



Simulação de Redes Elétricas Inteligentes

José Francisco Manteiga Varela

Relatório Final do Trabalho de Projecto de Mestrado em Eficiência Energética e Energias Renováveis apresentado à Escola Superior de Tecnologia e de Gestão do Instituto Politécnico de Bragança.

Trabalho orientado por:
Prof.Doutor Paulo Leitão
Prof. Esteban Jove

Bragança
Julho de 2017



Simulação de Redes Elétricas Inteligentes

José Francisco Manteiga Varela

Relatório Final do Trabalho de Projecto de Mestrado em Eficiência Energética e Energias Renováveis apresentado à Escola Superior de Tecnologia e de Gestão do Instituto Politécnico de Bragança.

Trabalho orientado por:
Prof.Doutor Paulo Leitão
Prof. Esteban Jove

Bragança
Julho de 2017

A Escola Superior de Tecnologia e de Gestão não se responsabiliza pelas opiniões expressas neste relatório.

Dedicatória

A mi Padre ...

Agradecimientos

Me gustaría aprovechar la ocasión para agradecer a todas las personas que contribuyeron directa o indirectamente al éxito de este trabajo. Especialmente por el apoyo y colaboración que me han prestado, no puedo dejar de evidenciar a las siguientes personas: En primer lugar a mis dos orientadores, Profesor Doctor Paulo Leitão y Profesor Esteban Jove, por todo el tiempo que me han dispensado en el desarrollo de este proyecto, por su ayuda y el conocimiento compartido. A todos los compañeros del Laboratorio de Control, Automatización y Robótica (LCAR) por su amistad, su apoyo y los valores que han compartido conmigo de una forma tan altruista. Por todos los momentos vividos y compartidos en un ambiente tan acogedor. Como no podía ser de otro modo, un gracias en mayúsculas a mi compañero Adriano Ferreira por su paciencia y su actitud positiva en todo momento, sin su ayuda este proyecto no sería lo que es. A mis compañeros en el Master de Eficiencia y Aprovechamiento Energético en la UDC por sus palabras de apoyo y su interés por el desarrollo de este proyecto, os deseo a todos una larga, próspera y feliz trayectoria laboral . A los Profesores del Master de Eficiencia y Aprovechamiento Energético en la UDC, por su implicación y esfuerzo en esta primera promoción de Master. A José Luis Calvo Rolle y Orlando Soares, directores de este Master, por el tiempo y esfuerzo dedicados al Master y las relaciones entre IPB - UDC, sus consejos que siempre fueron una guía importante para decidir el camino a seguir. A todos muchas gracias, muito obrigado, siempre estaréis muy presentes en mi pensamiento.

Siempre que te pregunten si puedes hacer un trabajo, contesta que sí y ponte enseguida a aprender como se hace.

Franklin D. Roosevelt

Resumo

A procura de eletricidade está a crescer rapidamente e o seu fornecimento deve ser ininterrupto, mesmo que haja crises ou estados de emergência. A procura, aliada à inconsistência criada pela crescente introdução de fontes de energia renováveis, gera instabilidade, tanto na rede de transmissão como na distribuição. Para acomodar estas mudanças, a rede tem sofrido várias alterações ao nível da estrutura e do nível de controle, tornando-se uma rede inteligente, dita Smartgrid. Este novo conceito tem como objetivo principal o desenvolvimento de uma rede elétrica capaz de gerir de forma mais eficiente os seus recursos e infra-estrutura e integrar os consumidores como produtores no sistema de energia elétrica (incluindo também veículos elétricos e produtores de energia elétrica de fontes renováveis). Entre os componentes de uma Smartgrid inclui-se a Microgrid como o elemento de construção básica, um elemento de construção que nas últimas décadas tem sido desenvolvido pela introdução de uma grande quantidade de fontes de geração de energia de origem renovável, ligados ao nível da baixa e da média tensão no que toca às redes de distribuição. O objetivo deste trabalho é estudar, modelar e simular uma Microgrid, usando a plataforma Matlab Simulink, para entender melhor o seu comportamento. O estudo parte de uma primeira configuração (Caso 1) em que a Microgrid é composta de quatro tipos de moradias que diferem umas das outras por incluir mais ou menos elementos de geração de energia renovável (eólica e fotovoltaica) e blocos de armazenamento de energia (baterias), juntamente com um sistema de rede comum a todas as casas. Para terminar, considera-se um segundo caso (Caso 2), onde se aumenta o número de elementos da Microgrid e, para finalizar, cumprindo uma das principais características que deve ter uma Microgrid, testa-se o evento de eliminar um dos seus componentes mantendo-se esta

a funcionar.

Palavras-chave: Smart grid, Microgrid, Matlab, Simulink, simulação, energias renováveis, geração distribuída.

Resumen

La demanda de energía eléctrica está creciendo rápidamente y el suministro debe ser ininterrumpido incluso si existen crisis o estados de emergencia. La demanda aliada a la inconsistencia creada por la introducción creciente de fuentes de energía renovable, genera inestabilidad, tanto en la red de transmisión como en la red de distribución. Con el fin de acomodar todos estos cambios, la red ha sufrido varias modificaciones, tanto a nivel de estructura como a nivel de control, convirtiéndose en una red inteligente denominada Smartgrid. Este nuevo concepto, tiene como principal objetivo el desarrollo de una red eléctrica con capacidad para gestionar de una forma más eficiente sus recursos e infraestructuras, e integrar a los consumidores como productores en el sistema eléctrico de energía, (incluyendo también los vehículos eléctricos y productores de energía eléctrica usando energías renovables). Entre los componentes de una Smartgrid, cabe destacar a la Microgrid como el elemento constructivo básico, un elemento constructivo que en las últimas décadas se ha venido desarrollando gracias a la introducción de una gran cantidad de fuentes de generación eléctrica de origen renovable, conectadas a nivel de baja y media tensión en las redes de distribución. El objetivo de este trabajo es estudiar, modelar y simular una Microgrid, usando la plataforma Matlab Simulink para comprender mejor su comportamiento. El estudio parte de una primera configuración (CASO 1), en el que la Microgrid se compone de cuatro tipos de viviendas, que se diferencian por incluir más o menos elementos de generación eléctrica renovable (eólica y fotovoltaica), y bloques de almacenamiento de energía (baterías), además de una instalación común a todas las viviendas. Para finalizar, se considera un segundo caso (CASO 2) donde se aumenta el número de los elementos que componen la Microgrid y para finalizar, cumpliendo con una

de las principales características que debe de tener una Microgrid, se estima el hecho de eliminar uno de sus componentes y que esta, siga funcionando.

Palabras-clave: Smart grid, Micro grid, Matlab, Simulink, energías renovables, generación distribuida

Abstract

The demand of electric energy is quickly growing, and the supply must be intermittent, even during crisis or states of emergency. The demand, together with the inconsistency created by the increasing introduction of renewable energy sources, generates instability, both in the transmission grid as in the distribution grid. Aiming to accommodate all these changes, the grid has suffered several modifications, both in the structure level and in the control level, becoming a Smart Grid. The main goal of this new concept is the development of an electrical grid with capacity to manage its resources and infrastructures in a more efficient way, and the integration of consumers as producers in the electric energy system (including electric vehicles and renewable energy producers). Among the basic components of a Smart Grid, the Micro Grid stands out as a basic constructive element. This element has been developed in the last decades thanks to the introduction of a large amount of renewable power generation sources, connected in the level of low and medium voltage in the distribution grids. The goal of this project is to study, model and simulate a Micro Grid, using the Matlab Simulink platform, to better understand its behaviour. The study starts from a first configuration (CASE 1) in which the "Micro Grid" is composed by four types of dwellings that differ depending on the presence of more or less renewable power generation elements (wind and photovoltaic), and energy storage blocks (batteries), and also a plant that is common for all dwellings. The second case (CASE 2) has an increased number of elements composing the Micro Grid, as compared to CASE 1. It is also proved that eliminating one of the components of this Micro Grid does not prevent it from working, which is one of the main characteristics that a Micro Grid must have.

Keywords: Smart grid, Micro grid, Matlab, Simulink, renewable energy, distributed generation

Índice general

Agradecimientos	IX
Resumo	XI
Resumen	XIII
Abstract	XV
1. Introducción	1
1.1. Encuadramiento	2
1.2. Objetivos	3
1.3. Estructura del Documento	5
2. Breve Estado del Arte en Smartgrids	7
2.1. Concepto de Smartgrid	7
2.2. Concepto de Microgrid	9
2.3. Herramientas de simulación	11
3. Modelos Simulink para Recursos Energéticos	17
3.1. Central Fotovoltaica con Baterías	19
3.2. Central Fotovoltaica de Conexión a Red	22
3.3. Micro-Aerogenerador	23
3.4. Banco de Baterías	26
3.5. Cargas o consumos	28

4. Implementación de Modelos de Microgrid en - Simulink	31
4.1. Implementación del Caso de Estudio (CASO 1)	32
4.1.1. Implementación de la central fotovoltaica al modelo Simulink	33
4.1.2. Implementación de la central eólica al modelo Simulink	35
4.1.3. Implementación del sistema de almacenamiento al modelo Simulink	36
4.1.4. Implementación de los datos de consumo al modelo Simulink	38
4.1.5. Flujo de datos a través del modelo de simulación	39
4.2. Implementación del Caso de Estudio (CASO 2)	43
4.2.1. Implementación de la instalación común al modelo Simulink	44
4.2.2. Implementación de los modelos de la House 1 al modelo Simulink	45
4.2.3. Implementación de los modelos de la House 2 al modelo Simulink	47
4.2.4. Implementación de los modelos de la House 3 al modelo Simulink	47
4.2.5. Implementación de los modelos de la House 4 al modelo Simulink	48
5. Análisis de los Resultados de la Simulación	51
5.1. Análisis de Resultados (CASO 1)	52
5.1.1. Analisis de consumo y acumulacion de energía	52
5.1.2. Análisis de la producción eólica y fotovoltaica	54
5.1.3. Relación entre producción y consumo (CASO 1)	55
5.2. Análisis de Resultados (CASO 2)	57
5.2.1. Análisis de Resultados (CASO 2 con red)	57
5.2.2. Relación entre producción y consumo (CASO 2 con red)	60
5.2.3. Relación entre producción y consumo (CASO 2 sin red)	61
6. Conclusiones generales	65
A. Propuesta Original del Proyecto	70
B.	74
B.1. Hoja Excel con los datos de partida	74
B.2. Ficha técnica del módulo fotovoltaico	76

B.3. Gráficas de los resultados de simulación	79
B.4. Como ejecutar la simulación	99
B.5. Vista General de Sistema de modulos Simulink	100

Índice de cuadros

3.1. Relación de cargas que componen el consumo de una vivienda tipo	30
4.1. Relación de entradas y salidas de los modelos comunes a los dos casos	31
4.2. Potencia y horarios de las cargas del consumo de cada tipo de vivienda . . .	32
4.3. Componentes propuesto para la simulación del CASO 1	32
4.4. Potencia, nº de elemento de cada modelo y su ubicación para el CASO 1 . .	33
4.5. Cargas que componen el consumo de una vivienda tipo	38
4.6. Componentes propuestos para la simulación del CASO 2	43
4.7. Potencia, nº de elemento de cada modelo y su ubicación para el CASO 2 . .	44

Índice de figuras

1.1. Desafios do sistema de energia e o papel das redes inteligentes em resposta [3].	4
2.1. Estructura de una Smartgrid	8
3.1. Entorno de trabajo de la herramienta de simulación Matlab-Simulink	18
3.2. Esquema fotovoltaica con baterias	19
3.3. Central Fotovoltaica con baterias (Simulink)	22
3.4. Central Fotovoltaica de conexion a red	23
3.5. Central Fotovoltaica de conexion a red (Simulink)	24
3.6. Esquema del micro aerogenerador (Genérico)	25
3.7. Esquema del micro aerogenerador (Simulink)	26
3.8. acumulación en baterías	27
3.9. acumulación en baterias (Simulink)	27
3.10. Esquema de cargas o consumos (Genérico)	29
3.11. Esquema de cargas o consumos (Simulink)	30
4.1. Modelo de central fotovoltaica ESCENARIO	34
4.2. Modelo de central eólica ESCENARIO	36
4.3. Modelo de la batería	37
4.4. Modelo de consumos ESCENARIO	39
4.5. Composicion de modelos del subsistema ESCENARIO	41
4.6. Modelo de resultados y salida de datos del ESCENARIO	42

4.7.	Implementación de modelos a la instalacion común CASO 2	45
4.8.	Implementación de modelos a la House 1 del CASO 2	46
4.9.	Implementación de modelos a la House 3 del CASO 2	48
4.10.	Implementación de modelos a la House 4 del CASO 2	48
5.1.	Gráfica de potencia de las 7 cargas tipo de una vivienda	53
5.2.	Gráficas de consumo y estado de carga (SOC)	54
5.3.	Gráficas de potencia de la producción eólica y fotovoltaica	55
5.4.	Total de consumos, total de producción y resultado final del CASO 1	56
5.5.	Consumos de HOUSE 1/3/4 (CASO 2 con red)	58
5.6.	Gráfica de potencia de la producción eólica y fotovoltaica	59
5.7.	SOC General, HOUSE 1 y HOUSE 2 (CASO 2 con red)	60
5.8.	Total de consumos, total de producción y resultado final del CASO 2 con red	61
5.9.	SOC General, SOC HOUSE 1 y SOC HOUSE 2	63
5.10.	Análisis de consumo, producción y resultado final	63
B.1.	Vista General de Sistema en Simulink	100

Siglas

AC corriente alterna. 19, 22, 27, 28

DC corriente continua. 19, 22, 27

DG Generación Distribuida. 2, 3, 8, 9, 12–14

LV bajo voltaje. 11

PSAT Power System Analysis Toolbox. 13

PV Instalación fotovoltaica. 33, 35, 43–45, 54

SOC estado de carga. 21, 28, 51, 53, 54, 57, 59, 60, 62, 63

VE Vehículo Eléctrico. 4, 18, 21, 37, 43, 45, 53, 56, 58, 59, 62, 64

Capítulo 1

Introducción

El calentamiento global es un problema medioambiental grave, con consecuencias previsiblemente catastróficas para el planeta a menos que se ponga remedio a los orígenes de esta consecuencia, los combustibles de origen fósil como fuente energética de las centrales de producción eléctrica o en la automoción, son uno de los orígenes del calentamiento global. A pesar de que esta relación es sobradamente conocida desde hace años, el cambio del uso de combustibles fósiles a una energía limpia lleva tiempo, y en este momento las medidas que se piensan como necesarias para poder detener el calentamiento global, van más allá de la mera sustitución de la energía de origen fósil, por una de origen renovable, además, es necesario acompañar esto de una disminución en el consumo energético a través de la eficiencia de los recursos energéticos, en definitiva, usar la energía de forma racionalizada. A día de hoy, tenemos multitud de información relacionada con este paradigma energético, donde poder apoyarnos a la hora de decidir un camino certero para solucionar y llevar a cabo la reforma necesaria en la infraestructura de generación y consumo eléctrico. Podríamos hacer una recopilación de estudios, soluciones propuestas y consejos, basados en la investigación, y todos ellos convergen en lo mismo.

Según la Comisión Europea y el Plan Estratégico de Tecnología Energética (Plan SET) hasta el año 2020, alrededor del 20% de la demanda europea de electricidad, debería provenir de la energía eólica y alrededor del 15% de la energía fotovoltaica[1].

Una Opción para futuras estructuras descentralizadas de energía y como estrategia

energética, es apostar por consumir tanta energía renovable como sea posible en el lugar de producción, rechazando la idea de su transporte a largas distancias, que acarrea pérdidas de energía y sobrecostos en infraestructuras y mantenimiento. Tampoco se contempla en esta opción su almacenamiento de grandes cantidades. Se opta pues por la tecnología de Microgrid que parece ser la tecnología favorecedora para apoyar esta estrategia[1].

Esta tecnología de Microgrid, que puede vincularse en el futuro eficientemente con la generación local de energía renovable y con la movilidad eléctrica, permite la gestión de red para mejorar la seguridad del suministro y la resistividad de apagón. Además, se puede reducir la necesidad de grandes redes y extensiones de almacenamiento . La propia tecnología de la Microgrid constituye un valioso complemento del actual sistema de transmisión y distribución [1].

1.1. Encuadramiento

Como se ha visto en la introducción, estudios recientes convergen en que las Smartgrid, son el camino adecuado para cumplir los objetivos marcados y deseables desde el punto de vista técnico, medioambiental y político. Si nos enfocamos en la realidad actual, con la intención de encuadrar este trabajo, vemos que la arquitectura de las redes eléctricas tradicionales, con una configuración centralizada, donde grandes centrales de producción eléctrica dan servicio a los consumidores, transportando la energía desde la central que la produce hasta cada uno de ellos, se ha visto alterada por la presencia de pequeños productores de electricidad, que usan la micro generación basada en energías renovables como la fotovoltaica o pequeños aerogeneradores, convirtiendo así la arquitectura centralizada de la red existente, en una arquitectura descentralizada y dando lugar así a la Generación Distribuida (DG) y con ello a las denominadas Smartgrid, que ofrecen un mayor nivel de integración, permitiendo la conexión de varios generadores distribuidos y de consumidores cercanos, permitiendo con esto, ejercer un control inteligente sobre el conjunto y por lo tanto dando la oportunidad de optimizar indicadores tales como la calidad de potencia y la eficiencia del sistema. Esto nos permite encuadrar este trabajo en un marco real y

actual que además sigue una línea de trabajo avalada por los estudios más recientes de los profesionales del sector; es por lo tanto muy necesario tratar de dejar bien definido el concepto de Smartgrid.

Optaremos por la definición de Smartgrid según la AIE (Agencia Internacional de la energía)

Una red inteligente es un sistema de red eléctrica que utiliza tecnología digital para monitorear y administrar el transporte de electricidad de todas las fuentes de generación para satisfacer las diversas demandas de electricidad de los usuarios finales. Estas redes pueden coordinar las necesidades y capacidades de todos los generadores, operadores de la red, usuarios finales y partes interesadas del mercado de la electricidad de tal manera que puedan optimizar la utilización y el funcionamiento de los activos y, en el proceso, minimizar los costes y los impactos medioambientales. Manteniendo la fiabilidad, resiliencia y estabilidad del sistema [2].

Si continuamos con esta sección de encuadramiento y observamos la Figura 1.1, se deduce fácilmente que conocer el comportamiento de la red con estas características, es fundamental para un correcto desarrollo del concepto Microgrid. El número de Generadores Distribuidos que se conectan a la red, es cada vez mayor y por eso se crean centros tecnológicos y laboratorios de energía con el fin de investigar el comportamiento de la red bajo estas circunstancias, en España existe (LABEIN) que es un centro tecnológico privado de reconocido prestigio, entre otras cosas, en el mercado de la energía, en EE-UU (CERTS) Clean Energy resource teams, en Grecia The National Technical University of Athens (NTUA) y en Inglaterra The University of Manchester (UM).

1.2. Objetivos

El objetivo de este trabajo consiste en estudiar, modelar y simular dos Microgrid, usando la plataforma Matlab Simulink, para comprender mejor su comportamiento, permitiendo dimensionar su tamaño y posicionamiento de las fuentes de DG. En definitiva, se trata de estudiar el comportamiento de las dos Microgrid con distinto número de



Figura 1.1: Desafíos del sistema de energía e el papel de las redes inteligentes en respuesta [3].

consumidores y generadores distribuidos basados en pequeñas centrales fotovoltaicas y microaerogeneradores o centrales eólicas.

Una de las dos Microgrid trabajara constantemente conectada a la red de distribución (CASO 1) y la otra tendrá la opción de conexión/desconexión de la misma, (CASO 2 con red) conectada y (CASO 2 sin red) desconectada.

Se comienza creando modelos tipo con la herramienta Simulink, apoyados por Scripts creados en lenguaje "m" de Matlab para cada uno de los elementos necesarios en la composición final del modelo a simular. Se crean modelos para la central fotovoltaica, para la eólica, para los bloques de acumulación estacionarios, para la batería correspondiente al Vehículo Eléctrico (VE) y para cada una de las 7 cargas que componen el consumo de la vivienda tipo.

Posteriormente se ligarán estos modelos tipo, formando las dos Microgrid propuestas en este trabajo, para finalmente ejecutar la simulación con la herramienta Matlab-Simulink y estudiar los resultados obtenidos a lo largo del tiempo, de la potencia, la tensión, la

intensidad y la energía entre otros, por medio de los bloques Scope de Simulink correspondientes. Los bloques Scope tienen la misión de graficar las variables estudiadas y poder analizar así su evolución a lo largo del tiempo, en este caso 24h.

1.3. Estructura del Documento

Este documento se encuentra organizado en seis capítulos. En el presente la descripción del tema de la disertación, el problema existente, los objetivos definidos para una solución y la organización del documento. El segundo capítulo presenta el estado del arte, los conceptos de Smartgrid y de la Microgrid y las herramientas de simulación utilizadas en este proyecto. En el tercer capítulo se explica de forma somera y en términos generales, los esquemas y modelos utilizados en el proyecto. Se describen los sistemas de generación mediante energías renovables, central fotovoltaica con baterías y de conexión directa, así como la central eólica. Los sistemas de almacenamiento de energía y los consumos o cargas.

En el cuarto Capítulo se transcriben los modelos genéricos del capítulo 3 asignándoles variables cuantificadas referentes a materiales reales usados en sistemas de ese tipo, siendo este el primer paso para encaminar la simulación. El traspaso de las variables de entrada de cada uno de los sistemas de generación, las potencias de los consumos y las capacidades iniciales de la capacidad de los sistemas de almacenamiento. En el capítulo 5 se relacionan los resultados de la evolución de la portencia, tensión, intensidad y energía a lo largo del tiempo por medio del bloque Scope de Simulink, que grafica los resultados obtenidos. En algunos casos se comparan estos resultado,s operando con distintos datos de partida, hasta conseguir, como sucede con el caso de las baterías, una capacidad suficiente para mantener el sistema en condiciones de funcionamiento dentro del rango óptimo. Es la manera de reajustar los valores para conseguir una Microgrid autosoltenible utilizando esta herramienta de simulación.

La comparativa se extiende a los resultados de los dos casos estudiados en este proyecto. El capítulo 6 describe las conclusiones generales que se extraen del conjunto del proyecto y las directrices para los posibles trabajos futuros.-

El Apéndice B.1 relaciona la hoja Excel que contiene los datos de entrada para los modelos usados en el trabajo. En el Apéndice B.2 muestra la hoja técnica del módulo fotovoltaico usado para la composición de la central fotovoltaica tipo. estudiados en los Capítulos 3, 4 y 5 principalmente. En el Apéndice B.3 se compone de 14 Screenshots pertenecientes a las gráficas más representativas de los resultados obtenidos de la simulación del CASO 1, de los 14 Screenshots pertenecientes a las gráficas más representativas de los resultados obtenidos de la simulación del CASO 2 y, de los 3 Screenshots pertenecientes a las gráficas más representativas de los resultados obtenidos de la simulación del CASO 2 funcionando en modo aislado de la red pública. En el Apéndice B.4 se relaciona el procedimiento para ejecutar el software de la simulación

Capítulo 2

Breve Estado del Arte en Smartgrids

Para describir el estado del arte en este trabajo, comenzamos con la definición de los conceptos de Smartgrid, Microgrid y las herramientas usadas para su simulación.

2.1. Concepto de Smartgrid

Se acuña con el término Smartgrid como la aplicación de las TIC (tecnologías de la información) a los sistemas de energía, así pues, se define como un compendio de múltiples redes, empresas de generación de energía, múltiples operadores de comunicaciones a distintos niveles tanto de comunicación como de coordinación. Las Smartgrids aumentan la conectividad, la automatización y la coordinación entre estos proveedores, consumidores y redes que realizan las distintas tareas de transmisión. Estos sistemas de energía son muy complejos tal y como los tenemos estructurados de forma que las posibilidades que las Smartgrids pueden aportarnos aún no se han definido claramente.

Dicho de otra forma y con ánimo de conjugar los términos que tratamos de definir en este capítulo, podemos decir que una Smartgrid es un conjunto localizado de Microgrids, cargas o consumos y fuentes productoras de energía, habitualmente de origen renovable, (monitoreadas y administradas por las Tecnologías de la información), que pueden funcionar sincronizadas formando una red común y copiando de la misma las características

eléctricas necesarias para la sincronización. Un ejemplo gráfico de una red de estas características, se puede ver en la figura 2.1. En esta figura se aprecia entre otras cosas, como coexisten en la misma red, grandes plantas de producción con pequeños productores de energías renovables de carácter doméstico, o Microgrids con su propia generación eólica y microturbinas.

Pero una Microgrid, también podría funcionar en isla desconectándose de la red común, cumpliendo una función de seguro frente a apagones o fallos de la red común o simplemente cumpliendo una función de DG, autónoma y sostenible.

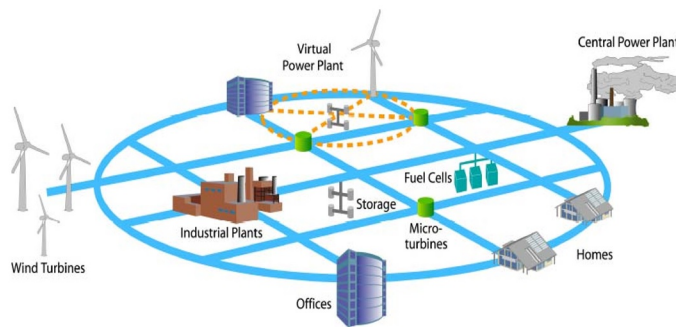


Figura 2.1: Estructura de una Smartgrid [4].

Resumiendo las características de una Smartgrid se podrían condensar en la auto-curación, la interacción, la optimización, la compatibilidad y la integración. El escenario de las redes eléctricas tradicionales que transportan electricidad a granel a lo largo de grandes distancias operando por lo general a tensiones que van desde los 345 kV a los 800 kV a través de líneas de corriente alterna y de corriente continua son gestionadas activamente. Las redes locales tradicionalmente mueven la energía en una sola dirección, estamos hablando de las redes de "Distribución" que llevan la energía a los consumidores, estas líneas funcionan a una tensión que no superaba los 132kV. Este paradigma cambia día a día a medida que los consumidores, hogares y negocios comienzan a generar más electricidad eólica y solar, lo que les permite vender el excedente de energía a sus servicios públicos. Por lo tanto es necesario modernizar el sistema para hacerlo más eficiente, para gestionar en tiempo real los flujos de energía y para proporcionar la medición bidireccional que permita compensar la producción a los productores/consumidores locales de energía.

Se debe de tener claro que sostenibilidad es una variable de primer orden, tanto a nivel medioambiental como económico para cuadrar la ecuación energética del siglo XXI, pero la infraestructura y los sistemas existentes carecen de la flexibilidad necesaria para evolucionar y satisfacer las exigencias fundamentales de eficiencia y fiabilidad que se le exige al nuevo sistema. [5]. Para dar solución a este pero, se debe de tener en cuenta que la Smartgrid es la encargada de introducir una respuesta inteligente entre la disponibilidad y la demanda devolviendo así el delicado equilibrio a este paradigma de costo-beneficio"que necesitamos resolver de forma sostenible.

Los mercados y la información del sistema en tiempo real aportaran las condiciones necesarias para que las empresas de servicios públicos puedan trabajar a la par con los consumidores y confeccionar a medida el mix de suministro más rentable y eficiente. Y este es el objetivo, los beneficios inherentes a la Red Inteligente, pero para conseguir este objetivo, en primer lugar es necesario que entendamos su estructura, sus componentes y sus características [5].

2.2. Concepto de Microgrid

Para conocer el potencial emergente de la DG es necesario adoptar un enfoque del sistema que nos permita ver la generación y los consumos asociados como un subsistema, y así esbozamos el concepto de Microgrid cuyo principal cometido es:

- Que durante las perturbaciones, la generación y los correspondientes consumos puedan separarse del sistema de distribución para aislarse así formando una Microgrid y mantener el servicio sin dañar la Integridad de la red.
- Conseguir subsistemas con la suficiente fiabilidad y flexibilidad que nos proporcionen un modelo *peer-to-peer* y *plug-and-play* para cada componente de la Microgrid.
- Cumplir con el concepto *peer-to-peer*, el cual asegura que no hay componentes críticos para el funcionamiento de la Microgrid. Esto implica que la Microgrid puede continuar operando aún con pérdida de cualquier componente o generador.

