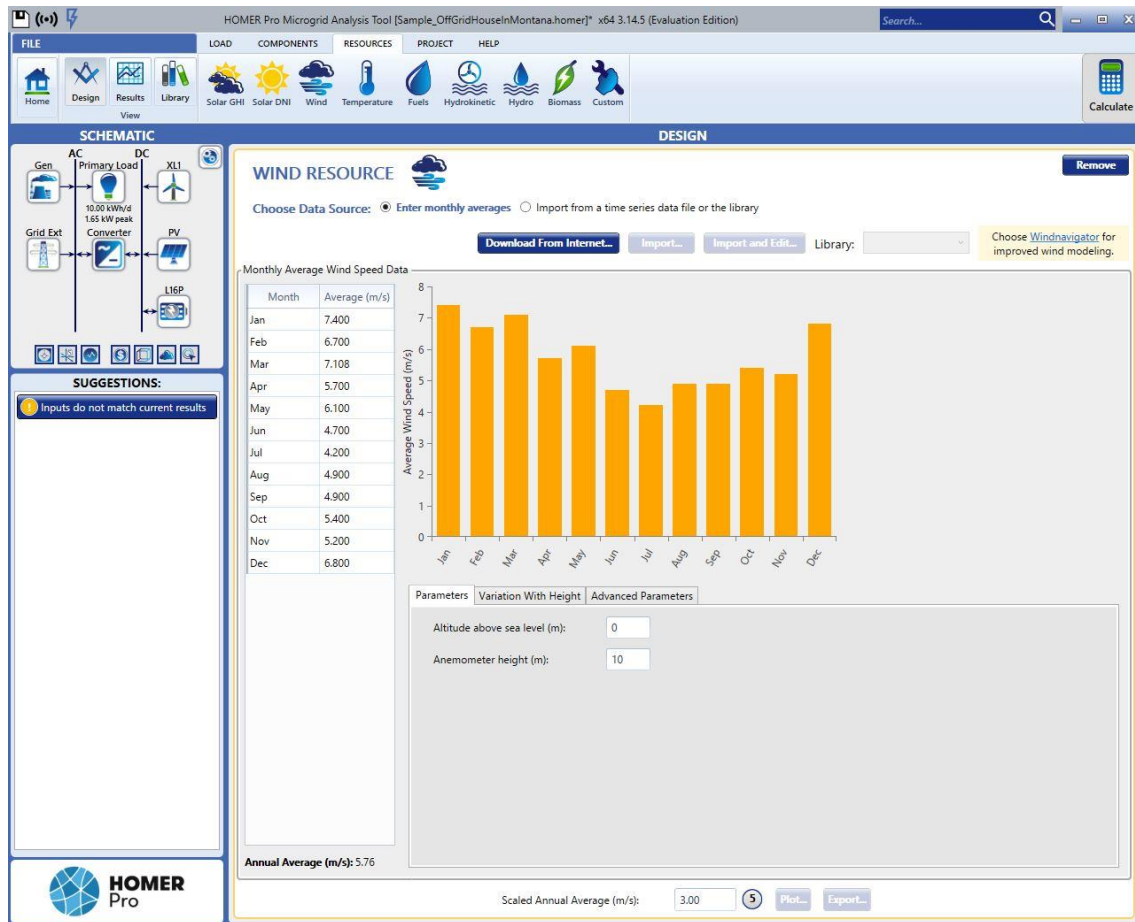


Figura 88. Recurso eólico ejemplo.

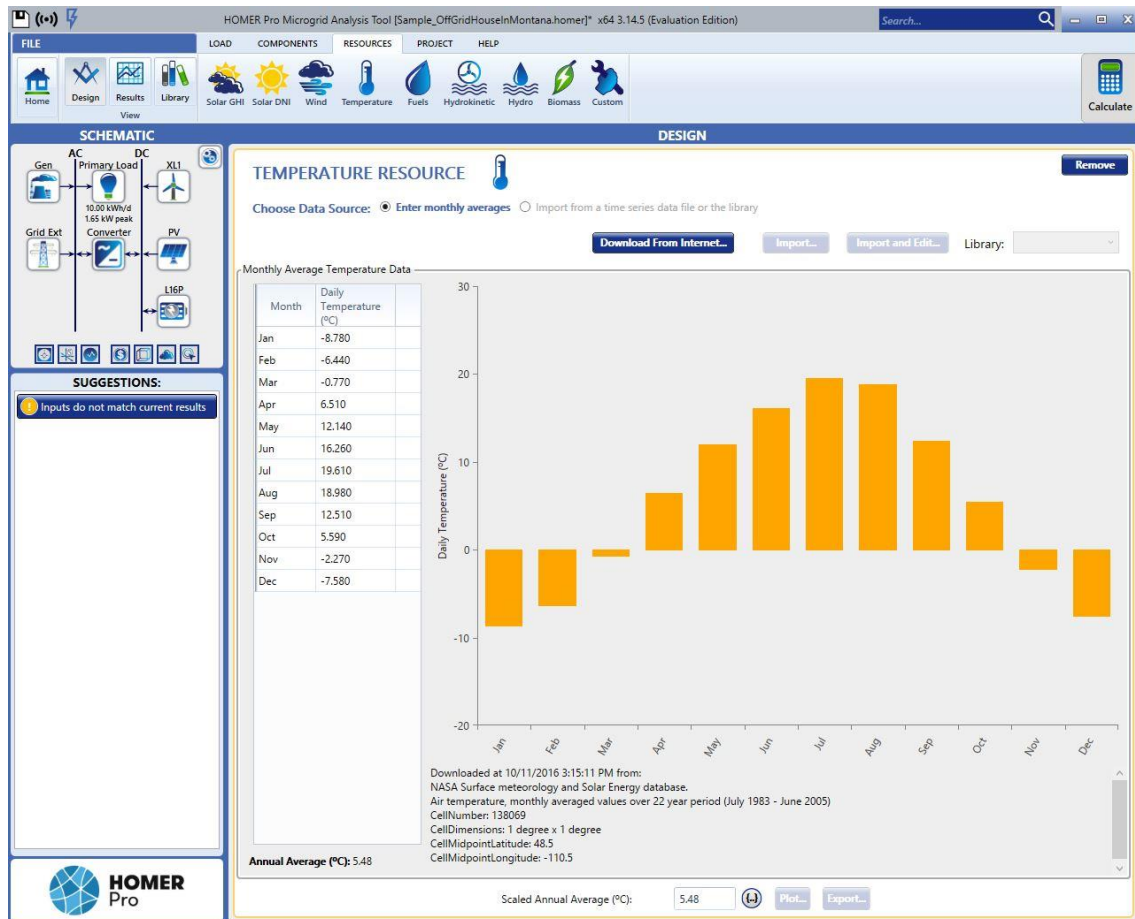


Figura 89. Recurso temperatura ejemplo.

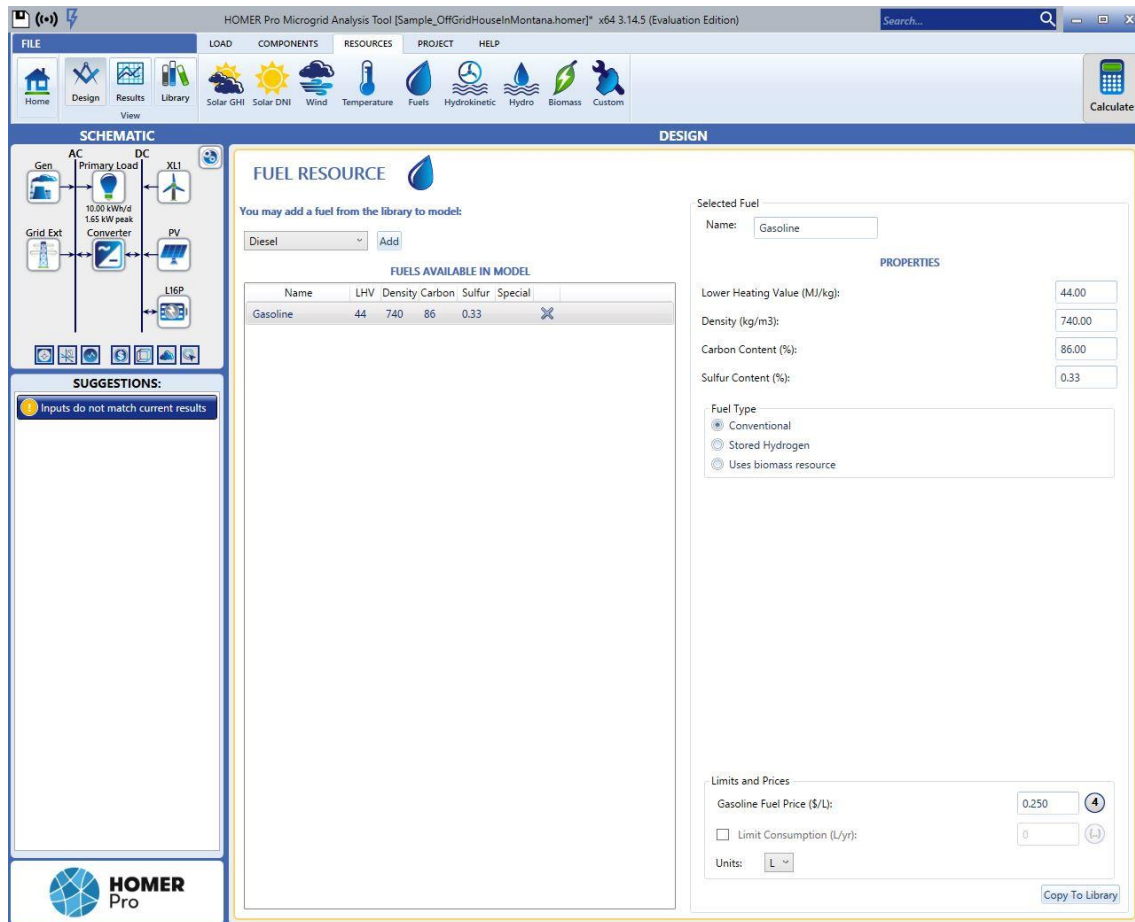


Figura 90. Recurso combustible ejemplo.

· **Componentes:** En el ejemplo se han utilizado diversos componentes, un generador (Figura 91) para el combustible de gasolina de 2,6 kW de capacidad, una turbina eólica (Figura 92) de una capacidad nominal de 1,24 kW, paneles fotovoltaicos (Figura 93) de capacidad nominal 5 kW, un sistema de almacenamiento (Figura 94) de 2,37 kWh de capacidad nominal, un convertidor (Figura 95), una extensión de la red (Figura 96) y para finalizar un controlador para el ciclo de carga (Figura 97) y el seguimiento de la carga (Figura 98).

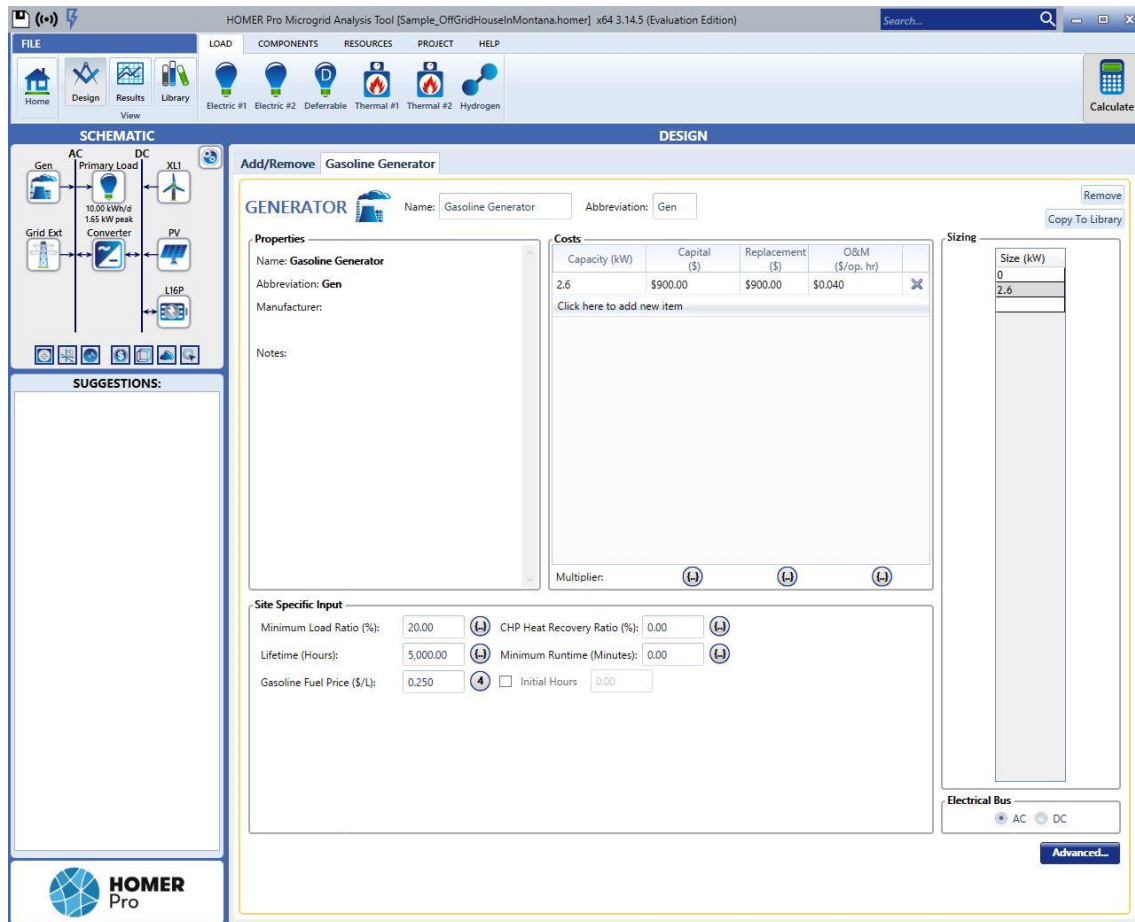


Figura 91. Generador ejemplo.

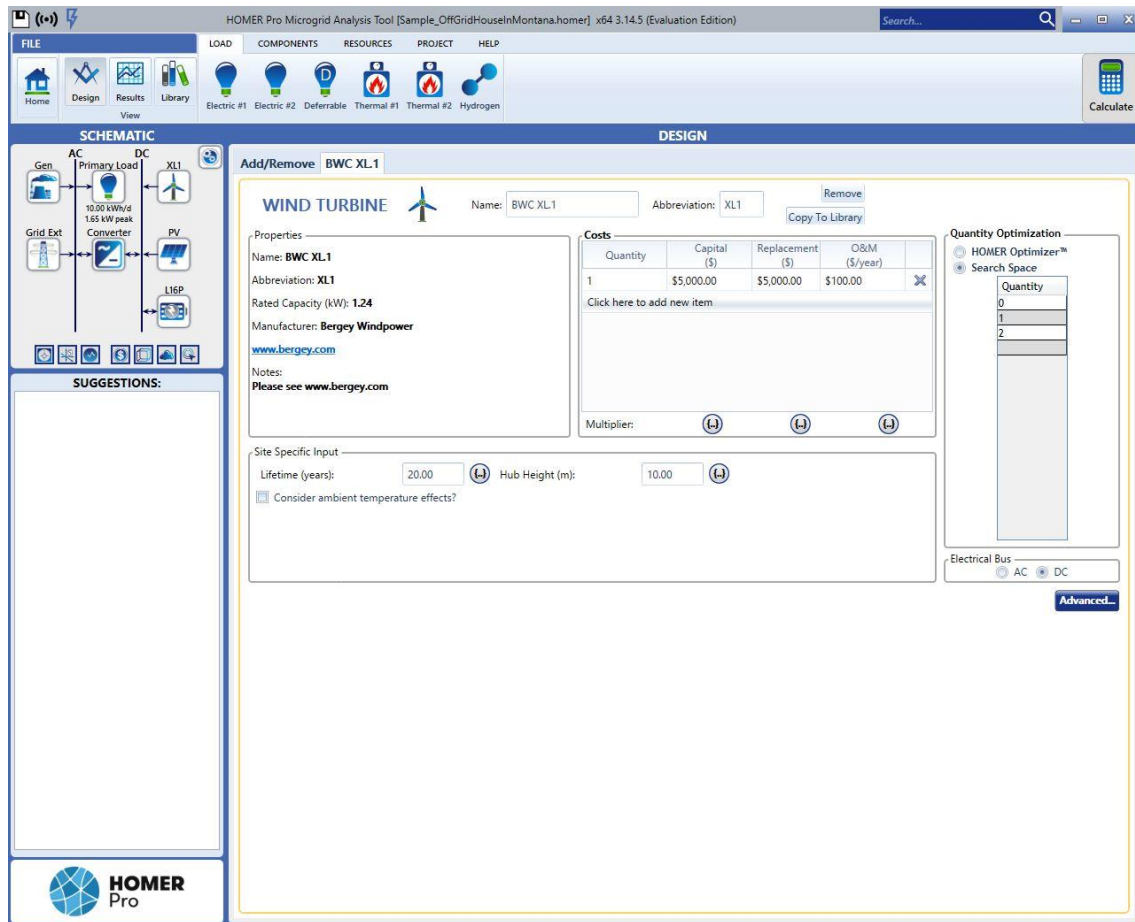


Figura 92. Turbina eólica ejemplo.

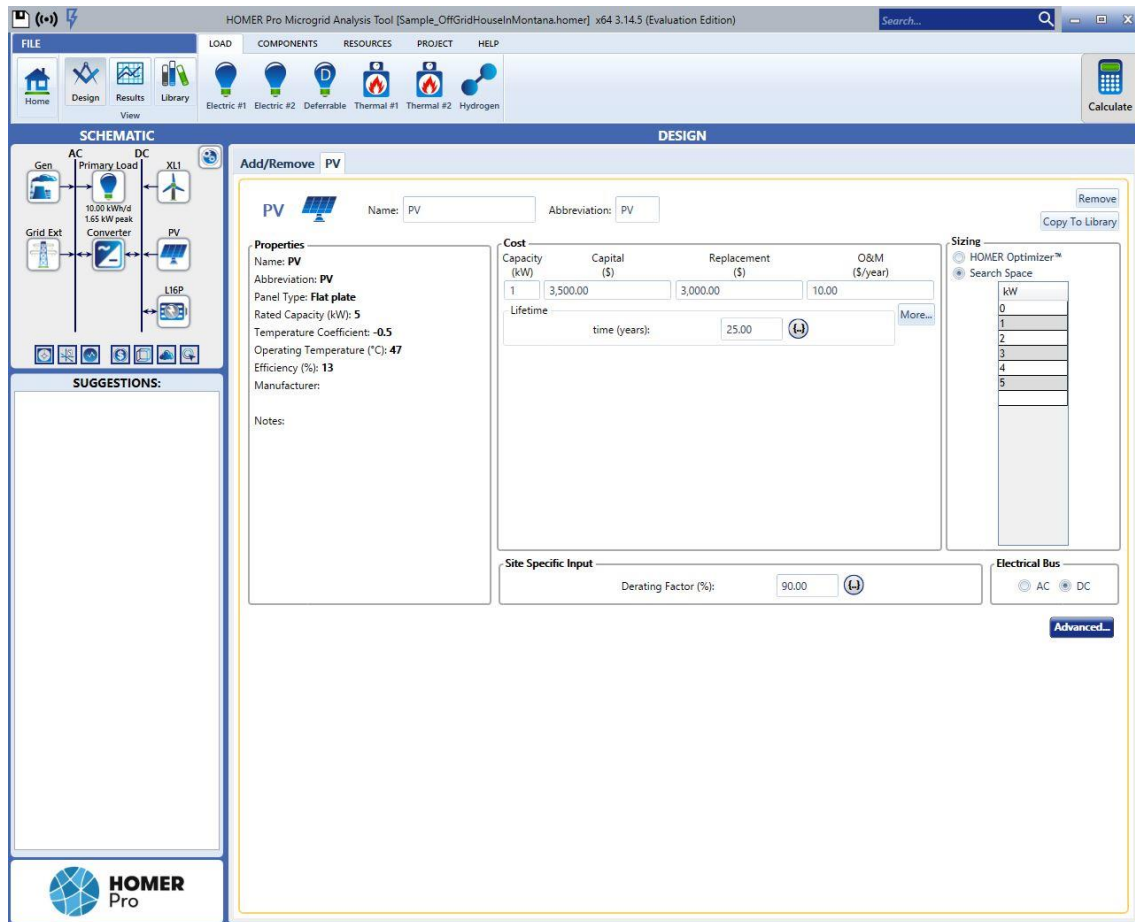


Figura 93. Fotovoltaica ejemplo.

