

E.T.S. de Ingeniería Industrial,
Informática y de Telecomunicación

Aplicación para Evaluación y Selección de Sistemas de Almacenamiento de Energía



Máster Universitario en
Ingeniería Industrial

Trabajo Fin de Máster

Martín López Sexmilo

Mónica Aguado Alonso

Raquel Garde Aranguren

Pamplona, 16 de junio de 2017



CENER

CENTRO NACIONAL DE
ENERGÍAS RENOVABLES

upna
Universidad Pública de Navarra
Nafarroako Unibertsitate Publikoa

**Abstract**

The development of an application able to evaluate multiple choices of electricity storage technologies to be used in various energy applications is presented in this End-of-Master's Project.

The main function of the developed tool is to select the most appropriate technology which will be used depending on different parameters (value chain position, energy service to provide, economic costs, technical capacities and so on).

Potentially applicable technologies and their relation with different grid applications is something taken into account. An analysis of several tools related to energy storage available in the market is provided too. Finally, the application is implemented using a computer program, MATLAB.

Resumen

En el presente Trabajo Fin de Máster, TFM en adelante, se presenta la implementación de una aplicación que permita evaluar múltiples posibilidades de tecnologías de almacenamiento de energía eléctrica para su uso en diversas aplicaciones energéticas.

La función principal de la herramienta a desarrollar es la selección de la tecnología más apropiada para utilizarse en cada caso de estudio en función de diversos parámetros (posición en la cadena de valor, servicio energético a proveer, viabilidad económica, capacidades técnicas, etc...)

Para ello es necesario conocer las tecnologías potencialmente aplicables y su relación con las diferentes aplicaciones energéticas en la red. Se realiza también un análisis de los programas existentes en el mercado con funcionalidades relativas al almacenamiento de energía. Finalmente se lleva a cabo la implementación de la aplicación mediante programación por ordenador. El programa usado para ello es MATLAB.

Palabras clave

- Almacenamiento / Storage
- Aplicación / Application
- Electricidad / Electricity
- Energía / Energy
- Red / Grid
- Tecnología / Technology



CENER

CENTRO NACIONAL DE
ENERGÍAS RENOVABLES

upna
Universidad Pública de Navarra
Nafarroako Unibertsitate Publikoa



ÍNDICE

ÍNDICE	5
LISTA DE FIGURAS	6
LISTA DE TABLAS	7
CAPÍTULO 2. PLANTEAMIENTO Y OBJETIVOS	8
CAPÍTULO 3. INTRODUCCIÓN	12
3.1. INTRODUCCIÓN.....	14
CAPÍTULO 4. PROGRAMAS EXISTENTES	16
4.1. PROGRAMAS EXISTENTES EN EL MERCADO.....	18
4.1.1. <i>ES-SelectTM</i>	19
4.1.2. <i>Energy Storage Valuation Tool by EPRI</i>	20
4.1.3. <i>Energy Storage Computational Tool</i>	21
4.1.4. <i>HOMER</i>	22
4.1.5. <i>PSS/E</i>	23
4.1.6. <i>Positive Sequence Load Flow (PSLF)</i>	23
4.1.7. <i>DigSilent</i>	24
4.1.8. <i>Plexos</i>	24
4.1.9. <i>WindHyGen</i>	24
CAPÍTULO 5. PROGRAMA REALIZADO	25
5.1. ENFOQUE	27
5.2. INTRODUCCIÓN A LA PROGRAMACIÓN	29
5.3. FUNCIONAMIENTO	32
CAPÍTULO 6. CASO REAL DE APLICACIÓN	53
6.1. CASO REAL DE APLICACIÓN	55
6.1.1. ESCENARIO 1	56
6.1.2. ESCENARIO 2	57
6.1.3. ESCENARIO 3	58
6.1.4. ESCENARIO 4	59
6.1.5. ESCENARIO 5	60
6.1.6. ESCENARIO 6	60
6.2. RESUMEN.....	61
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES	63
7.1. CONCLUSIONES	65
CAPÍTULO 8. BIBLIOGRAFÍA	67
8.1. BIBLIOGRAFÍA.....	69
CAPÍTULO 9. ANEXOS	70
9.1. ANEXO I.....	72