- Que sea Plug-and-play, lo cual implica que una unidad puede colocarse en cualquier punto del sistema eléctrico sin reingeniería de los controles, es una funcionalidad muy similar a la flexibilidad. Resumiendo, que si el modelo tradicional agrupa la generación en un único punto que simplifica la aplicación eléctrica, el modelo plug-and-play facilita la colocación de generadores cerca los consumos permitiendo un uso más eficaz de los mismos.

La tipología de Microgrids es muy variada, por definición, un sistema de Microgrid puede operar tanto dentro como fuera de otro sistema de potencia más grande, es decir tanto en modo conectado a la red como en modo aislado y una mención especial merecen las característica y peculiaridades propias de cada una de ellas [6]. En cada modo de funcionamiento podrían existir diferentes combinaciones de las fuentes de energía disponibles y de los bloques de almacenamiento pertenecientes al sistema que satisfagan la demanda de las cargas [6].

Las Microgrids que operan en modo aislado, son más utilizadas, por ejemplo, en el ámbito rural donde la red de distribución no llega, o llega con unas características eléctricas de baja calidad. Este tipo de Microgrid tiene que contar con un bloque de baterías de suficiente capacidad para almacenar la energía necesaria que garantice el funcionamiento de las cargas de la Microgrid, en su conjunto completo o al menos las estrictamente necesarias o de emergencia, en los momentos de baja generación. El conjunto de elementos de la Microgrid, debe de mantener un equilibrio energético auto sostenible, para que el funcionamiento a lo largo del tiempo sea fluido.

Las Microgrids aisladas han surgido dentro del campo de las redes inteligentes, enfrentándose a desafíos importantes, relacionados con su operación adecuada y eficiente. Un ejemplo es la autosostenibilidad, cuando la Microgrid se desconecta de la red principal, por ejemplo, debido a un fallo en la utilidad principal o debido a situaciones geográficas, lo que requiere un control eficiente de la demanda y la producción de energía [7].

En cambio, las Microgrids conectadas a la red pública, no necesitan de tanta acumulación, con lo cual en términos económicos, la instalación, suele significar un ahorro respecto

a las que funcionan en modo aislado ya que la acumulación es cara. Las Microgrids aparecen en las redes de distribución como una forma de facilitar la integración de la micro generación en redes bajo voltaje (LV) y aumentar la confiabilidad. Entre otras definiciones también acertadas, a una Microgrid se le puede definir como una asociación de una red de distribución de LV, pequeños sistemas modulares de generación (micro-generadores), cargas y dispositivos de almacenamiento que tienen algunas funciones coordinadas locales. Como tal y así definida, puede operar en dos modos diferentes: interconectados o de emergencia.

En el primer modo, interconectado, la Microgrid está conectada con la red de distribución, importando o exportando electricidad y / o servicios auxiliares. Cuando está en modo de emergencia, la microgrid funciona aislada de la red de distribución y utiliza recursos locales, pasando del control de potencia al control de frecuencia. Una Microgrid sólo se establecerá si sus promotores logran ventajas suficientes que justifiquen los costos incurridos, es decir, los costos de inversión, operación y mantenimiento [8].

Por lo tanto una Microgrid que opere en modo aislada será en la mayoría de los casos por motivos ajenos a los de índole económico puesto que como se ha dicho anteriormente, el coste de los elementos que la componen aumenta debido al sistema de almacenamiento que suele requerir.

2.3. Herramientas de simulación

La integración de las tecnologías TIC contribuirá a cumplir los objetivos de las Smartgrids, aplicando estrategias inteligentes para implementar sus funciones de automatización. El uso de la simulación constituye una alternativa al modelo y prueba, de forma sencilla, estas complejas redes eléctricas de potencia, mejorando la fiabilidad, resistencia y estabilidad del sistema.

Una Smartgrid es un conjunto localizado Microgrids, cargas o consumos y fuentes productoras de energía, habitualmente de origen renovable que pueden funcionar sincronizadas, formando una red común, copiando de la misma las características eléctricas

necesarias para la sincronización previa a la inyección de energía, pero también podría funcionar en isla, desconectándose de la red común, cumpliendo una función de seguro, frente a apagones o fallos de la red común o simplemente cumpliendo una función de DG, autónoma y sostenible.

Conocer el comportamiento de este tipo de redes en constante desarrollo, es muy importante para saber la fiabilidad que nos brindan ante posibles fallos de la red, ante el crecimiento de la misma tanto en consumidores como productores, o ante la implementación de nuevas fuentes de energía. Es importante como decíamos, conocer su comportamiento ante estos cambios, pero muy difícil por no decir prácticamente imposible probar todos los escenarios posibles en la realidad, para ello, usamos herramientas de simulación que nos pueden acercar el comportamiento de la Microgrid de una forma mucho más rápida y menos costosa.

Para que una simulación implique una ventaja, debe de “imitar” el sistema real a un coste más bajo, o usando menos recursos. Los resultados de una simulación deben de corresponderse con las salidas que se obtendrían del sistema real.

Las principales ventajas que nos ofrece la simulación de un sistema dinámico son entre otras las siguientes [9]:

- Ayuda a descubrir nuevos procedimientos operacionales y a establecer nuevas reglas de decisión en los procesos.
- El tiempo puede ser comprimido y expandido, permitiendo acelerar o retardar el fenómeno de estudio.
- El sistema puede ser estudiado sin interferir en las operaciones reales del mismo.
- Se pueden testear nuevos procesos o escenarios antes de realizar costosas inversiones.
- Se pueden avalar hipótesis de porque ocurren ciertos fenómenos, o hacer predicciones al descubrir cuellos de botella antes de que sucedan y el sistema real se vea comprometido.

Pero a medida que se integran más tecnologías de Smartgrid, como por ejemplo las DG fotovoltaica , espacialmente de vehículos eléctricos, en las redes de distribución, las simulaciones estáticas ya no son suficientes para realizar modelado y análisis. Para resolver esto, existen herramientas de simulación para sistemas de potencia como GridLab-D, Power System Analysis Toolbox (PSAT), OpenDSS, DigSilent PowerFactory ampliamente utilizadas y que se definen brevemente a continuación.

- GridLAB-D es un simulador de sistema de distribución de energía y una herramienta de análisis que permite simular simultáneamente el flujo de potencia, las cargas finales y las funciones de mercado. Proporciona características básicas, como los cálculos de flujo de energía, pero también los más avanzados, como modelos de comportamiento del consumidor como perfiles de demanda entre otros. Se basa en un concepto modular que permite agregar módulos adicionales dependiendo del número y tipo de entidades requeridas, modelos físicos avanzados para describir las interdependencias de cada uno de los dispositivos [10]. GridLAB-D se ha utilizado para realizar Diseño y evaluación de automatización de distribución, Gestión de la carga máxima permitiendo modelar el comportamiento de los consumidores, para comprenderlo mejor y optimizar la interacción entre varias estrategias, Generación y almacenamiento distribuidos etc. En definitiva, GridLAB-D es una herramienta de distribución de sistema de energía modular de código abierto que proporciona un análisis y simulación de primera clase de todos los aspectos de las operaciones de la red [10].
- PSAT es una caja de herramientas de Matlab para simulación y análisis de sistema de energía eléctrica. Todas las operaciones pueden evaluarse por medio de interfaces gráficas de usuario (GUI) y una biblioteca basada en Simulink provee una herramienta fácil de usar para el diseño de la red. Las principales características de PSAT son: flujo de potencia; Flujo de potencia de continuación; Flujo de potencia óptimo; Análisis de estabilidad de pequeña señal; Simulación de dominio de tiempo. Completa interfaz gráfica de usuario; Modelos de aerogenerador; Conversión de archivos de

datos de varios formatos; Exportar los resultados a la EPS, texto, Microsoft Excel y archivos de LaTeX; Interfaces a GAMS y programas de UWPFLOW; Uso de línea de comandos; y compatibilidad con GNU Octave [11].

- OpenDSS es una aplicación completa diseñada para ayudar a crear y simular sistemas de energía eléctrica. La utilidad fue diseñada para trabajar con la mayoría de los sistemas de planificación de distribución de energía, especialmente porque soporta la integración de recursos y las características de modernización de la red. El software fue desarrollado para proporcionar una plataforma de investigación muy flexible y una base para aplicaciones especiales de análisis de distribución como el análisis de la DG rellena huecos dejados por otras herramientas de análisis de sistemas de distribución. La herramienta OpenDSS, se ha utilizado desde 1997 en apoyo de varios proyectos de investigación y consultoría que requieren análisis de sistemas de distribución. Además está diseñada para ser indefinidamente ampliable, para que pueda ser modificada fácilmente y satisfacer las necesidades futuras [12].
- DigSilent con mas de 25 años de trayectoria, ha establecido estándares y tendencias en el modelado, análisis y simulación de sistemas de energía eléctrica. DigSilent PowerFactory es un software con grandes ventajas y muy probadas como son su integración funcional global, su aplicabilidad al modelado de las redes de generación, transmisión, distribución e industrial, y el análisis de las interacciones de estas redes. DigSilent PowerFactory es una solución económica, ya que el manejo de datos, las capacidades de modelado y la funcionalidad general, reemplazan un conjunto de otros sistemas de software, minimizando así los costos de ejecución del proyecto. Se trata de un Software fácil de usar y que satisface todas las necesidades de análisis de sistemas de potencia estándar, incluyendo aplicaciones de gama alta en nuevas tecnologías como la energía eólica y la DG y el manejo de sistemas de energía muy grandes. Además, se puede integrar en GIS, DMS y EMS que soportan estándares de sistemas abiertos [13].

- Otra de estas herramientas es Matlab-Simulink, que nos permite mediante programación, simular el comportamiento de cada uno de los componentes que integran la Micro Grid mediante lenguaje m (propio de Matlab), lenguaje C o Scripts de Java, sumando a esto un modulo que a través de modelos hace el proceso de simulación mucho mas fácil y potente, nos referimos a Simulink que nos ofrece un editor gráfico, bibliotecas de bloques personalizables y solvers para modelar y simular sistemas dinámicos. Se integra con Matlab, lo que permite incorporar algoritmos de Matlab en los modelos y exportar los resultados de la simulación a Matlab para llevar a cabo más análisis[14].

El hecho de que Matlab sea desde sus fundamentos y como su nombre indica (*MA-Trix LABORatory*), Laboratorio de Matrices, nos ofrece la herramienta adecuada para el tratamiento de los datos iniciales de este proyecto.

También el papel de Simulink es importante y fundamental para este trabajo, ofreciendonos un entorno gráfico imprescindible para el tratamiento de la información proporcionada por Matlab. Podemos considerar a Simulink como una extensión u un anexo de Matlab, consiguiendo de este modo un perfecto complemento para el tratamiento de sistemas dinámicos.

Estas características nos ofrecen unas ventajas muy interesantes para la simulación de las Microgrids que se proponen en este trabajo por lo que esta será la herramienta que vamos a utilizar para su desarrollo.

Capítulo 3

Modelos Simulink para Recursos Energéticos

La herramienta que se utilizara en este proyecto, para la simulación de las Microgrids es Matlab-Simulink y antes de abordar el propósito de este capítulo, se cree conveniente hacer una breve introducción a la misma. Matlab-Simulink, nos permite mediante programación, simular el comportamiento de cada uno de los componentes que integran la Microgrid, mediante lenguaje m (propio de Matlab), lenguaje C o Scripts de Java, sumando a esto un módulo que a través de modelos hace el proceso de simulación mucho más fácil y potente, nos referimos a Simulink que cuenta con módulos ya programados que simulan elementos integrantes de la red. Además permite el desarrollo de módulos propios en caso de que sea necesario.

Se muestra un visión general del entorno de trabajo en la figura 3.1 en la que se han numerado una serie de zonas para una mejor diferenciación de las mismas. Con el número 1 se ha señalado una zona del entorno de Matlab donde aparecen una serie de pestañas que despliegan todas las opciones del menú de Matlab. Con el número 2 se señala el editor donde se realiza la programación y gestión de los Scripts. En el punto 3 está el Workspace, espacio de trabajo donde básicamente se puede consultar el valor de las variables en uso en cada momento. En el número 4 se muestra el directorio en curso, que se puede cambiar

en cualquier momento con solo seleccionarlo. El número 5 muestra el Command Window, donde se pueden ejecutar órdenes y comandos en línea, además de actuar como pantalla de salida de resultados. y finalmente con el número 6 aparece superpuesta la pantalla de trabajo de Simulink, en la que se distingue básicamente el menú de opciones en la parte superior de la pantalla y el entorno de trabajo donde se componen los modelos de simulación.

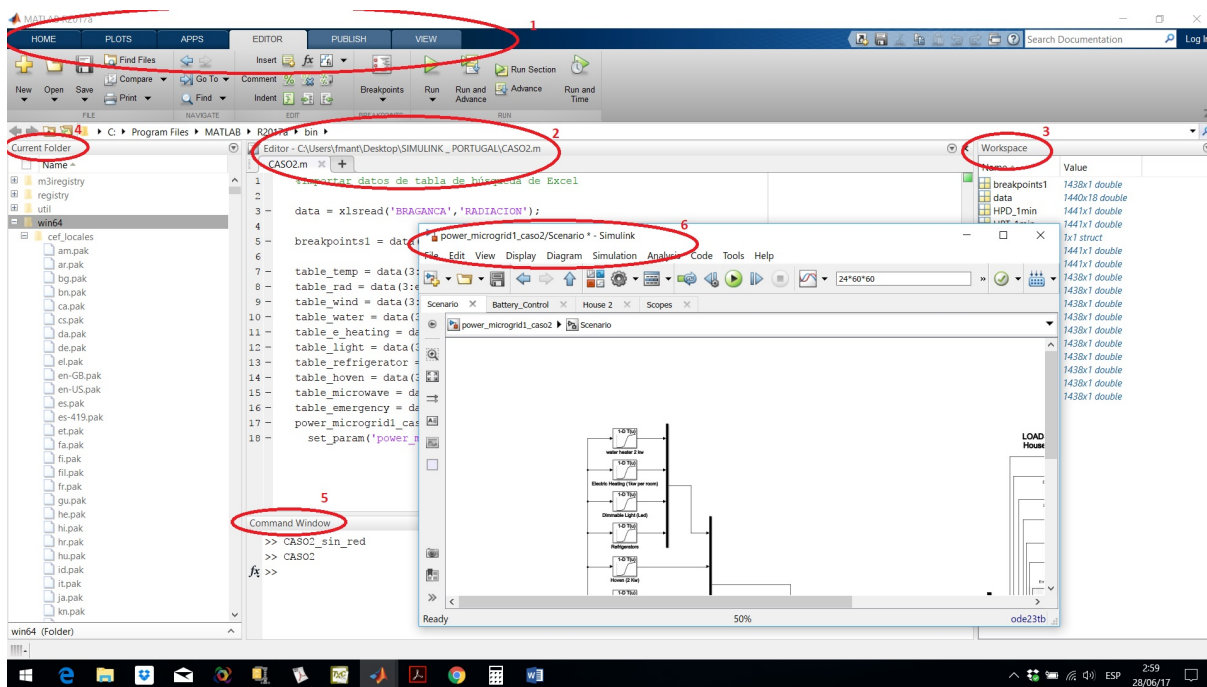


Figura 3.1: Entorno de trabajo de la herramienta de simulación Matlab-Simulink

Para abordar más adelante la simulación de los dos casos que incumben a este proyecto, empezaremos por realizar individualmente, modelos representativos de cada uno de los componentes de la Microgrid, que enumeramos a continuación. En este Capítulo, cada modelo Simulink está basado en un esquema genérico, para tener una referencia previa a la simulación de los dos casos previstos en este trabajo.

Tenemos como fuentes de generación las centrales fotovoltaicas y los microaerogeneradores, para la acumulación de energía eléctrica contamos con bloques de baterías estacionarias, de plomo ácido y también baterías de ion-litio, propias del VE. También

como parte de la Microgrid, contamos con las cargas o consumos de distinta índole, integrantes de cada vivienda, como son los distintos electrodomésticos, la iluminación o los calentadores de ACS y calefacción [1].

3.1. Central Fotovoltaica con Baterías

La central fotovoltaica con baterías es exactamente una fotovoltaica aislada que necesariamente para sincronizarse con la red pública necesita de un inversor/cargador que sea capaz de cargar las baterías haciendo la función de regulador de carga, y al mismo tiempo dar servicio a las cargas que lo requieran, convirtiendo la corriente continua (DC) de las baterías, en corriente alterna (AC) a 230V de tensión, en este caso haciendo las funciones de inversor.

En la Figura 3.2 se muestra un esquema típico de una fotovoltaica aislada, en nuestro caso el regulador y el inversor forman un solo elemento del tipo definido en el párrafo anterior como inversor/cargador.

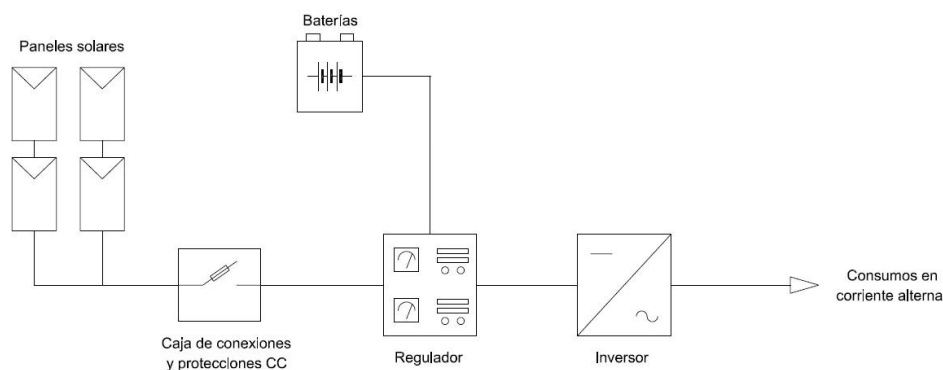


Figura 3.2: Esquema fotovoltaica aislada (genérico)

Para una mejor comprensión de este modelo, vamos a seguir paso a paso los cálculos necesarios para llegar a la potencia generada por este modelo fotovoltaico. La central fotovoltaica que se va a simular, parte de un campo módulos fotovoltaicos que convierten la radiación solar en energía eléctrica mediante el efecto fotovoltaico. En este caso simularemos módulos de silicio polycristalino pero el modelo genérico que aquí se estudia

podría ser de cualquier otra tecnología puesto que los cálculos servirían perfectamente. Primeramente se puede calcular el rendimiento del módulo sabiendo la potencia y las dimensiones del mismo. Se establece a y b como largo y ancho del módulo y Pp como potencia del módulo. También hay que contar con que 1 Hora de Sol Pico (HSP) equivale a 1000 W/m^2 de modo que mediante la fórmula 3.1 se calcula el rendimiento del módulo rp en tanto por ciento.

$$rp = \frac{Pp \times 100}{a \times b \times 1000} \quad (3.1)$$

Una aclaración importante que se ha de tener en cuenta, es que el aumento de la temperatura de las células, baja la tensión de la generación eléctrica del módulo y sube ligeramente la intensidad, pero el producto de estos dos parámetros que es la potencia, sale perjudicado por este aumento de temperatura, es decir con el aumento de temperatura de las células, baja la potencia generada por el módulo. Sabiendo esto el propósito ahora es saber cuánto baja la potencia por el aumento de temperatura y para eso, establecemos tc como temperatura de trabajo de la célula, y la calcularemos en función de la temperatura ambiente, que si conoceremos por las mediciones meteorológicas y se denominara $temp$, también denominamos $tonc$ como la temperatura de operación nominal de la célula, que es la temperatura que tendría la célula fotovoltaica, cuando la temperatura ambiente es de 25°C . Otro parámetro a tener en cuenta es el coeficiente de temperatura-potencia (tcp) que nos da el fabricante del módulo expresado en tanto por ciento y expresa en tanto por ciento en que disminuye la potencia, por cada $^\circ\text{C}$ que sube la temperatura de la célula. Entonces, la potencia generada por el módulo, que llamaremos P se calcula mediante la fórmula 3.2.

$$p = pi - \frac{(tc - 25) \times tcp \times pi}{100} \quad (3.2)$$

De donde faltaría por definir pi , que es la potencia ideal que generaría el módulo en condiciones estandar de prueba, o sea, a 25° de temperatura ambiente, o lo que es lo mismo a 46°C de temperatura de la célula. Este valor, nos lo proporciona la formula 3.3,

donde rad es la radiación solar en W/m^2 , rp es el rendimiento del módulo que se calculó antes, y spt es la superficie del campo fotovoltaico, que lo tenemos en la formula 3.4, donde np representa el número de módulos que componen el campo fotovoltaico.

$$pi = \frac{(rad \times rp \times spt)}{100} \quad (3.3)$$

$$spt = a \times b \times np \quad (3.4)$$

En la Figura 3.3, se muestra la simulación con módulos simulink donde se puede apreciar la central fotovoltaica, y el VE que para nuestro caso actúa a modo de bloque de baterías, eso sí, cuando dicho VE esté presente, siendo necesario establecer ese horario, es decir, el horario en que está conectado a nuestra microgrid. Para detallar más en profundidad la figura 3.3, se han numerado en color rojo 8 puntos que nos sirvan de referencia para explicar el funcionamiento de este modelo. Hay que reiterar que estos puntos marcados en color rojo, no pertenecen al modelo, sino que se han añadido para un mejor entendimiento de la explicación.

El punto 1, señala un módulo from de Simulink, que recibe el dato de la intensidad correspondiente a la potencia generada mediante simulación por la central fotovoltaica de 5 kWp, (este dato se consigue mediante programación a partir de datos reales).

El punto 2, señala el subsistema que muestra un seguidor solar, y que se encarga de inyectar la corriente recibida, en la red física simulada, esta inyección se produce en el 7.

El punto 3, señala un subsistema, que recibe la tensión (v) y la intensidad (I) y que funciona simulando un regulador de carga, además también recibe un control, que consiste en un cero (0) que significa que la batería no está operativa, o un uno (1) que significa que si esta operativa. Este control, se genera en el grupo de módulos marcados con el punto 5. De este modo, con estos 3 datos que recibe el subsistema marcado con el número 3 se encarga de generar la I_RMS que se corresponde a la salida de ese subsistema y que es la intensidad a la que opera la batería y de la que podemos calcular la energía cedida o absorbida por dicha batería y el SOC de la misma. Siguiendo con el recorrido

la salida del módulo marcado con el número 3 se le pasa la I_RMS al subsistema marcado con el número 6 que es el que se encarga de inyectar este valor en la red física, en el punto 8.

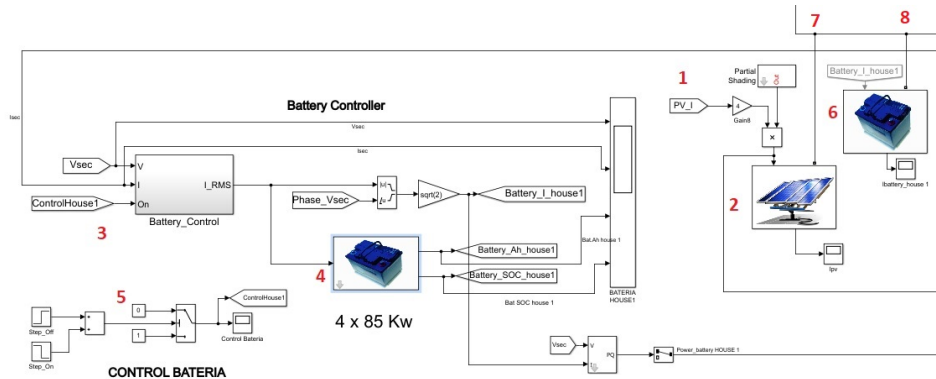


Figura 3.3: Esquema fotovoltaica aislada (Simulink)

3.2. Central Fotovoltaica de Conexión a Red

La central fotovoltaica de conexión a red, consta del campo fotovoltaico y de un inversor del tipo de los conexión a red, que se encarga de leer la red de alterna a la que está conectado y de inyectar en ella la energía del campo fotovoltaico, convirtiéndola previamente la DC que le llega a su entrada, a AC, con las características eléctricas de la red de alterna donde la va a inyectar y que ha leído previamente como hemos dicho. En la Figura 3.4, se muestra un esquema genérico de una instalación de este tipo; el doble sentido de la corriente entre la red y el inversor es debido a que para el consumo interno del inversor, la energía se toma de la red. Como en el caso de la central fotovoltaica con baterías, en este tipo también se muestra un esquema de los módulos de simulink que componen la simulación.

En la Figura 3.5, se muestra esta simulación con módulos simulink donde se puede apreciar la central fotovoltaica, que recibe como entrada la intensidad del campo fotovoltaico, PV_I , previamente calculado en función de la radiación y la temperatura incidentes en la zona. Estos cálculos se llevan a cabo teniendo en cuenta las variables

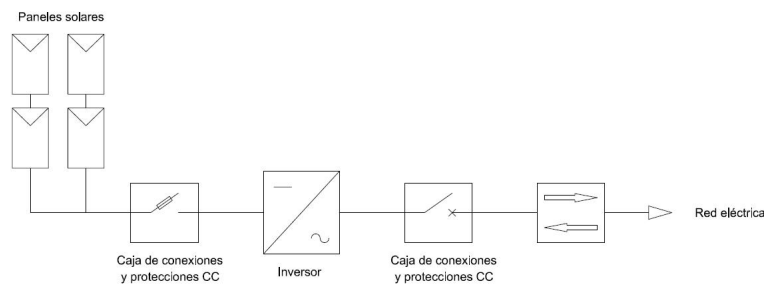


Figura 3.4: Esquema fotovoltáica de conexión a red (genérico)

relacionadas de la zona y con los datos propios de un módulo fotovoltáico en concreto. Para un seguimiento más detallado de los datos a través de este modelo, igual que en el anterior, hemos numerado en rojo, en este caso 5 puntos que nos servirán de apoyo en la explicación.

El punto 1, señala un módulo "from" de Simulink, que recibe el dato de la intensidad correspondiente a la potencia generada mediante simulación por la central fotovoltáica de 5 kWp, (este dato se consigue mediante programación a partir de datos reales).

El punto 2, señala el subsistema que se encarga de generar cortes temporales programados, que simulan sombras sobre el campo fotovoltáico, en cuyo caso dejaría de generar energía.

El punto 3, señala el subsistema que muestra un seguidor solar y que se encarga de inyectar la corriente recibida del punto 1 y no cortada por el punto 2, en la red física simulada, esta inyección se produce en el punto 4.

3.3. Micro-Aerogenerador

Otra fuente de generación renovable, que forma parte de esta Microgrid, es la representada por los microaerogeneradores. Un microaerogenerador, consta de un generador eléctrico, que accionado por la energía cinética del viento y a través de una hélice, convierte esta en energía mecánica y en energía eléctrica, mediante un alternador. La palabra micro, limita la potencia hasta la que los fabricantes ponen en el mercado las microturbinas o microaerogeneradores, denominados indistintamente de ambas formas, No existe

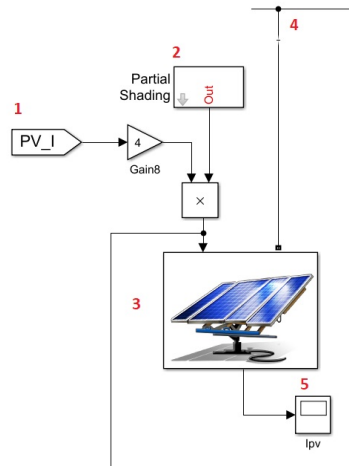


Figura 3.5: Esquema fotovoltaica de conexión a red (Simulink)

una barrera entre la microeólica y la minieólica. Se considera que la microeólica está formada por un único aerogenerador, el límite superior de la minieólica está como mucho, en los 100 kW de potencia[15]. La potencia que contiene el viento que atraviesa un aerogenerador, se calcula según la ecuación de la energía cinética (3.5). En esta ecuación interviene (σ) que es la densidad del aire, (A) que es el área del círculo que describen las palas del aero y (V) que es la velocidad del viento que atraviesa dicha área.

$$Pe = \frac{\sigma \times A \times V^3}{2} \quad (3.5)$$

En realidad la fracción de la energía del viento que una turbina convierte en la práctica en energía mecánica de rotación, se llama “coeficiente de potencia” CP de esa turbina. Del coeficiente de potencia, la ecuación de Betz proporciona el límite superior de las posibilidades de un aerogenerador, pero no tiene en cuenta una serie de factores como: La resistencia aerodinámica de las palas, La pérdida de energía por la estela generada en la rotación, la compresibilidad del fluido o la interferencia de las palas. Además, habrá que tener en cuenta el rendimiento de los diversos mecanismos que componen el aerogenerador, por lo que considerando el siguiente balance para los distintos componentes:

- Rendimiento de Betz: 59,3%

- Rendimiento de la hélice: 85 %
- Rendimiento del multiplicador: 98 %
- Rendimiento del alternador: 95 %
- Rendimiento del transformador: 98 %

se obtiene un rendimiento global de la instalación del orden del 46 % para aplicar como C_p en la ecuación (3.6)

$$P_t = C_p \times P_e = \frac{C_p \times \sigma \times A \times V^3}{2} \quad (3.6)$$

El esquema genérico que representa una instalación de estas características, se representa en la Figura 3.6, la corriente generada por la microturbina ha de ser rectificadada y luego invertida a corriente alterna para inyectar en la red.