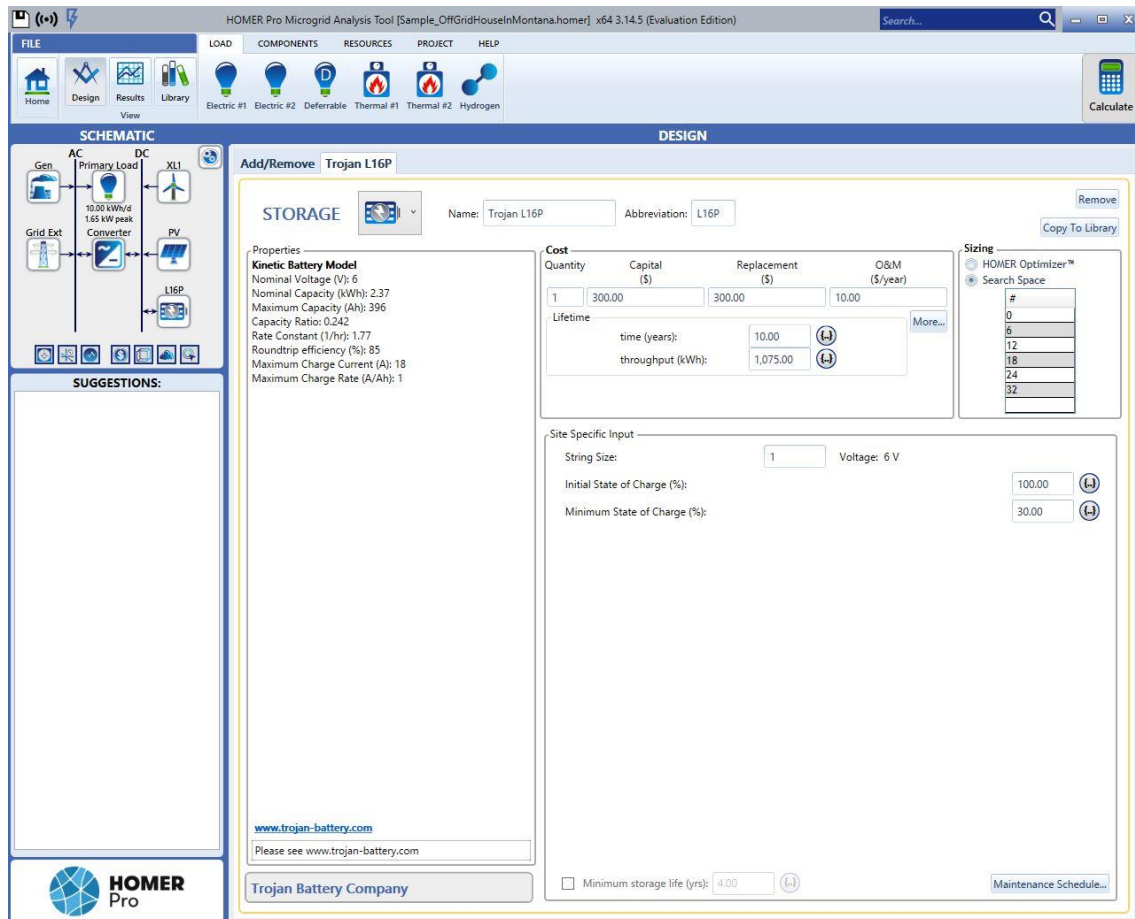


Figura 94. Sistema almacenamiento ejemplo.

The screenshot displays the HOMER Pro Microgrid Analysis Tool interface. The top menu bar includes FILE, LOAD, COMPONENTS, RESOURCES, PROJECT, and HELP. The left sidebar shows the SCHEMATIC view with a diagram of a microgrid system including Gen, AC, Primary Load, DC, XL1, Grid Ext, PV, and L16P. The main window is in the DESIGN tab, showing the configuration for a 'Converter' component.

Converter Properties:

- Name: Converter
- Abbreviation: Converter
- Notes:

Costs Table:

Capacity (kW)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/year)
1	\$750.00	\$750.00	\$0.0

Click here to add new item

Capacity Optimization:

- HOMER Optimizer™
- Search Space
- Size (kW): 0, 1, 2, 3, 4

Generic Component:

- homerenergy.com
- HOMER Energy

Input Parameters:

- Inverter Input:
 - Lifetime (years): 15.00
 - Efficiency (%): 90.00
 - Parallel with AC generator? ☒
- Rectifier Input:
 - Relative Capacity (%): 75.00
 - Efficiency (%): 85.00

Advertisement:

NODE X Decentralized Microgrid which start at 6kVA and capable to expand as your project grow

LEONICS

Flexible • Scalable • Redundancy

For more microgrid details, email: info@leonics.com • www.leonics.com

Figura 95. Convertidor ejemplo.

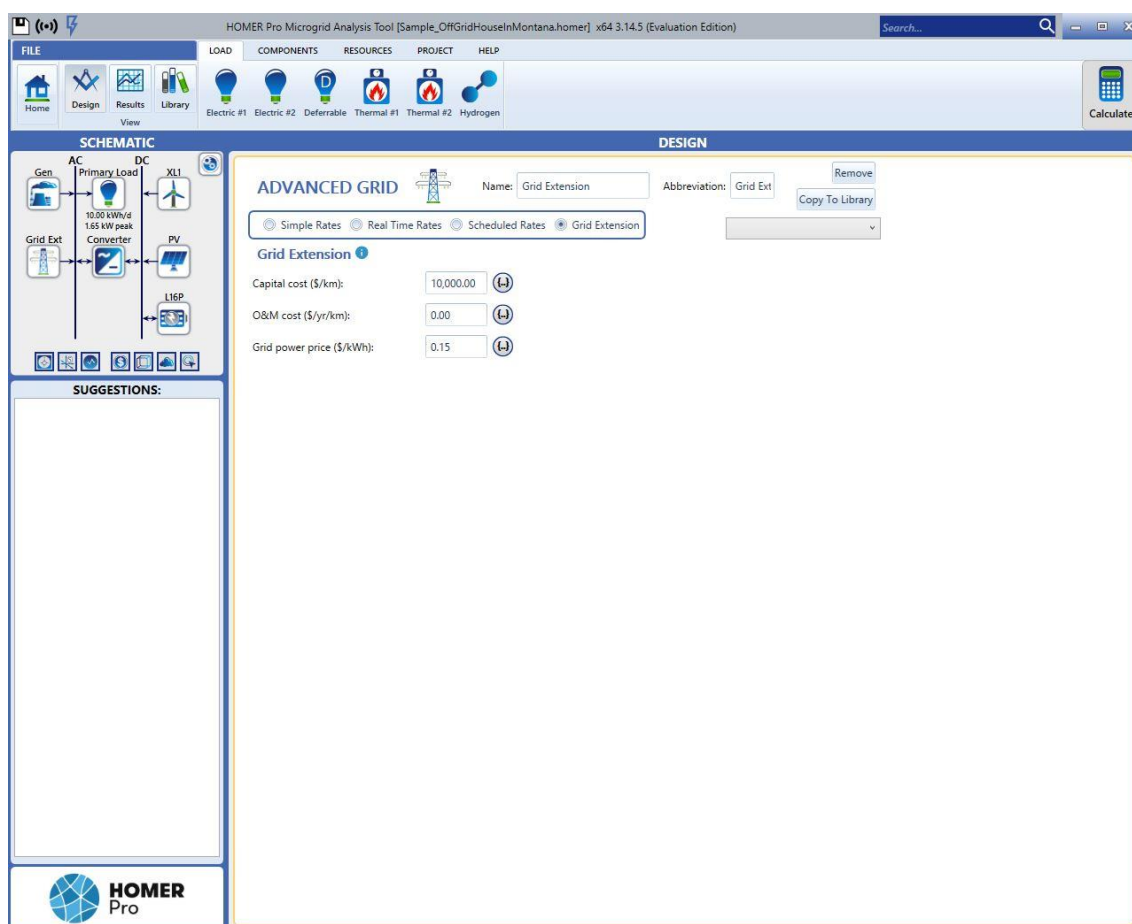


Figura 96. Extensión red ejemplo.

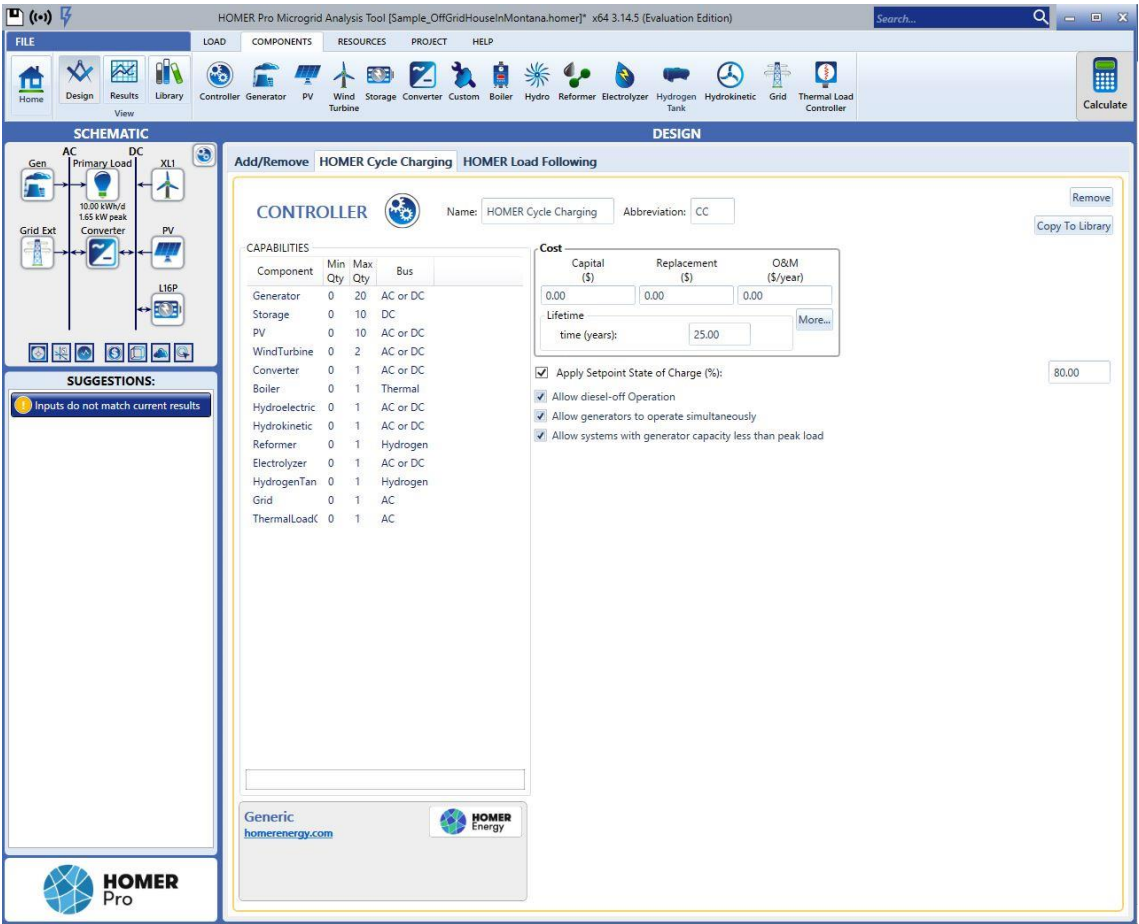


Figura 97. Ciclo de carga ejemplo.

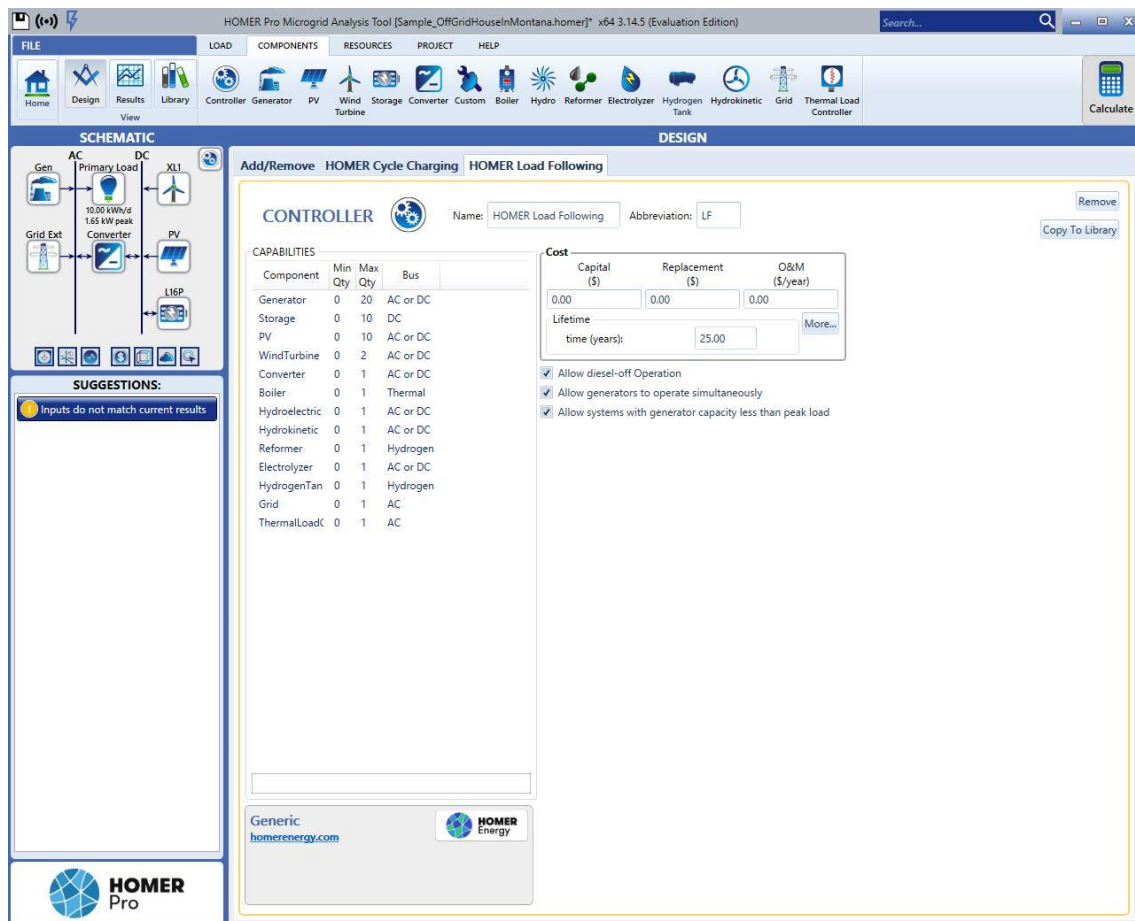


Figura 98. Seguimiento de la carga ejemplo.

· Ajustes del proyecto: Para acabar, los ajustes introducidos en el apartado de *Proyecto*. Los factores económicos que afectan al proyecto (Figura 99), las limitaciones presentes en el proyecto (Figura 100), los ajustes seleccionados para la optimización (Figura 101), el apartado de “Espacio de búsqueda” (Figura 102) y para acabar los valores que tienen una sensibilidad asociada en el proyecto (Figura 103).

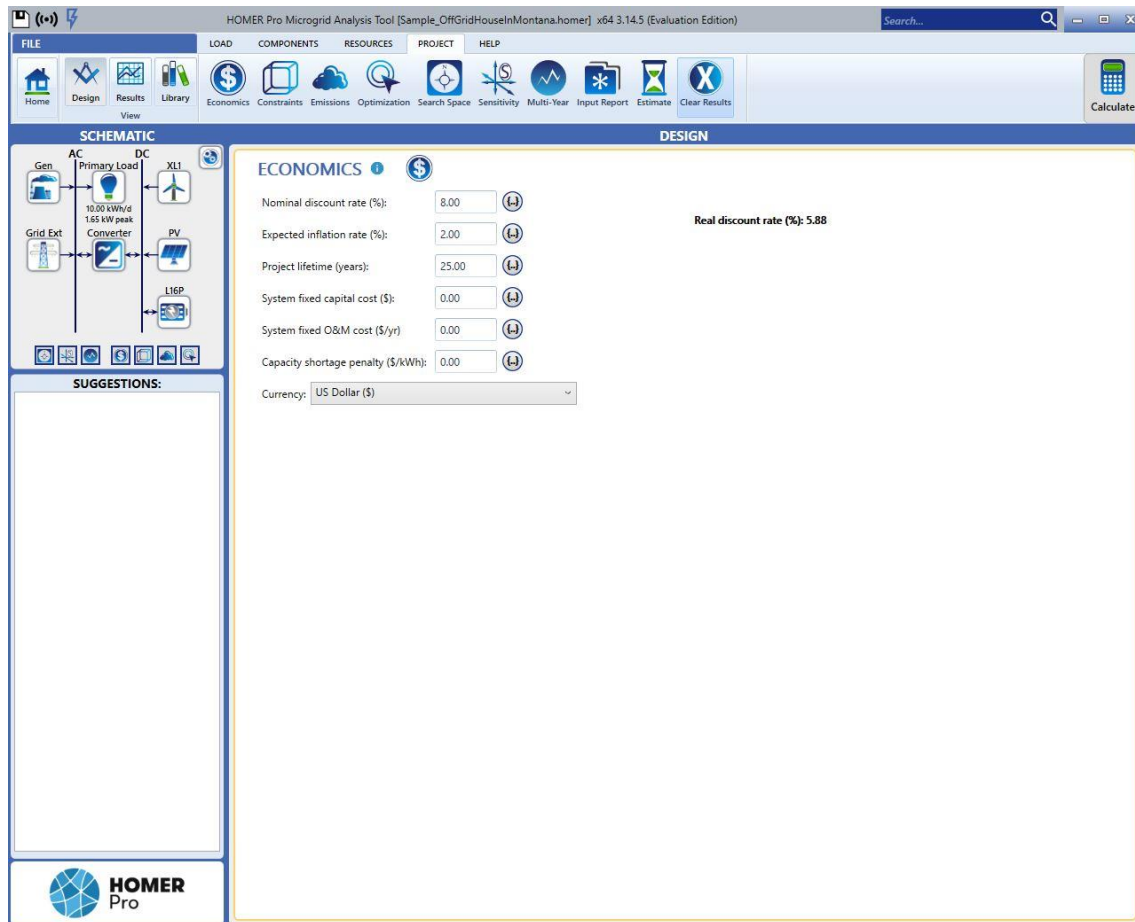


Figura 99. Económicos ejemplos.

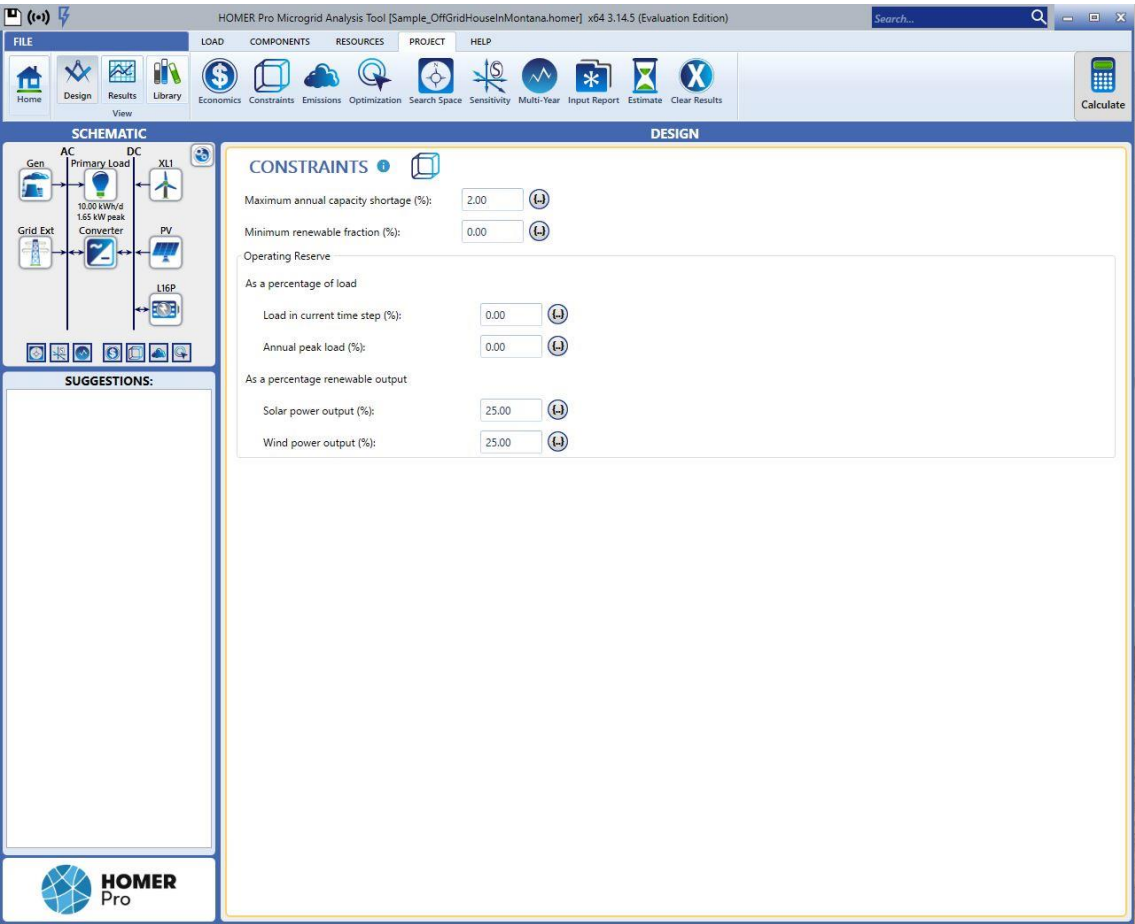


Figura 100. Limitaciones ejemplo.