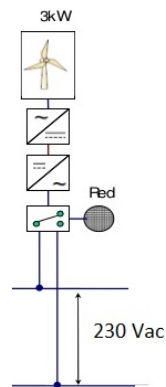


Figura 3.6: Esquema del micro aerogenerador (Genérico)

En la figura 3.7 se representa el modelo en Simulink de la central eólica y para un seguimiento mas detallado de los datos a través de este modelo, igual que en los anteriores, hemos numerado en rojo, en este caso 5 puntos que nos servirán de apoyo en la explicación.

El punto 1, señala un módulo "from" de Simulink que recibe el dato de la intensidad correspondiente a la potencia generada mediante simulación por el aerogenerador de 3 kw nominales. (este dato se consigue mediante programación a partir de datos reales). El punto 2, señala el subsistema que se encarga de generar cortes temporales programados,

que simulan paradas del aerogenerador por motivos de mantenimiento o similares, en cuyo caso dejaría de generar energía. El punto 3, señala el subsistema que muestra el dibujo de un aerogenerador, este subsistema, se encarga de inyectar la corriente recibida del punto 1, y no cortada por el punto 4, en la red física simulada, esta inyección se produce en el punto 6.

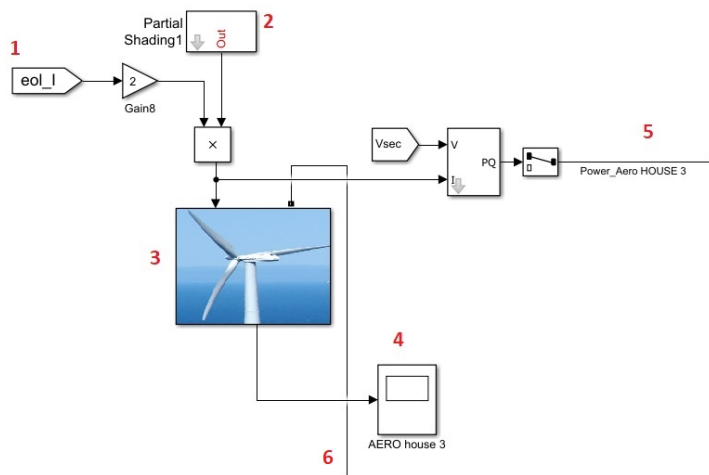


Figura 3.7: Esquema del micro aerogenerador (Simulink)

El punto 5, es una salida hacia una pantalla de resultados, que tomando la intensidad de la potencia generada y después de haberla tratado junto con la tensión de la línea en un bloque Active & reactive Power, ofrece en su salida, la potencia producida por el aerogenerador. El punto 4, es un bloque del tipo Scope que grafica la intensidad tratada en el subsistema del punto 3.

3.4. Banco de Baterías

Un banco de baterías ligado a la red AC de la vivienda, funciona a modo de Backup, por lo que su funcionamiento consiste en acumular energía cuando sobra de alimentar a las cargas y proporcionarla en los momento de carencia o fallo. Así pues, con independencia del motivo de la carencia o fallo, un backup energético hace más seguro y sostenible el

sistema. Para realizar esta función, el banco de baterías ha de contar con un cargador de baterías, que realiza la función de carga o acumulación de energía y un inversor que transforma la energía de las baterías DC en AC para inyectarla en la red de consumo con las mismas características eléctricas de dicha red. Un esquema genérico del banco de baterías con su interface para ligar a la red de consumo, se representa en la Figura 3.8.

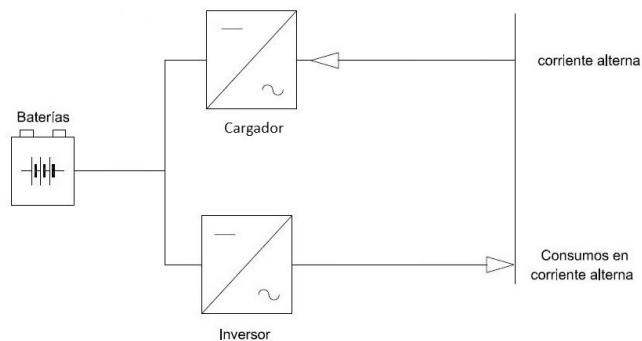


Figura 3.8: Esquema de acumulación en baterías (Genérico)

El modelo en Simulink se representa en la Figura 3.9.

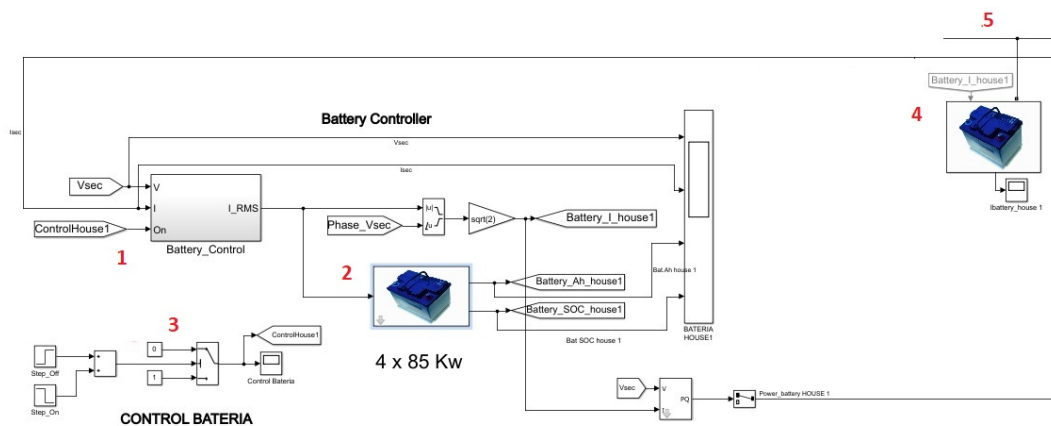


Figura 3.9: Esquema de acumulación en baterías (Simulink)

Para detallar más en profundidad la figura 3.3, se han numerado en color rojo 5 puntos que nos servirán de referencia para explicar el funcionamiento de este modelo.

El punto 1, señala un subsistema que recibe la tensión (v) y la intensidad (I), que

funciona simulando un regulador de carga y además recibe un control del tipo (0/1), donde cero (0) significa que la batería no está operativa y uno (1) que si esta operaaíva. Este control, se genera en el grupo de módulos marcados con el punto 3. De este modo, con estos 3 datos que recibe, el subsistema marcado con el número 1 se encarga de generar la I_RMS, que se corresponde a la salida de ese subsistema y que es la intensidad a la que opera la batería, mediante esta salida, se puede calcular la energía cedida o absorbida por la batería y el SOC de la misma. Esto se realiza en el módulo marcado con el número 2. Siguiendo con el recorrido de la salida del módulo marcado con el número 1 se le pasa la I_RMS al subsistema marcado con el número 4 que es el que se encarga de inyectar la corriente en la red física en el punto 5.

3.5. Cargas o consumos

Los consumos que se tendrán en cuenta en los casos previstos para este trabajo, pertenecen a viviendas unifamiliares y se componen de 7 cargas AC de distinta intensidad, que trabajan a la misma tensión y cuentan con distintos horarios de consumo a lo largo del día. El esquema genérico es el correspondiente a una vivienda unifamiliar al uso y lo tenemos representado en la Figura 3.10.

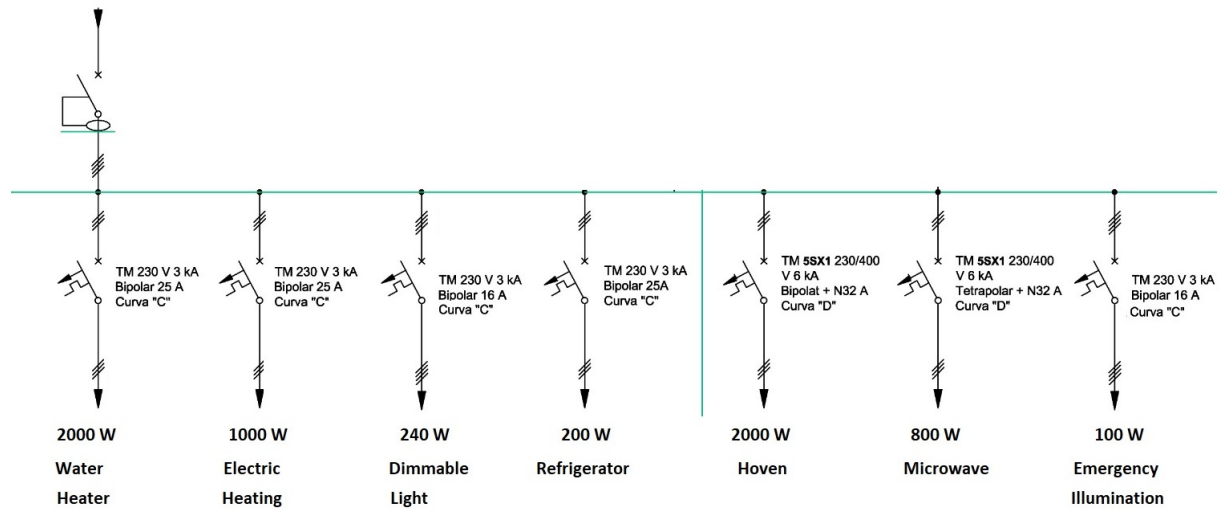


Figura 3.10: Esquema de cargas o consumos (Genérico)

La representación del modelo en Simulink, junto con el detalle de las 7 cargas por separado, se representan en la Figura 3.11. En esta misma figura, se detalla en la esquina inferior-derecha, la figura que distingue el subsistema que representa a cada uno de los 4 tipos de viviendas, que según el caso puede representar a una o varias de ese mismo tipo. En este detalle de la figura del modelo, Se aprecian las 7 entradas por la parte superior, mediante módulos de Simulink, que en este caso se corresponden con módulos del tipo *From* que reciben sus datos del subsistema *Escenario*.

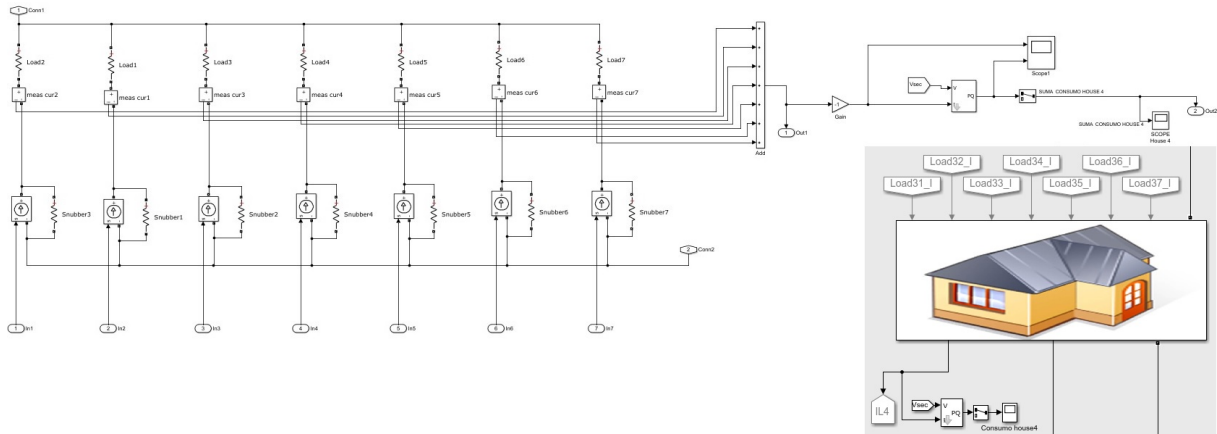


Figura 3.11: Esquema de módulos Simulink representando las cargas de una vivienda (Simulink)

Cada una de las cargas que intervienen en el consumo de una vivienda, es de tipo resistivo, cumpliendo perfectamente con el objetivo de este trabajo. Si las numeramos por el orden de aparición en la figura 3.10, se verían como en el cuadro 3.1.

Cuadro 3.1: Relación de cargas que componen el consumo de una vivienda tipo

n ^o	Consumos*
1	Calentador de agua
2	Calefacción eléctrica
3	Iluminación
4	Refrigerador
5	Horno
6	Microondas
7	Iluminación de emergencia

Capítulo 4

Implementación de Modelos de Microgrid en - Simulink

En este capítulo, se describen con detalle las relaciones entre los distintos modelos relacionados y descritos en el capítulo 3. Estas relaciones, son las que basándose en los modelos creados, en el número de elementos de cada uno de ellos y en los datos de partida que requieren para su funcionamiento, dan singularidad a cada caso. Para la implementación de los modelos para recursos energéticos del capítulo 3, será necesario contar con otros módulos de Simulink que ayuden en la implementación, además ha de tenerse en cuenta que estos modelos se implementa en varias partes del sistema, por lo que no coincidirán exactamente los puntos de este capítulo con los del capítulo 3, aunque se trate de la implementación de los modelos allí creados. Para una mejor comprensión del modelo de simulación, se muestra un esquema general en la figura B.1 en el Apendice B.5

Cuadro 4.1: Relación de entradas y salidas de los modelos comunes a los dos casos

Modelo	Potencia	Inputs	Ouputs
PV	5 kW	rad. (W/m ²), Temp.amb.°C	Prod. en kW
Aero	3 kW	vel. del viento (m/seg)	Prod. en kW
Batería	138 kWh	Pot. sobrante de la red	Cap. libre
Vehículo eléctrico	85 kWh	Pot. sobrante, carga programada	Cap. libre
Consumos*	variable	temperatura, horario	val. de demanda

Cuadro 4.2: Potencia y horarios de las cargas del consumo de cada tipo de vivienda

Consumos*	Potencia	Horario
Calentador de agua	2000 w	10 min. cada 2h
Calefacción eléctrica	1000 w	mañana y noche
Iluminación	240 w	mañana y noche
Refrigerador	200 w	30 min. cada hora
Horno	2000 w	aleatorio
Microondas	800 w	aleatorio
Iluminación de emergencia	100 w	permanente

Los datos de partida para cada modelo, que después trataremos por separado y en detalle, se relacionan en los cuadros 4.1 y 4.2 y son comunes a los dos casos que vamos a simular y que de ahora en adelante llamaremos CASO 1 y CASO 2.

4.1. Implementación del Caso de Estudio (CASO 1)

Partiendo de las indicaciones de la propuesta original para el CASO 1 enumeradas en el cuadro 4.3, en este capítulo dedicado a la implementación de los casos de estudio propuestos, se comienza por el CASO 1 que cuenta con una referencia a cada uno de los modelos con los que se va a trabajar en este proyecto, de modo que nos abrirá el camino para que la implementación del CASO 2 resulte mucho más fácil, como veremos en su momento.

Cuadro 4.3: Componentes propuesto para la simulación del CASO 1

nº de unidades	denominación
1	vivienda sin acumulación en baterías y sin generación
1	vivienda sin acumulacion en baterías, con 1 PV y con 1 VE
1	vivienda con 1 banco de baterías
1	vivienda con 1 eólica
1	instalación aislada común con 1 PV, 1 eólica y 1 banco de baterías

El primer paso para llegar a simular una Microgrid, es conseguir los datos de entrada de cada modelo que participa en la simulación y a continuación aplicarlos al modelo o modelos a implementar según las indicaciones de la propuesta original del proyecto, en este caso relacionados en el cuadro 4.4.

Cuadro 4.4: Potencia, nº de elemento de cada modelo y su ubicación para el CASO 1

Modelo	Potencia	Nº de elementos	ubicación
Instalación fotovoltaica (PV)	5 kW	1	Común
PV	5 kW	1	House 1
Aero	3 kW	1	Común
Aero	3 kW	1	House 3
Batería	138 kWh	1	Común
Batería	138 kWh	1	House 2
Vehículo eléctrico	85 kWh	1	House 1
Consumos*	variable	1	House 1
Consumos*	variable	1	House 2
Consumos*	variable	1	House 3
Consumos*	variable	1	House 4

4.1.1. Implementación de la central fotovoltaica al modelo Simulink

Los datos de entrada (Inputs), que se necesitan para la central PV según los cuadros que encabezan este capítulo, son los datos referentes a la radiación solar y la temperatura ambiente, para lo cual de antemano debemos fijar un día concreto y una zona con unas coordenadas geográficas también concretas. En este caso hemos seleccionado para nuestra simulación el día 1 de febrero de 2004 y la ciudad de Bragança, más concretamente la zona de la estación: latitude (positive means North): 41.800 y longitude (positive means East): -6.769. Los datos de radiación solar, se han localizado mediante la herramienta o programa *HelioClim – 3* [16] ofrecido entre los servicios de la web de *SoDa* y la temperatura ambiente también se ha localizado en otra herramienta de esta web que relaciona los datos meteorológicos y que se llama *MERRA2* [17]. Estas dos herramientas utilizadas, ofrecen la posibilidad de exportar los datos seleccionados en un fichero de texto y que posteriormente se han incluido en una hoja Excel (Apéndice B.1), junto con los demás datos de entrada (Inputs) del resto de modelos que los precisan y que se detallarán en los próximos puntos de este capítulo.

En el caso de la central fotovoltaica representada en la figura 4.1, los datos que entran en el sistema desde el WorkSpace y a través de dos módulos Lookup Table (n-D), son los de

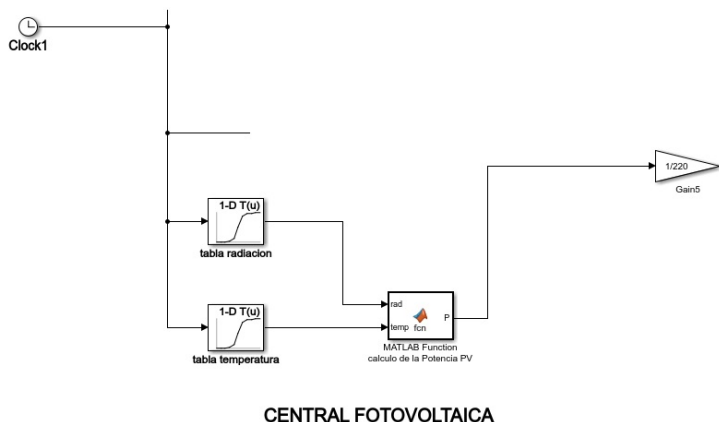


Figura 4.1: Modelo de central fotovoltaica ESCENARIO

radiación que viene dado en W/m^2 y los de temperatura ambiente en grados centígrados. La función fcn de Matlab, cuyo código se muestra en el *Listing 4.1*, calcula la producción fotovoltaica en base a la radiación del lugar por el rendimiento del módulo fotovoltaico.

Listing 4.1: Función de cálculo para central fotovoltaica

```

1 function P = fcn(rad, temp)
2 % Calculos para 5 kWp (20 modulos.250wp) de Solarworld % ...
   P=potencia(kW) % I=Intensidad (Amp.) % rad=radiacion (W/m2) % ...
   temp=temperatura ambiente
3 np=20; % np = numero de paneles fotovoltaicos de la instalacion
4 a=1.675; % a = longitud del panel fotovoltaico en metros
5 b=1.001; % b = ancho del panel fotovoltaico en metros
6 pp=250; % pp = potencia del panel fotovoltaico en wp
7 tcp=0.34; % tcp = coeficiente de temperatura - potencia
8 tonc=46; % tonc = temperatura de operacion nominal de la celula
9 % rp = rendimiento del panel en %
10 % pi = potencia fotovoltaica instantanea generada ideal (sin contar ...
   con la
11 % temperatura de la celula % P = potencia fotovoltaica instantanea ...
   generada final
12 rp = (pp/(a*b))*100/1000;
13 spvt=np*a*b;

```

```
14 tc=temp+rad*((tonc-20)/800); % temperatura de trabajo de la celula
15 pi=(rad*rp/100)*spvt;
16 P=pi-(((tc-25)*tcp/100)*pi);
```

El módulo fotovoltaico elegido, es un modelo SW250Poly de silíceo policristalino, de la empresa Solarworld, cuyas características eléctricas y físicas se pueden ver en el (Apéndice B.2).

4.1.2. Implementación de la central eólica al modelo Simulink

Los datos de entrada (Inputs) que se necesitan para la central eólica según se relaciona en los cuadros que encabezan este capítulo, son los datos referentes a la velocidad del viento en la misma zona geográfica del punto anterior, correspondiente a la ciudad de Bragança. Estos datos también se han localizado mediante la herramienta *HelioClim* – 3 [16] y también se han añadido a la hoja Excel (Apéndice B.1). Aprovecho este punto para explicar que la hoja Excel así confeccionada servirá de base para trasladar sus datos a los respectivos vectores de Matlab y que localizaremos en el Workspace, según se puede apreciar en la figura 3.1, marcado con el numero 3, de esta manera, estos datos estarán a disposición de Simulink y podrán ser utilizados, para calcular los valores iniciales que necesitan algunos de los modelos de la simulación para iniciar la misma. En un punto posterior, se mostrará más en detalle el código referido y que se utiliza para hacer este traspaso de datos.

Del mismo modo que se trataron los datos de la PV, se tratan los datos de velocidad del viento que llegan desde el Workspace en m/seg. para la central eólica cuyo modelo podemos ver en la figura 4.2. A través de un módulo Lookup Table (n-D) se leen estos datos del Workspace y que posteriormente se utilizan para calcular la potencia eólica generada por esta central, mediante una función *fcn* de Matlab cuyo código se muestra seguidamente en el *Listing 4.2*

Listing 4.2: Función de cálculo para central eólica

```

1 function Pe = fcn(vel)
2 % Pe = potencia en kW
3 % vel = velocidad del viento
4 ro = 1.185;
5 % ro = densidad del aire Kg/m3 ( a 25 °c y 1 atm.)
6 r=20; % r = longitud de la pala
7 % s = superficie barrida por la pala
8 cp = 0.46; % Coeficiente de Potencia
9 s = pi*r^2;
10 Pe=(0.5*ro*s*vel^3)*cp/1000;

```

Para realizar los cálculos, esta función tiene como variable de entrada la velocidad del viento y como variable de salida la potencia eólica generada. Para realizar los cálculos, cuenta con la velocidad del viento, la longitud de la pala del aerogenerador (para calcular el área del círculo que describe la pala), y el coeficiente de potencia del aerogenerador que toma el valor 0.46.

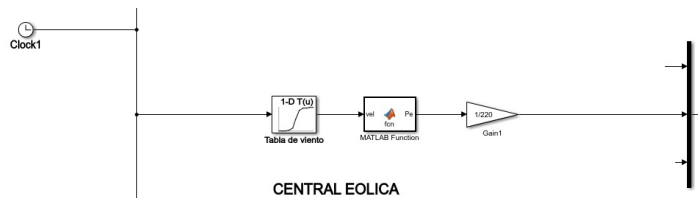


Figura 4.2: Modelo de central eólica ESCENARIO

4.1.3. Implementación del sistema de almacenamiento al modelo Simulink

El sistema de almacenamiento está compuesto por baterías, estas pueden ser de distintos materiales dependiendo de la aplicación a la que serán destinadas durante su vida útil. Dependiendo de los materiales que las componen, varían las características de carga y descarga, pero en este trabajo es posible considerar baterías de cualquier tipo, puesto que lo que se analiza es el comportamiento en el balance de energía, tensiones e intensidades

de la microgrid, trabajando bajo condiciones específicas. A pesar de esto, se considera que las baterías estacionarias serán del tipo de plomo-ácido, de placa tubular y en el formato, de vasos de 2 voltios, debido a las capacidades que se necesitan. Otro de los acumuladores que entran a formar parte del consumo, es el perteneciente a un VE, de modo que este tipo de acumulador, es del tipo de Ión-Litio y en este caso de 85 kWh. En la figura 4.3, se muestra el modelo del sistema de control de la batería, (esquina inferior izquierda), los dos bloques Step de Simulink, controlan la hora en que la batería deja de estar disponible en el sistema y la hora en que vuelve a ser operativa. Esto es útil para la batería que simula el VE, que deja de estar disponible para el sistema cuando se va al trabajo y hasta que regresa a la noche no vuelve a estar disponible. El módulo Goto de Simulink, que se aprecia como resultado de salida en el mismo modelo, envía un cero (0) o un uno (1) al modelo de la batería para activar o desactivar su funcionamiento, o sea, su presencia como elemento de la Microgrid. En cuanto a la capacidad que se usa para la batería del VE, se ha tomado como referencia, la de un *Tesla Model S SIGNATURE PERFORMANCE 85 kWh* que cuenta con 85kWh de energía en su batería.[18]

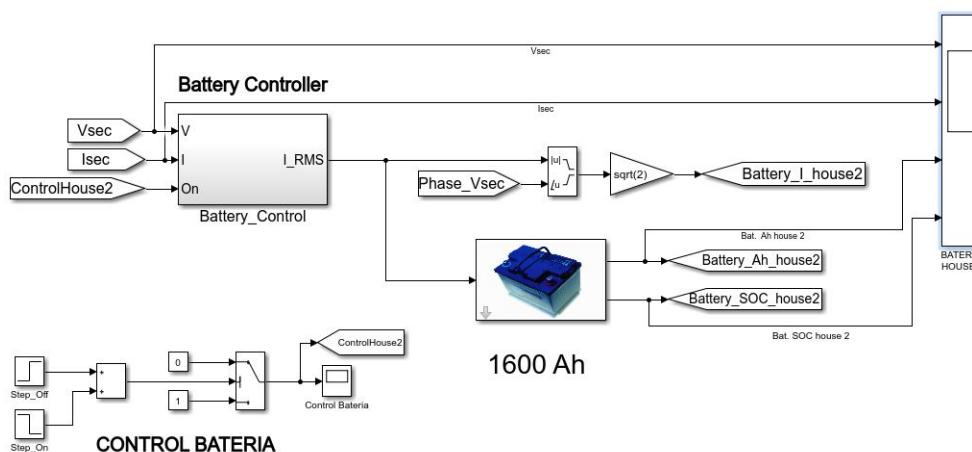


Figura 4.3: Modelo de la batería

4.1.4. Implementación de los datos de consumo al modelo Simulink

Para simular el consumo de cada vivienda, se opta por relacionar 7 cargas tipo distintas que simulan el funcionamiento habitual de una vivienda unifamiliar y que se enumeran en el cuadro 4.5, con sus potencias de consumo correspondientes.

Cuadro 4.5: Cargas que componen el consumo de una vivienda tipo

nº de carga	denominación	potencia
1	Calentador de agua	2000 W
2	Calefacción eléctrica	1000 W
3	Iluminación	240 W
4	Refrigerador	200 W
5	Horno	2000 W
6	Microondas	800 W
7	Iluminación de emergencia	100 W

En principio para este trabajo, los consumos de las viviendas que intervienen en cada caso simulado, van a ser iguales para todas las casas siendo este a priori uno de los peores escenarios que se nos puede ocurrir, aunque en la realidad es muy difícil por no decir imposible, que los consumos de todas las casas se conecten y desconecten al mismo tiempo. De esta forma, se define cada carga con su potencia asociada y mediante un cuadro los valores a intervalos de 1 minuto la opción de conectada o desconectada, en definitiva, 1440 valores para cada una de las 7 cargas que indican a cada minuto si está consumiendo o no. Estos valores así relacionados, son añadidos a la hoja Excel junto con el resto de variables que hemos mencionado en los puntos anteriores y que se pueden consultar en el Apéndice B.1 .

En el modelo de consumos aparecen 7 entradas que comienzan cada una de ellas con un módulo Lookup Table (n-D) de Simulink, que lee los datos del Workspace para incorporarlos al modelo de simulación y poder operar con ellos, datos que previamente y como hemos explicado en el punto Incorporación de los datos reales al sistema de simulación se han leído de la hoja Excel ya mencionada. Estos cuadros contienen los Breakpoints a intervalos de 1 minuto durante 24h, dando lugar a 1440 puntos a los cuales

van asociadas las potencias instantáneas que en ese momento intervienen en el consumo de esa carga. Tenemos un detalle en la figura 4.4. Usando un bloque de Simulink denominado MUX, se combinan los consumos programados por separado del resto, por si en el futuro fuese necesario usarlos de ese modo y mediante otro bloque MUX se combina el anterior con los demás consumos quedando así una sola señal de tipo vectorial a la que se le da el signo negativo, multiplicándola por -1 y poder combinarla directamente con la generación de renovables, de las centrales eólica y fotovoltaica, que llevan signo positivo.

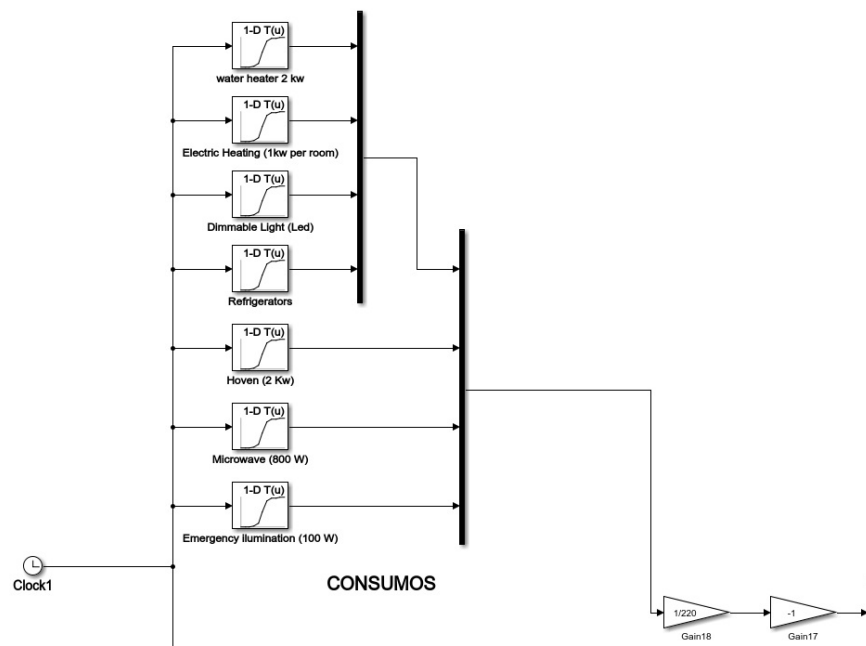


Figura 4.4: Modelo de consumos ESCENARIO

4.1.5. Flujo de datos a través del modelo de simulación

Incorporación de los datos reales al modelo de simulación

Con los datos reales de radiación, temperatura ambiente, velocidad del viento y horarios de cada una de las cargas tipo de las viviendas, el siguiente paso, es enviar estos datos al Workspace, para que Matlab y Simulink puedan operar con ellos, para esto hemos realizado un código en lenguaje m propio de Matlab, que lee la hoja Excel que contiene

los datos a intervalos de 1 minuto y a lo largo de 24h y los incorpora al modelo, como variables de tipo vector, que añade al Workspace. El Workspace es un almacén de Matlab, accesible desde Simulink y se puede distinguir, señalado en la esquina superior derecha de la figura 3.1. El código que se encarga de este proceso se puede ver a continuación como *Listing 4.3*.

Listing 4.3: Paso de variables al Workspace

```

1  % Importar datos de de búsqueda de Excel
2  data = xlsread('BRAGANCA', 'RADIACION');
3  breakpoints1 = data(3:end,1)*60;
4  table_temp = data(3:end,2);
5  table_rad = data(3:end,3);
6  table_wind = data(3:end,4);
7  table_water = data(3:end,6);
8  table_e_heating = data(3:end,7);
9  table_light = data(3:end,8);
10 table_refrigerator = data(3:end,9);
11 table_hoven = data(3:end,10);
12 table_microwave = data(3:end,11);
13 table_emergency = data(3:end,12);
14 power_microgrid_casol
15 set_param('power_microgrid1_casol', 'AlgebraicLoopSolver', 'LineSearch')

```

Implementación de modelos al subsistema Escenario

Al subsistema escenario se implementan las fuentes de generación renovable, las cargas de consumo y el control de los bloques de almacenamiento común (Baterías), que generan una serie de salidas mediante las cuales este subsistema se comunica con el resto del sistema, transpasando estos valores a cada una de las cargas, de cada una de las viviendas que intervienen en la simulación de este caso, también del mismo modo, transfiere los valores de la corriente a la central eólica de la instalación común y a la fotovoltaica de esa

misma instalación.

La función de este subsistema, como es habitual en Simulink cuando el modelo adquiere una cierta envergadura, es la de simplificar la visión de cada una de las partes implementadas. En este subsistema que se trata y que se ha denominado Escenario, se incluyen las partes comunes a toda la simulación, no estando presentes los controles de los sistemas de almacenamiento, o baterías propias de cada vivienda, o los Vehículos eléctricos, también propios de cada vivienda, ya que su implementación en este subsistema lo haría demasiado grande y difícil de manejar visualmente, por lo tanto se ha optado por implementar estos modelos, en cada una de sus ubicaciones físicas correspondientes.

Una vista general del subsistema ESCENARIO lo podemos ver en la figura 4.5

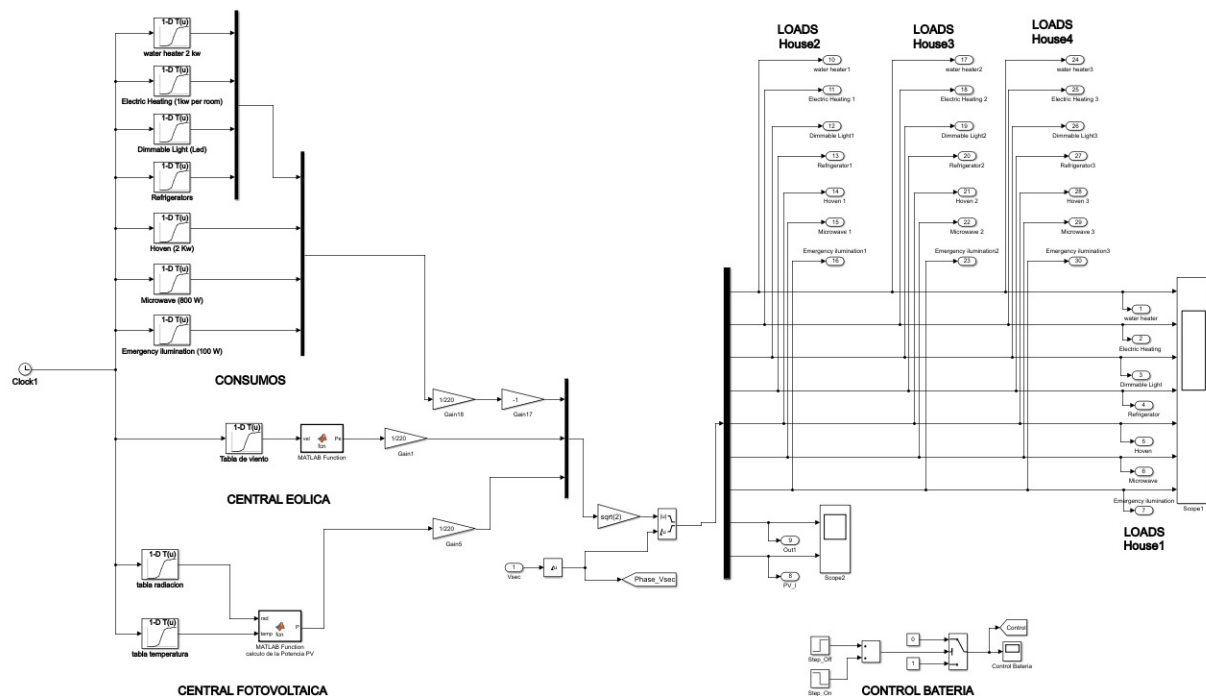


Figura 4.5: Composición de modelos del subsistema ESCENARIO

Traspaso de valores de consumo y producción al modelo físico

Una vez calculados los valores de la producción de las centrales eólica y fotovoltaica se combinan estos con los consumos que vienen con signo negativo según se ha detallado anteriormente. Del resultado de esta combinación se resuelve para convertir todo en una señal compleja (a través de un módulo de Simulink denominado Magnitud-Angle to Complex), finalmente a través de un módulo DEMUX, se extraen los componentes de la señal de entrada y se envían como señales independientes al modelo de conexiones físicas a través de módulos Outport de Simulink. A través de módulos Outport se envía la señal de cada una de las 7 cargas a cada uno de los 4 tipos de casas que se plantean en este trabajo y también se envían del mismo modo, a través de módulos Outport a las centrales eólica y fotovoltaica, los resultados de las instalaciones tipo del aerogenerador de 3kW y la fotovoltaica de 5kW. Todo esto puede apreciarse en la figura 4.6.

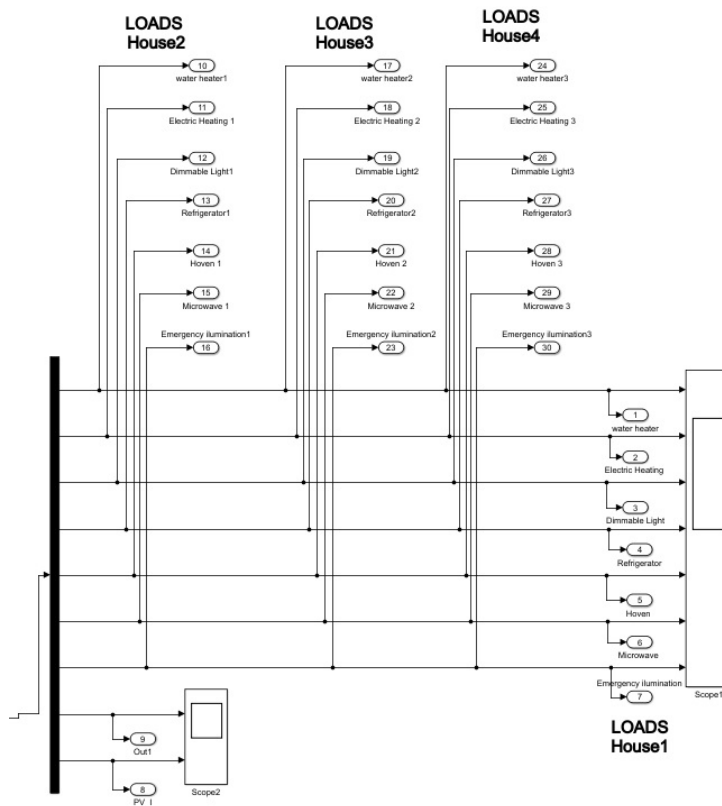


Figura 4.6: Modelo de resultados y salida de datos del ESCENARIO

4.2. Implementación del Caso de Estudio (CASO 2)

Partiendo de las indicaciones de la propuesta original para el CASO 1 enumeradas en el cuadro 4.6, corresponde implementar ahora el caso de estudio perteneciente al CASO 2 que como se ha dicho y veremos ahora, nos resultará mucho más fácil después de haber implementado el CASO 1, puesto que ya se cuenta con cada uno de los elementos necesarios implementados en la simulación.

Cuadro 4.6: Componentes propuestos para la simulación del CASO 2

nº de unidades	denominación
15	vivienda sin acumulación en baterías y sin generación
4	vivienda sin acumulacion en baterías, con PV1 PV y con 1 VE
1	vivienda con 1 banco de baterías
2	vivienda con 1 eólica
1	instalación aislada común con 3 PV, 2 eólica y 1 banco de baterías

De igual manera que se hizo en el CASO 1, el primer paso para llegar a simular una Microgrid, es conseguir los datos de entrada de cada modelo que participa en la simulación y a continuación aplicarlos a los modelos a implementar según las indicaciones de la propuesta original del proyecto, en este caso relacionados en el cuadro 4.7.

Cuadro 4.7: Potencia, nº de elemento de cada modelo y su ubicación para el CASO 2

Modelo	Potencia	Nº de elementos	ubicación
PV	5 kW	3	Común
PV	5 kW	4	House 1
Aero	3 kW	2	Común
Aero	3 kW	2	House 3
Batería	138 kWh	1	Común
Batería	138 kWh	1	House 2
Vehículo eléctrico	85 kWh	1	House 1
Consumos*	variable	4	House 1
Consumos*	variable	2	House 2
Consumos*	variable	1	House 3
Consumos*	variable	15	House 4

La implementación de estos modelos al CASO 2 de la propuesta original del proyecto, se hace exactamente igual que en el CASO 1, debido a que las diferencias entre los dos casos se limitan a la cantidad de elementos que los conforman.

4.2.1. Implementación de la instalación común al modelo Simulink

La instalación aislada común a todas las viviendas en el CASO 1 está compuesta por 1 PV, 1 Aero y 1 batería y para el CASO 2 está compuesta por 3 PV, 2 Aero y 1 batería.

Para simular esta diferencia en el caso de la PV basta con multiplicar por 3 la entrada de datos procedente del subsistema Escenario a través del módulo de simulink Outport que se detalla en el punto 4.1.9 de este capítulo. Se puede hacer esto porque las 3 PV del CASO 2 son exactamente iguales a la PV del CASO1. De este modo, multiplicando su valor por 3, se evita tener que crear 3 modelos Simulink exactamente iguales. Para llevar a cabo esta multiplicación en el modelo Simulink, basta con añadir un módulo Gain, cuya

función es la de multiplicar su entrada por el valor que se le asigne, que en este caso será 3 y la salida de este módulo Gain, es el resultado de la mencionada multiplicación, de este modo, tal y como se detalla en la figura 4.7., basta con intercalar este módulo Gain, entre el valor de entrada de la corriente y el resto del modelo para que la entrada tenga el valor deseado, o sea, el valor que tiene el modelo unitario multiplicado por 3.

En el caso de la central eólica se haría lo mismo pero multiplicando por 2, puesto que en este caso, las 2 centrales eólicas del CASO 2 también son idénticas a la que aparece en el CASO 1.

En cuanto a la acumulación, como es igual en ambos caso, no sufre modificación alguna.

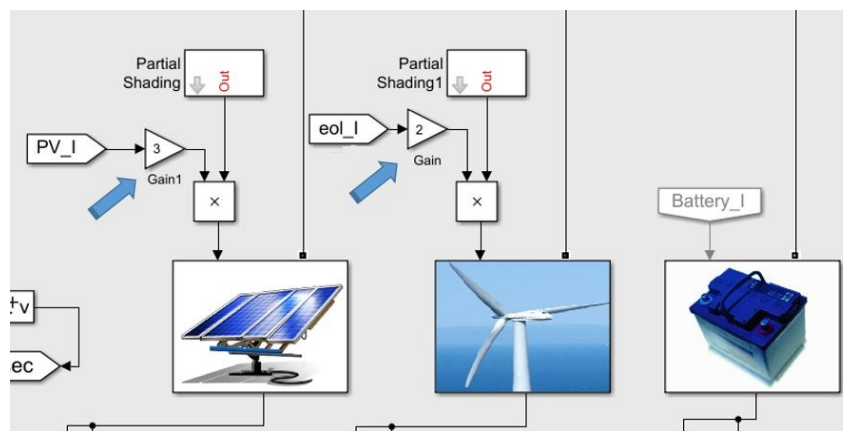


Figura 4.7: Implementación de modelos a la instalación común CASO 2

4.2.2. Implementación de los modelos de la House 1 al modelo Simulink

En el caso de la House 1 que representa al grupo de viviendas que cuentan con una PV y un VE además de las cargas, la diferencia entre el CASO 1 y el CASO 2 también está en el número de elementos, de modo que si en el CASO 1 se tienen 1 PV + 1 VE + 1x7 cargas y en el CASO 2 son 4 viviendas que sumarían 4 PV + 4 VE + 4x7 cargas, basta con multiplicar por 4 cada una de las entradas de datos procedentes del subsistema Escenario como en el caso anterior. Se detalla cómo se hace esta multiplicación en la figura 4.8. Del mismo modo que se hizo en el caso anterior de la instalación aislada, en

este caso también basta con intercalar un módulo Gain entre cada entrada procedente del subsistema escenario y el modelo. En el caso de las cargas, se pueden ver en la figura 4.8, las 7 flechas en línea que señalan los 7 módulos Gain que se han intercalado en el modelo, para multiplicar la entrada de las 7 cargas que componen el consumo, y así simular 4 viviendas (según propone el CASO 2) en lugar de 1 vivienda (que Propone el CASO 1). De esta forma, también aquí nos evitamos tener que crear 4 modelos exactamente iguales, para simular el consumo de 4 viviendas en lugar de una. En el caso de la glsPV, se actúa exactamente igual que en los consumos, intercalando el módulo Gain con valor 4, para simular 4 glsPV en lugar de una.

En cuanto a las baterías, en este CASO 2, para simular que son 4 bloques en lugar de 1 que tenía el CASO 1, lo que se hace es multiplicar por 4 su capacidad, este valor se encuentra como parámetro en el subsistema de la batería, que se distingue perfectamente en la figura 4.8 precisamente con el dibujo de una batería. También para que se sepa, sin entrar en sus parámetros, se cambia este valor en la etiqueta del subsistema, tal y como se aprecia y señala la flecha correspondiente.

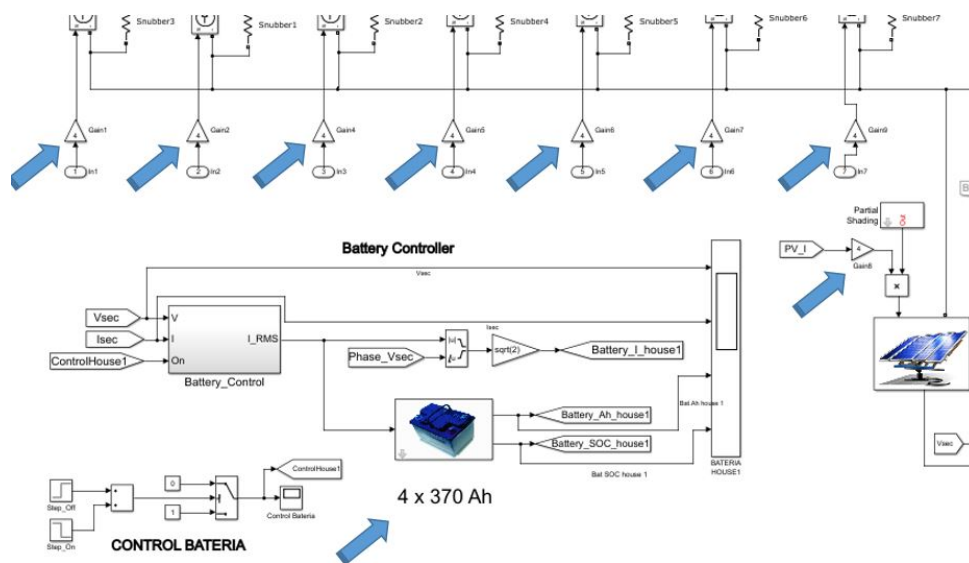


Figura 4.8: Implementación de modelos a la House 1 del CASO 2

4.2.3. Implementación de los modelos de la House 2 al modelo Simulink

En el caso de la House 2 que representa al grupo de viviendas que cuentan con una 1 Bat. además de las cargas, la diferencia también está en el número de elementos, de modo que, si en el CASO 1 se tienen 1 Bat + 1x7 cargas y en el CASO 2 son 1 BAt + 1x7 cargas, la implementación no varía de un caso a otro por lo que se puede usar de guía el mismo procedimiento para ambos casos y que ya se ha explicado en el CASO 1.

4.2.4. Implementación de los modelos de la House 3 al modelo Simulink

En el caso de la House 3 que representa al grupo de viviendas que cuentan con un aero además de las cargas, la diferencia también está en el número de elementos, de modo que si en el CASO 1 se tienen 1 aero + 1x7 cargas y en el CASO 2 son 2 viviendas que suman 2 aero + 2x7 cargas, basta con multiplicar por 2 cada una de las entradas de datos procedentes del subsistema Escenario. Se detalla cómo se hace esta multiplicación en la figura 4.9.

Del mismo modo que se hizo en los casos anteriores, en este caso también basta con intercalar un módulo Gain entre, cada entrada procedente del subsistema escenario y el modelo. En el caso de las cargas, se pueden ver en la figura 4.9, las 7 flechas en línea que señalan los 7 módulos Gain, que se han intercalado en el modelo para multiplicar la entrada de las 7 cargas.

Estas 7 cargas, componen el consumo para simular 2 viviendas, (según propone el CASO 2), en lugar de 1 vivienda (que Propone el CASO 1). De esta forma también aquí, nos evitamos tener que crear 2 modelos exactamente iguales para simular el consumo de 2 viviendas en lugar de una. En el caso de la central eólica, se actúa exactamente igual que en los consumos, intercalando el módulo Gain con valor 2 para simular 2 centrales eólicas en lugar de una.

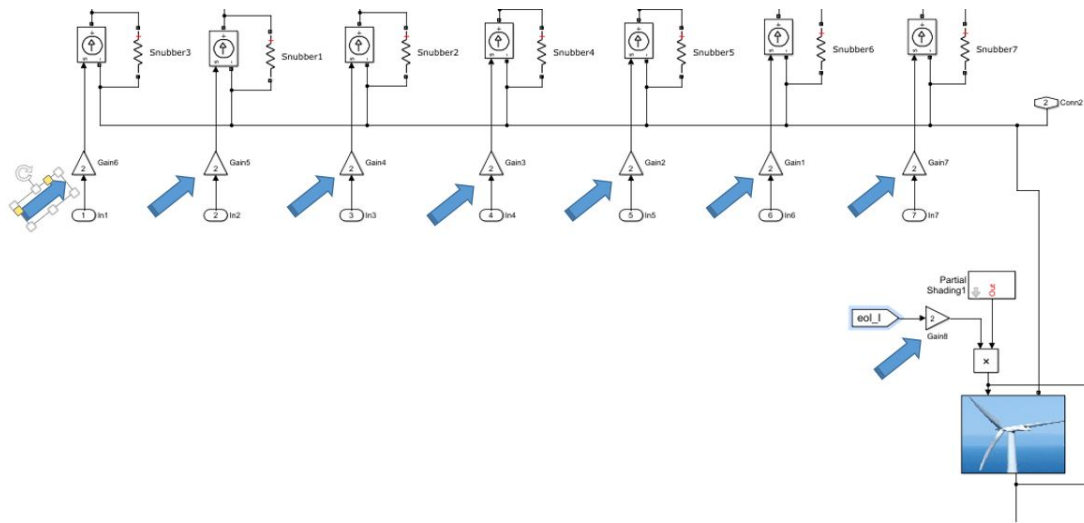


Figura 4.9: Implementación de modelos a la House 3 del CASO 2

4.2.5. Implementación de los modelos de la House 4 al modelo Simulink

En el caso de la House 4 que representa al grupo de viviendas que solo cuentan con las cargas. También aquí, la diferencia está en el número de elementos, de modo que en el CASO 1 se tiene 1 vivienda con 1x7 cargas y en el CASO 2 son 15 viviendas que suman 15x7 cargas. En este caso basta con multiplicar por 15 cada una de las entradas de datos procedentes del subsistema Escenario. Se detalla cómo se hace esta multiplicación en la figura 4.10.

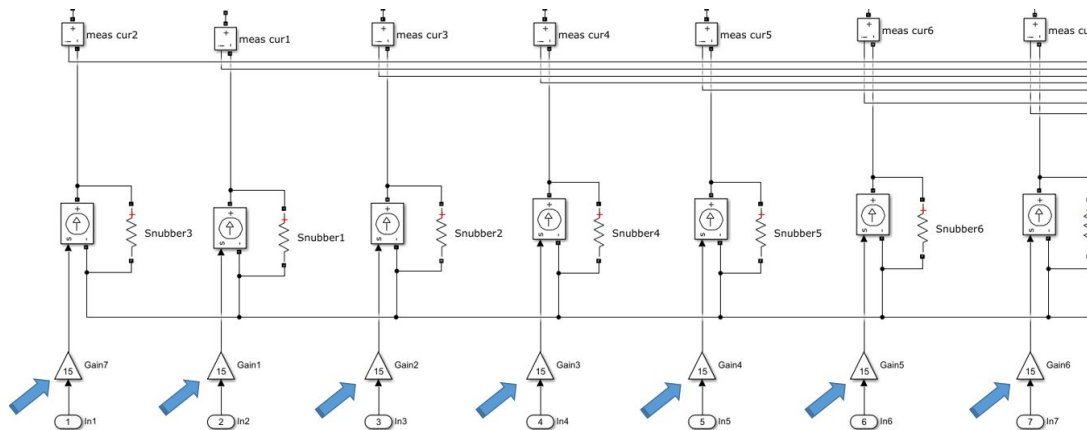


Figura 4.10: Implementación de modelos a la House 4 del CASO 2

Del mismo modo que se hizo en los casos anteriores, en este caso también basta con intercalar un módulo Gain entre cada entrada procedente del subsistema escenario y el modelo. Se pueden ver en la figura 4.10, las 7 flechas en línea que señalan los 7 módulos Gain que se han intercalado en el modelo. De esta manera, se multiplica la entrada de cada una de las 7 cargas que componen el consumo, para simular 15 viviendas en lugar de 1 (que Propone el CASO 1). De esta manera, se evita el tener que crear 15 modelos exactamente iguales, para simular el consumo de 15 viviendas.

Capítulo 5

Análisis de los Resultados de la Simulación

En este Capítulo, se ejecuta la simulación de los dos casos motivo de la propuesta original de este proyecto. Como la cantidad de bloques Scope de Simulink usados para graficar la evolución de las variables de potencia, tensión, intensidad y energía que genera cada simulación, asciende a 14 para cada caso, y para verlos bien en detalle es necesario graficarlos a pantalla completa, (en este caso a hoja completa), se considera la opción de recopilarlos y añadirlos en el (Apéndice B.3) a modo de complemento de consulta, en caso necesario.

Estructurando de esta manera los gráficos de resultados de Simulink de ambos casos, (CASO 1 y CASO 2), coincidiendo el orden de presentación de ambos, será mucho más fácil la comparativa entre ellos.

En el CASO 1 y para no alargar innecesariamente la simulación, se parte de una acumulación en baterías ajustada ya a las necesidades reales de acumulación, esto se ha conseguido a base de hacer varias simulaciones previas cambiando el valor de la acumulación de las baterías, hasta conseguir el suficiente capacidad para que aguanten las 24 horas, de modo que el SOC permanezca entre los límites aconsejados para que la vida útil de una batería no se reduzca drásticamente. En el Caso 2, como veremos, al cambiar

entre otras cosas, los valores de consumo, las capacidades de acumulación se salen de los valores aconsejados, por lo tanto se hará un reajuste de la capacidad de la batería de la HOUSE 1, del mismo modo que se hizo para iniciar la simulación con el CASO 1, que pasará de 600Ah a 3000Ah. El compendio de resultados de la simulación del CASO 2, después de haber efectuado los cambios en la capacidad de esta batería se muestran en el (Apéndice B.3) como se dijo anteriormente para consulta general.

Cabe señalar que se ha tratado en todo momento de reducir las figuras mostradas en este capítulo para que la exposición sea lo mas clara posible, por lo tanto se encontrara la posibilidad de que en un punto se haga referencia a las figuras mostradas en otro punto distinto, por ser idénticas en ambos casos.

5.1. Análisis de Resultados (CASO 1)

El escenario que se presenta en el CASO 1 para simular una Microgrid residencial consta de los elementos enumerados en el cuadro 4.3 del capítulo 4.

Este escenario se ha implementado en Simulink tal y como se ha descrito en el capítulo 4 y se ha simulado en base a datos reales del 1 de febrero de 2004 en la ciudad de Braganza. Se analizan a contión las gráficas mas representativas de los resultados en base a las cuales se pueden detallar de forma clara el significado de los resultados obtenidos. En cualquier caso, el compendio de las gráficas que se pueden obtener en la simulación se pueden consultar en el Apéndice 3 de este trabajo. El Apéndice 3 esta dividido en tres bloques de gráficas, una para el CASO 1 otra para el CASO 2 con red y la tercera pra el CASO 2 sin red.

5.1.1. Analisis de consumo y acumulacion de energía

En la figura 5.1, se representa la potencia de cada una de las cargas que componen el consumo de cada una de las viviendas que componen esta simulación. Todas las vivindas tienen el mismo consumo compuesto por las cargas referenciadas en el cuadro 4.5 en el mismo orden que aparecen en la grafica de la figura 5.1.