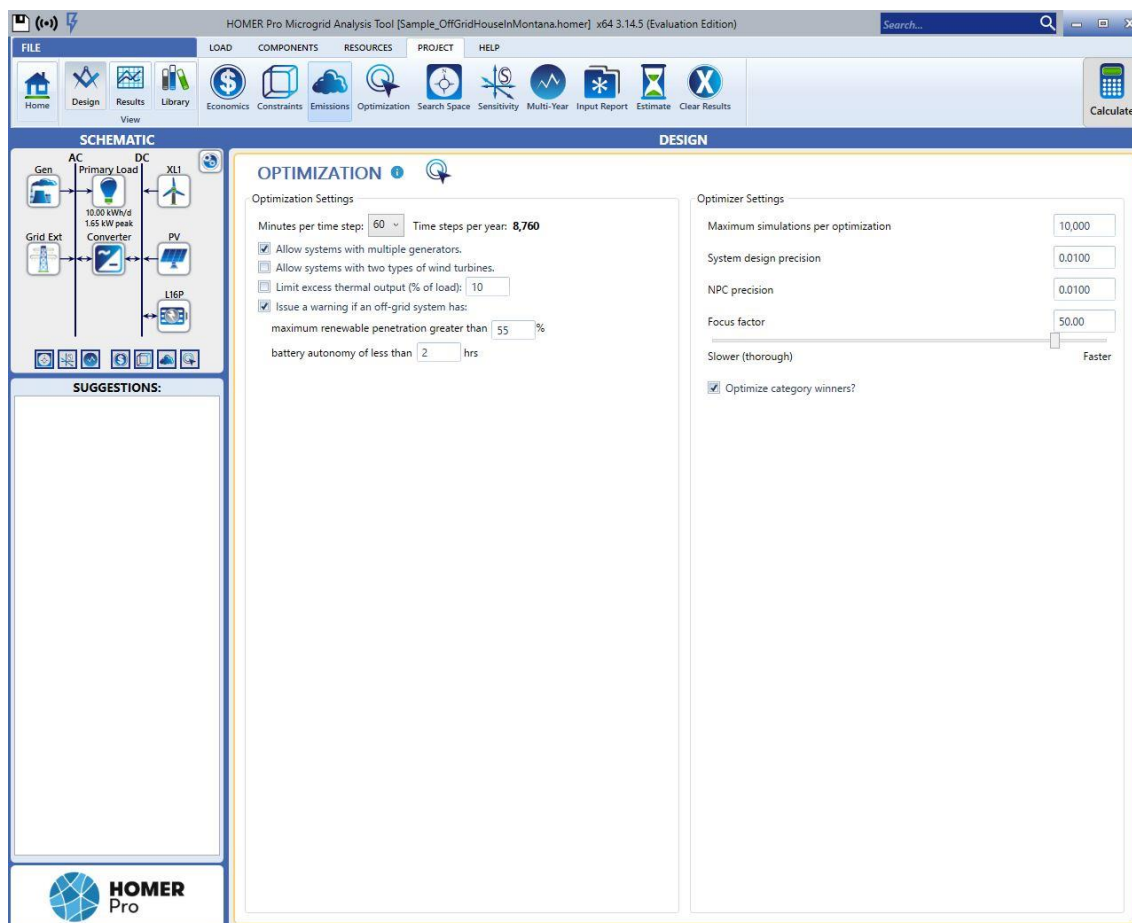


Figura 101. Optimización ejemplo.

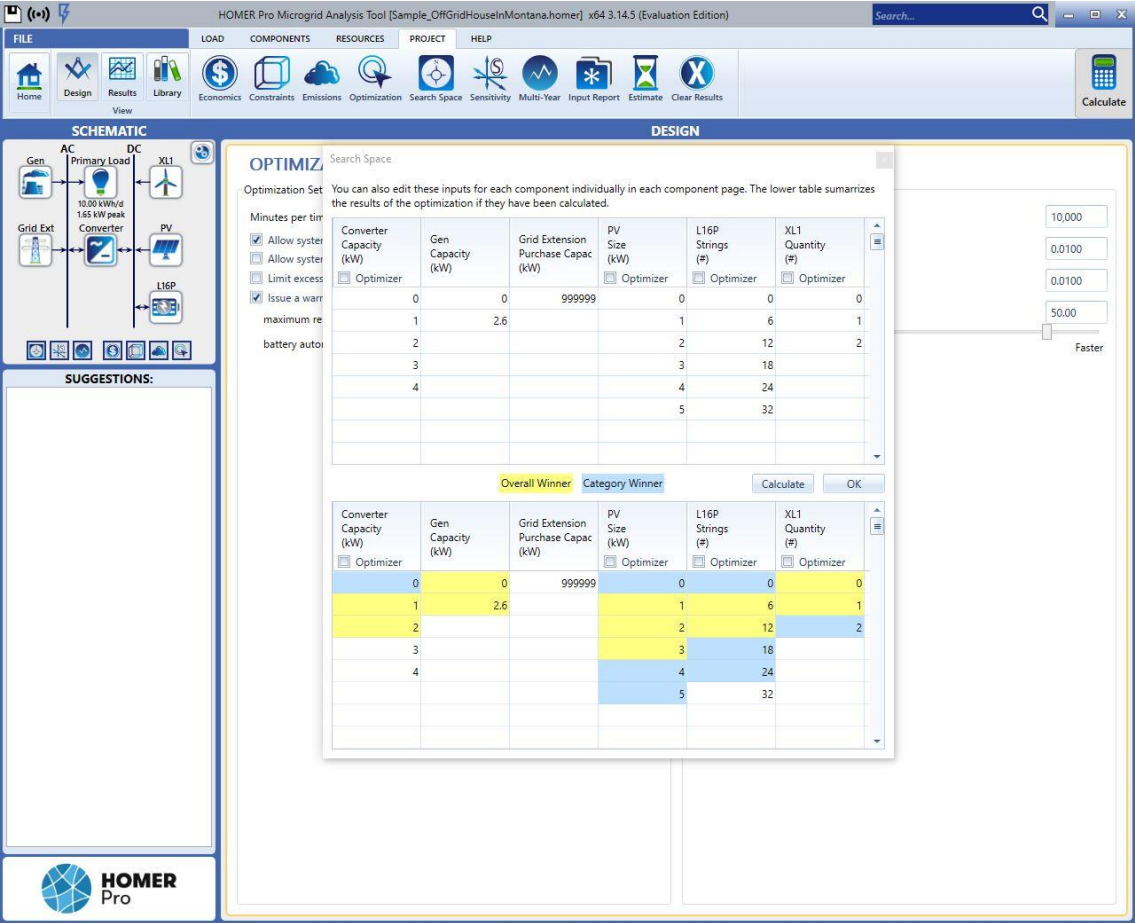


Figura 102. Espacio búsqueda ejemplo.

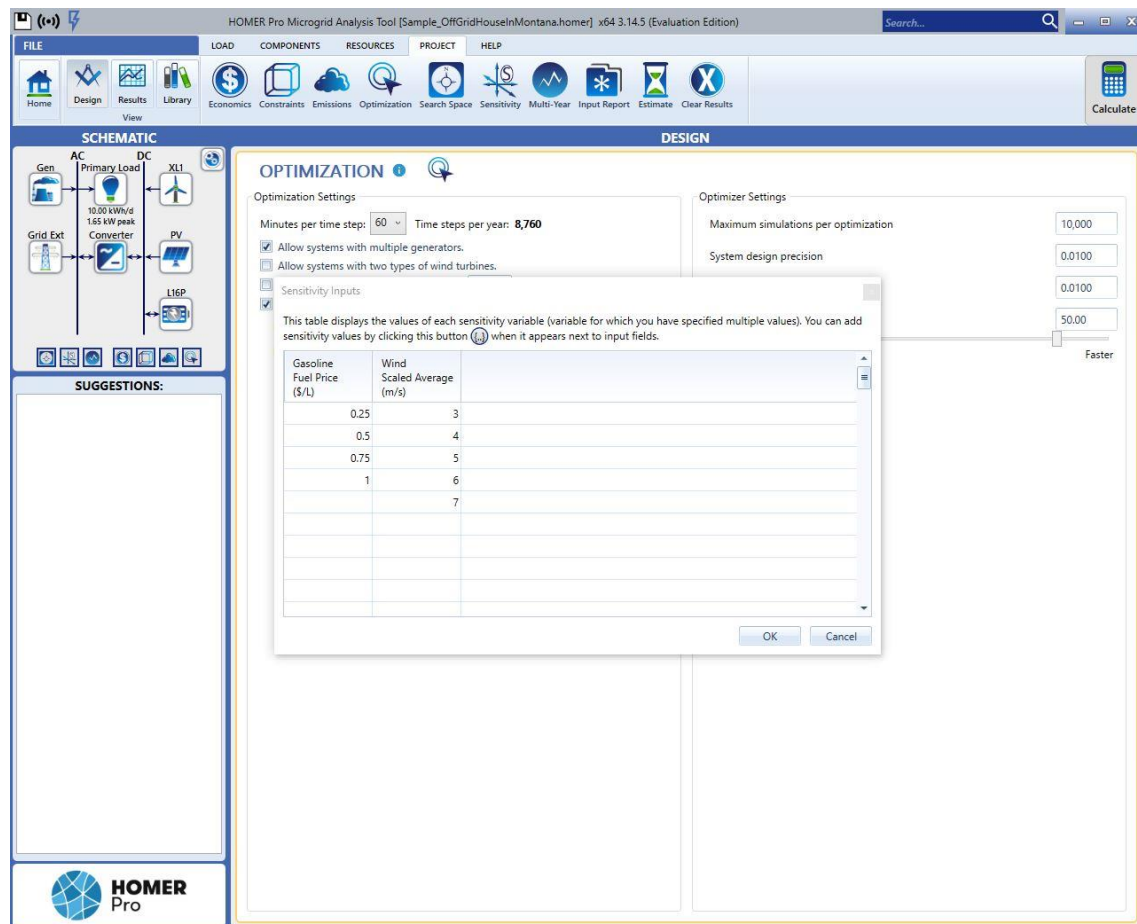


Figura 103. Sensibilidad ejemplo.

· **Resultados:** A continuación, se van a mostrar los resultados obtenidos a partir de la simulación del software Homer con los datos del ejemplo explicado con anterioridad “Casa en Montana desconectada de la red”.

El primer apartado que veremos dentro de los resultados es el resumen general de los resultados obtenidos, donde se incluye una comparativa (Figura 104) entre la arquitectura del caso base que sirve como partida y la arquitectura del sistema ganador en la comparativa de la simulación llevada a cabo.

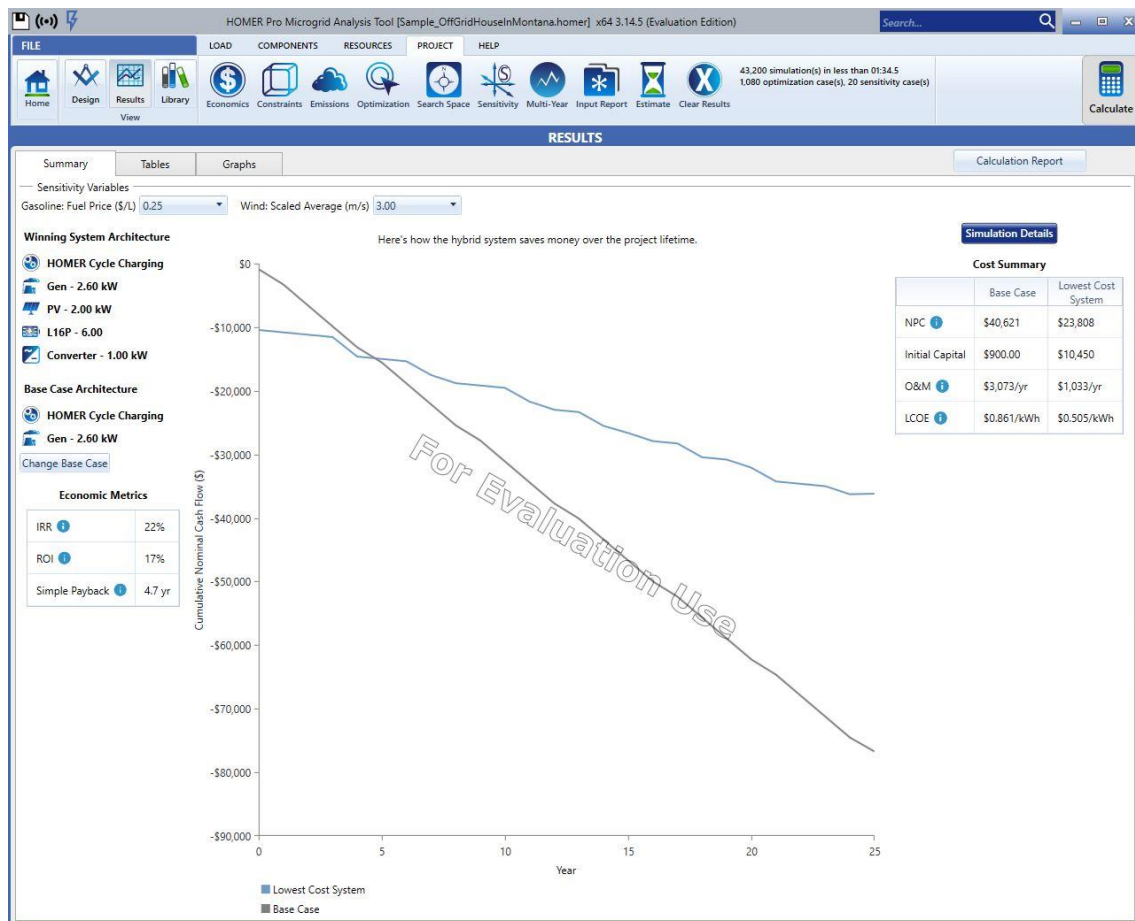


Figura 104. Resumen resultados ejemplo.

En la citada arquitectura de sistema ganadora se puede observar sus valores económicos como son la tasa interna de retorno (IRR), el retorno de la inversión (ROI) y el Payback simple, del mismo modo resumen de la comparación entre el caso ganador y el base sobre el coste neto presente (NPC), el capital inicial, el coste de operación y mantenimiento anual y el coste nivelado de la energía (LCOE) todo en la figura anteriormente mostrada (Figura 105).

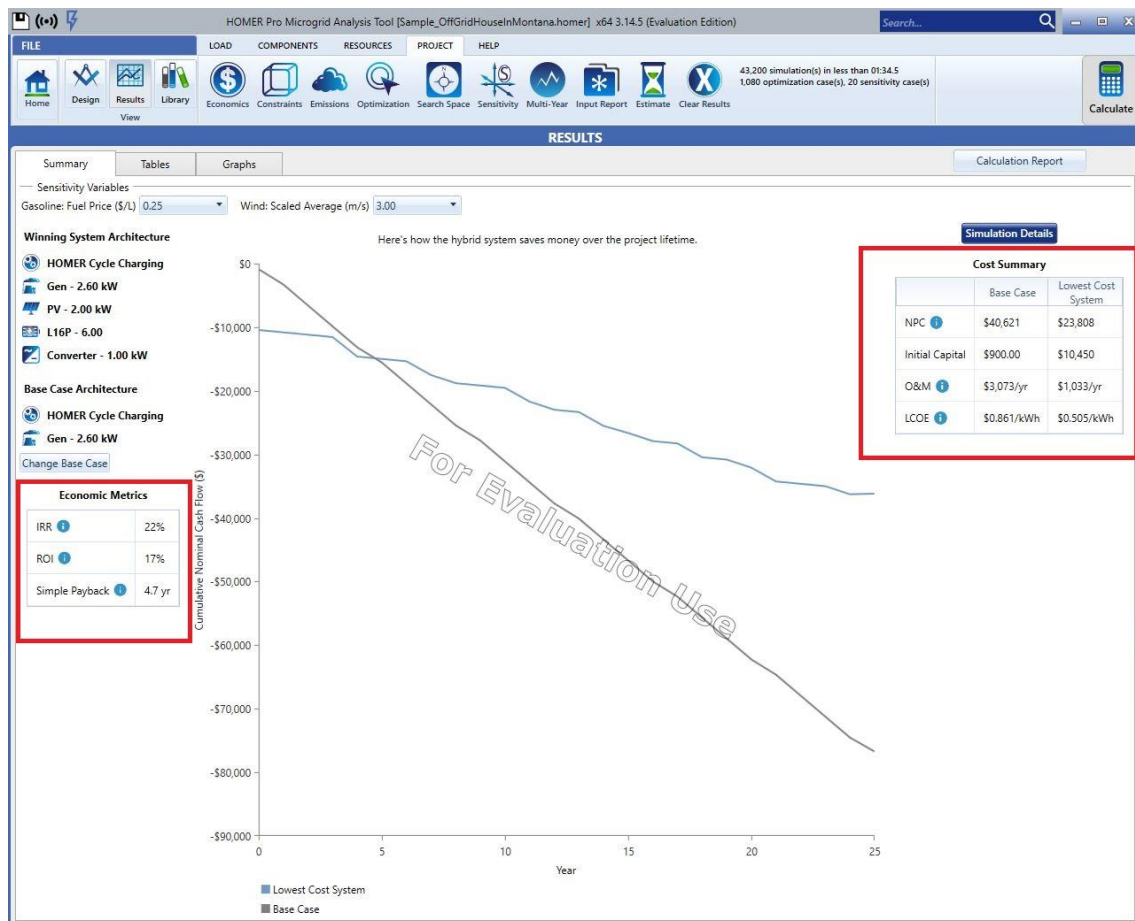


Figura 105. Detalles resumen resultados ejemplo.

Se puede variar los valores con sensibilidad del precio del combustible y la velocidad del recurso eólico, y de ese modo alterar los resultados obtenidos en caso de tener que modificar uno de dichos valores.

Otra opción disponible en el resumen es observar los detalles del informe de la simulación, donde se puede observar detalles referentes al resumen de los costes, el flujo de caja, comparaciones económicas, así como información de cada componente de producción energética (Figura 106).

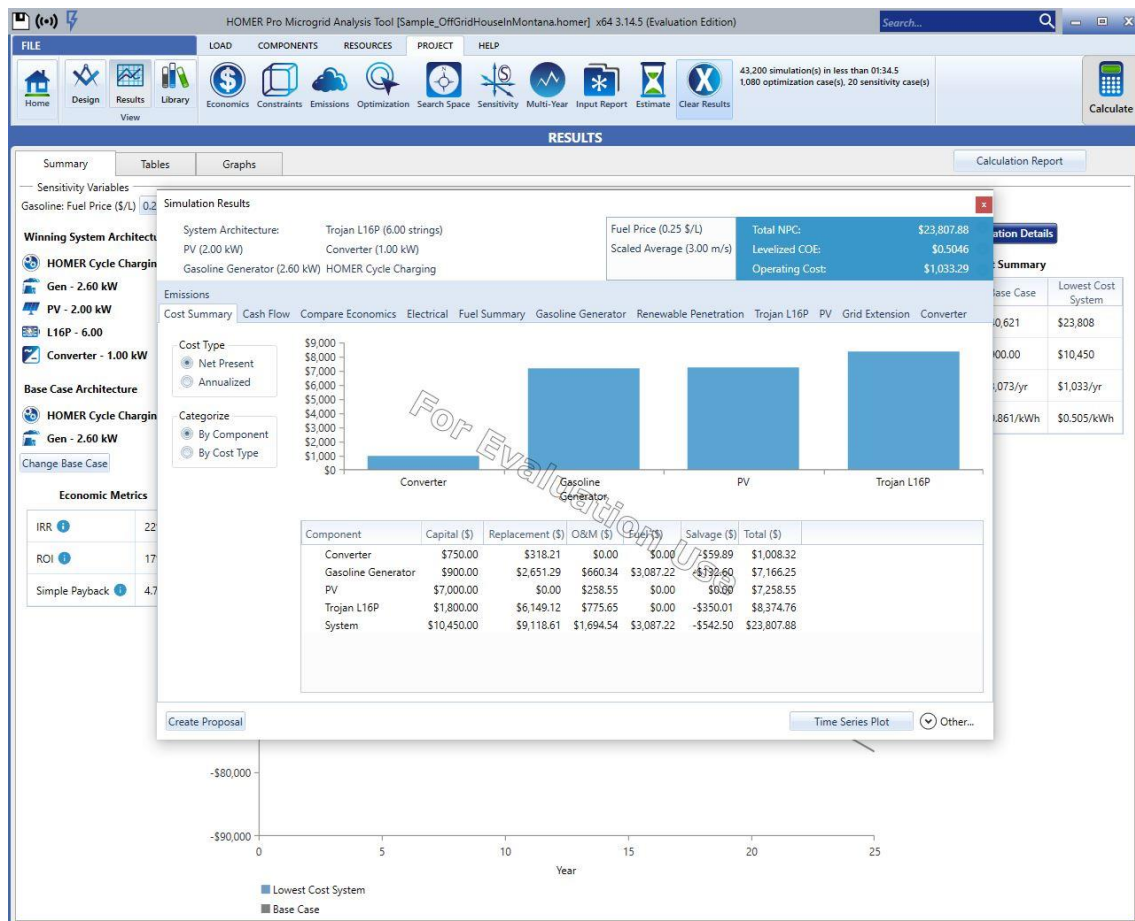


Figura 106. Detalles simulación resumen ejemplo.

El segundo apartado que se encuentra en los resultados es el de las tablas, donde se muestran todos los sistemas factibles acorde a las simulaciones realizadas por Homer, son utilizadas para la obtención de la arquitectura de sistema ganadora y permite observar las demás opciones válidas (Figura 107).

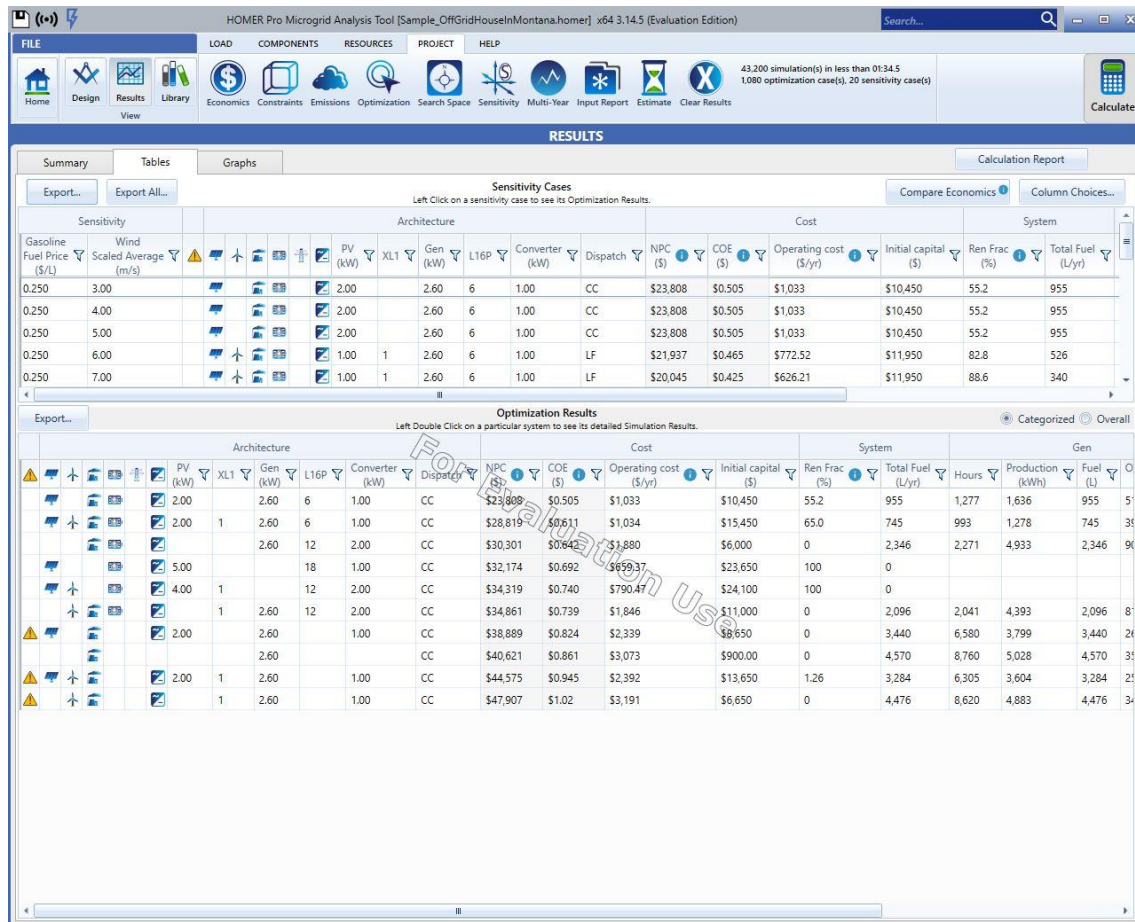


Figura 107. Comparación opciones viables resumen ejemplo.