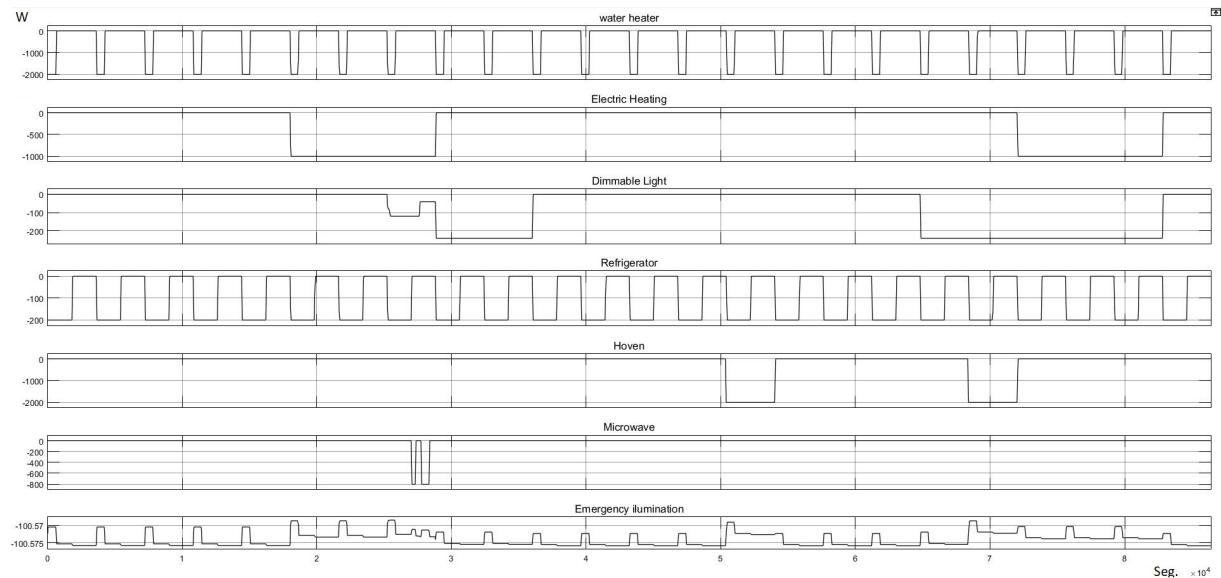


Figura 5.1: Gráfica de potencia de las 7 cargas tipo de una vivienda (caso 1)

La figura 5.2, compuesta por 4 gráficas, muestra en la primera de ellas el consumo de cada una de las viviendas de este caso, este consumo es igual para todas ellas representándose el perteneciente a una y como se dijo, está compuesto por la suma de las siete cargas representadas en la figura 5.1. En las otras 3 gráficas, se representa el SOC de la batería del VE de la casa 1 en el que se puede apreciar que a partir de las 8 de la mañana no varía debido a que el VE a partir de esa hora no está en casa y la batería permanece desconectada. Seguidamente se representa el SOC de la batería de la vivienda 2, una batería estacionaria de 600 Ah de capacidad, exactamente igual a la de la instalación general de la que también se representa el SOC en la última gráfica. Para que el uso de la batería sea completo, generalmente esta ha de tener una capacidad suficiente para hacer frente a los consumos y cargas que se le presenten, por lo menos a lo largo de un día, por esto y para esta simulación, se han adaptado las capacidades de las baterías, aumentándolas. De esta manera, los parámetros de SOC permanecen dentro de sus límites normales de funcionamiento.

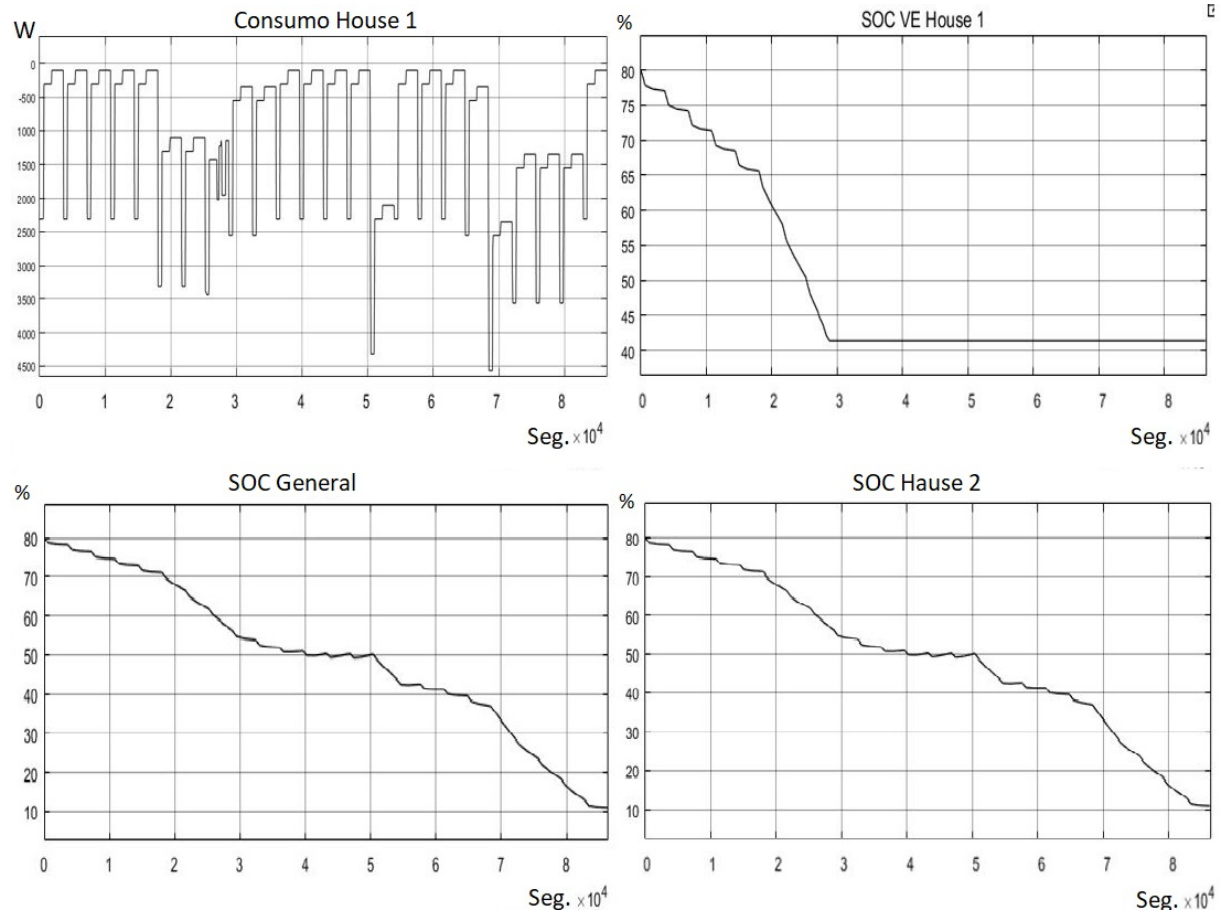


Figura 5.2: Gráficas de consumo y SOC (caso 1)

5.1.2. Análisis de la producción eólica y fotovoltaica

En la figura 5.3, se representan las gráficas de producción de una central eólica cuya potencia nominal es de 3 kW y la de una central fotovoltaica de 5 kWp. La variación del viento en la zona ese día se ve reflejada notoriamente en la gráfica que representa la potencia eólica generada por la central, sin embargo la potencia desarrollada es muy poca debido a la baja velocidad del viento que en ningún momento supera los 5 m/seg.

La central fotovoltaica, más previsible, puesto que la radiación solar suele ser bastante parecida todos los años, consigue un pico de producción máxima con algo más de 2000 W. de potencia, lo cual no está mal para principios de febrero. La producción ideal de una central PV sin sombras tiene la forma de una Campana de Gauss y en este caso, si bien no

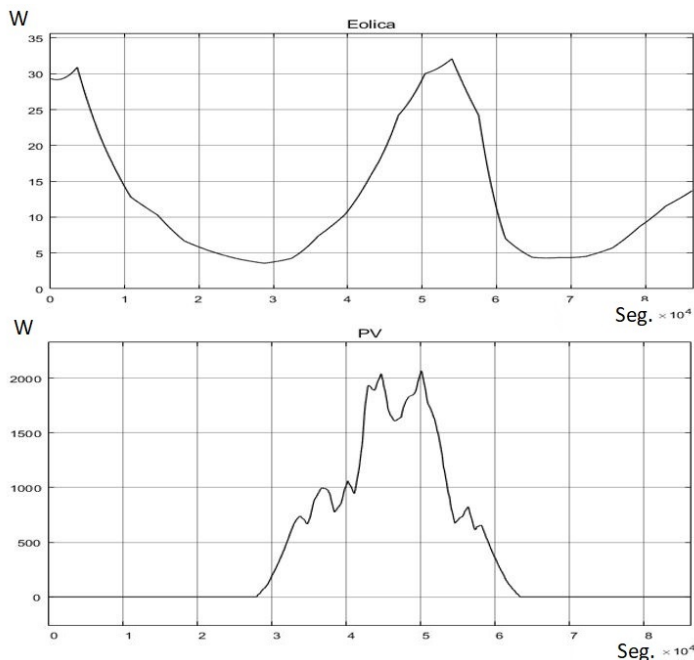


Figura 5.3: Gráficas de potencia de la producción eólica y fotovoltaica (caso 1)

existen sombras pertenecientes al horizonte o a obstáculos cercanos, las desviaciones que se observan respecto a lo que sería la trayectoria ideal de la curva, son debido probablemente a las nubes.

Detallado todo esto, y para terminar con este punto, se concreta que la central eólica está situada, 1 unidad en la instalación aislada y otra en la casa 3. En cuanto a la central fotovoltaica, se sitúa 1 en la instalación aislada y otra en la House 1, en concordancia con la propuesta de este caso. La producción de cada una de estas centrales es la detallada en la figura 5.3.

5.1.3. Relación entre producción y consumo (CASO 1)

Se hace un balance global, para concluir este CASO 1. El balance se representa en la figura 5.8 donde se representan en color rojo los consumos y en color verde la generación eléctrica, cada cual en una gráfica distinta, nombradas convenientemente, en las dos primeras gráficas de esta figura.

La tercera gráfica representa las potencias de carga y descarga del conjunto de las

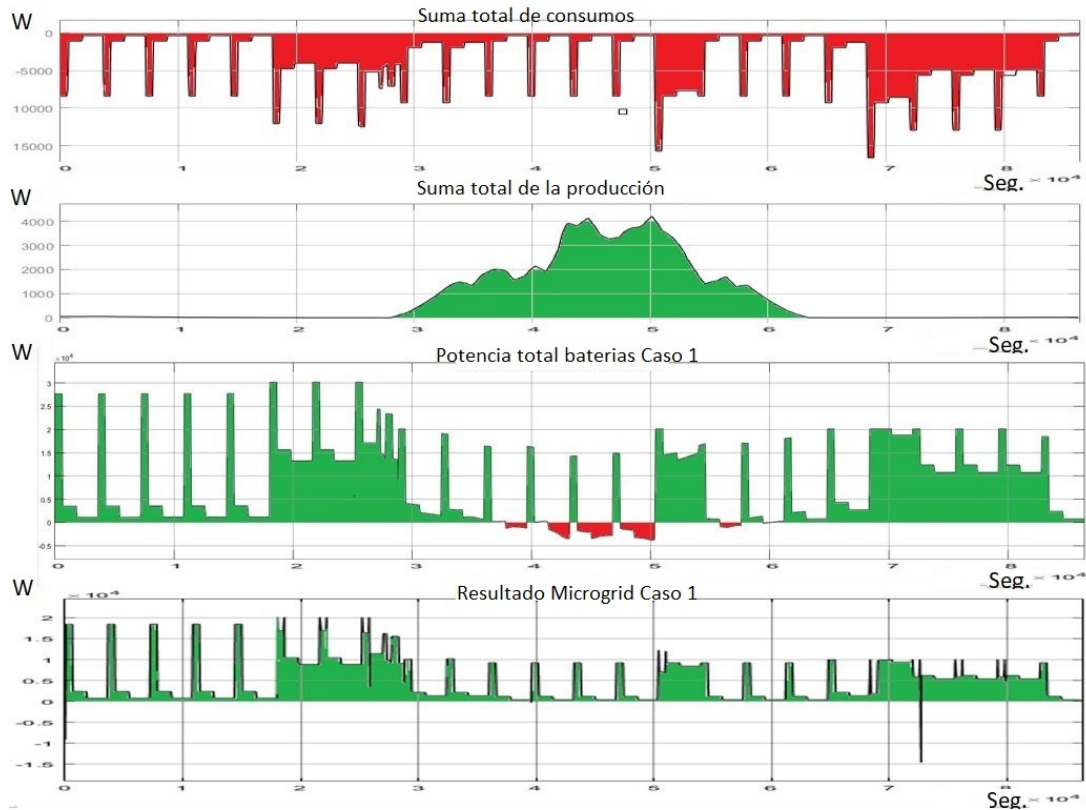


Figura 5.4: Total de consumos, total de producción y resultado final del CASO 1

baterías existente en este caso 1, una general de tipo estacionario, otra correspondiente al VE de la House 1 y otra estacionaria correspondiente a la House 2. El color verde en esta tercera gráfica, corresponde a la potencia suministrada por el conjunto de las baterías y el color rojo a la potencia de carga de este mismo conjunto.

En la cuarta gráfica, se representa el resultado final de la Microgrid, donde como se puede apreciar, no existen zonas en rojo que representarían las situaciones en que la Microgrid no podría autoabastecerse y tendría que recurrir a la red pública a lo largo de las 24h, como esta situación no se da, significa que la Microgrid, si podría autoabastecerse en caso de que la desconectásemos de la red pública.

En contrapartida, las zonas verdes representan los momentos en que el conjunto de la Microgrid tiene superávit de energía para autoabastecerse, contando con la energía generada y la acumulada en baterías, que aportarían, en caso necesario, hasta su capacidad máxima de abastecimiento.

5.2. Análisis de Resultados (CASO 2)

El escenario que se presenta en el CASO 2 para simular una Microgrid residencial consta de los elementos enumerados en el cuadro 4.6 en el capítulo 4.

5.2.1. Análisis de Resultados (CASO 2 con red)

En el CASO 2 propuesto, se advierte que el número de elementos pertenecientes a cada grupo ha aumentado por lo que en una primera simulación se observa que la acumulación en baterías estacionarias, denominadas en el cuadro 4.6 como "bloque de baterías", es insuficiente para hacer frente a la demandaría, por lo que se decide regularizar la capacidad de los bloques de baterías existentes en la simulación de este CASO 2, de 600Ah a 1600Ah, para que el SOC de este bloque se mantenga entre unos límites razonables.

Análisis del consumo de energía

El consumo de las viviendas es igual para todas tal y como se dijo en el caso anterior, donde se reflejaba el consumo de una sola vivienda. En este caso, el número de viviendas ha aumentado, por lo tanto se cree conveniente mostrar una gráfica con el consumo total de cada uno de los cuatro grupos que se proponen según el cuadro 4.6.

El resultado como cabía esperar tiene la misma forma que la gráfica de una vivienda mostrada en la esquina superior izquierda de la figura 5.2., la diferencia es que se ve multiplicada por el número de viviendas de ese grupo, por ejemplo en el caso HOUSE 4 representado en la primera gráfica de la figura 5.5, hay picos de consumo que sobrepasan los 60.000 W de potencia instantánea consumida. En esta figura se pueden ver los consumos de los bloques pertenecientes a las HOUSE 1, HOUSE3 y HOUSE 4, el caso de HOUSE 2 no se representa puesto que tiene una sola vivienda y es idéntico al nombrado consumo de una sola vivienda de la figura 5.2.

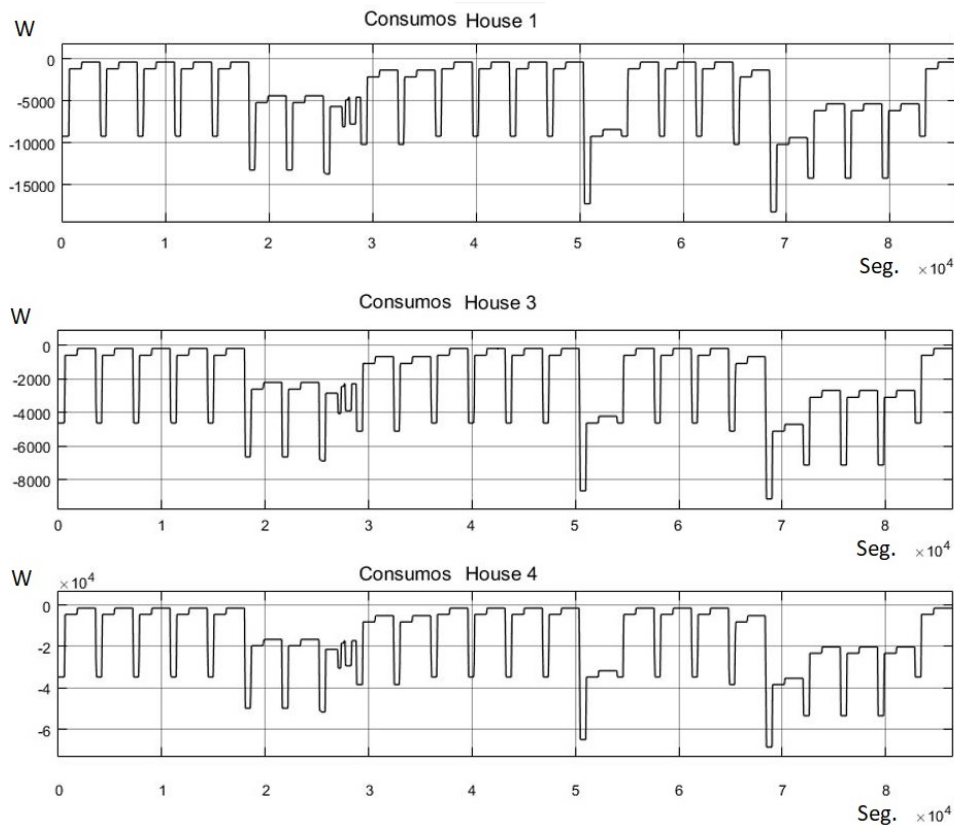


Figura 5.5: Consumos de HOUSE 1/3/4 (CASO 2 con red)

Análisis de la producción eólica y fotovoltaica

En la figura 5.6, se refleja la producción o generación eólica y fotovoltaica de la instalación general del CASO 2, como muestra de lo que sucede. Pasa como con el consumo, las gráficas, si bien tienen la misma forma, reflejan valores múltiples de los de la instalación unitaria representada en la figura 5.3, multiplicados por el número de centrales de cada caso. En la instalación general, la fotovoltaica aparece multiplicada por 3 y la eólica por 2.

Análisis de acumulación de energía

La acumulación de energía se realiza en los bloques de baterías y en los acumuladores de los VE. Los bloques de baterías o baterías estacionarias, que en este caso estarían compuestas por vasos de 2 voltios, instalados en serie para alcanzar la tensión de trabajo

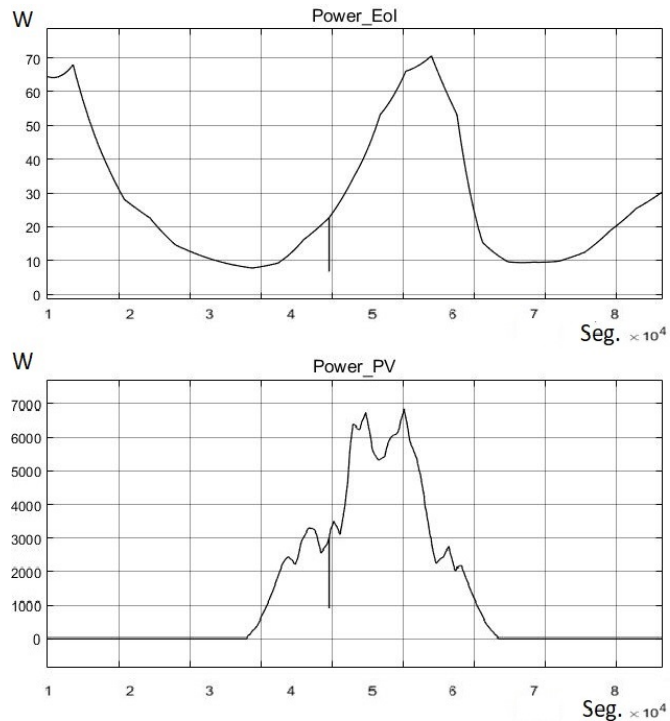


Figura 5.6: Gráfica de potencia de la producción eólica y fotovoltaica (caso 2 con red)

y capaces de almacenar energía, hasta unas capacidades que podrían sobrepasar los 3.000 Ah en C10, o sea, que dispondrían de 3.000 Ah en un tiempo mínimo de 10 horas. En este CASO 2 se proponen dos bloques de baterías de este tipo, uno en la instalación general y otro en el bloque HOUSE 2, en este caso compuesto por una sola vivienda, a los que se les ha asignado una capacidad de 1.600 Ah a cada uno y cuyo SOC se ve reflejados en las dos últimas gráficas de la figura 5.7. Se puede apreciar que son gráficas iguales, debido a que la capacidad de estos bloques de baterías es igual y sus condiciones de trabajo también. En la primera gráfica de esta figura, se representa la evolución del SOC del acumulador del VE de las viviendas del bloque HOUSE 1, en este caso compuesto por 4 viviendas y por lo tanto se cuentan con 4 VE cuyo SOC total se refleja como se dijo anteriormente, en la primera gráfica de la figura 5.7.

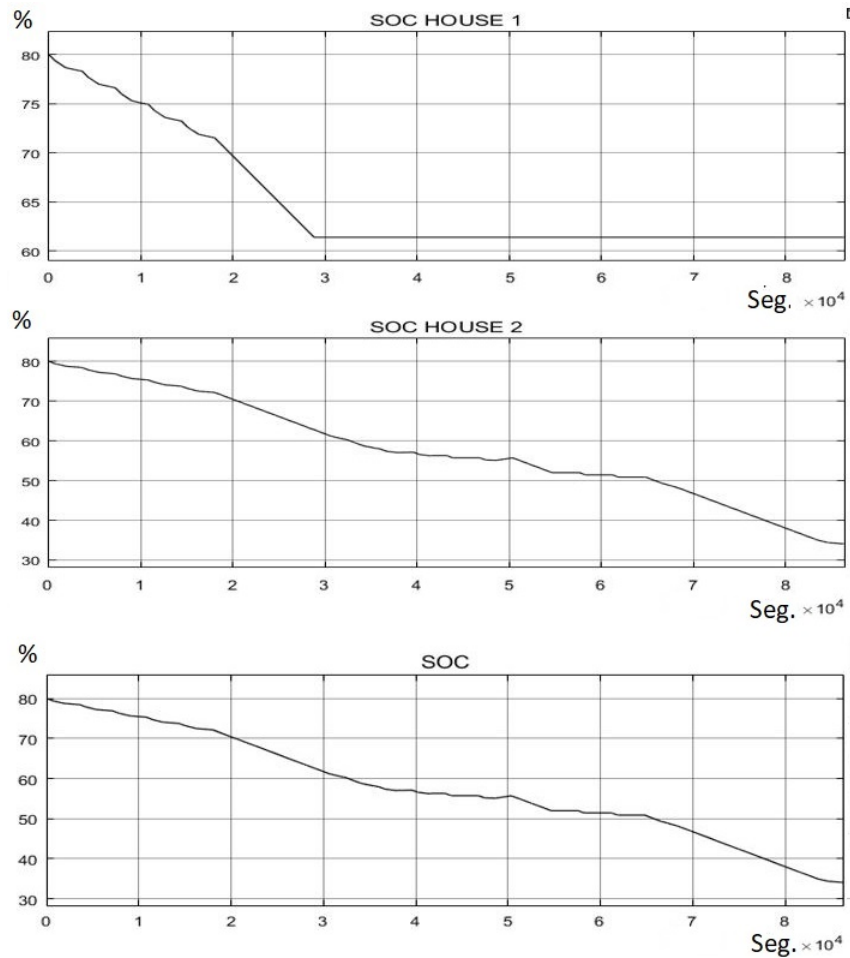


Figura 5.7: SOC General, HOUSE 1 y HOUSE 2 (caso 2 con red)

5.2.2. Relación entre producción y consumo (CASO 2 con red)

Se hace un balance global, para concluir este CASO 2 con red. El balance se representa en la figura 5.8 donde se representan en color rojo los consumos y en color verde la generación eléctrica, cada cual en una gráfica distinta, nombradas convenientemente, en las dos primeras gráficas de esta figura.

La tercera gráfica representa las potencias de carga y descarga del conjunto de las baterías existente en este caso 2.

En la cuarta gráfica, se representa el resultado final de la Microgrid, las zonas en rojo, representan las situaciones a lo largo de las 24h, en las que la Microgrid no ha podido autoabastecerse y por lo tanto ha necesitado de la energía de la red pública.

Debido a que los consumos son mucho mayores que en el CASO 1, en esta gráfica, la Microgrid, depende en ocasiones de la red pública. En contrapartida, las zonas verdes representan los momentos en que el conjunto de la Microgrid tiene superávit de energía para autoabastecerse. Hay que pensar que si bien los consumos son mayores, también es mayor la capacidad de generación y de almacenamiento.

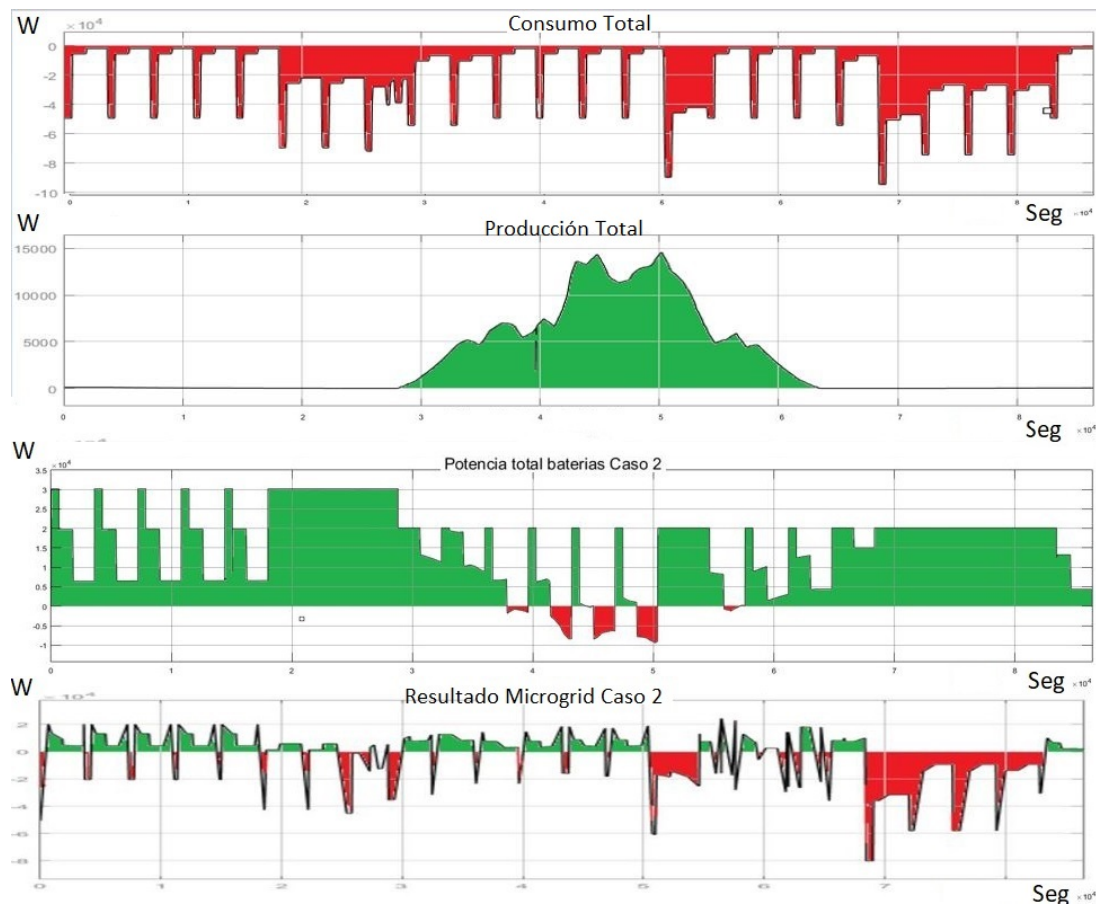


Figura 5.8: Total de consumos, total de producción y resultado final del CASO 2 con red

5.2.3. Relación entre producción y consumo (CASO 2 sin red)

La última propuesta de este trabajo consiste en aislar de la red pública la Microgrid del CASO 2, para tratar de constatar así, la propiedad que se atribuye a una Microgrid de tener la capacidad de trabajar de forma aislada y sostenible en cualquier momento, asegurando el suministro de energía de forma segura y fiable.

Constatará esta propiedad sin tener que modificar su estructura cumpliendo así con el punto 2.2 del capítulo 2 de este trabajo donde se describen las propiedades de una microgrid.

Sin incumplir ninguna de las propiedades mencionadas, y después de realizar varias simulaciones de prueba, se concluye en aumentar la capacidad de los 2 bloques de baterías existentes en este CASO 2 para que el SOC de los mismos se mantenga como siempre se pretende, entre unos valores razonables durante toda la simulación. En este caso se aumenta su capacidad hasta 3.000 Ah, que es la capacidad máxima que suelen tener las baterías de tipo vaso de 2 V, usadas en esta simulación, siendo todavía insuficientes para hacer frente, con ayuda de la generación de renovables, eólica y fotovoltaica, a los consumos de todas las viviendas.

En la figura 5.9, se representa por este orden, el SOC del bloque de baterías del bloque de viviendas HOUSE 2, el SOC del acumulador de los VE del bloque de viviendas HOUSE 1 y el SOC del bloque de baterías de la instalación general. Se observa que la gráfica del VE permanece activa todo el tiempo de la simulación, ya que en este caso, se considera que permanece todo el día conectado a la Microgrid, colaborando así al mantenimiento de la misma, en condición de Microgrid aislada.

Se hace un balance global, para concluir este CASO 2 sin red, donde la Microgrid tiene que demostrar su capacidad de funcionamiento aislada de la red pública. El balance se representa en la figura 5.10 donde se representan en color rojo los consumos y en color verde la generación eléctrica, cada cual en una gráfica distinta, nombradas convenientemente, en las dos primeras gráficas de esta figura.

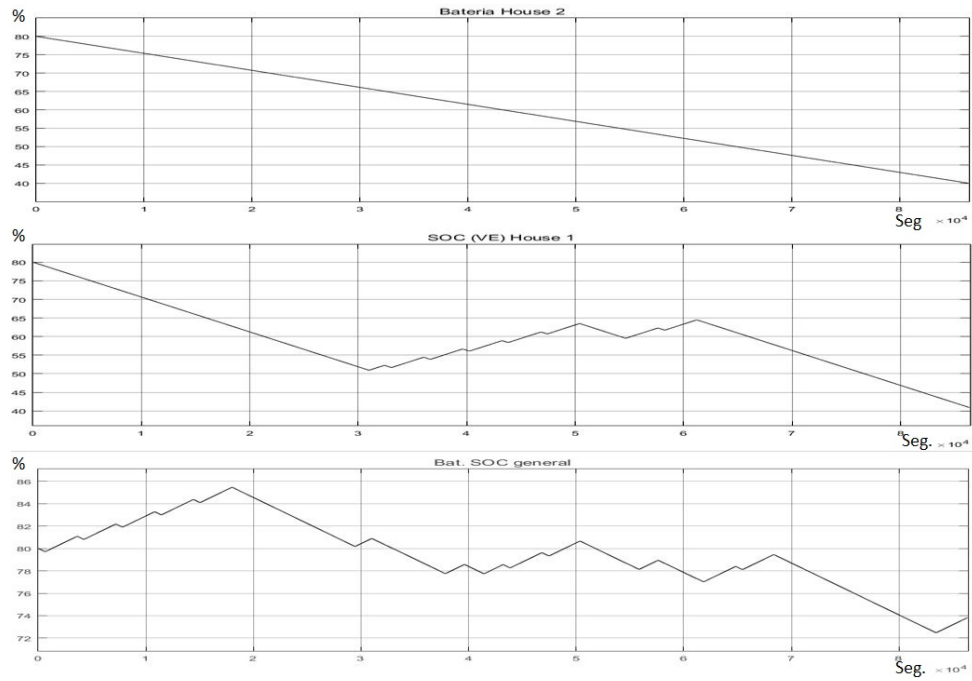


Figura 5.9: SOC General, SOC HOUSE 1 y SOC HOUSE 2 (caso 2 sin red)

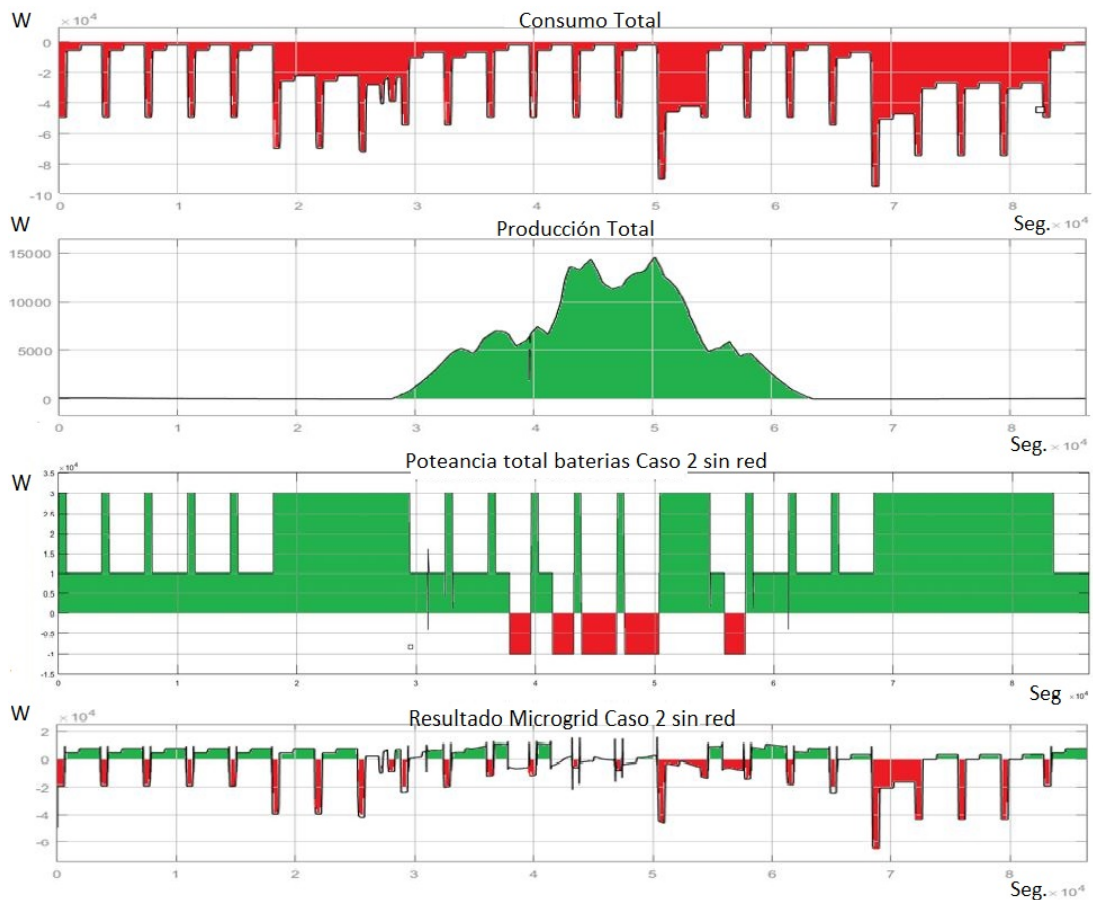


Figura 5.10: Analisis de consumo, producción y resultado final (caso 2 sin red)

La tercera gráfica representa las potencias de carga y descarga del conjunto de las baterías existente en este caso 2 sin red.

En la cuarta gráfica se representa la potencia del resultado final de la Microgrid aislada de este CASO 2 sin red. A simple vista se puede observar que si se superponen las dos primeras gráficas, el resultado no sería la tercera, y efectivamente así es, puesto que esos huecos y sobrantes de potencia, que dejarían la superposición de los consumos con la producción eléctrica, son los que cubren los bloques de baterías y el acumulador del VE, piezas indispensables en una Microgrid aislada. Aun así, quedan huecos en rojo que nos demuestran que los consumos no quedan garantizados cuando la Microgrid queda aislada de la red, incluso aumentando la capacidad de las baterías. Se cree preciso aumentar la acumulación y la generación, para lograr la autosostenibilidad de la Microgrid, en el supuesto del CASO 2 sin red.

Capítulo 6

Conclusiones generales

El objetivo de este proyecto consistió en la simulación, mediante las herramientas Matlab-Simulink, de 2 configuraciones distintas de Microgrids, una de ellas con la variante de conexión o desconexión de la red, para estudiar su comportamiento a lo largo de 24h, variando los datos a intervalos de 1 minuto.

Para conseguir esto, en primer lugar se construyen los modelos de generación fotovoltaica y eólica, modelos de acumulación por baterías y modelos de viviendas con diversas topologías, combinando cargas, generación y acumulación.

Para alimentar estos modelos, se necesitan datos reales de partida y para ello, se construye una hoja Excel con los valores de los datos iniciales de radiación solar, temperatura ambiente y velocidad del viento. Con estos datos se alimenta la simulación de las centrales de energía renovable, solar y eólica.

También se añaden a la misma hoja Excel, los valores de potencia para cada una de las cargas que componen el consumo de una vivienda. Todos estos valores se han añadido a la hoja a intervalos de 1 minuto.

En el siguiente paso se componen 2 Microgrids, una de ellas con pocos elementos, simplemente con una referencia de cada uno de ellos y una segunda con bastantes más número de componentes que la otra para ver las diferencias en el comportamiento del conjunto.

En la ejecución de la simulación se aprecia el significado, o peso, de cada uno de los

componentes tiene en el resultado final. Los resultados se reflejan en módulos Scope de Simulink, que grafican las variables a lo largo de las 24 horas simuladas.

Se aprecia que la producción eólica apenas influye en los resultados, debido principalmente a la baja velocidad del viento durante el día simulado en la ciudad de Bragança y también, debido al limitado número de aerogeneradores incluidos en las Microgrids. Aun así se aprecia su generación en los resultados finales reflejados en algunos de los Scopes o gráficas. Mas significativo en el conjunto, es la producción fotovoltaica, con mas potencia generada en horas de radiación solar.

Mención especial merece la simulación de la Microgrid del CASO 2 en su propuesta desconectada de la red pública, que perfectamente se puede autosostener. Para conseguir que se mantenga en el tiempo, se ha tenido que aumentar la capacidad del bloque de baterías de las viviendas del tipo 2 de 600 Ah a 3000Ah, para que se mantenga dentro de los margenes aconsejados para una vida útil adecuada. En cualquier caso, estos ajustes son los que debemos de hacer para llegar a configurar una Microgrid autosostenible tal y como se menciona en la introducción de este trabajo.

Para futuros trabajos, sería adecuado el desarrollo de algunos de estos puntos:

- Desarrollo de un modelo de sistema de acumulación mas flexible
- Analisis de puntos críticos o con defectos de simulación
- Desarrollo de la simulación en tiempo real, buscando datos iniciales en el servicio meteorológico.
- Ampliación de la simulación, implementando mas modelos de generación y de consumo.

Bibliografía

- [1] G. Brauner, W. D'Haeseleer, W. Gehrler, W. Glaunsinger, T. Krause, H. Kaul, M. Kleimaier, W. W. Kling, H. Prasser, I. Pyc y col., «Electrical power vision 2040 for europe», 2012.
- [2] *Technology roadmap: Smart grids. 2011. paris: Oecd/iea*. <http://dx.doi.org/10.1787/9789264115071-en>, Accessed: 2017-06-07.
- [3] «Technology roadmap how2guide for smart grids in distribution networks», Accessed: 2017-06-15.
- [4] *Smartcity, gestión y demanda*, <http://www.ingenieros.es/noticias/ver/smartcity-y-gestion-de-la-demanda/2131>, Accessed: 2017-06-29.
- [5] C. Wei, «A conceptual framework for smart grid», en *2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, mar. de 2010, págs. 1-4. DOI: 10.1109/APPEEC.2010.5448786.
- [6] M. S. Khan y M. R. Iravani, «Supervisory hybrid control of a micro grid system», en *2007 IEEE Canada Electrical Power Conference*, oct. de 2007, págs. 20-24. DOI: 10.1109/EPC.2007.4520300.
- [7] A. Ferreira, P. Leitão y J. Barata Oliveira, «Formal specification of a self-sustainable holonic system for smart electrical micro-grids», en *Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing : Proceedings of SOHOMA 2016*, T. Borangiu, D. Trentesaux, A. Thomas, P. Leitão y J. B. Oliveira, eds. Cham: Springer International Publishing, 2017, págs. 179-190, ISBN: 978-3-319-51100-9. DOI: 10.1007/978-3-

- 319-51100-9_16. dirección: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-51100-9_16.
- [8] P. M. Costa y M. A. Matos, «Economic analysis of microgrids including reliability aspects», en *2006 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems*, jun. de 2006, págs. 1-8. DOI: 10.1109/PMAPS.2006.360236.
- [9] *Simulación de sistemas*, <http://www.monografias.com/trabajos20/simulacion-sistemas/simulacion-sistemas.shtml>, Accessed: 2017-06-30.
- [10] T. M. Hansen, B. Palmintier, S. Suryanarayanan, A. A. Maciejewski y H. J. Siegel, «Bus.py: A gridlab-d communication interface for smart distribution grid simulations», en *2015 IEEE Power Energy Society General Meeting*, jul. de 2015, págs. 1-5. DOI: 10.1109/PESGM.2015.7286003.
- [11] *Power system analysis toolbox (psat)*, <http://faraday1.ucd.ie/psat.html>, Accessed: 2017-06-29.
- [12] *Distribution system simulator (dss)*, <http://smartgrid.epri.com/SimulationTool.aspx>, Accessed: 2017-06-29.
- [13] *Digsilent powerfactory*, <http://www.digsilent.de/index.php/products-powerfactory.html>, Accessed: 2017-06-29.
- [14] *Matlabsimulink*, <https://es.mathworks.com/products/simulink.html>, Accessed: 2017-07-15.
- [15] *Guia sobre tecnologia minieolica*, <http://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/Guia-sobre-tecnologia-minieolica-fenercom-2012.pdf>, Accessed: 2017-06-07.
- [16] *Soda web services - helioclim 3*, <http://www.soda-pro.com/web-services/radiation/helioclim-3-for-free;jsessionid=DCFF5812196175270E6A19D2AEFD9FA5>, Accessed: 2017-06-15.
- [17] *Soda web services - merra 2*, <http://www.soda-pro.com/web-services/meteo-data/merra>, Accessed: 2017-06-07.

- [18] *Tesla*, https://www.tesla.com/en_CA/used/5YJSA1DP1CFS02113, Accessed: 2017-07-1.

Apéndice A

Propuesta Original del Proyecto

Constitution and description of the scenarios:

Case 1:

A residential microgrid that is permanently grid connected with the following constitution.

- 1 Residential Houses with no generation or storage;
- 1 residential Houses with generations and no storage;
 - 1 PV
 - 1 EV
- 1 Residential House with no generation and and storage;
 - 1 battery bank
- 1 Residential House with generation no storage;
 - 1 Wind generator
- 1 Isolated PVs and 1 wind generators and 1 battery bank

The isolated generation and battery banks are part of the community, meaning this that all houses are interconnected as well as connected to the community generation and storage units.

The primordial use for the generation units is to be applied within the residential units and the surplus stored within the batteries and EV.

Case 2:

Islanded Microgrid geographically isolated (no connection to the mains) with the following constitutions:

- 15 Residential Houses with no generation or storage;
- 4 residential Houses with generations and no storage;
 - 1 PV
 - 1 EV
- 1 Residential House with no generation and and storage;
 - 1 battery bank
- 2 Residential House with generation no storage;
 - 1 Wind generator
- 3 Isolated PVs and 2 wind generators and 1 battery bank

The isolated generation and battery banks are part of the community, meaning this that all houses are interconnected as well as connected to the community generation and storage units.

Case Study Description.

The case study will contain the following Items:

- Consumer type
 - Controllable Loads
 - Water Heater 2kW
 - Electric Heating (1 kW per room?)
 - Dimmable Lights (LED?, halogen?)
 - Refrigerators (200W)
 - Non- Controllable Loads
 - Cooking related appliances
 - Hoven (2kW)
 - Microwave(800W)
 - Emergency illumination
 - (100W)
- Inputs
 - Exterior Temperature
 - Schedule
- Outputs
 - Discrete Demand values



- Producer Type
 - PV
 - 5Kwp
 - Inputs
 - W/m²
 - Outside Temperature
 - Outputs
 - Production kW
 - Wind generator
 - 2.4Kwp
 - Inputs
 - Wind speed m/s
 - Outputs
 - Production kW



- Storage type

- Battery bank

- Size (to be defined)

- Inputs

- Surplus Power

- Outputs

- Available storage

- Electric Vehicle

- 50 kW

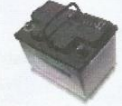
- Inputs

- Surplus Power

- Scheduled charging value

- Outputs

- Available storage



Apéndice B

B.1. Hoja Excel con los datos de partida

Las datos de entrada para los modelos de simulink, recopilados de bases de datos históricas de datos meteorológicos se pueden consultar en su totalidad en el fichero informático *HojaExcel.pdf*, adjunto a la documentación, dentro de la carpeta *Datos iniciales*, que contiene el CD adjunto a este proyecto.

Del archivo mencionado, *HojaExcel.pdf*, contiene en formato pdf los datos meteorológicos y de los consumos de las viviendas, copiados de la hoja Excel que los contiene. Estos datos son los que la simulación utiliza al leer la hoja Excel mencionada y que acompaña a los archivos de la simulación en la carpeta *Simulacao Matlab-Simulink*.

Se añade a este apéndice la primera hoja de estos datos a modo de ejemplo. En total serían 1440 entradas correspondientes a cada uno de los minutos que componen las 24 horas del día simulado.

UT time	GENERACION				CONSUMOS							Temperature	
	Temp °C	Irradiance W/m2	Wind speed	water 2kw	e heating 1kw	light	refrigerator	hoven	microwave	emergency			
1	8,54	0	4,5404	2000	0	0	200	0	0	100	281,69	2.816.869	
2	8,54	0	4,5394	2000	0	0	200	0	0	100	281,69	2.816.879	
3	8,54	0	4,5384	2000	0	0	200	0	0	100	281,69	2.816.889	
4	8,54	0	4,5376	2000	0	0	200	0	0	100	281,69	2.816.899	
5	8,54	0	4,5368	2000	0	0	200	0	0	100	281,69	2.816.909	
6	8,54	0	4,5361	2000	0	0	200	0	0	100	281,69	2.816.918	
7	8,54	0	4,5355	2000	0	0	200	0	0	100	281,69	2.816.928	
8	8,54	0	4,5349	2000	0	0	200	0	0	100	281,69	2.816.938	
9	8,54	0	4,5345	2000	0	0	200	0	0	100	281,69	2.816.948	
10	8,55	0	4,5341	2000	0	0	200	0	0	100	281,70	2.816.958	
11	8,55	0	4,5338	0	0	0	200	0	0	100	281,70	2.816.968	
12	8,55	0	4,5336	0	0	0	200	0	0	100	281,70	2.816.977	
13	8,55	0	4,5335	0	0	0	200	0	0	100	281,70	2.816.987	
14	8,55	0	4,5335	0	0	0	200	0	0	100	281,70	2.816.997	
15	8,55	0	4,5335	0	0	0	200	0	0	100	281,70	2.817.007	
16	8,55	0	4,5337	0	0	0	200	0	0	100	281,70	2.817.017	
17	8,55	0	4,5339	0	0	0	200	0	0	100	281,70	2.817.026	
18	8,55	0	4,5342	0	0	0	200	0	0	100	281,70	2.817.036	
19	8,55	0	4,5346	0	0	0	200	0	0	100	281,70	2.817.046	
20	8,56	0	4,535	0	0	0	200	0	0	100	281,71	2.817.056	
21	8,56	0	4,5356	0	0	0	200	0	0	100	281,71	2.817.066	
22	8,56	0	4,5362	0	0	0	200	0	0	100	281,71	2.817.076	
23	8,56	0	4,537	0	0	0	200	0	0	100	281,71	2.817.085	
24	8,56	0	4,5378	0	0	0	200	0	0	100	281,71	2.817.095	
25	8,56	0	4,5386	0	0	0	200	0	0	100	281,71	2.817.105	
26	8,56	0	4,5396	0	0	0	200	0	0	100	281,71	2.817.115	
27	8,56	0	4,5407	0	0	0	200	0	0	100	281,71	2.817.125	
28	8,56	0	4,5418	0	0	0	200	0	0	100	281,71	2.817.135	
29	8,56	0	4,543	0	0	0	200	0	0	100	281,71	2.817.144	
30	8,57	0	4,5443	0	0	0	200	0	0	100	281,72	2.817.154	
31	8,57	0	4,5457	0	0	0	0	0	0	100	281,72	2.817.164	

B.2. Ficha técnica del módulo fotovoltaico

los campos fotovoltaicos de este trabajo están formados por módulos Solarworld de 250wp cuya ficha técnica se muestra en la Figuras B.1 y Figura B.2; entre las características técnicas se reflejan el coeficiente de temperatura que repercute negativamente en la intensidad del módulo fotovoltaico y aunque positivamente en la tensión, el resultado es negativo para la potencia que genera el módulo. Esto lo tendremos en cuenta en la simulación de los sistemas fotovoltaicos contemplados en este trabajo. La degradación del siliceo también repercute en el rendimiento del módulo siendo generalmente garantizado por los fabricantes de módulos fotovoltaicos con un máximo de 10 % de pérdida de potencia a los 12 años y un 20 % a los 25 años que es la vida útil de los módulos de siliceo. Actualmente y cada vez más, los fabricantes están ofreciendo una garantía lineal desde el año cero hasta el año 25 que garantizan una pérdida de potencia de 20 % como máximo. En la realidad la degradación del siliceo fotovoltaico depende de la calidad de la célula y del lugar de instalación principalmente pero para cálculos podríamos tomar los porcentajes anteriores. Sin embargo, estos comentarios son a título informativo puesto que para una simulación de 24h como la que nos concierne, este parámetro no es representativo y no se tendrá en cuenta.

Sunmodule⁺ Plus SW 250 - 260 poly



Data Sheet



Quality modules
made in Germany

Produced in Germany,
the center for solar technology



TUV Power controlled:
Lowest measuring tolerance in industry



Sunmodule Plus:
Positive performance tolerance



25 year linear performance warranty and
10 year product warranty



SolarWorld AG relies on Germany as its technology location, thereby ensuring sustainable product quality.

The TUV Rheinland Power controlled inspection mark guarantees that the nominal power indicated for solar modules is inspected at regular intervals and thus ensured. The deviation to TUV is maximum 2 percent.

The positive power tolerance guarantees utmost system efficiency. Only modules achieving or exceeding the designated nominal power in performance tests are dispatched. The power tolerance ranges between -0 Wp and +5 Wp.

With its linear performance warranty covering a period of 25 years, SolarWorld guarantees a maximum performance depression of 0.7% p.a., a significant added value compared to the two-phase warranties common in the industry. Therefore, the service certificate offers comprehensive protection for your investment in the long term.

Sunmodule[®] Plus SW 250 - 260 poly



PERFORMANCE UNDER STANDARD TEST CONDITIONS (STC)*

		SW 250	SW 255	SW 260
Maximum power	P_{max}	250 Wp	255 Wp	260 Wp
Open circuit voltage	U_{oc}	37.6 V	38.0 V	38.4 V
Maximum power point voltage	U_{mp}	30.5 V	30.9 V	31.4 V
Short circuit current	I_{sc}	8.81 A	8.88 A	8.94 A
Maximum power point current	I_{mp}	8.27 A	8.32 A	8.37 A
Module efficiency	η_m	14.91 %	15.21 %	15.51 %

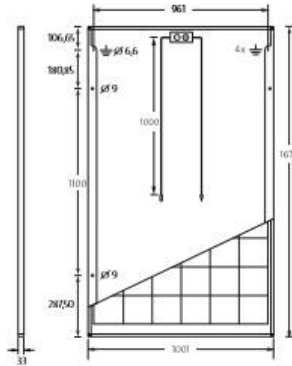
Measuring tolerance (P_{max}) traceable to TUV Rheinland. +/- 2% (TUV Power controlled)

*STC: 1000W/m², 25°C, AM 1.5

PERFORMANCE AT 800 W/m², NOCT, AM 1.5

		SW 250	SW 255	SW 260
Maximum power	P_{max}	185.4 Wp	188.7 Wp	192.4 Wp
Open circuit voltage	U_{oc}	34.2 V	34.5 V	34.8 V
Maximum power point voltage	U_{mp}	27.8 V	28.1 V	28.5 V
Short circuit current	I_{sc}	7.24 A	7.30 A	7.35 A
Maximum power point current	I_{mp}	6.68 A	6.72 A	6.76 A

Minor reduction in efficiency under partial load conditions at 25°C: at 200 W/m², 100% (+/-2%) of the STC efficiency (1000 W/m²) is achieved.



DIMENSIONS

Length	1675 mm
Width	1001 mm
Height	33 mm
Frame	Clear anodized aluminum
Weight	18.0 kg

THERMAL CHARACTERISTICS

NOCT	46 °C
TC I_{sc}	0.051 %/K
TC U_{oc}	-0.31 %/K
TC P_{max}	-0.41 %/K

PARAMETERS FOR OPTIMAL SYSTEM INTEGRATION

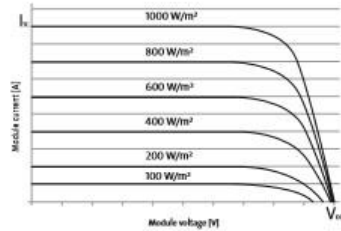
Maximum system voltage SC II	1000 V
Maximum reverse current	25 A
Load / dynamic load	5.4 / 2.4 kN/m ²
Number of bypass diodes	3
Operating range	-40 °C to +85 °C

COMPONENT MATERIALS

Cells per module	60
Cell type	Poly crystalline
Cell dimensions	156 mm x 156 mm
Front	tempered glass (EN 12750)

ADDITIONAL DATA

Power sorting	-0 Wp / +5 Wp
J-Box	IP65
Connector	H4



SolarWorld AG reserves the right to make specification changes without notice.
This data sheet complies with the requirements of EN 50380.

Your SolarWorld Official Distributor:



www.sfe-solar.com · info@sfe-solar.com
Phone: +34 981595856

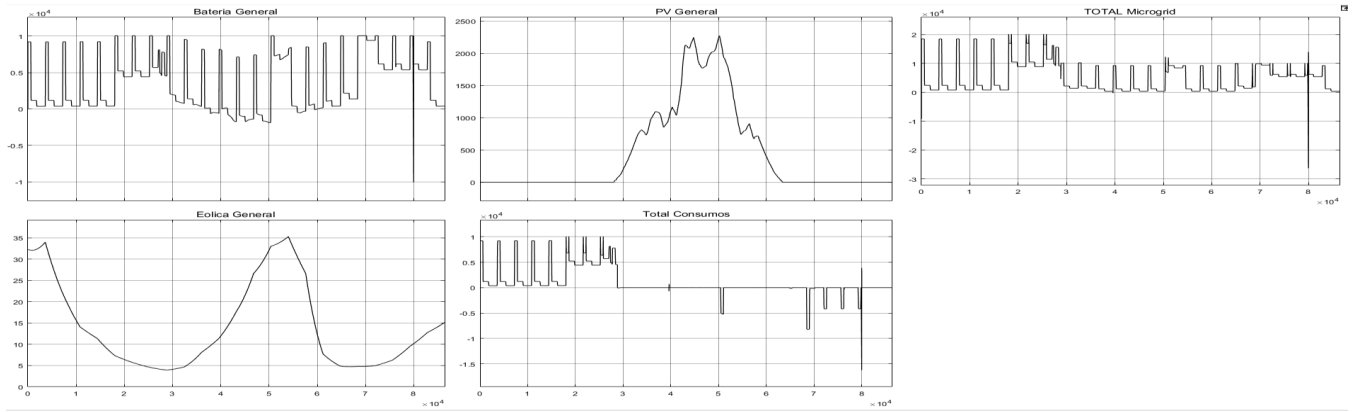
K88821 | 2015-03-02 EN

B.3. Gráficas de los resultados de simulación

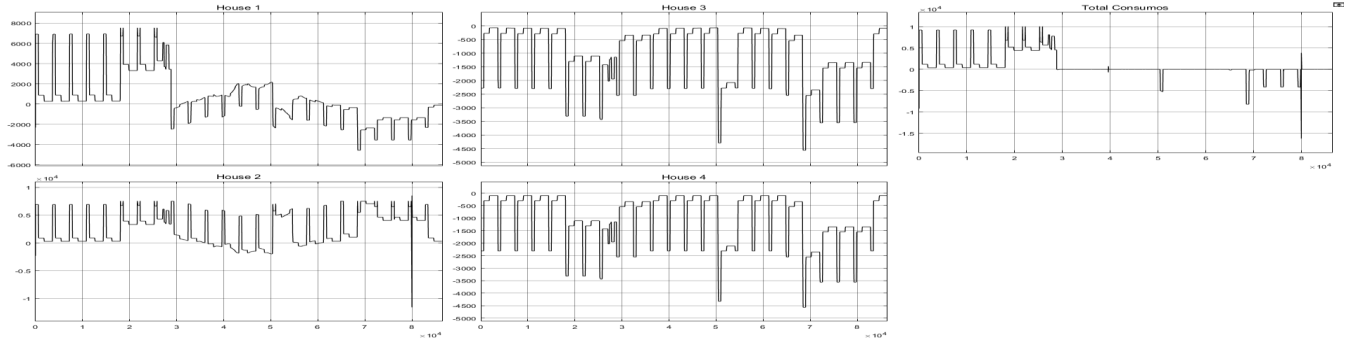
Las gráficas representadas en este apéndice, se corresponden con los resultados de la simulación con salidas a modulos Scope de Simulink y se pueden consultar a pantalla completa en el fichero informático *cofes a pantalla completa.pdf*, en la carpeta *SCOPES* adjunto a la documentación en formato CD.