Por último, el apartado de las gráficas, donde puedes modificar las variables sensibles y mostrar el grafico acorde a la situación especificada, mostrándote las configuraciones viables y el diseño de sistema óptimo (Figura 108).

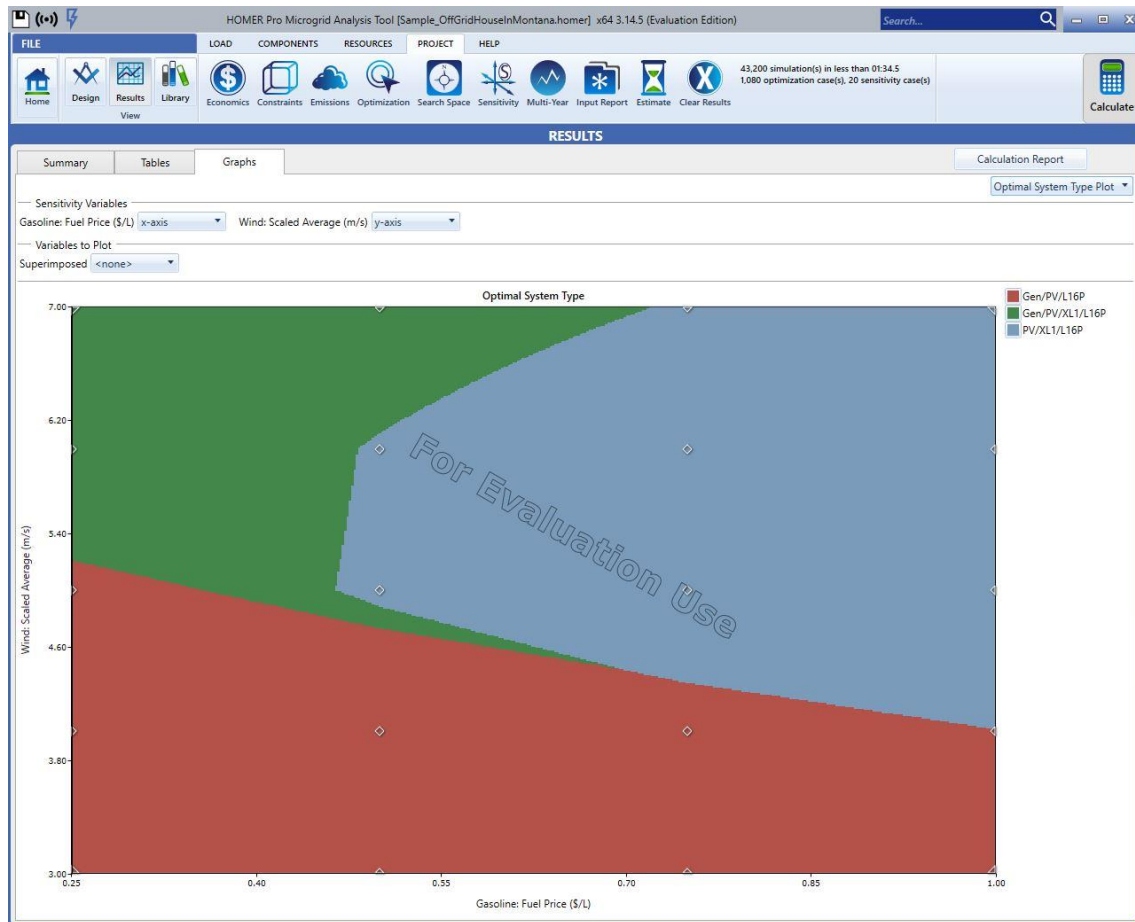


Figura 108. Gráficas resumen ejemplo.

4. DEFINICIÓN DE LAS NECESIDADES DE CONSUMO

A partir de las facturas de Endesa de la dependencia municipal del Ayuntamiento de Cazorla y el alumbrado público denominado centro de mando “Herrería” se ha podido obtener los datos de consumo eléctrico horario para cada día del año, pudiendo así generar las curvas de demanda energética.

Los consumos en las dependencias municipales del Ayuntamiento están focalizados en las horas funcionales del mismo variando según la época del año en la que estemos, sin llegar nunca a ser nulo. Por su parte el consumo del alumbrado público se produce durante las horas nocturnas donde se carece de iluminación suficiente en las calles, varía su intensidad según la franja nocturna, pero durante el día en horario diurno se apagan y el consumo pasa a ser nulo.

A continuación (Figura 109 – Figura 121), se muestran las curvas de demanda energética de la dependencia municipal del Ayuntamiento y del alumbrado público mediante datos medios horarios para cada día del mes correspondiente, así como la media anual del mismo.

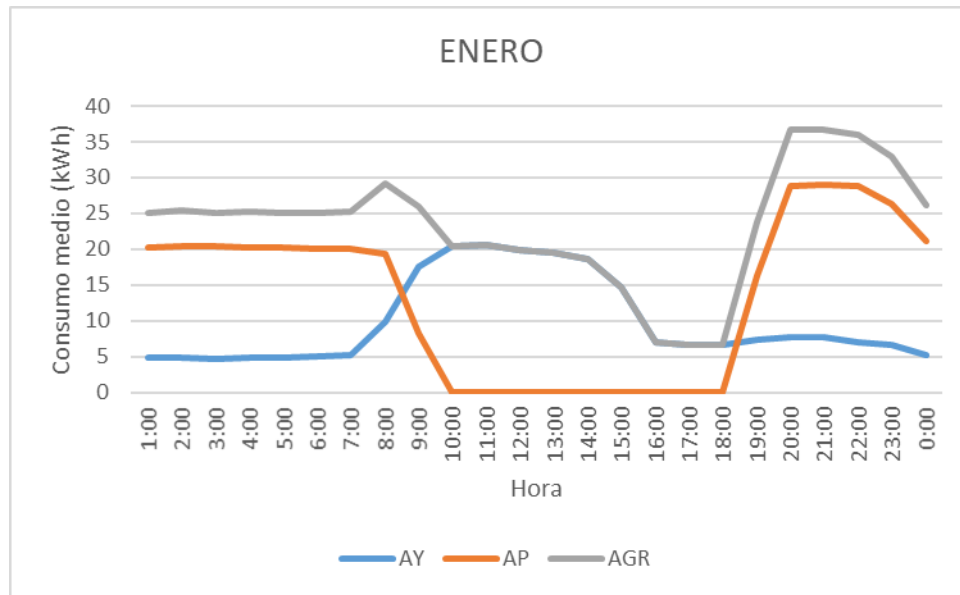


Figura 109. Curva demanda enero.

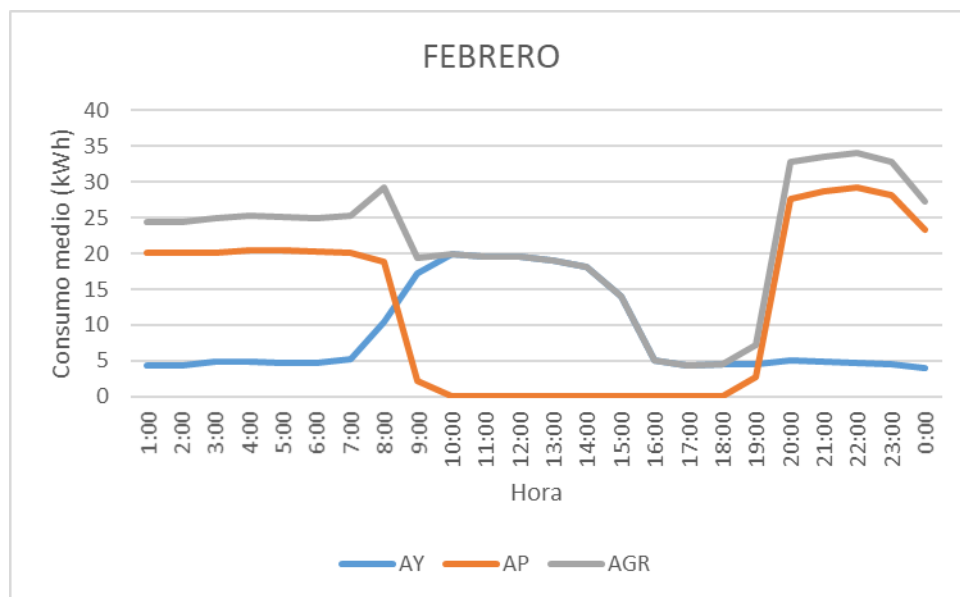


Figura 110. Curva demanda febrero.

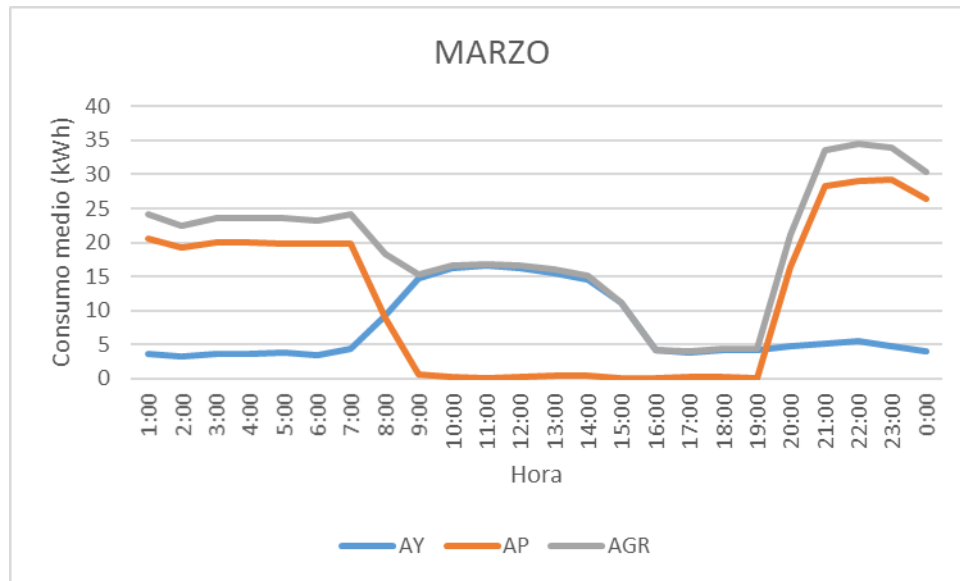


Figura 111. Curva demanda marzo.

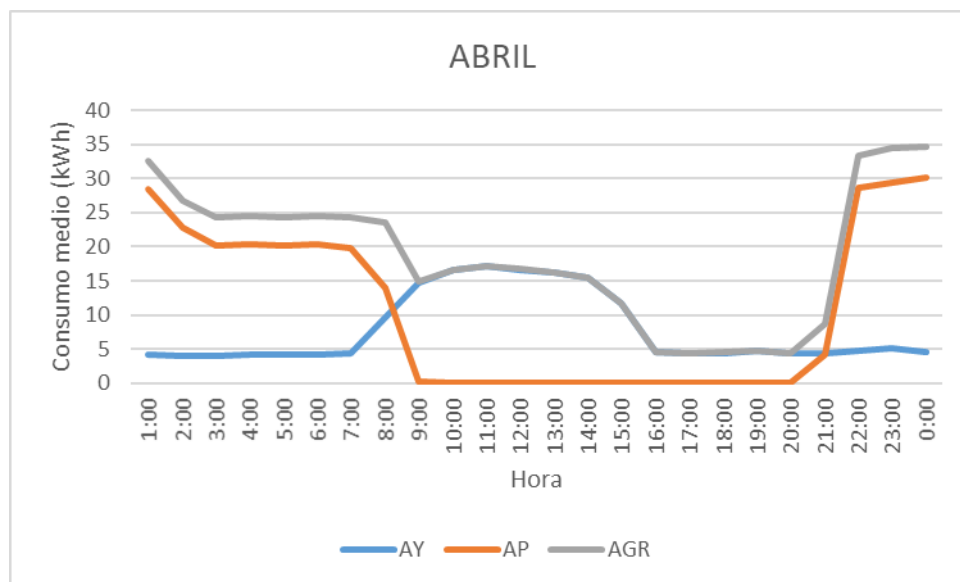


Figura 112. Curva demanda abril.

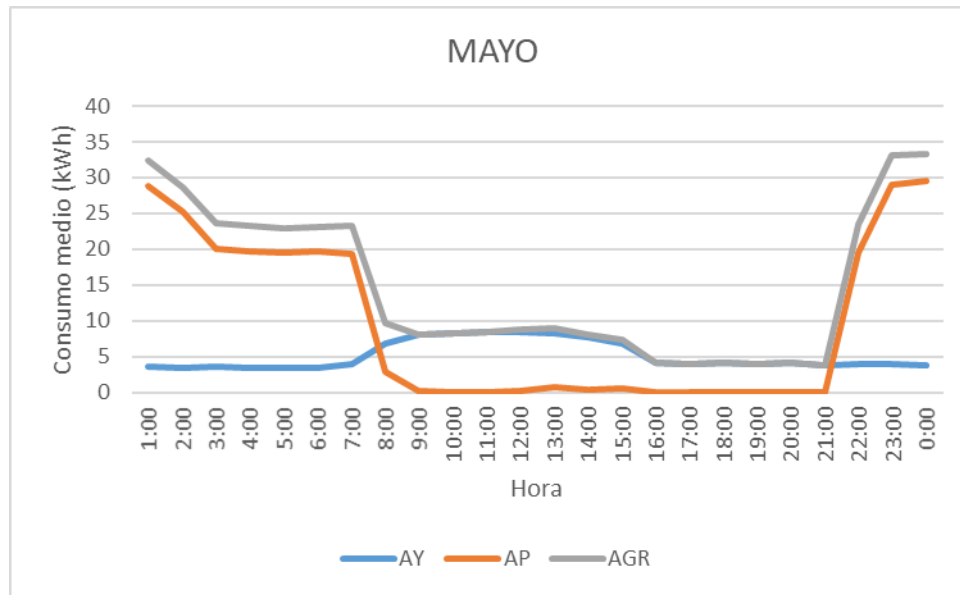


Figura 113. Curva demanda mayo.

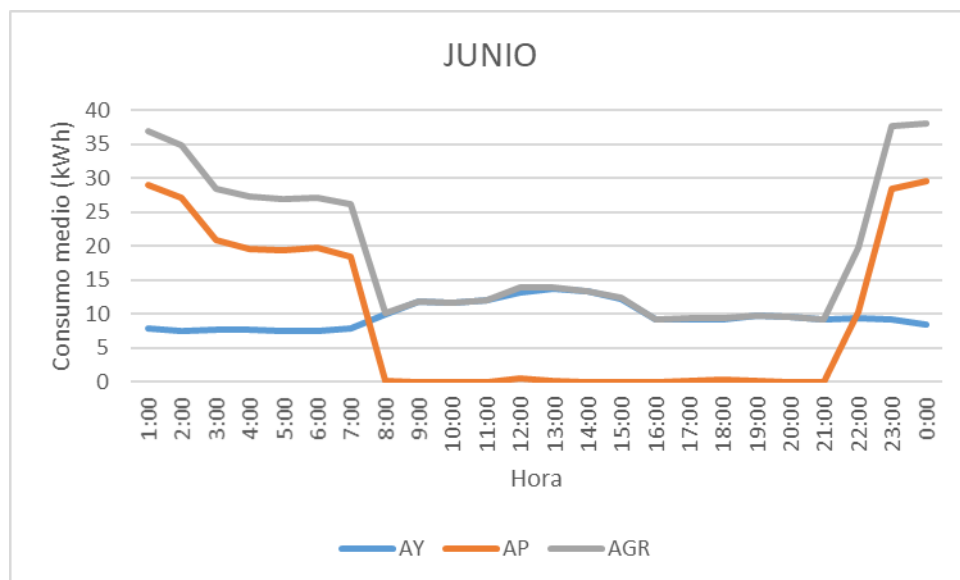


Figura 114. Curva demanda junio.

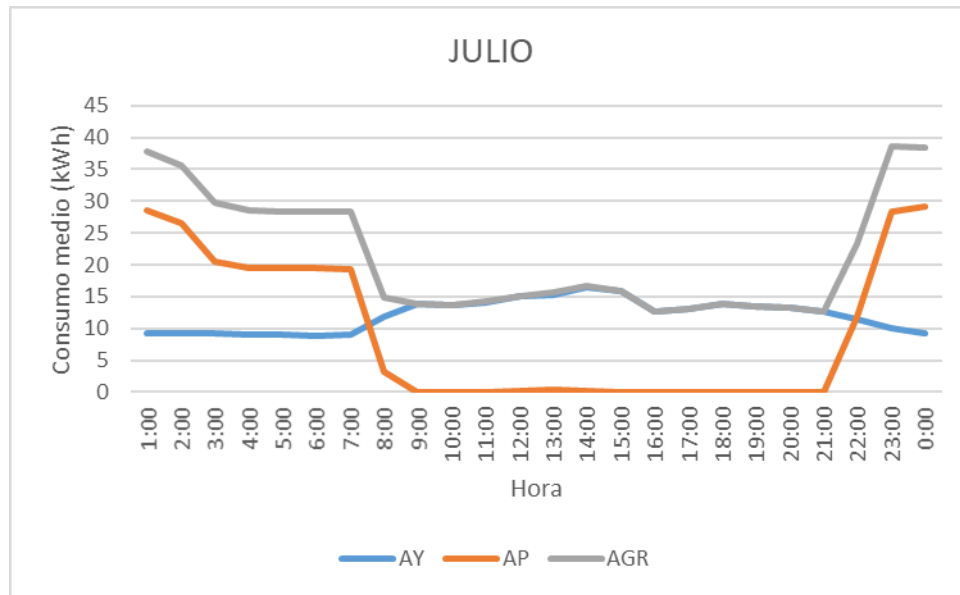


Figura 115. Curva demanda julio.

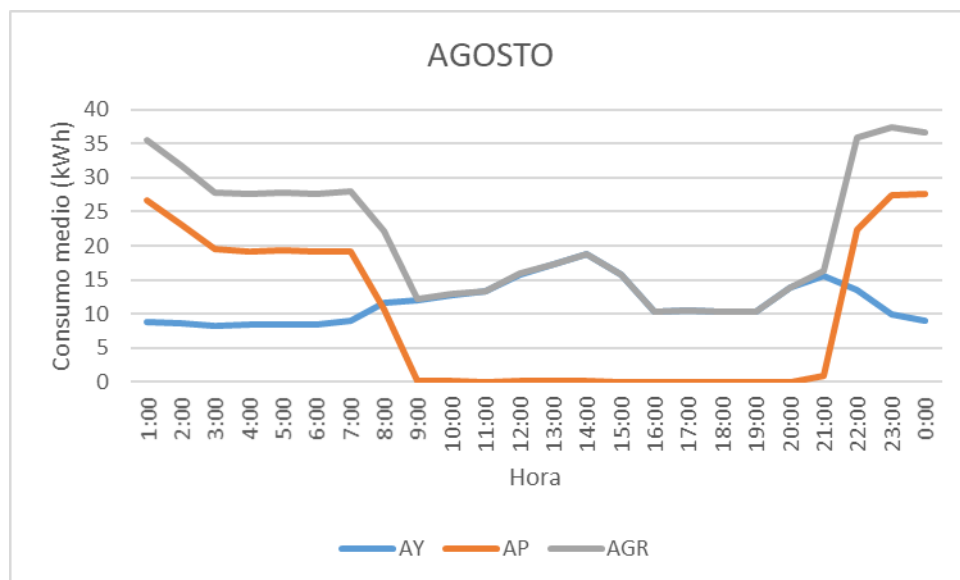


Figura 116. Curva demanda agosto.

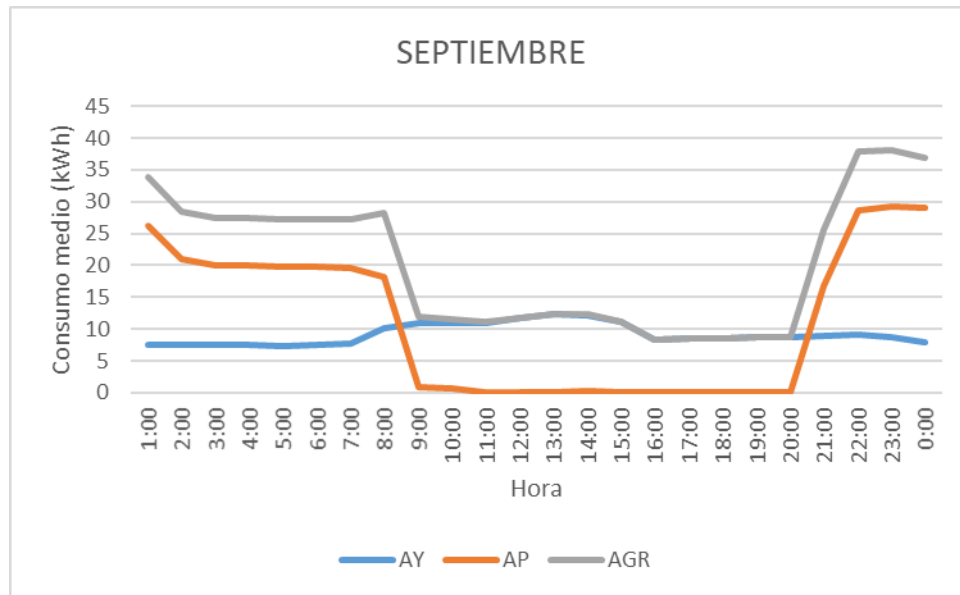


Figura 117. Curva demanda septiembre.