Menú organizativo del CASO 1

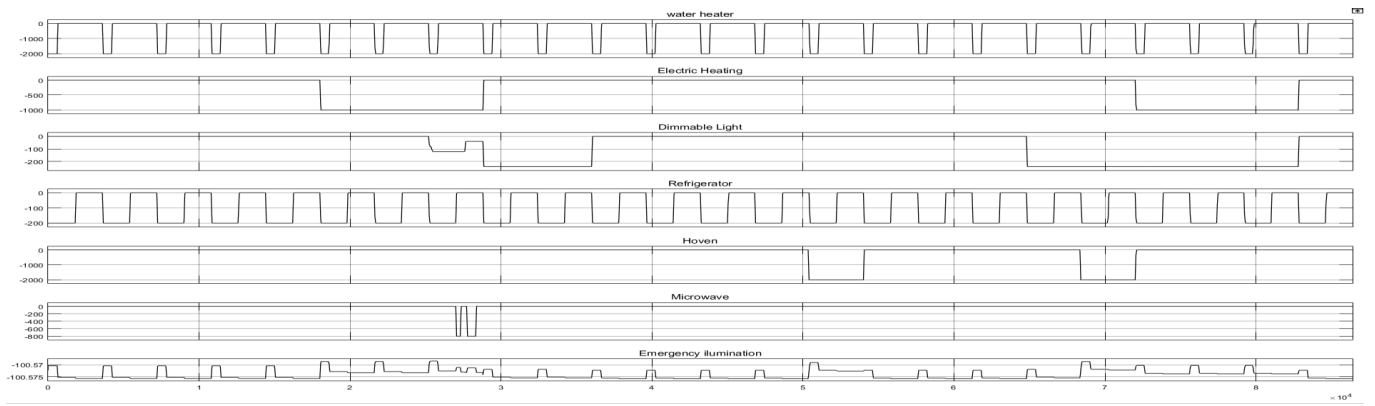
- 1.- Total Consumos + Generación + Acumulación (CASO 1)
- 2.-Total de consumos (CASO 1)
- 3.-Consumos de la vivienda tipo – ESCENARIO (CASO 1)
- 4.-Generacion de renovables instalacion aislada (CASO 1)
- 5.- Subsistema “Scopes” (CASO 1)
- 6.-Potencia de generación, consumo y almacenamiento “House 1” (CASO 1)
- 7.-Potencia de consumo y almacenamiento “House 2” (CASO 1)
- 8.- Potencia de generación, consumo “House 3” (CASO 1)
- 9.- Potencia de consumo “House 4” (CASO 1)
- 10.-Control de bateria estacionaria (CASO 1)
- 11.-Control de bateria VE (CASO 1)
- 12.-Bateria estacionaria general (CASO 1)
- 13.-Bateria VE house 1 (CASO 1)
- 14.-Bateria estacionaria house 2 (CASO 1)



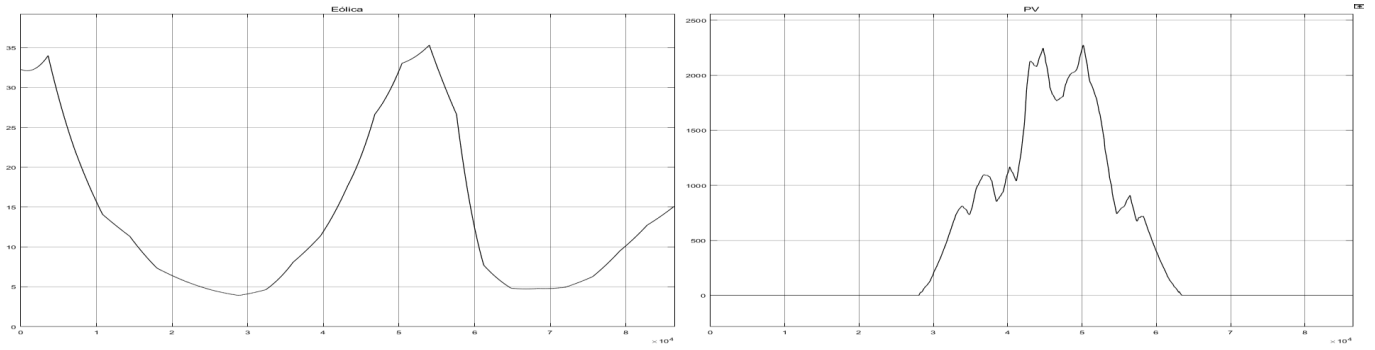
1.- Total Consumos + Generación + Acumulación (CASO 1)



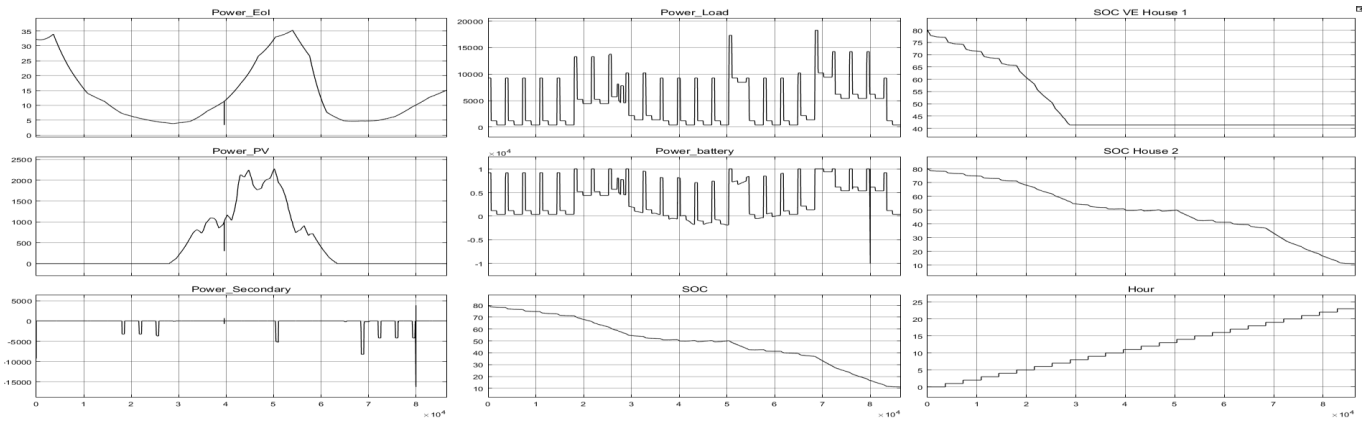
2.-Total de consumos (CASO 1)



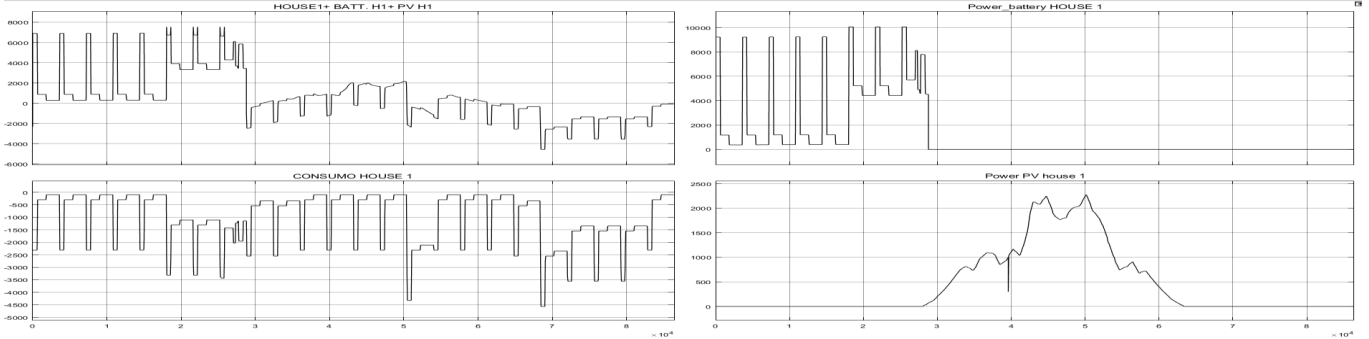
3.-Consumos de la vivienda tipo – ESCENARIO (CASO 1)



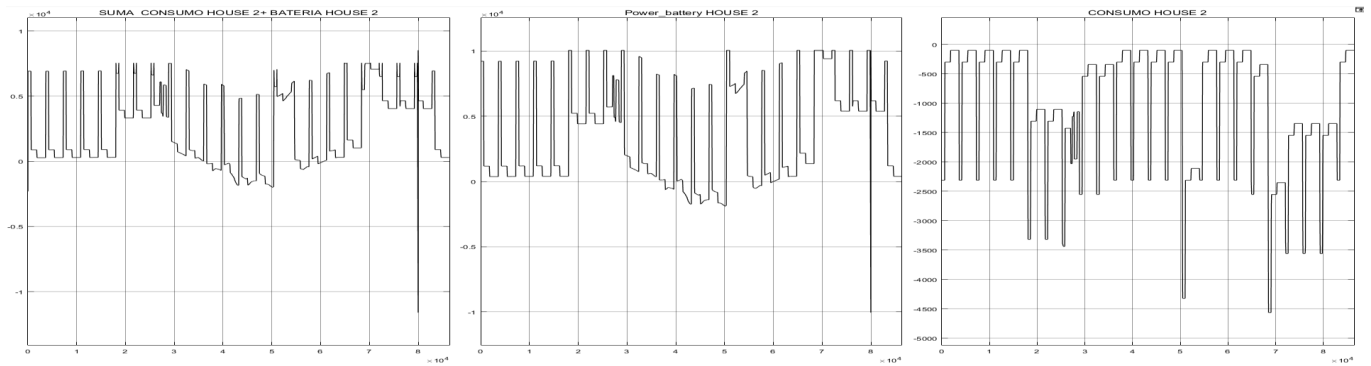
4.-Generacion de renovables instalacion aislada (CASO 1)



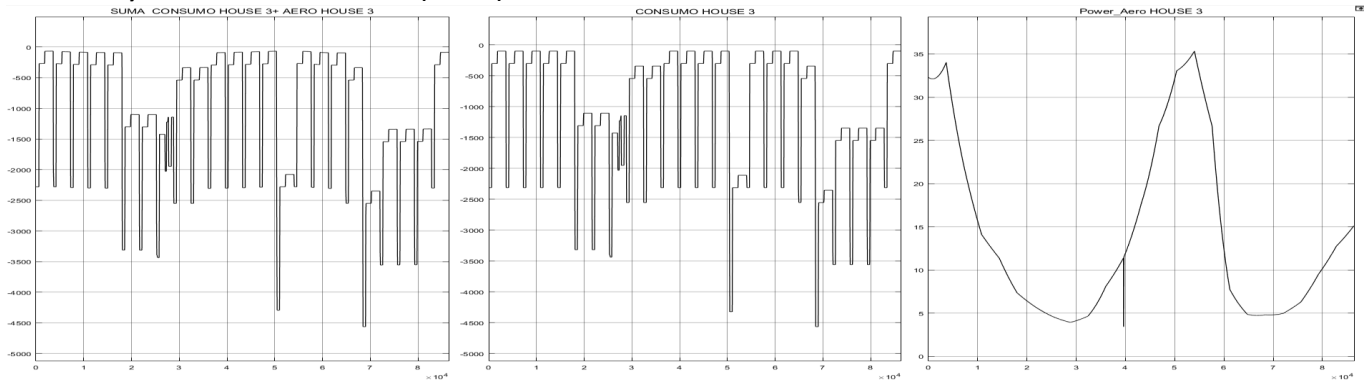
5.- Subsistema "Scopes" (CASO 1)



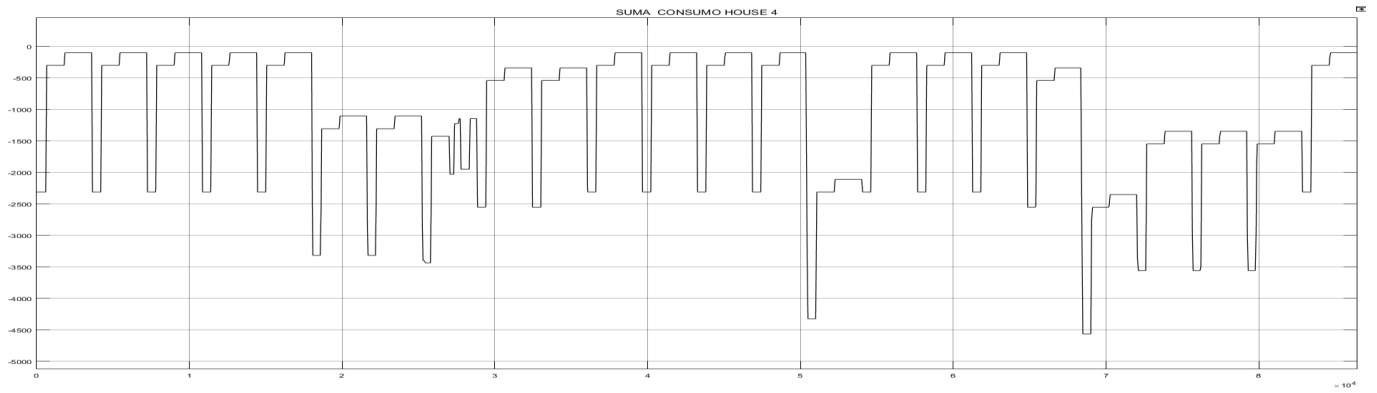
6.- Generación, consumo y almacenamiento "House 1" (CASO 1)



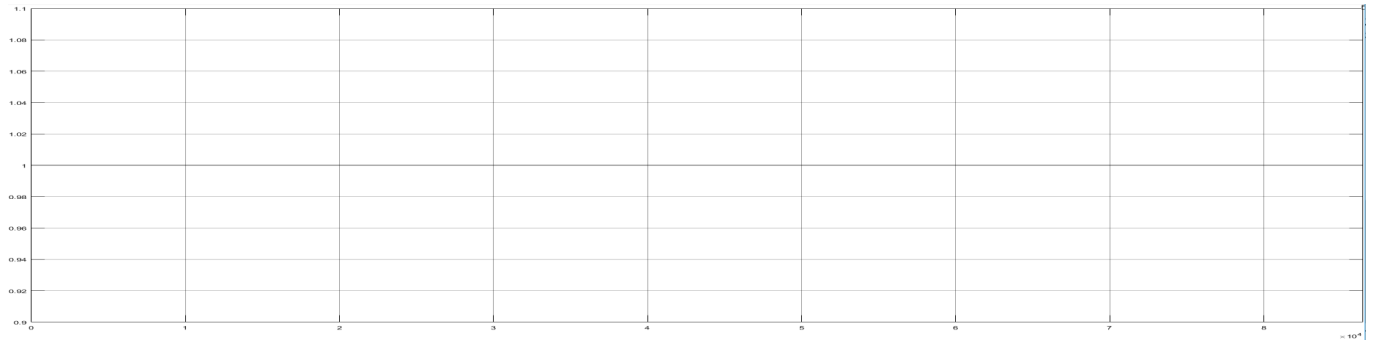
7.-Consumo y almacenamiento "House 2" (CASO 1)



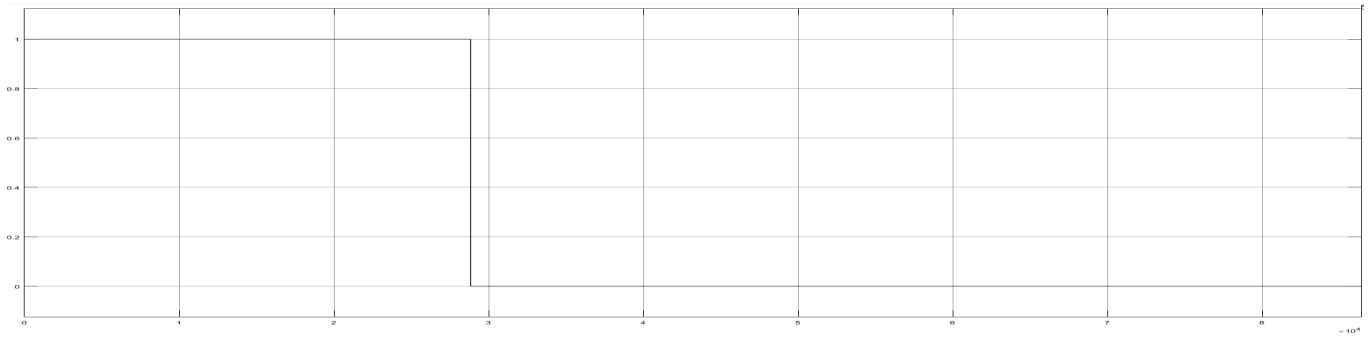
8.- Generación y consumo "House 3" (CASO 1)



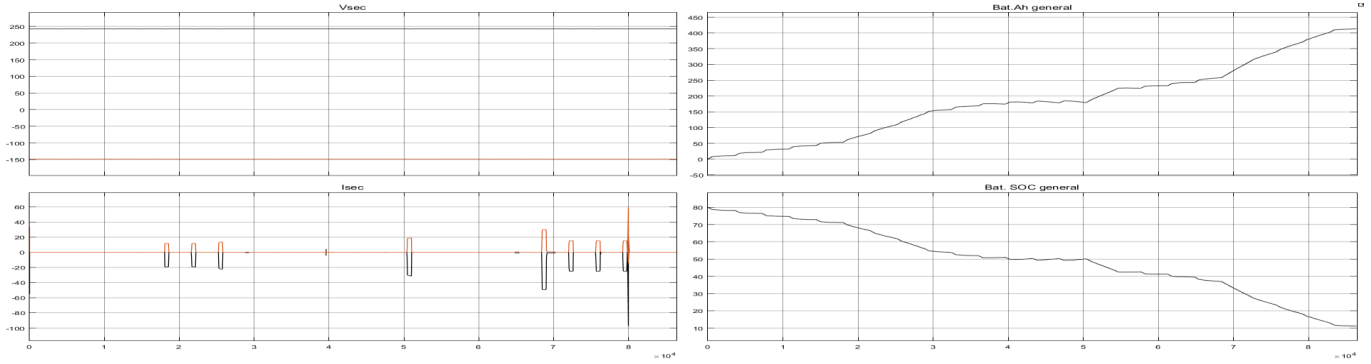
9.- Potencia de consumo "House 4" (CASO 1)



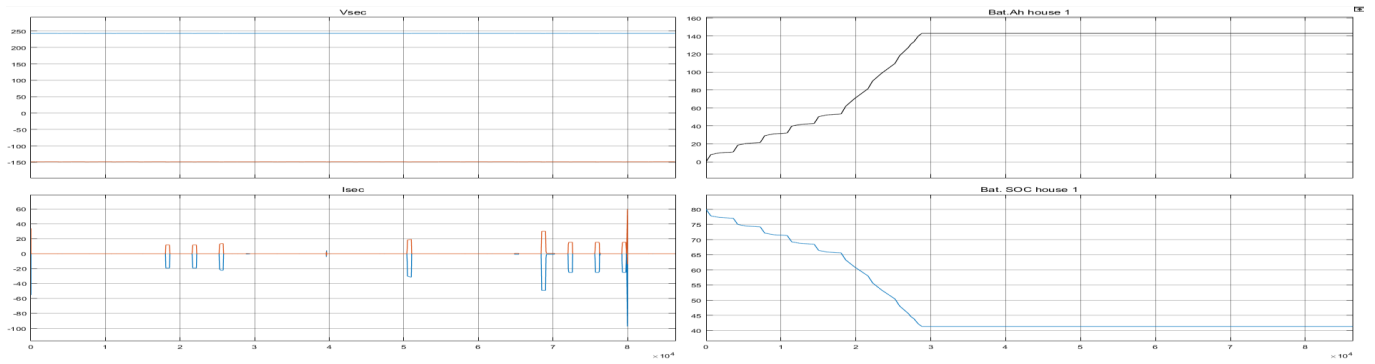
10.-Control de bateria estacionaria (CASO 1)



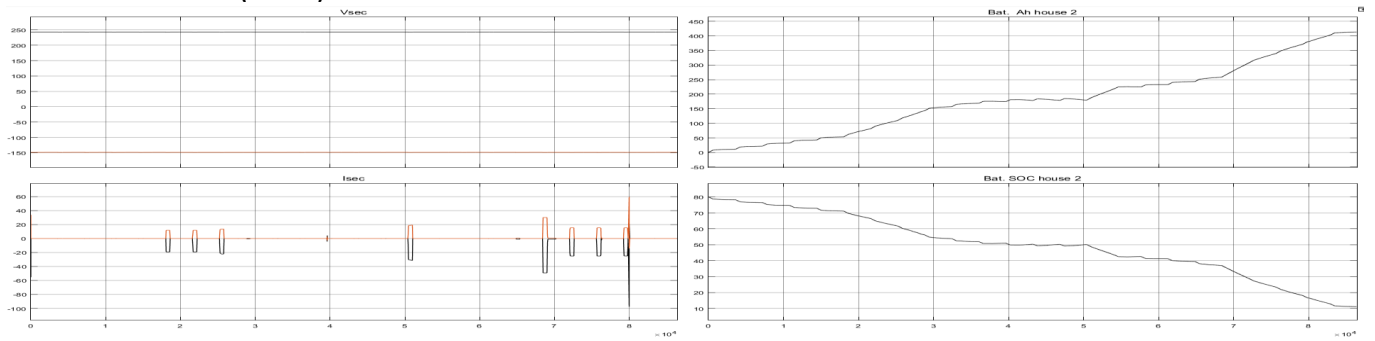
11.-Control de batería VE (CASO 1)



12.-Bateria estacionaria general (CASO 1)



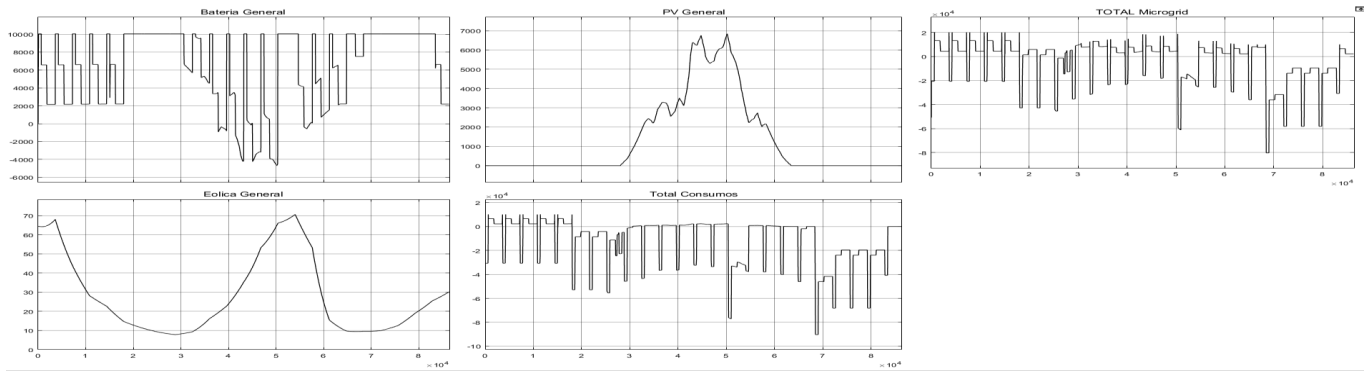
13.-Bateria VE house 1 (CASO 1)



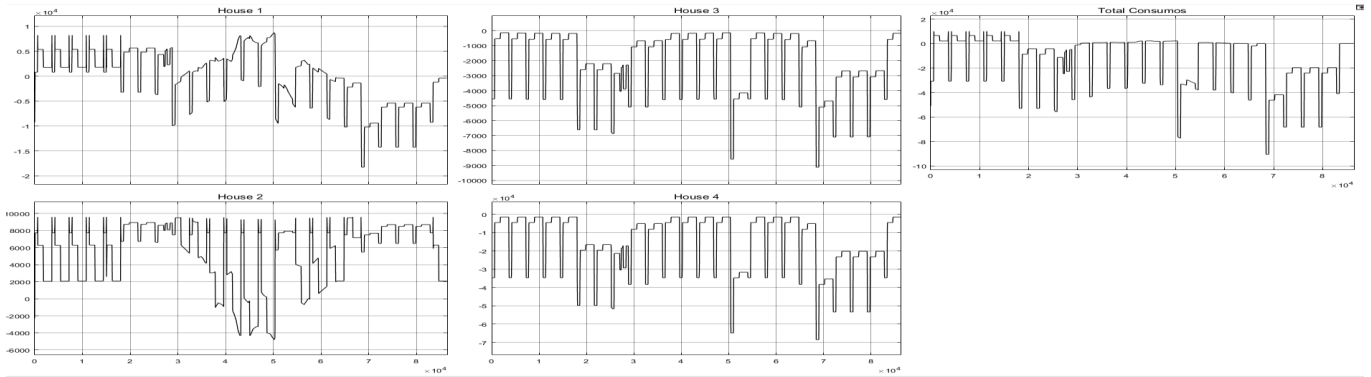
14.-Bateria estacionaria house 2 (CASO 1)

Menú organizativo del CASO 2

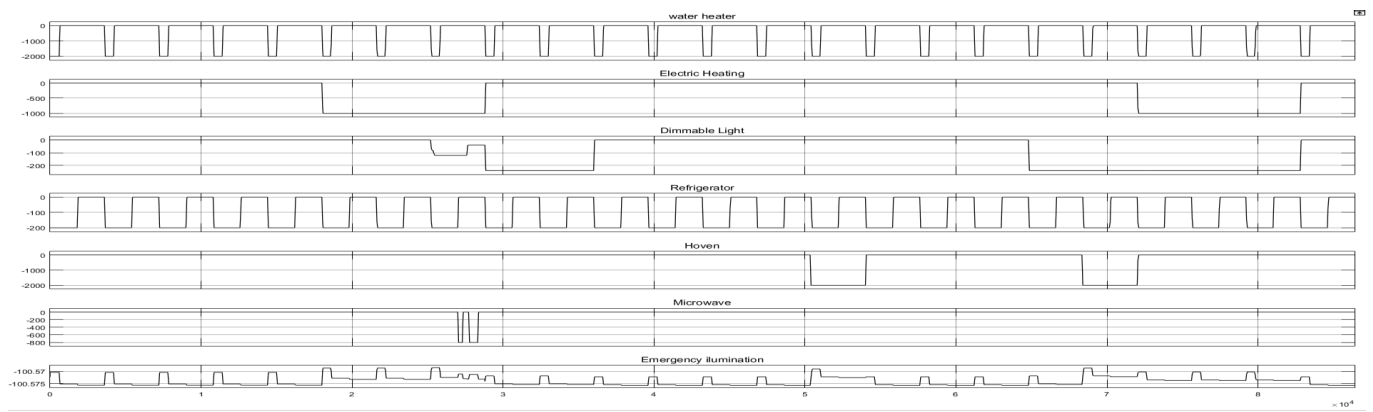
- 1.- Total Consumos + Generación + Acumulación (CASO 2)
- 2.-Total de consumos (CASO 2)
- 3.-Consumos de la vivienda tipo – ESCENARIO (CASO 2)
- 4.-Generacion de renovables instalacion aislada (CASO 2)
- 5.- Subsistema “Scopes” (CASO 2)
- 6.-Potencia de generación, consumo y almacenamiento “House 1” (CASO 2)
- 7.-Potencia de consumo y almacenamiento “House 2” (CASO 2)
- 8.- Potencia de generación, consumo “House 3” (CASO 2)
- 9.- Potencia de consumo “House 4” (CASO 2)
- 10.-Control de bateria estacionaria (CASO 2)
- 11.-Control de bateria VE (CASO 2)
- 12.-Bateria estacionaria general (CASO 2)
- 13.-Bateria VE house 1 (CASO 2)
- 14.-Bateria estacionaria house 2 (CASO 2)