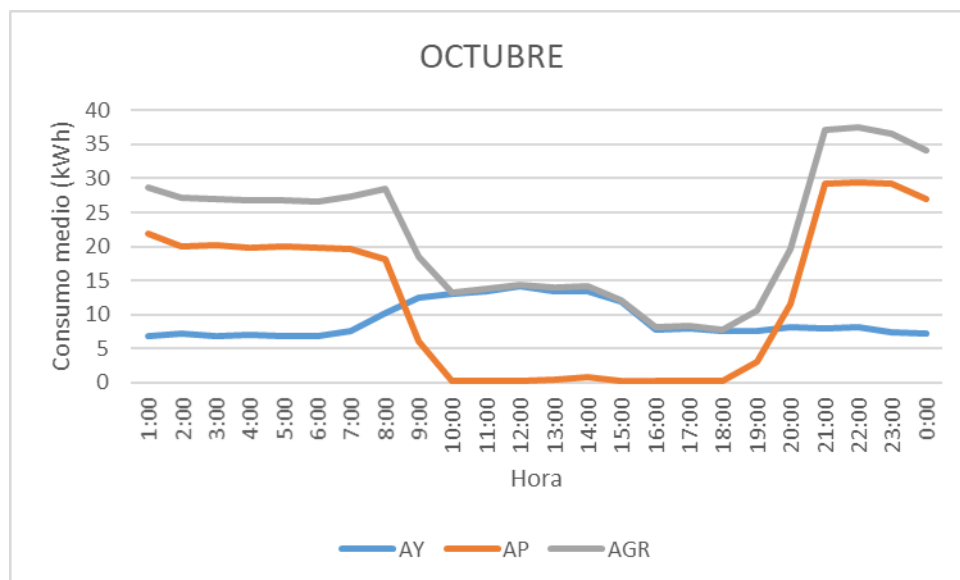


Figura 118. Curva demanda octubre.

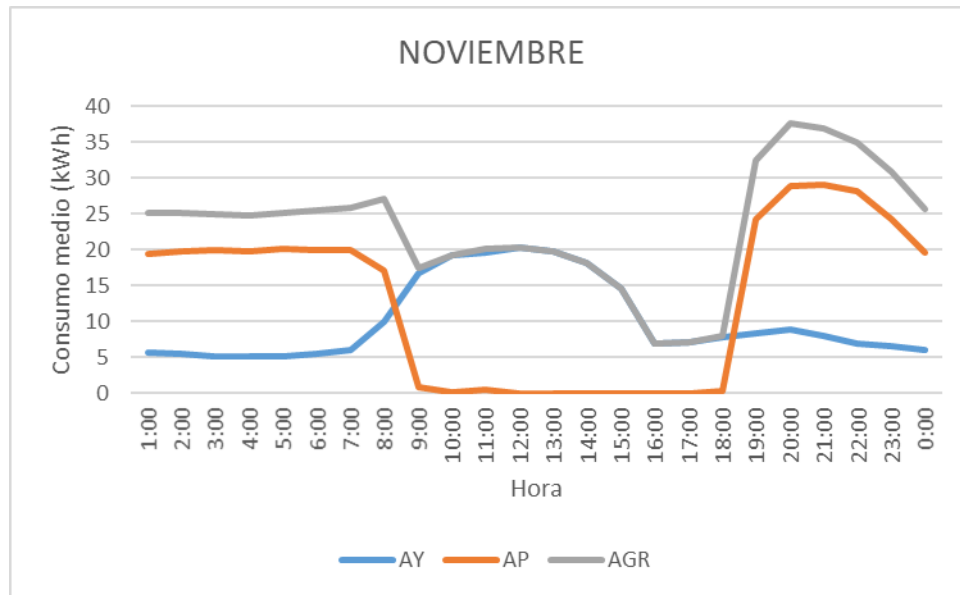


Figura 119. Curva demanda noviembre.

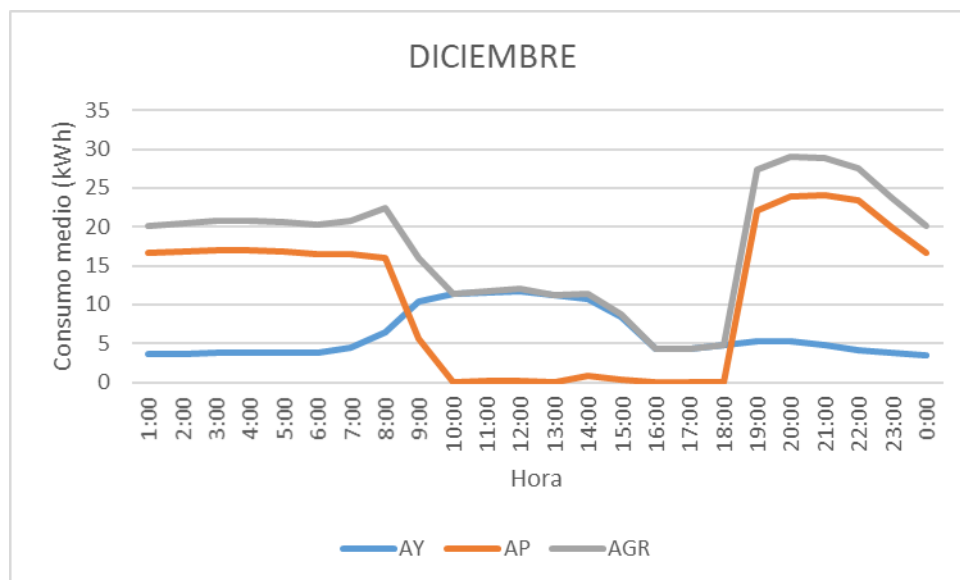


Figura 120. Curva demanda diciembre.

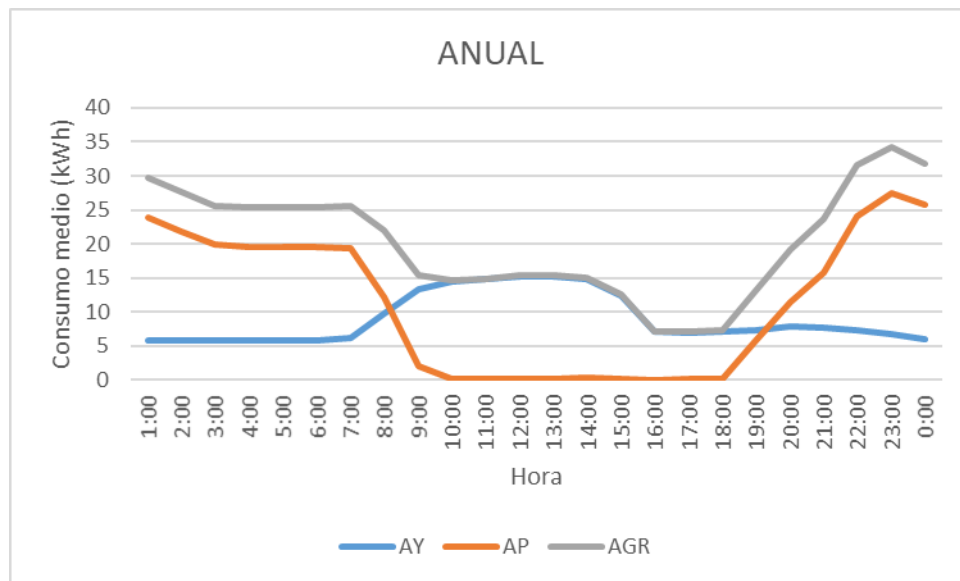


Figura 121. Curva demanda anual.

Como puede observarse en las anteriores figuras (Figura 109 – Figura 121) el alumbrado público supone un consumo eléctrico más regular que el de la dependencia municipal del Ayuntamiento, puesto que varía en función de las horas de luz que estén disponibles según la estación del año.

Por su parte, el consumo de la dependencia municipal del Ayuntamiento sufre de menor variación a lo largo del año, siendo esta variación más notoria en los meses centrales de las estaciones de invierno y de verano, cuando se utiliza con mayor frecuencia los aparatos de climatización para frío o calor.

5. DEFINICIÓN DE LOS SISTEMAS DE GENERACIÓN

La generación eléctrica necesaria para satisfacer el consumo existente en la dependencia municipal del Ayuntamiento y del alumbrado público del centro de mando “Herrería” va a estar generada por tres sistemas (Figura 122), la red eléctrica de abastecimiento estatal, la minicentral hidráulica llamada “Aguas de Cazorla” y la instalación fotovoltaica que se va a instalar, la cual se está tratando de optimizar mediante el presente estudio con la ayuda del software Homer.

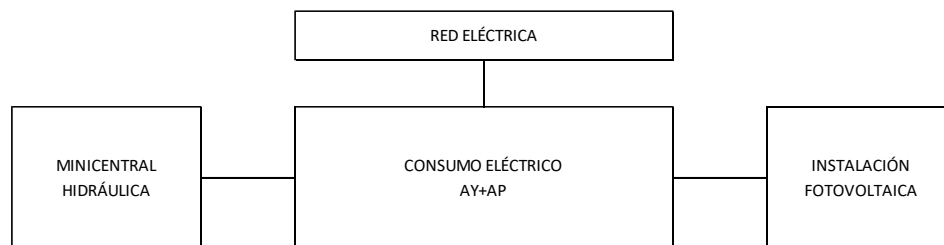


Figura 122. Esquema de los diferentes productores de electricidad.

El primer encargado de satisfacer la demanda energética es la minicentral hidráulica, dado que produce electricidad de manera ininterrumpida durante las 24 horas del día, variando la potencia generada según el mes del año debido a la variación del caudal disponible (Tabla 2).

Tabla 2. Datos caudal medio.

Mes	Caudal medio (L/s)
Enero	25,4
Febreo	25,4
Marzo	21,8
Abril	21,8
Mayo	23
Junio	23
Julio	27,2
Agosto	27,2
Septiembre	27,3
Octubre	27,3
Noviembre	24,6
Diciembre	24,6
Anual	24,9

A parte de los datos hídricos también se poseen los datos técnicos de la minicentral hidráulica, mostrados en la siguiente tabla (Tabla 3):

Tabla 3. Datos técnicos minicentral.

Potencia (kW)	18
Tipo Turbina	Pelton
Tipo de grupo	Síncrono
Salto neto (m)	92,77
Caudal eq. (L/s)	24
Factor eficiencia central	0,8
HE (h/año)	8.322
Energía producida anual (MWh)	150

En segundo lugar, se aprovechará la energía eléctrica producida por la instalación fotovoltaica que se situará en una ubicación cercana dentro de la localidad de Cazorla (Figura 123), en unos terrenos que pertenecen al Ayuntamiento de dicha localidad.



Figura 123. Ubicación de la instalación fotovoltaica.

Los datos de la instalación fotovoltaica serán obtenidos después de la simulación mediante el software Homer, una vez obtenido el sistema óptimo entre la energía procedente de la minicentral hidráulica, la red de abastecimiento y la instalación fotovoltaica.

Por último, la energía necesaria que no pueda ser suministrada por la minicentral hidráulica o la instalación fotovoltaica será adquirida de la red eléctrica de abastecimiento estatal.

Se ha calculado el precio de compra y venta de energía eléctrica de la red a partir de los datos de la web OMIE “Operador del Mercado Ibérico de Energía” (Tabla 4).

Ya que el precio de la energía ha variado notablemente durante el presente año 2021 y sigue haciéndolo, se ha cogido como valores de referencia el precio medio de la electricidad de los últimos tres meses a la fecha de realización del actual trabajo fin de máster (septiembre – octubre – noviembre).

Tabla 4. Precio de compra y venta de energía estipulado.

	€/kWh
Precio compra	0,19244
Precio venta	0,14625

6. DATOS PARA LA SIMULACIÓN

Una vez se ha definido el consumo energético de la dependencia municipal del Ayuntamiento y del alumbrado público y se ha explicado las diferentes tecnologías presentes en el sistema encargadas de la generación eléctrica, se introducen los datos necesarios en el software Homer para su simulación en busca del dimensionado óptimo del sistema híbrido hidráulico-fotovoltaico, para realizar la simulación hay que diferenciar entre los valores fijos y los variables.

Los datos fijos son la carga eléctrica de la dependencia municipal del Ayuntamiento, la carga eléctrica del alumbrado público, el recurso solar disponible, los datos de la red eléctrica de abastecimiento y los datos de la minicentral hidráulica, todos datos ya existentes que no pueden alterarse.

Los datos sensibles de variar son los referentes a la instalación fotovoltaica, que saldrán a partir del diseño óptimo del sistema a partir de la simulación mediante el software.

Para los datos de la carga eléctrica se importan a partir de un fichero de texto con datos medios horarios (Figura 124).

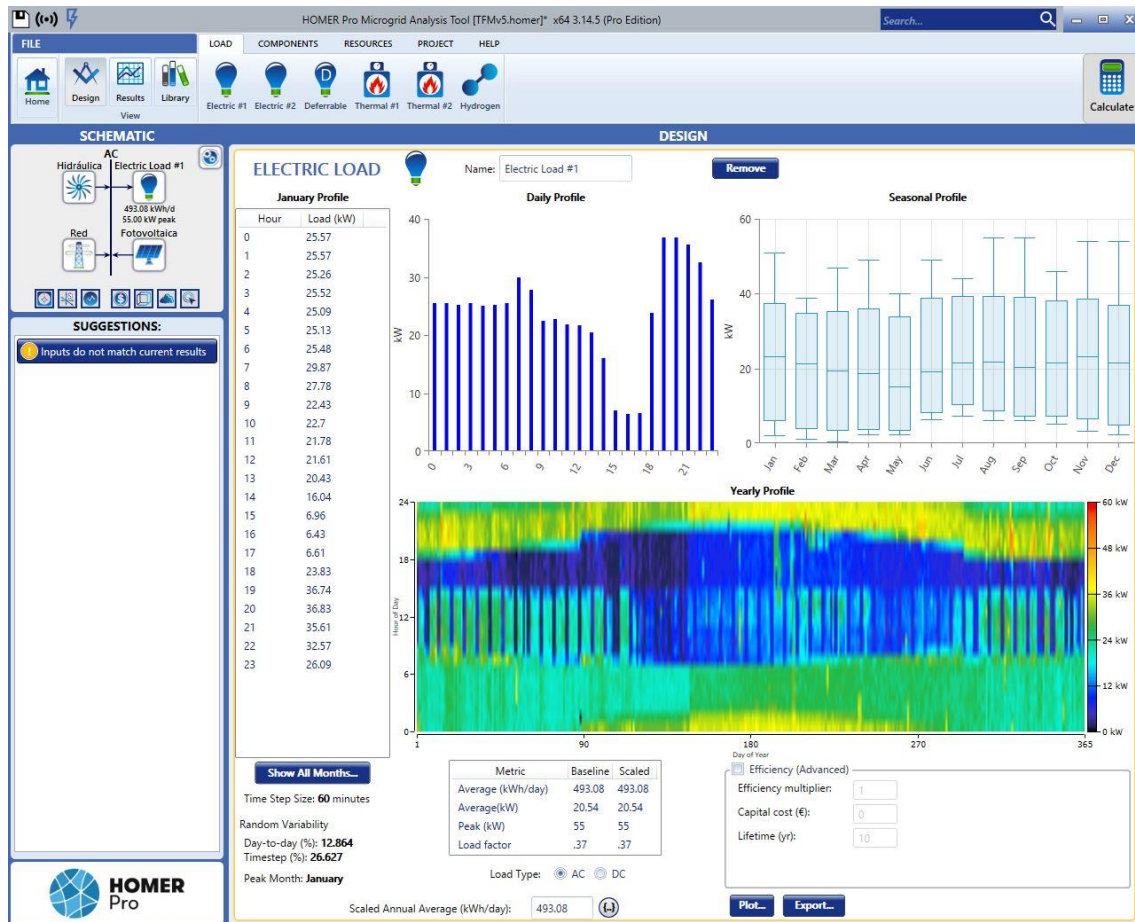


Figura 124. Detalle carga eléctrica 1.

En las siguientes figuras se puede apreciar con mayor detalle los valores de carga horaria mensual (Figura 125) y las gráficas mensuales (Figura 126).

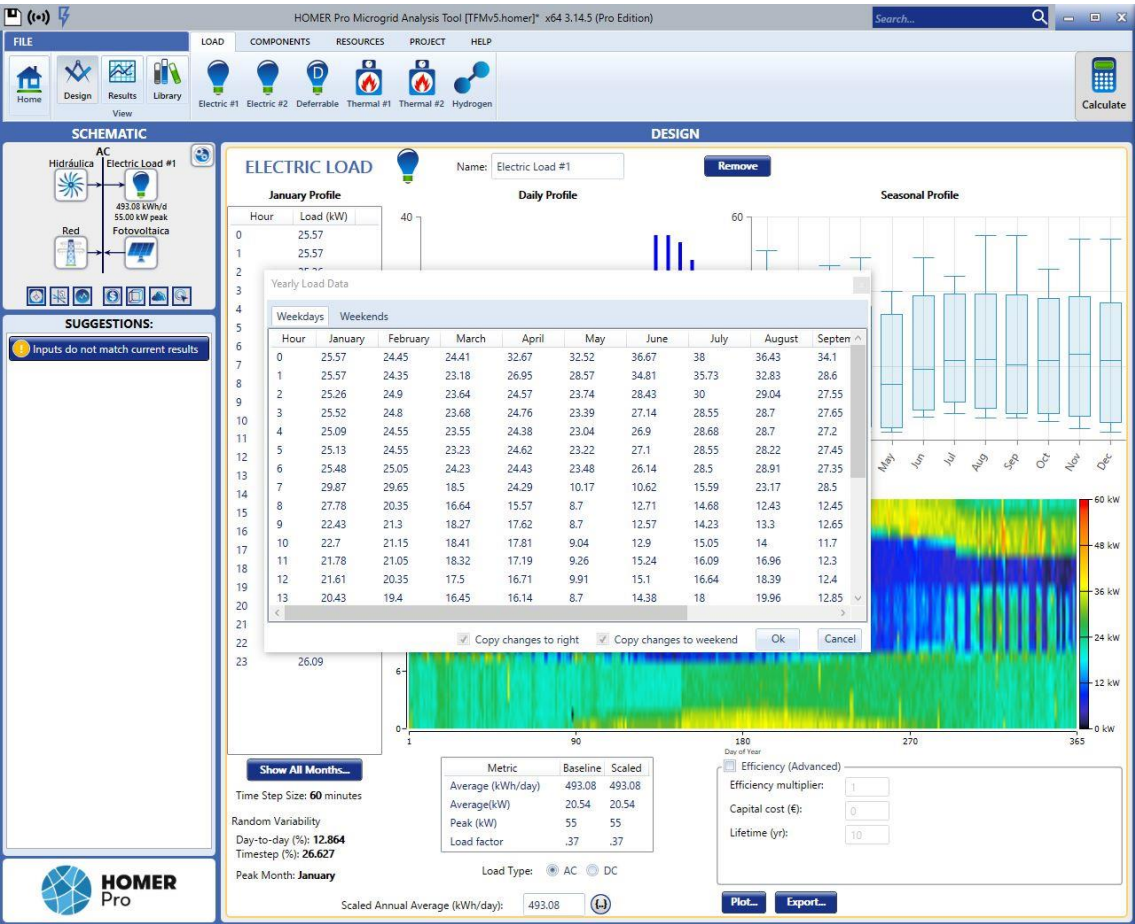


Figura 125. Detalle carga eléctrica 2.

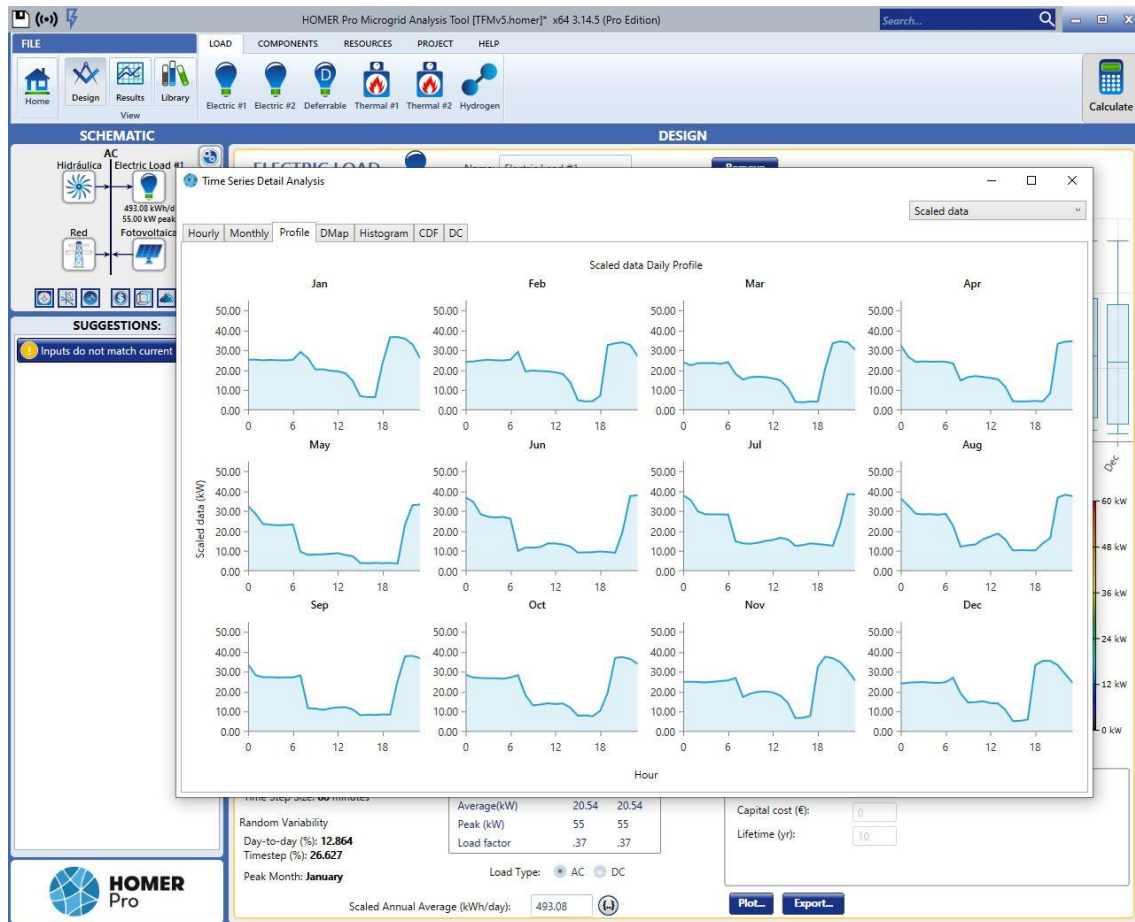


Figura 126. Detalle carga eléctrica 3.

Los datos de recurso solar (Figura 127) son obtenidos de la base de datos que utiliza el propio software basándose en la ubicación seleccionada (Figura 128).

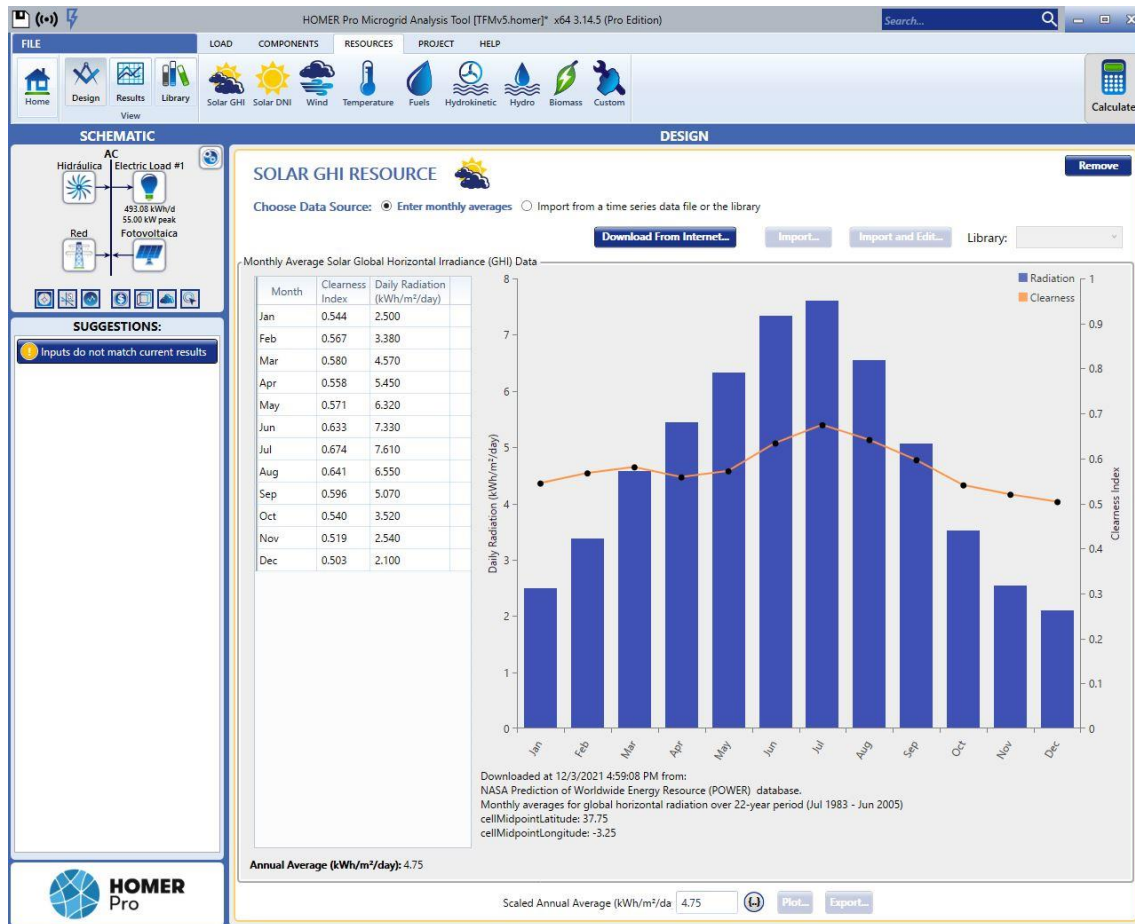


Figura 127. Datos recurso solar.

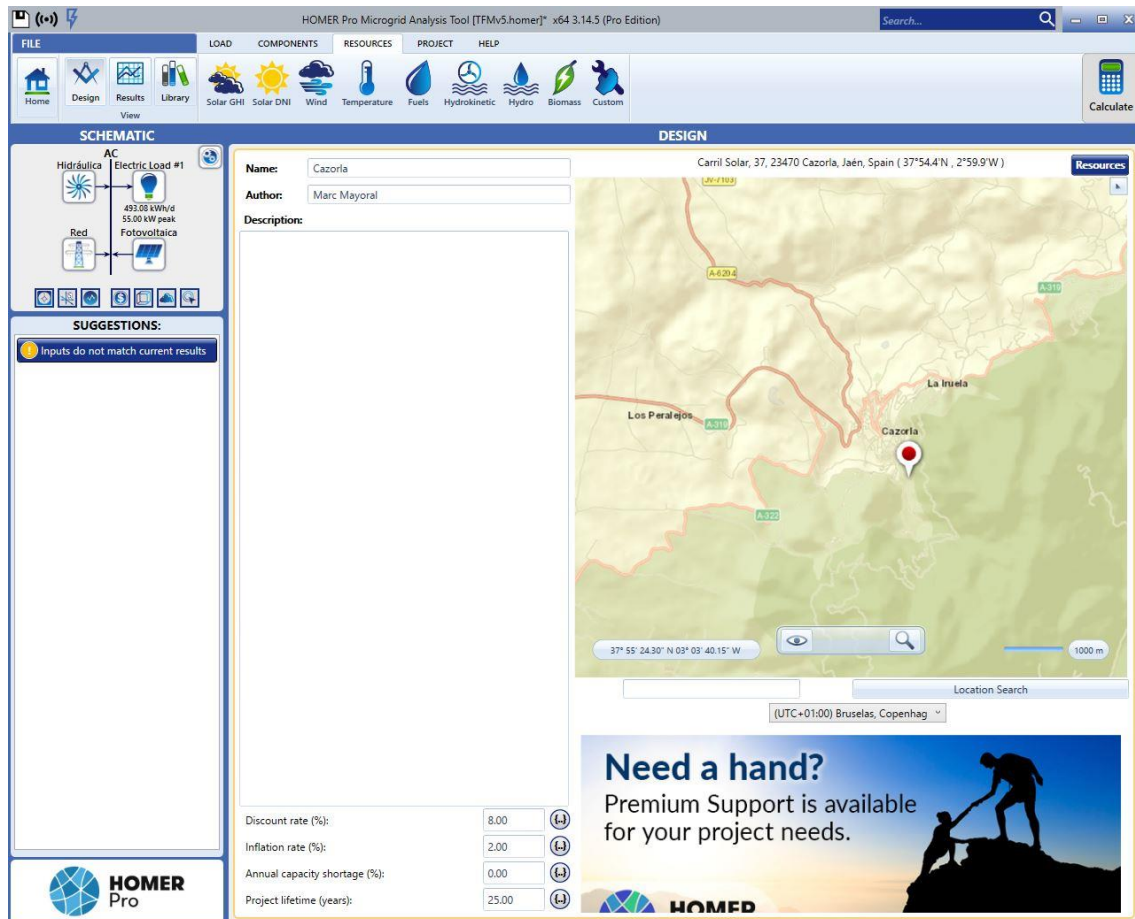


Figura 128. Ubicación seleccionada.

Con el objetivo de calcular correctamente el desempeño de la instalación fotovoltaica se cargan los datos de temperatura de la ubicación seleccionada para corregir los valores de potencia y eficiencia de la instalación fotovoltaica (Figura 129).

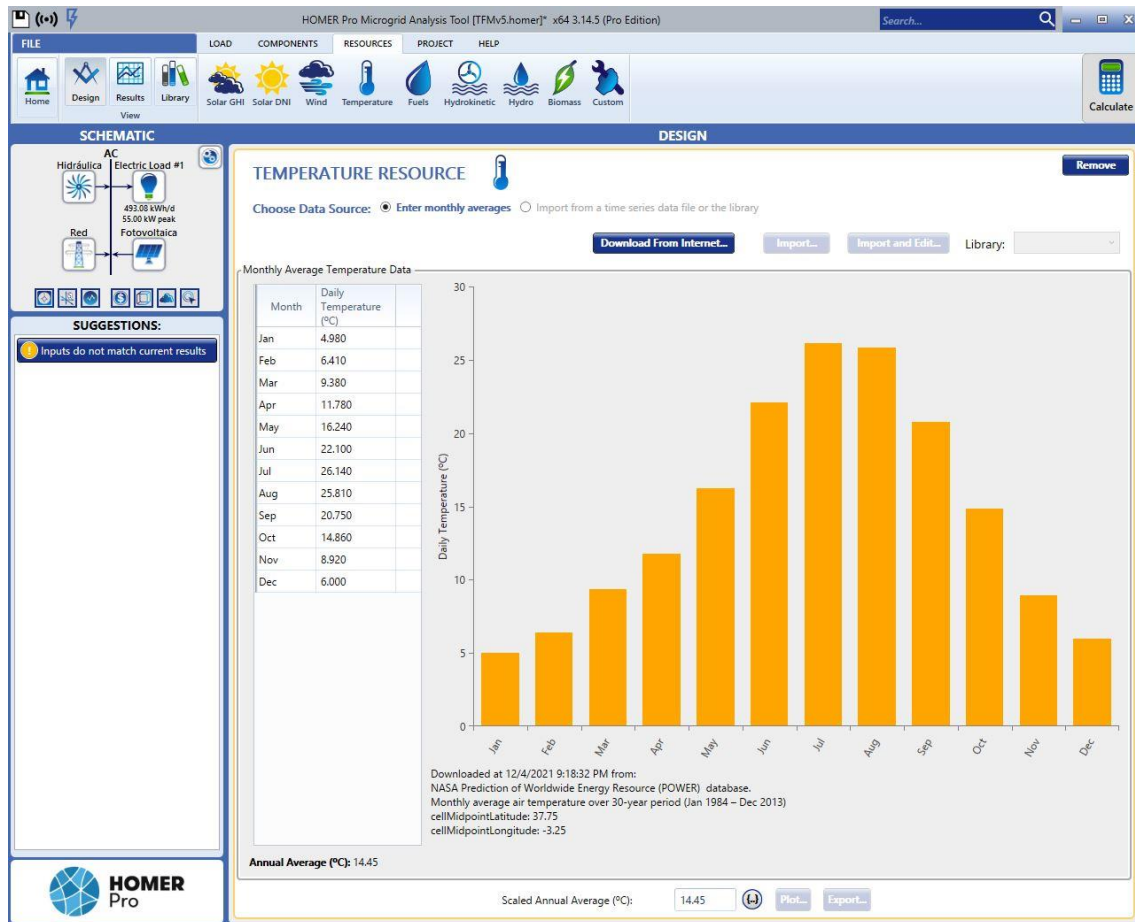


Figura 129. Datos temperatura.

Los datos de recurso hídrico se introducen manualmente (Figura 130) con medias mensuales del caudal disponible, a partir de la información proporcionada con anterioridad en el presente trabajo.

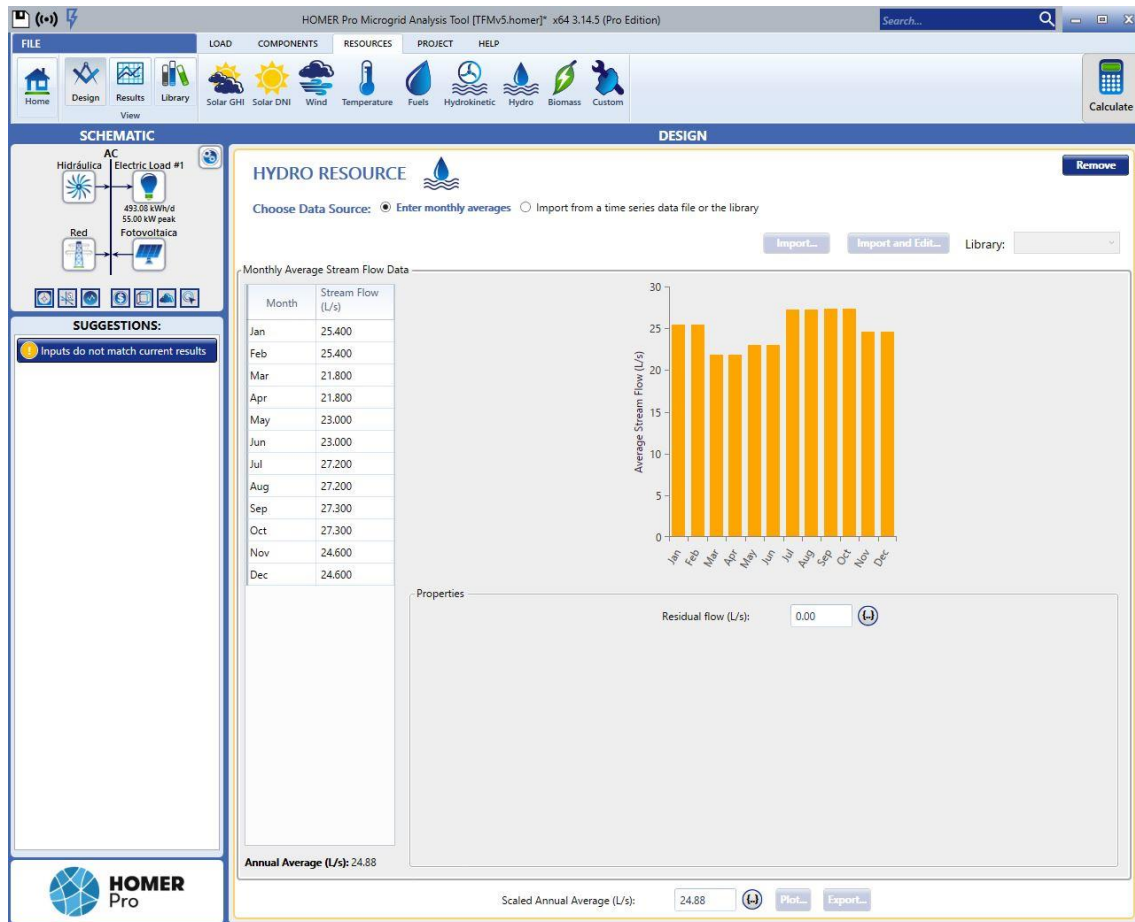


Figura 130. Recurso hidráulico.

Para los datos de la red eléctrica se seleccionan los valores mostrados anteriormente en la tabla 4 (Figura 131).

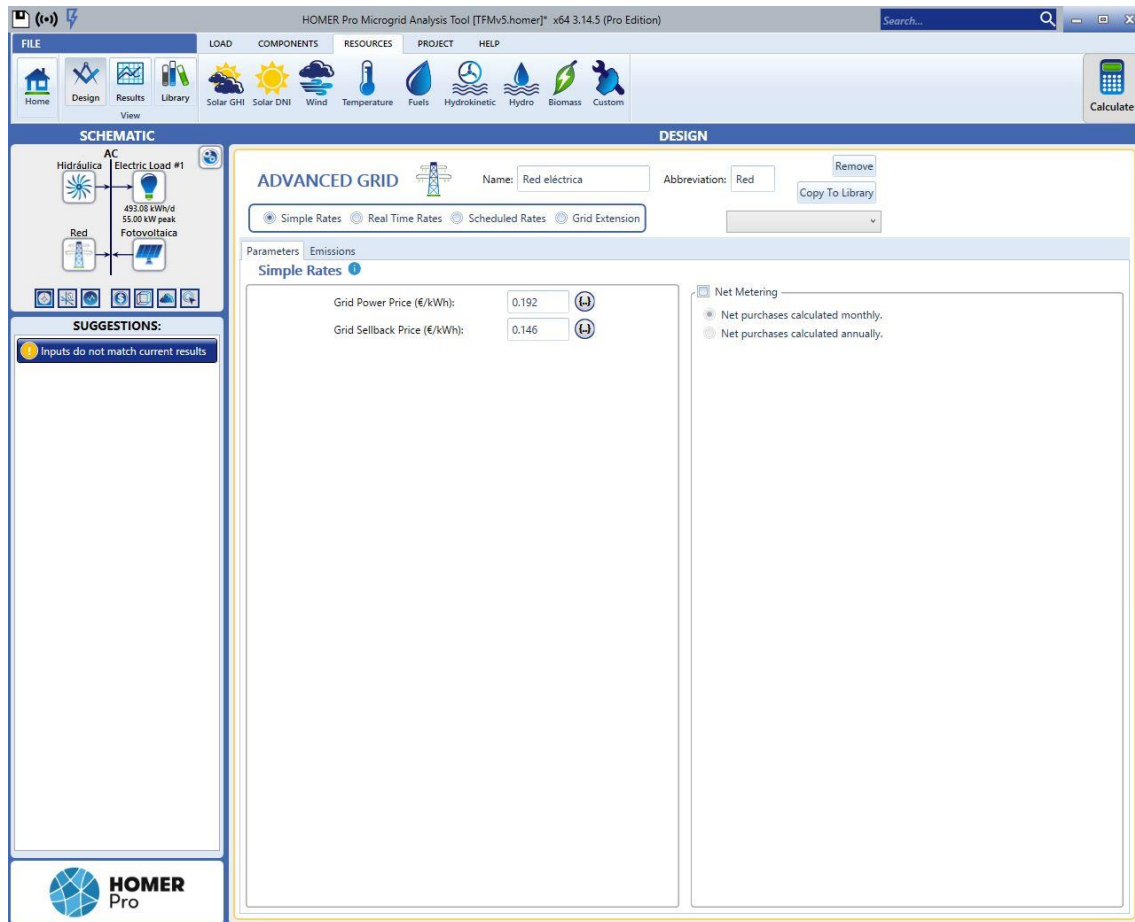


Figura 131. Precio de compra y venta de energía.

Para los valores referentes a la minicentral hidráulica se pide un conjunto de valores económicos y de turbina mostrados en la siguiente figura (Figura 132) con los datos disponibles del estudio previo realizado. No se tiene en cuenta el coste de la minicentral puesto que se está aprovechando una minicentral ya existente, de modo que no hay desembolso inicial en ese aspecto, únicamente el coste de operación y mantenimiento pertinente.

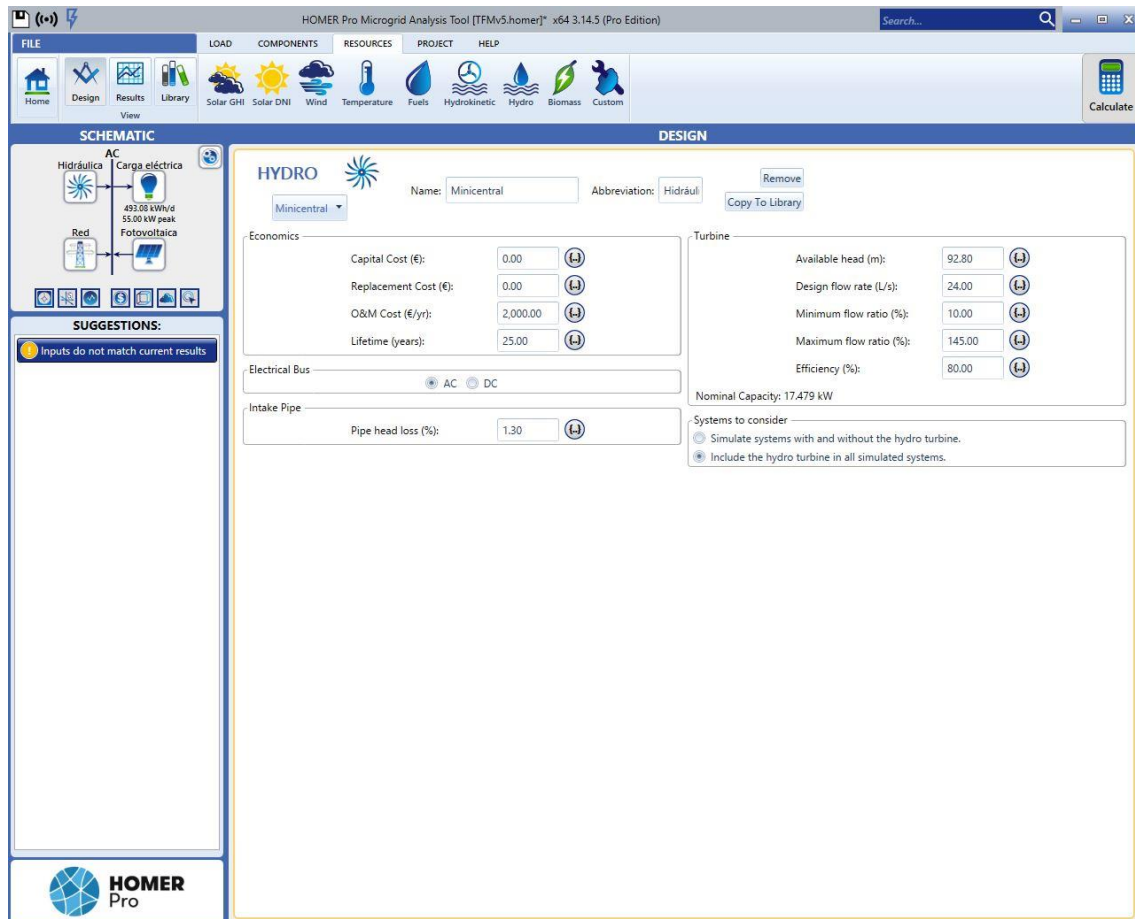


Figura 132. Datos minicentral hidráulica.