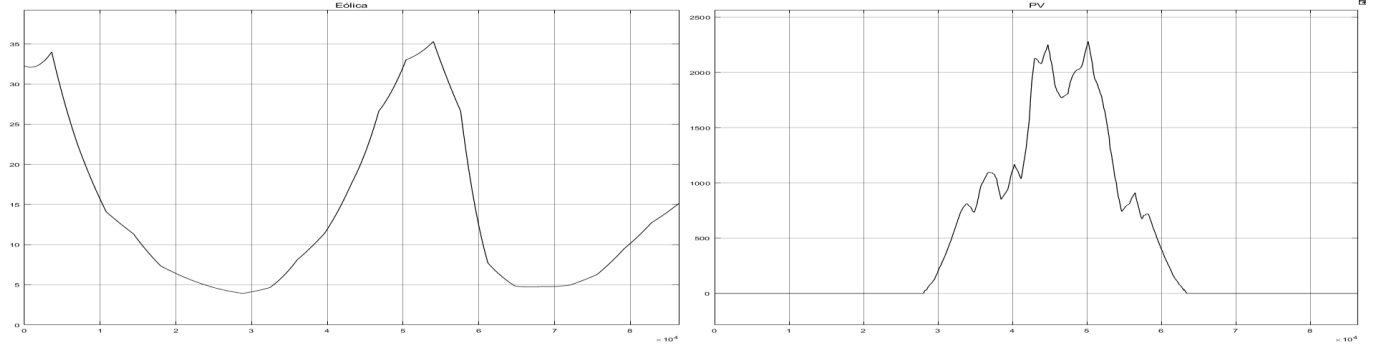
1.- Total Consumos + Generación + Acumulación (CASO 2)



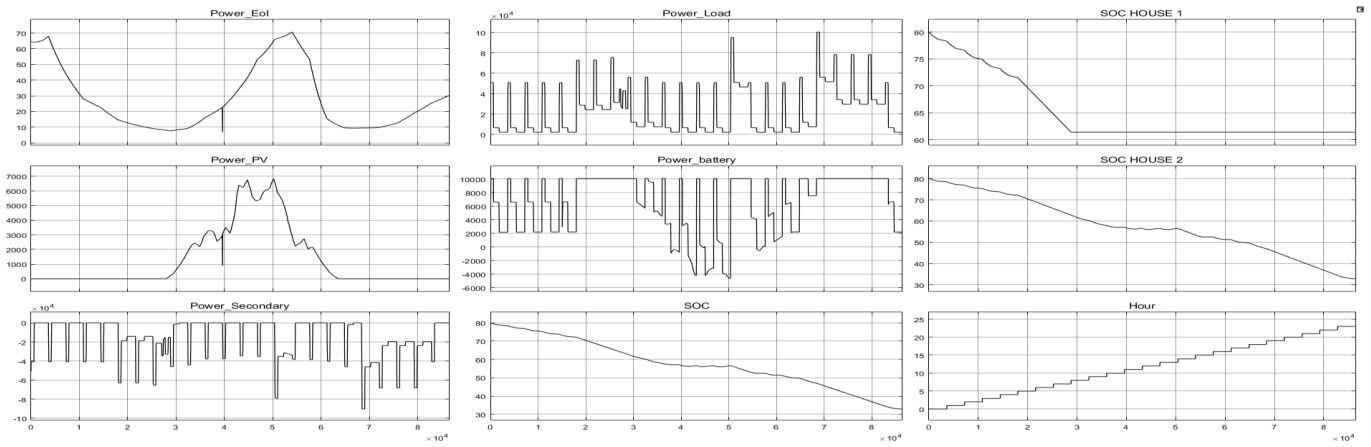
2.- Total de consumos (CASO 2)



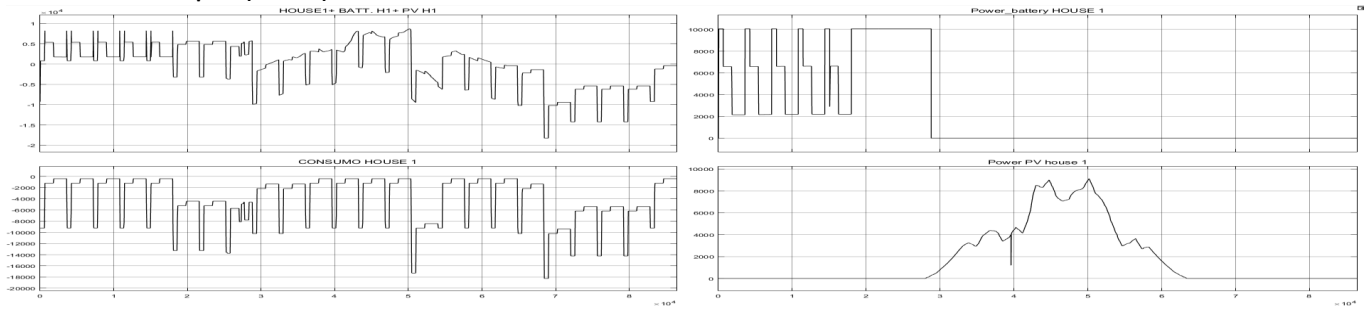
3.-Consumos de la vivienda tipo – ESCENARIO (CASO 2)



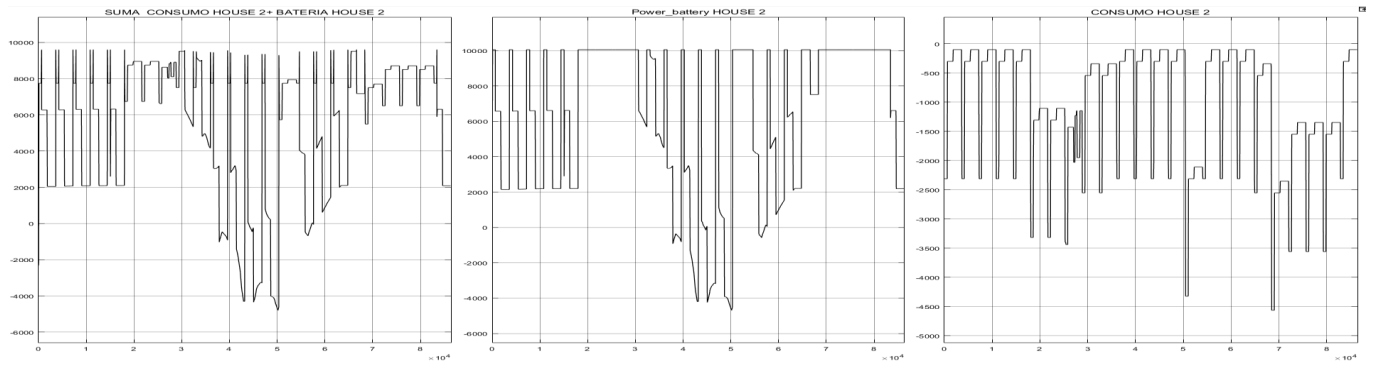
4.-Generacion instalacion aislada (CASO 2)



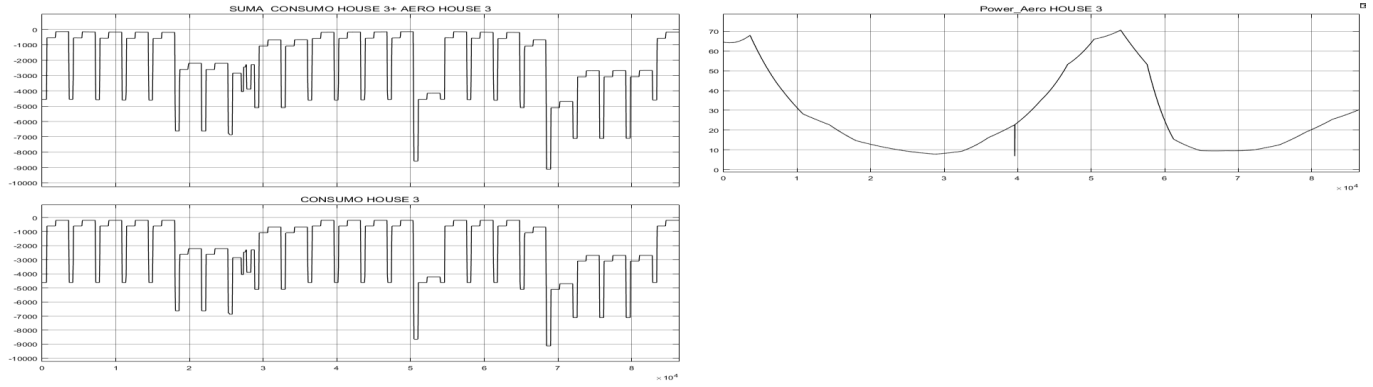
5.- Subsistema "Scopes" (CASO 2)



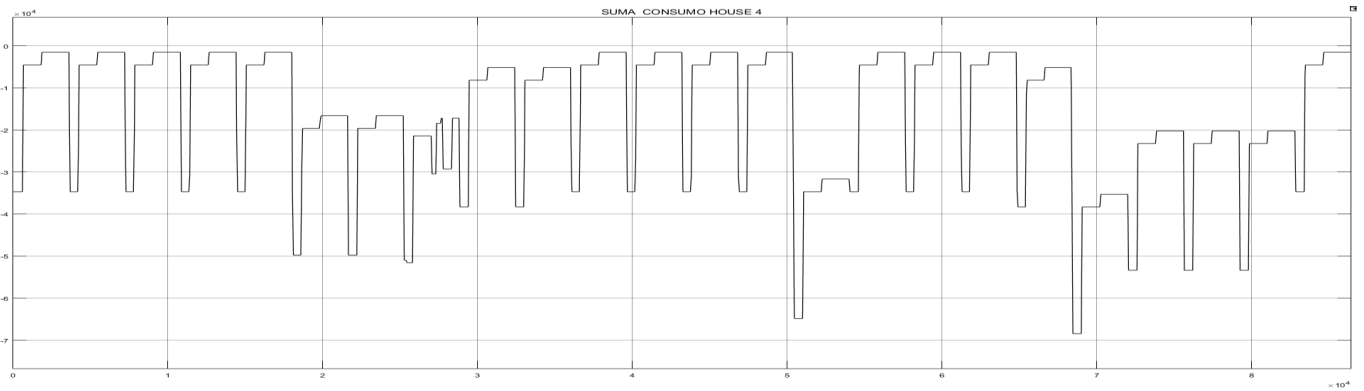
6.- Gen.cons. y almac. "House 1" (CASO 2)



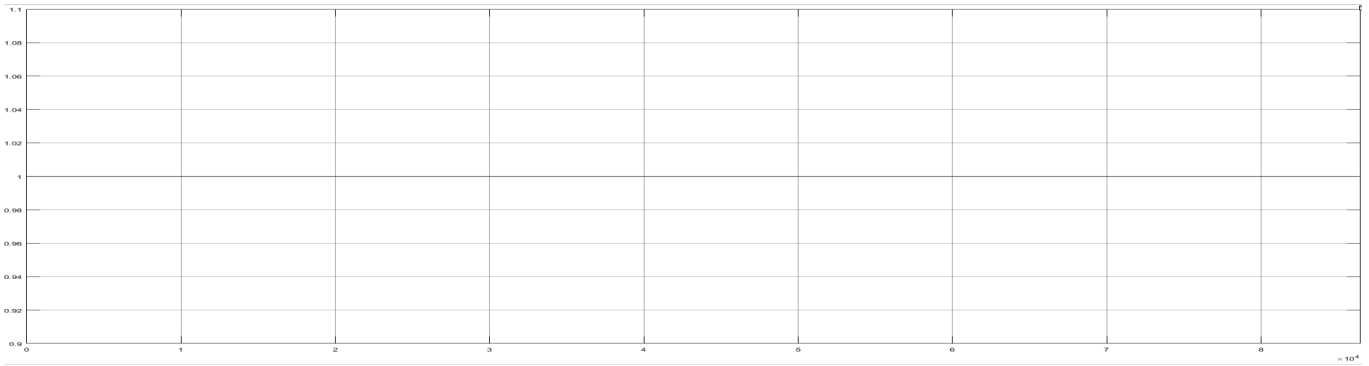
7. Consumo y almacenamiento "House 2" (CASO 2)



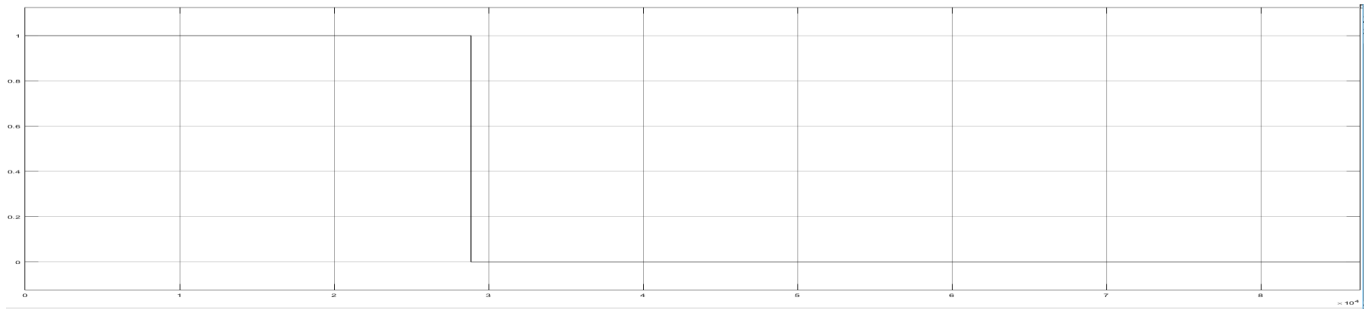
8.- Potencia de generación, consumo "House 3" (CASO 2)



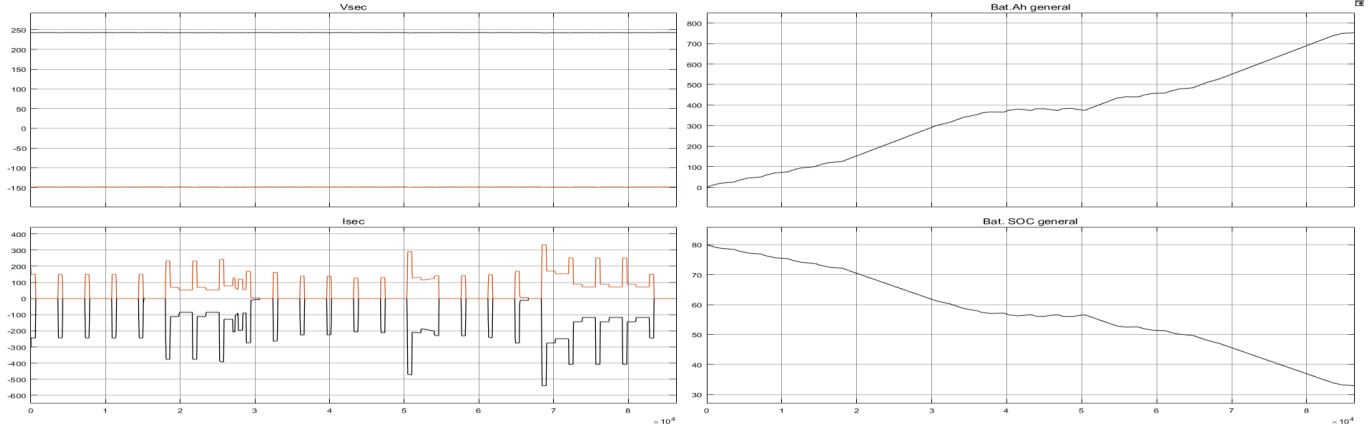
9.- Potencia de consumo "House 4" (CASO 2)



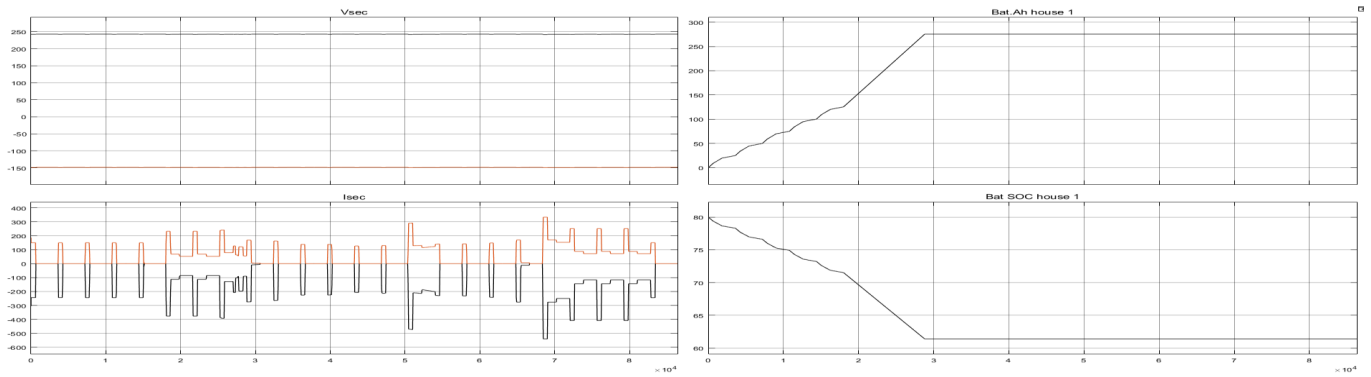
10.-Control de bateria estacionaria (CASO 2)



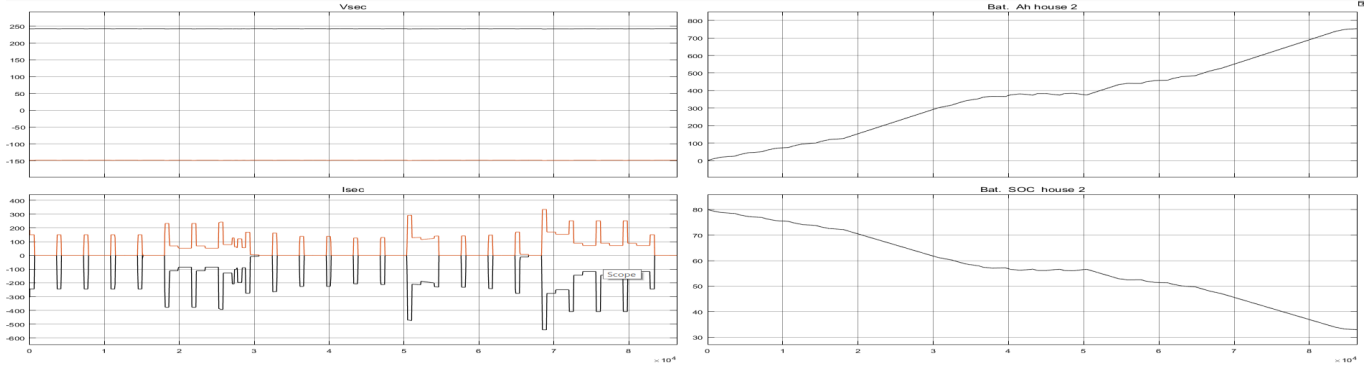
11.-Control de batería VE (CASO 2)



12.-Bateria estacionaria general (CASO 2)



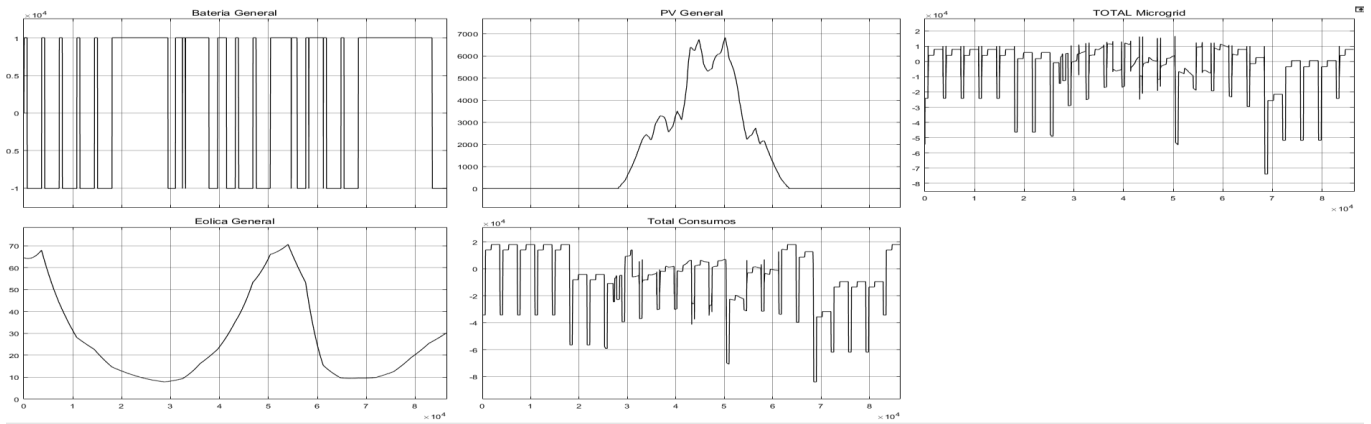
13.-Bateria VE house 1 (CASO 1)



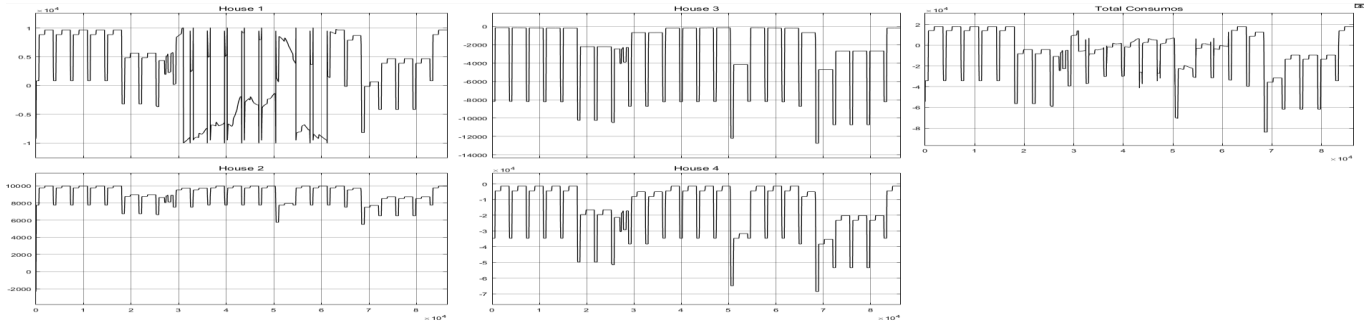
14.-Bateria estacionaria house 2 (CASO 1)

Menú organizativo del CASO 2 sin red

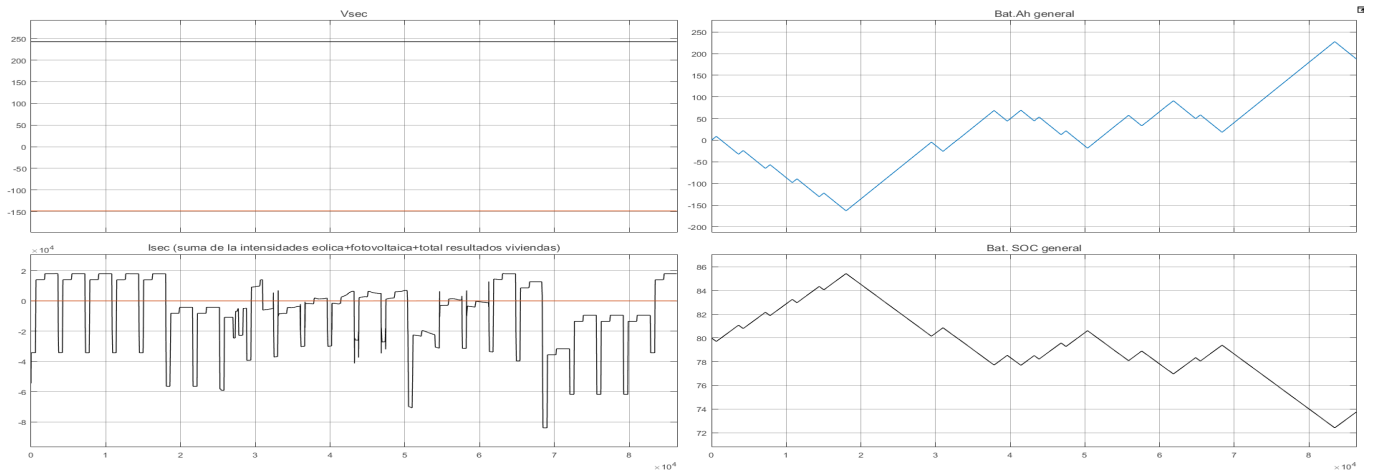
- 1.- Total Consumos + Generación + Acumulación (CASO 2 SIN RED)
- 2.-Total de consumos (CASO 2 SIN RED)
- 3.-Bateria estacionaria general (CASO 2 SIN RED)



1.- Total Consumos + Generación + Acumulación (CASO 2 SIN RED)



2.- Total de consumos (CASO 2 SIN RED)



3.-Bateria estacionaria general (CASO 2 SIN RED)

B.4. Como ejecutar la simulación

Esta simulación se ejecuta mediante el software Matlab-Simulink. Para lanzar la simulación, primeramente se copiara la carpeta *Simulacao Matlab-Simulink* que se suministra en el CD adjunto a este proyecto, en el disco duro del Pc donde se lanzará la simulación, por ejemplo en el escritorio.

Seguidamente abrimos Matlab y desde la opción *OPEN* del menú de Matlab, cargamos uno de los archivos: *CASO 1*, *CASO 2* o *CASO 3*, por ese orden pertenecen al CASO 1, CASO 2 Y CASO 2 sin red, abordados en este proyecto.

Una vez cargado uno de estos archivos, se ejecuta, pinchando con el ratón en el botón *Run* del menú Matlab.

Con esto se transfieren al *WorkSpace* los datos de ese caso a y automáticamente, se abre la simulación correspondiente.

Seguidamente, y desde Simulink se lanzará la simulación pinchando el botón *Run* del menú de Simulink.

Una vez terminada la ejecucion, se podran consultar los resultados en los bloques *SCOPE*, pinchando sobre ellos para abrirlos.

Nota:La version que se ha utilizado para crear la simulación fue Matlab version R2017a

B.5. Vista General de Sistema de modulos Simulink

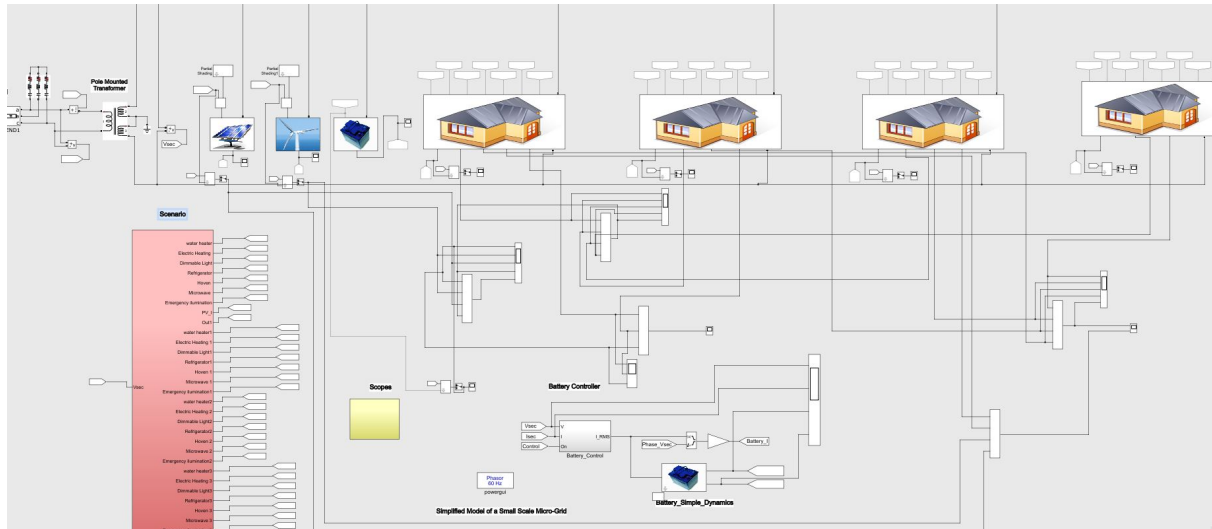


Figura B.1: Vista General de Sistema en Simulink