Para la instalación fotovoltaica, se programa el software para realice las simulaciones necesarias hasta encontrar el sistema óptimo híbrido hidráulico-fotovoltaico, únicamente introducimos la información económica que se puede observar en la figura siguiente (Figura 133), sin especificar la potencia de la instalación fotovoltaica.

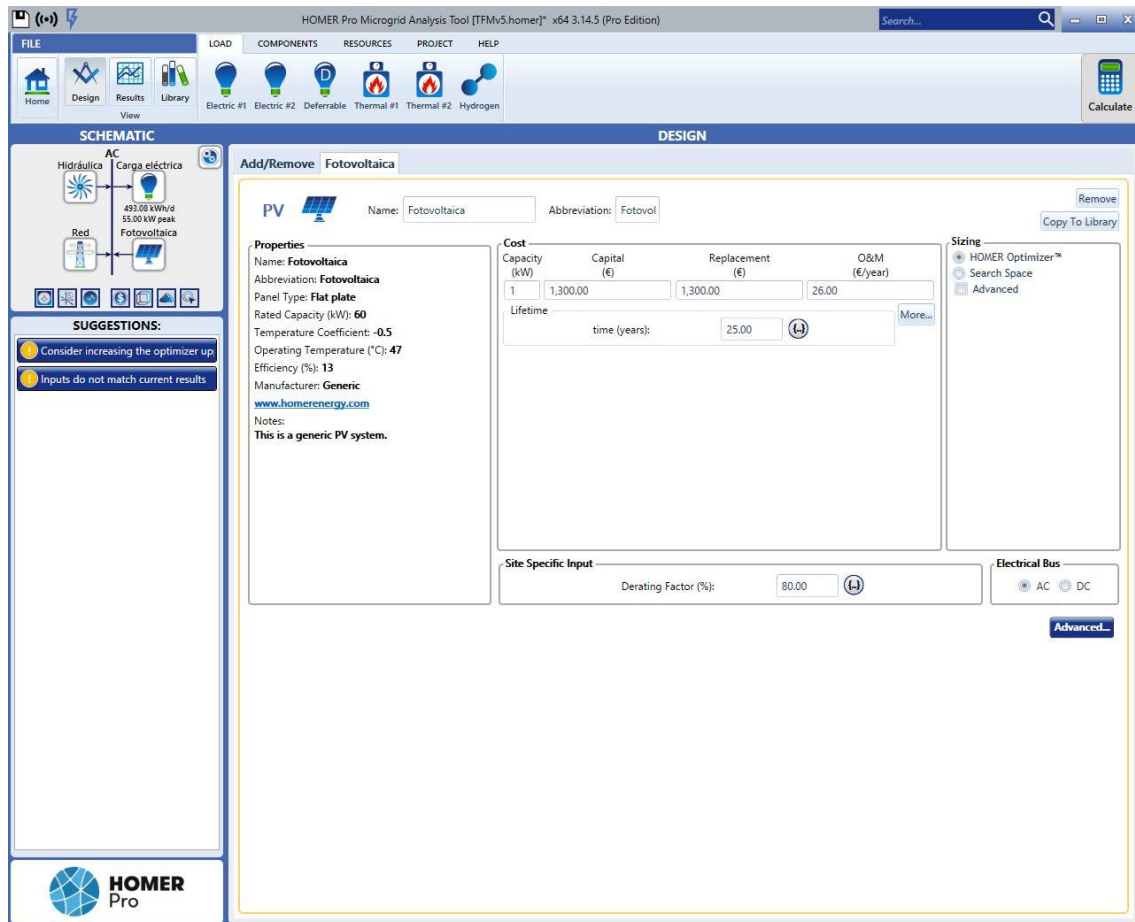


Figura 133. Datos instalación fotovoltaica.

7. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

A partir del conjunto de información mostrado en el punto anterior “*Datos para la simulación*” referente a la carga eléctrica asociada al conjunto de la dependencia municipal y el alumbrado público junto a los tres generadores de electricidad (red, hidráulica y fotovoltaica), se realiza la simulación mediante el software Homer con el objetivo de encontrar el tamaño óptimo de la instalación fotovoltaica desde el punto de vista económico.

El dimensionado óptimo resultado de la simulación mediante el software (Figura 134) es utilizar en su totalidad y de manera prioritaria la energía procedente de la minicentral hidráulica con sus 17,5 kW y en segundo lugar la energía producida por la instalación fotovoltaica de 30,9 kW, los excedentes serán vertidos a la red con compensación económica.

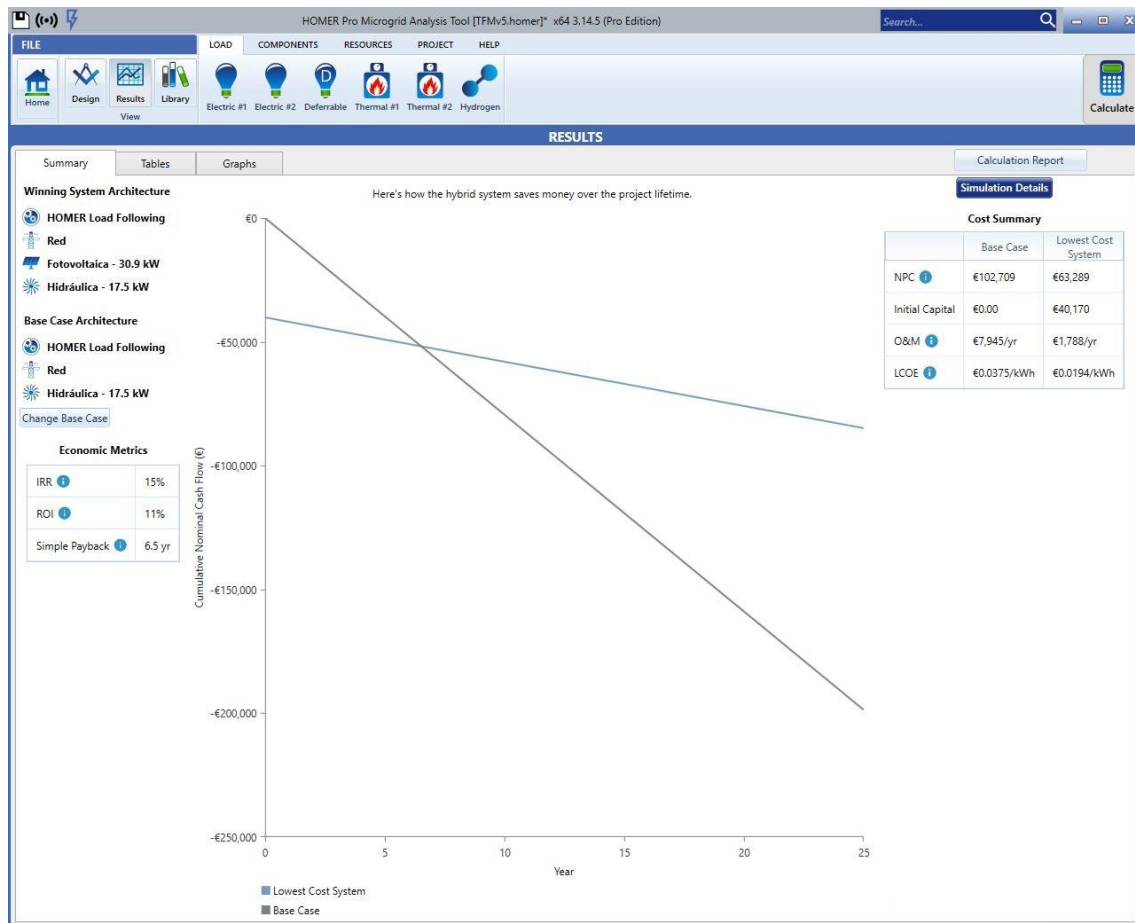


Figura 134. Dimensionado óptimo.

En las horas en las que la demanda energética no pueda ser satisfecha por la minicentral hidráulica y/o por la instalación fotovoltaica, se consumirá energía de la red eléctrica de abastecimiento estatal.

El propio software nos muestra unos gráficos sobre el uso de cada uno de los componentes utilizados como generadores de energía eléctrica a lo largo del año utilizados en la simulación; minicentral hidráulica (Figura 135), la instalación fotovoltaica (Figura 136) y la red eléctrica (Figura 137).

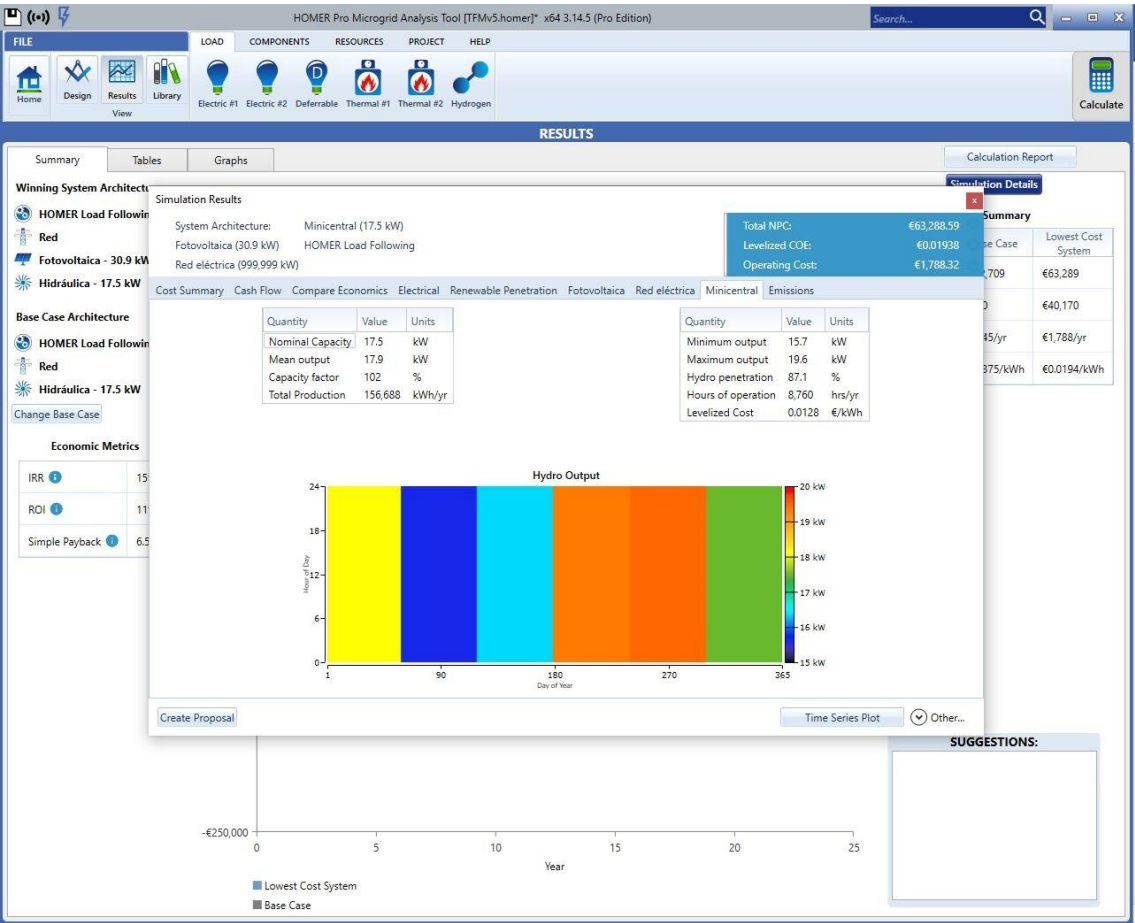


Figura 135. Uso minicentral hidráulica.

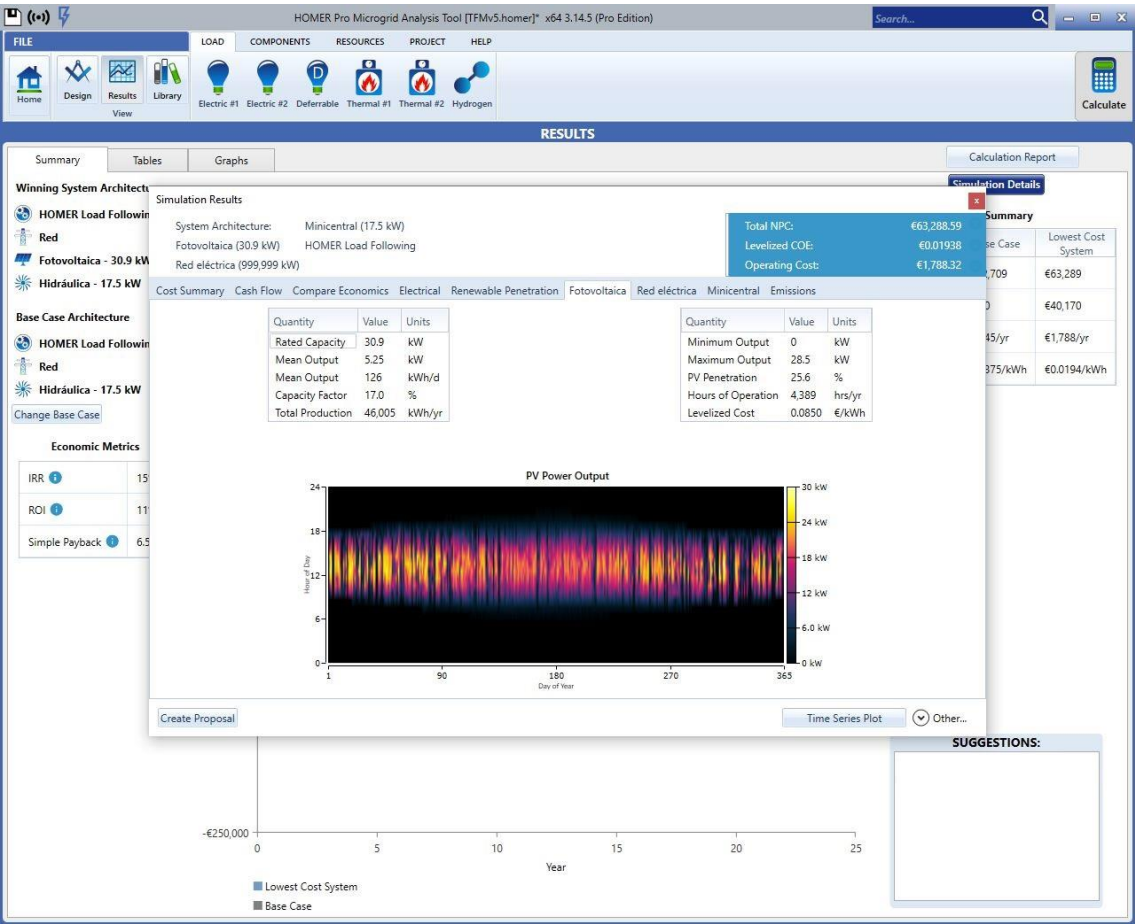


Figura 136. Uso instalación fotovoltaica.

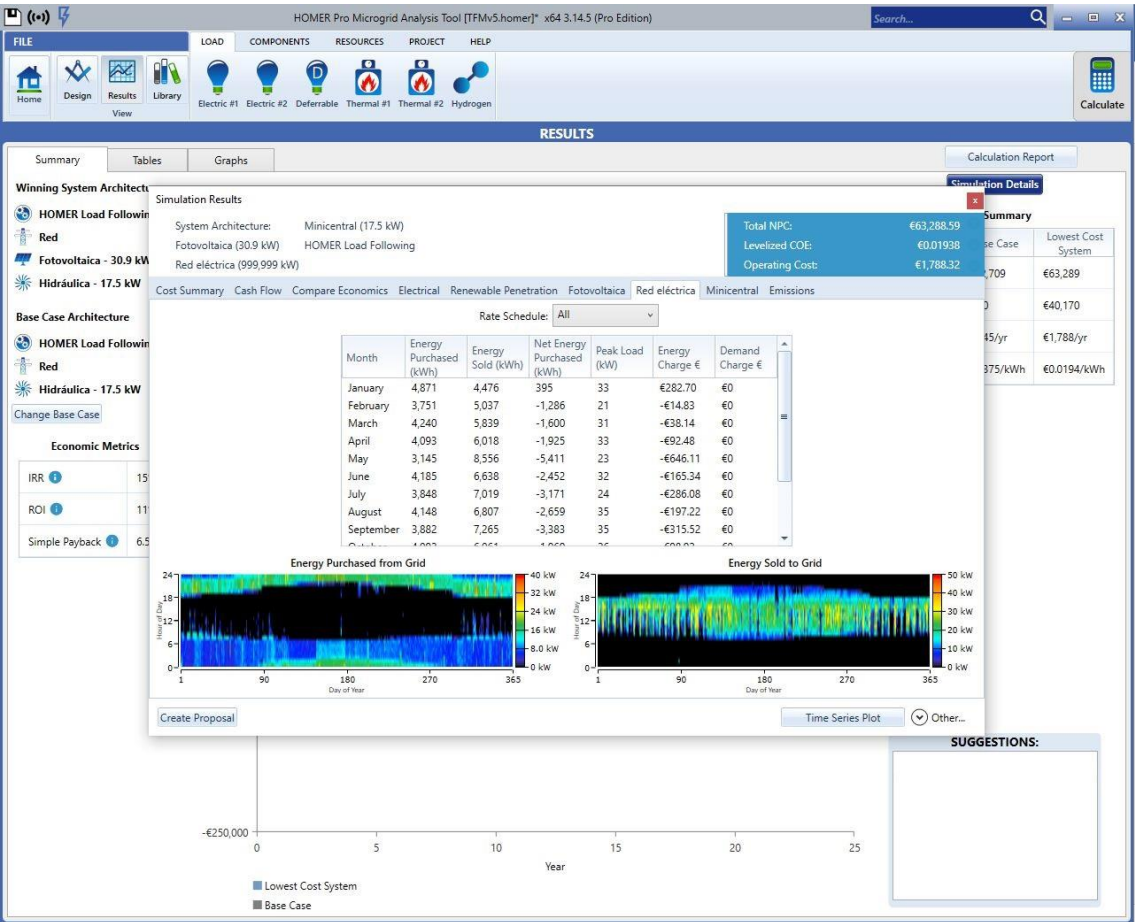


Figura 137. Uso red eléctrica.

En la tabla mostrada a continuación (Tabla 5) se puede observar la diferencia entre la energía adquirida de la red y la vendida, en kWh, así como la repercusión económica que supone dicha diferencia para cada mes.

Tabla 5. Intercambio energético con la red eléctrica.

Mes	Energía adquirida (kWh)	Energía vendida (kWh)	Beneficio económico (€)
Enero	4871	4474	-283,1
Febreo	3751	5035	14,41
Marzo	4240	5836	37,63
Abril	4093	6015	91,99
Mayo	3145	8552	645,61
Junio	4186	6634	164,83
Julio	3848	7015	285,53
Agosto	4148	6803	196,7
Septiembre	3882	7262	315,04
Octubre	4092	6058	98,51
Noviembre	4994	4118	-358,9
Diciembre	4713	4843	-198,67
Anual	49963	72645	1009,58

Para finalizar, se puede observar en la siguiente figura (Figura 138) la producción eléctrica mensual, así como el peso de cada tecnología de generación eléctrica utilizada en la producción de electricidad en el diseño óptimo del sistema.

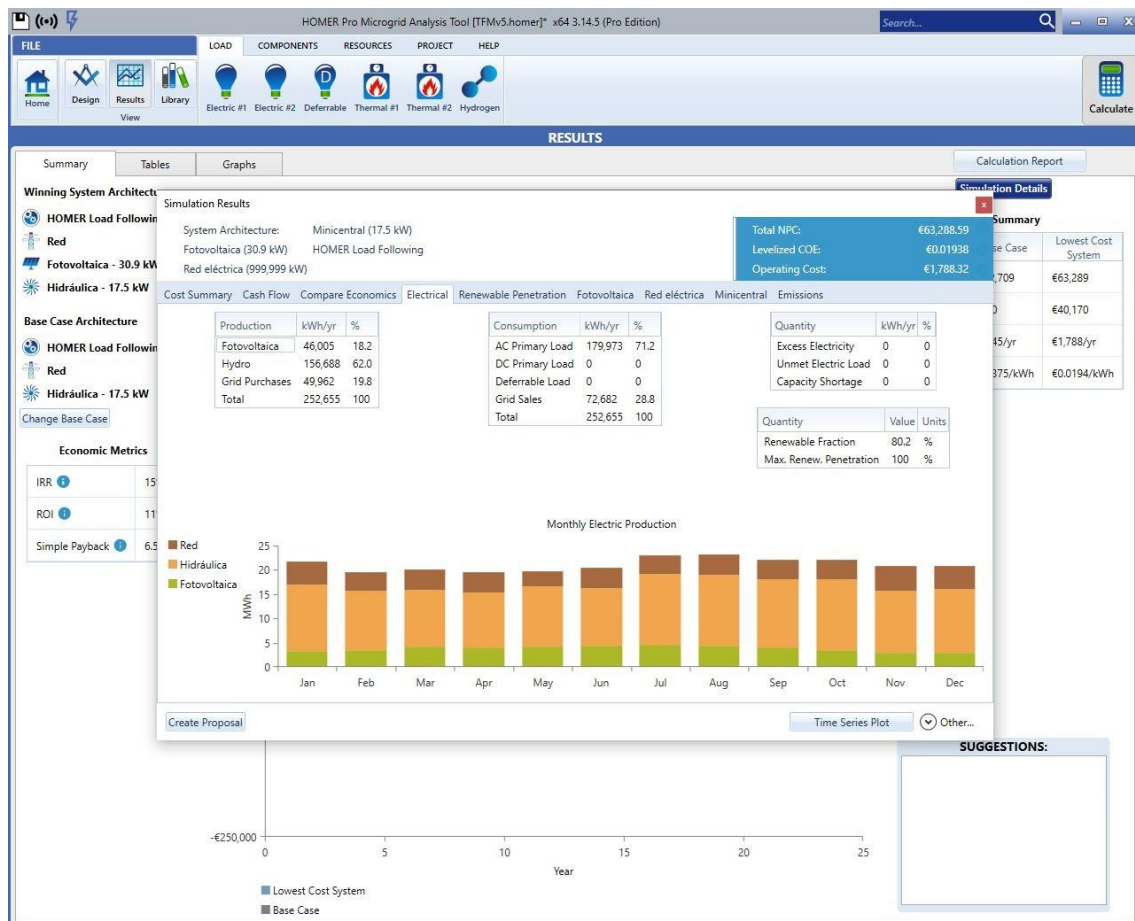


Figura 138. Comparación producción de cada tecnología utilizada.

8. ESTUDIO DE COSTES Y PÉRDIDAS

En el actual apartado se ha realizado un pequeño estudio de costes y pérdidas con la información económica aportada por la simulación mediante el software Homer.

El sistema está compuesto por diversos elementos susceptibles de aportar un coste económico: la minicentral hidráulica, la red eléctrica de abastecimiento y instalación fotovoltaica:

- Minicentral hidráulica: Las centrales o minicentrales tienen un coste inicial de instalación/creación, en el presente caso la minicentral ya existe y está en uso actualmente de modo que en el actual proyecto no hay que tener en cuenta dicho coste inicial, el único coste que va a ocasionar es el de operación y mantenimiento de la misma, estipulado en 2000 €/año para procurar su correcto funcionamiento y mantenimiento.
- Red eléctrica: La red ya está construida y con acceso al punto de suministro correspondiente del Ayuntamiento en el municipio de Cazorla. En este caso no comporta ningún gasto extra, únicamente hay que contabilizar los kWh que se adquieren en la red y los que se venden tal y como se ha expresado con anterioridad en la tabla 5 del presente documento.
- Componente fotovoltaico: El coste esencial es el de adquisición de la tecnología, en el supuesto estudiado se instauró un coste de 1300 € por cada kW de potencia instalado, así como un coste de operación y mantenimiento asociado de 26 €/año por cada kW de potencia instalada.

En las figuras mostradas a continuación se observa el flujo de caja de los 25 años previstos de vida útil de la instalación, para los gastos de capital inicial y de operación y mantenimiento (Figura 139), y para el flujo según el componente de generación de energía (Figura 140).

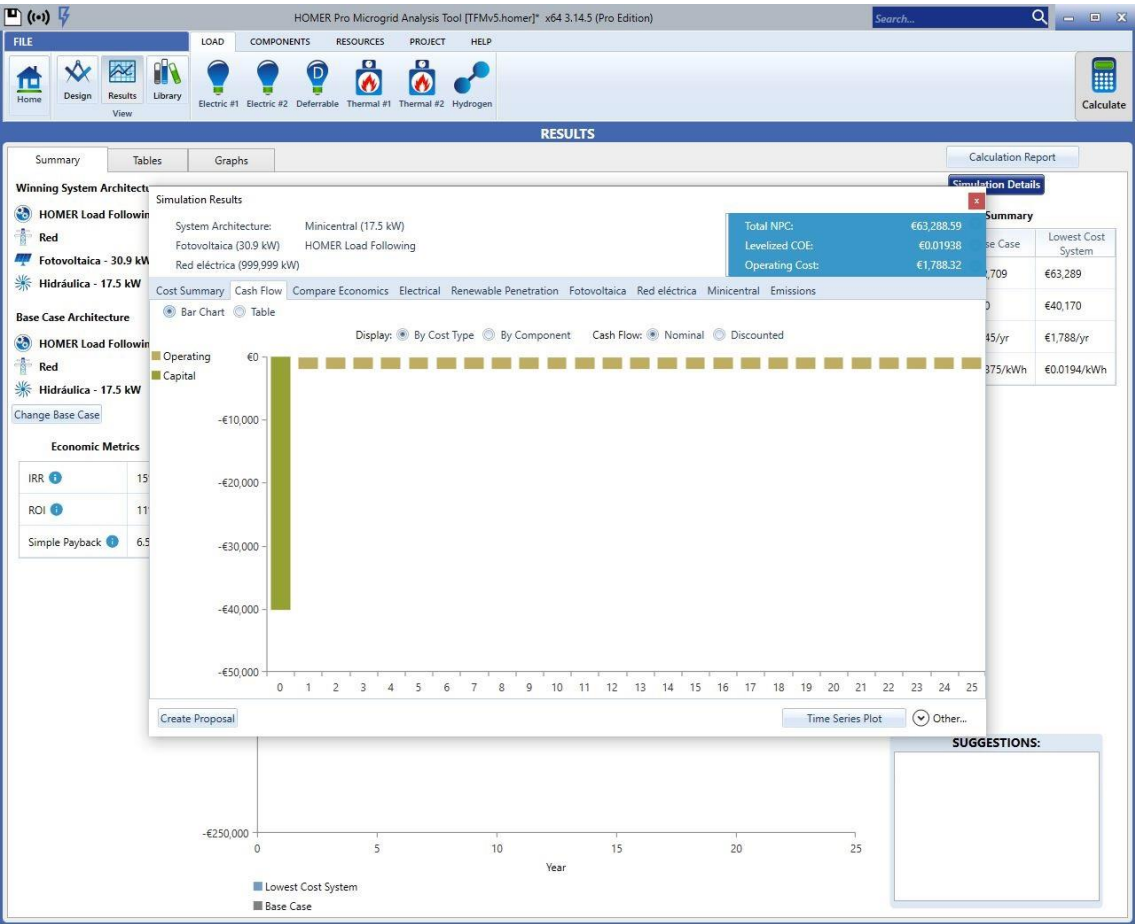


Figura 139. Flujo de caja por tipo de coste.

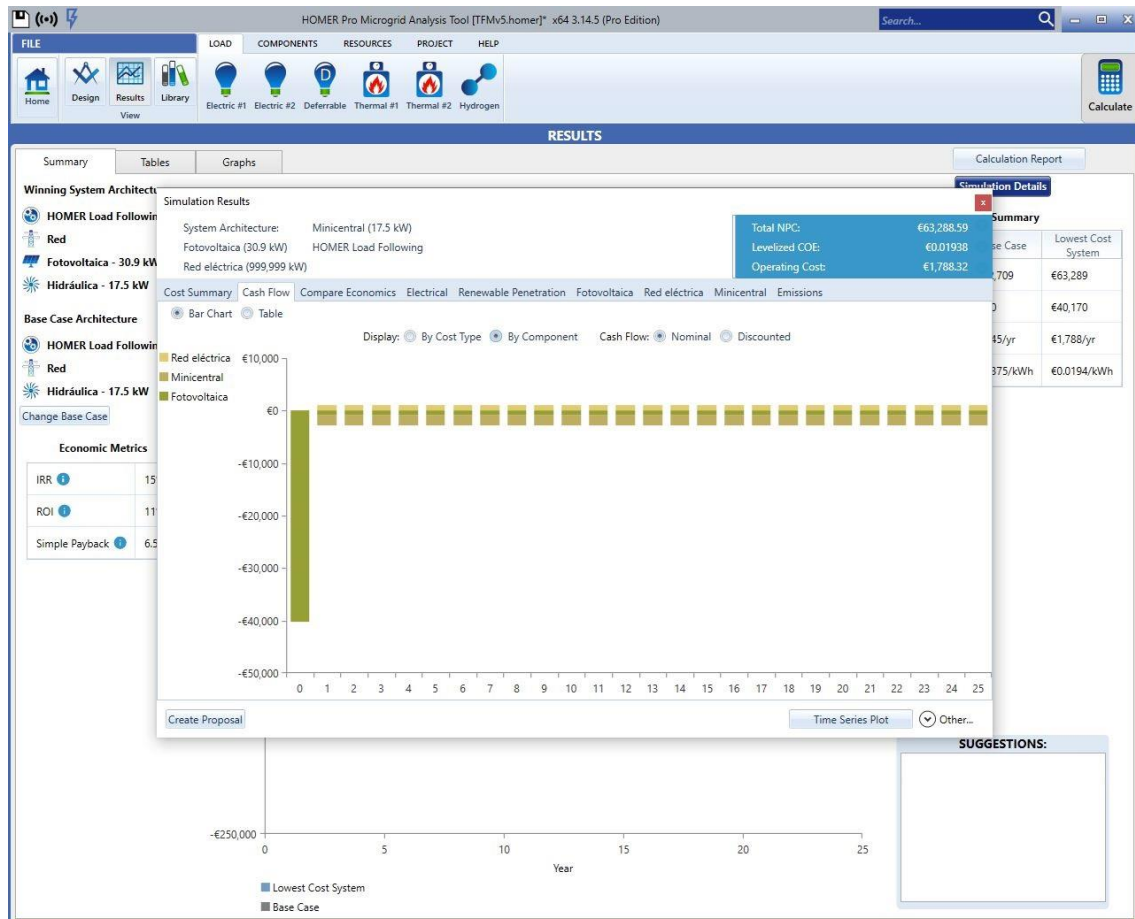


Figura 140. Flujo de caja por componente.

En la siguiente figura se puede observar el coste total al cabo de los 25 años de vida útil de cada tecnología de generación utilizada (Figura 141), así como la comparación del coste de la electricidad (LCOE) entre el caso base con la minicentral hidráulica y la red eléctrica, y el caso óptimo incluyendo la instalación fotovoltaica (Figura 142).

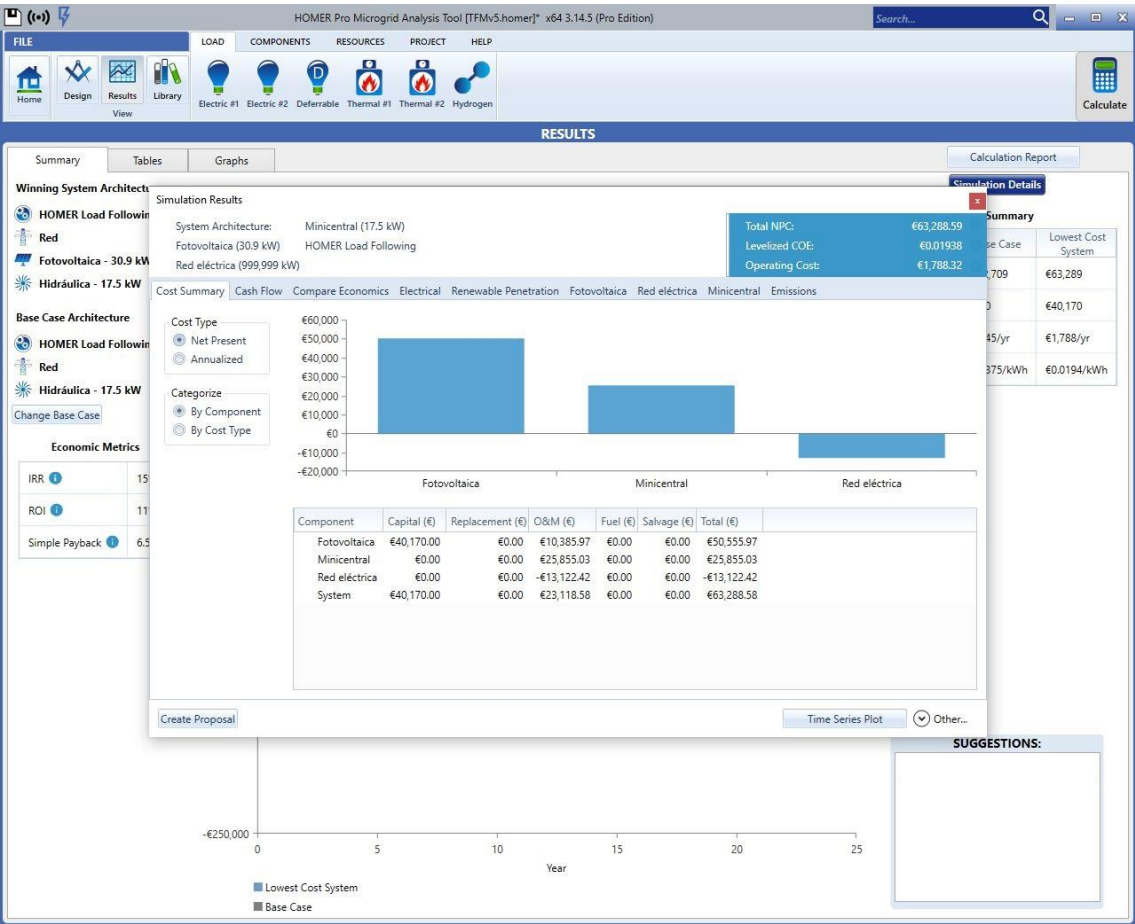


Figura 141. Coste total de cada tecnología de generación.

Los datos de Red eléctrica aparecen con valor negativo en el software dado que se trata de una ganancia económica, y no un gasto como los demás.

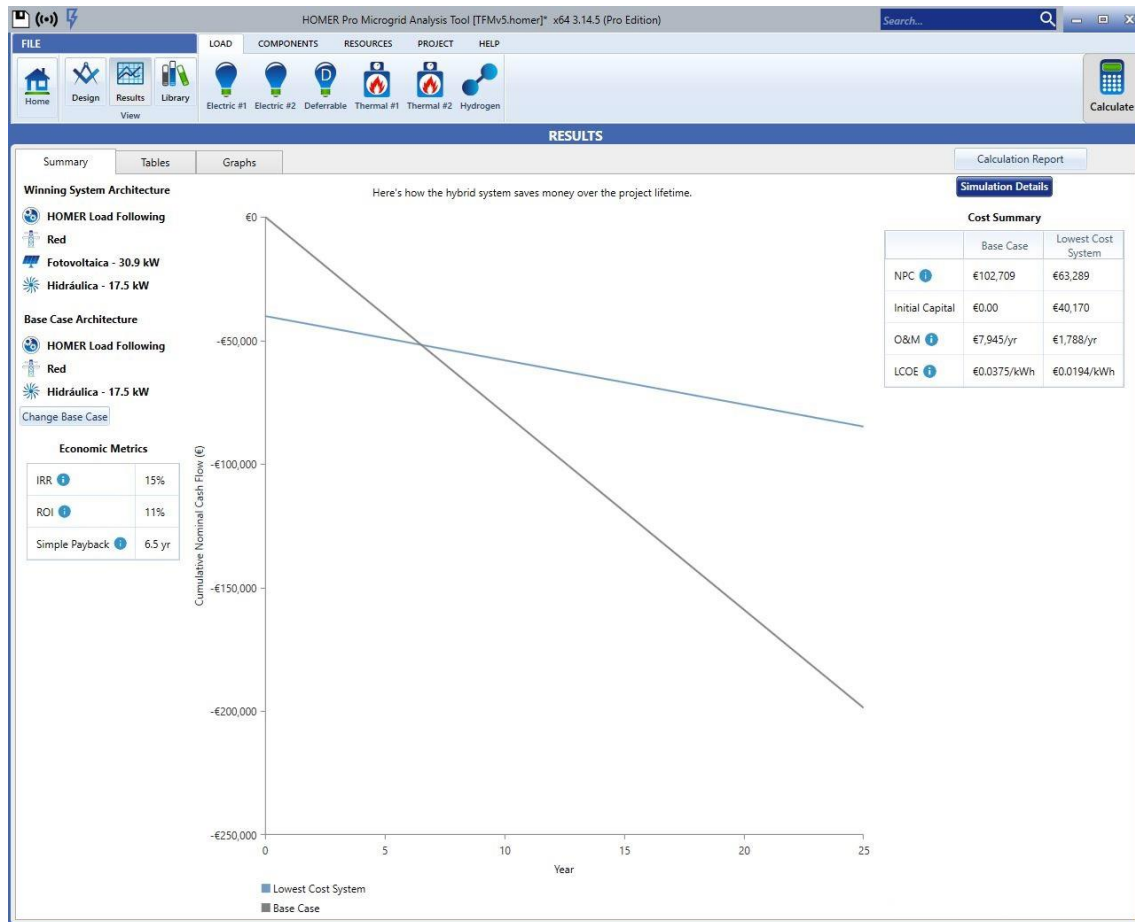


Figura 142. Comparación caso base y caso óptimo.

Para finalizar con el análisis económico, se comentan los valores de diferentes términos económicos del dimensionado óptimo del sistema:

- IRR: 15 %.
- ROI: 11 %.
- Payback Simple: 6,5 años.

IRR hace referencia a la tasa interna de retorno, es la tasa de descuento a la que el caso base y el sistema óptimo tienen el mismo coste presente neto.

ROI hace referencia al retorno de la inversión, es el ahorro anual de gastos relativo a la inversión inicial. Es el promedio de la diferencia anual en los flujos nominales de efectivo durante la vida útil del proyecto dividida por la diferencia en el coste del capital.

Payback simple es el número de años donde el flujo de caja acumulado de la diferencia entre el caso base y el caso óptimo cambia de negativo a positivo.

9. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Una vez llegado a la conclusión de que para obtener el óptimo diseño del sistema es requerida la incorporación de una instalación fotovoltaica hemos de tener en cuenta que es bajo los criterios tenidos en cuenta para su diseño, y algunos de dichos criterios pueden variar con el paso del tiempo ya que afecta de manera positiva o negativa al coste de dichas variables, en el presente caso las variables que pueden afectar al diseño óptimo del sistema en el futuro son principalmente tres; el consumo energético de la dependencia municipal del Ayuntamiento y el alumbrado público, el coste de la electricidad suministrada por la red eléctrica y el precio de la instalación fotovoltaica.

La variación de dichos valores puede cambiar la solución al diseño óptimo del sistema, siendo el precio alrededor de la instalación fotovoltaica el más sensible de cambiar. En segundo lugar, está el precio de adquisición y venta de energía eléctrica de la red, y por último y con menor sensibilidad, el valor referente a el coste de operación y mantenimiento de la minicentral hidráulica.

10. CONCLUSIONES

El presente trabajo tenía la finalidad de comprobar la eficacia del software Homer a la hora de diseñar un sistema híbrido hidráulico-fotovoltaico para una determinada ubicación.

El caso estudiado ha sido el de la dependencia municipal del Ayuntamiento de Cazorla junto al alumbrado público del centro de mando “Herrería”, dicho ayuntamiento dispone de una minicentral hidráulica para autoabastecerse energéticamente y la energía demandada que no puede ser abastecida por la minicentral hidráulica es adquirida de la red eléctrica de abastecimiento estatal.

Mediante la utilización del software se ha hallado un dimensionado óptimo para la incorporación de una instalación fotovoltaica para la producción de energía que no puede producir la minicentral hidráulica, de modo que con la venta de los excedentes producidos durante el día se amortiza con la adquisición nocturna de energía de la red eléctrica.

El software Homer ha resultado ser un programa de fácil utilización e intuitivo, muy útil para realizar grandes simulaciones con múltiples variables en búsqueda del dimensionado óptimo de todos sus componentes, en el caso estudiado en el presente trabajo ha sido una simulación muy sencilla con una única variable real, la potencia de la instalación fotovoltaica, pero el programa es capaz de realizar trabajos mucho más duros. En definitiva, ha resultado ser un software adecuado, que cumple con su propósito y se agradece la interfaz intuitiva que tiene.

11. BIBLIOGRAFÍA

- Repositorio Institucional de Producción Científica de la Universidad de Jaén: *“Mejoras al dimensionamiento óptimo de sistemas híbridos con energías renovables”* por Lato García, Juan Carlos a 05-abril-2019. Url; <http://ruja.ujaen.es/handle/10953/949> [En línea. 02/09/2021 12:21].
- Repositorio Institucional de Producción Científica de la Universidad de Jaén: *“Optimización en dimensionamiento y control energético de sistemas de energías renovables en Ecuador”* por Arévalo Cordero, Wilian Paul a 10-febrero-2021. Url; <http://ruja.ujaen.es/handle/10953/1056> [En línea. 02/09/2021 12:25].
- Repositorio Institucional de Documentos de la Universidad de Zaragoza: *“Análisis técnico y económico para la implantación de sistemas de iluminación fotovoltaica conectados a la red eléctrica”* por Pérez Sáenz, Alfonso a xx-diciembre-2013. Url; <https://zaguan.unizar.es/record/12970?ln=es#> [En línea. 02/09/2021 12:29].
- Repositorio Digital de la Universidad Politécnica de Cartagena: *“Análisis técnico y económico del impacto de las instalaciones de autoconsumo en las redes eléctricas: aplicación a la generación fotovoltaica integrada con recursos energéticos distribuidos”* por García Garre, Ana a xx-enero-2018. Url; <https://repositorio.upct.es/handle/10317/6417> [En línea. 02/09/2021 12:33].
- Biblioteca de la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla: *“Estudio de viabilidad y requisitos técnicos necesarios para la implantación de una micro-red*

eléctrica” por Fuentes Palma, Alejandro a xx-xx-2017. Url;
<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/71018> [En línea. 02/09/2021 12:37].

· Trabajo Fin de Grado en Universidad de Jaén: “*Proyecto de minicentral hidroeléctrica para autoconsumo ‘Aguas de Cazorla’*” por Galán Cano, Lucía a xx-07-2020.

· Página web de OMIE: “*Operador del Mercado Ibérico de Energía*”, a 01/12/2021. URL; <https://www.omie.es/> [En línea. 02/12/21 10:54].