**LISTA DE FIGURAS**

<i>Figura 1. Centro Nacional de Energías Renovables</i>	10
<i>Figura 2. Layout de ES-SelectTM</i>	20
<i>Figura 3. Layout de ESVT</i>	21
<i>Figura 4. Layout de ESCT</i>	22
<i>Figura 5. Interfaz gráfica de HOMER</i>	23
<i>Figura 6. Metodología seguida en la selección de la tecnología de almacenamiento I</i>	27
<i>Figura 7. Metodología seguida en la selección de la tecnología de almacenamiento II</i>	28
<i>Figura 8. GUIDE inicial</i>	31
<i>Figura 9. Ejemplo de sumadora</i>	31
<i>Figura 10. Pantalla inicial</i>	33
<i>Figura 11. Selección de la posición en la cadena de valor del sistema eléctrico</i>	34
<i>Figura 12. Compatibilidad (servicios de red)</i>	35
<i>Figura 13. Compatibilidad (tecnologías de almacenamiento)</i>	36
<i>Figura 14. Selección de los servicios de red deseados I</i>	36
<i>Figura 15. Selección de los servicios de red deseados II</i>	37
<i>Figura 16. Apps Database I</i>	38
<i>Figura 17. Apps Database II</i>	38
<i>Figura 18. Storage Database I (Features)</i>	40
<i>Figura 19. Storage Database II (Cycles & Costs)</i>	40
<i>Figura 20. Storage Database III (Feasibility Parameters)</i>	41
<i>Figura 21. Cálculo de los factores de uso de los servicios y beneficio anual asociado I</i>	42
<i>Figura 22. Cálculo de los factores de uso de los servicios y beneficio anual asociado II</i>	44
<i>Figura 23. Cálculo de factores de uso de la mejor combinación de servicios y beneficio anual asociado</i>	45
<i>Figura 24. Barra de estado</i>	46
<i>Figura 25. Cálculo de factibilidades de las tecnologías de almacenamiento I</i>	46
<i>Figura 26. Cálculo de factibilidades de las tecnologías de almacenamiento II</i>	49
<i>Figura 27. Selección del sistema de almacenamiento</i>	51
<i>Figura 28. Zn-Aire, escenario 1</i>	56
<i>Figura 29. Zn-Aire, escenario 1 (madurez = 0)</i>	56
<i>Figura 30. Zn-Aire, escenario 2</i>	57
<i>Figura 31. Zn-Aire, escenario 2 (madurez = 0)</i>	57
<i>Figura 32. Zn-Aire, escenario 3</i>	58
<i>Figura 33. Zn-Aire, escenario 3 (madurez = 0)</i>	58
<i>Figura 34. Zn-Aire, escenario 4</i>	59
<i>Figura 35. Zn-Aire, escenario 4 (madurez = 0)</i>	59
<i>Figura 36. Zn-Aire, escenario 5</i>	60
<i>Figura 37. Zn-Aire, escenario 5 (madurez = 0)</i>	60
<i>Figura 38. Zn-Aire, escenario 6</i>	61
<i>Figura 39. Zn-Aire, escenario 6 (madurez = 0)</i>	61
<i>Figura 40. Factibilidades relativas comparadas con la mejor tecnología</i>	62
<i>Figura 41. Relación €//\$ (2009-2010)</i>	72



Figura 42. Variación del IPC desde diciembre de 2009 hasta marzo de 2017..... 73

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Tecnologías de almacenamiento.....</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 2. Escenarios de análisis de viabilidad técnica</i>	<i>55</i>
<i>Tabla 3. Escenario 1</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 4. Escenario 2</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 5. Escenario 3</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 6. Escenario 4</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 7. Escenario 5</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 8. Escenario 6</i>	<i>61</i>



CENER

CENTRO NACIONAL DE
ENERGÍAS RENOVABLES

upna
Universidad Pública de Navarra
Nafarroako Unibertsitate Publikoa

CAPÍTULO 2. PLANTEAMIENTO Y OBJETIVOS



CENER

CENTRO NACIONAL DE
ENERGÍAS RENOVABLES

upna
Universidad Pública de Navarra
Nafarroako Unibertsitate Publikoa



2. Planteamiento y objetivos

El presente Trabajo de Fin de Máster, TFM en adelante, está enmarcado en la Cátedra de Energías Renovables de la Universidad Pública de Navarra (UPNA). La Cátedra nace en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación, tratándose de un modelo estable de colaboración entre la universidad y diversas empresas, entre ellas el Centro Nacional de Energías Renovables (CENER), lugar en el cual se ha desarrollado este TFM. En un acuerdo entre la UPNA y CENER, la universidad facilita el acceso de alumnos a la empresa, de forma que se realiza el TFM en la misma sobre proyectos de interés mutuo.

CENER es un centro tecnológico cuya sede está en la Comunidad Foral de Navarra, España. Lleva a cabo la investigación aplicada y el desarrollo y fomento de las energías renovables. Sus principales áreas de investigación están divididas según las tecnologías existentes. Además, cuenta con un departamento de eficiencia energética en edificios y un departamento transversal a todas las tecnologías. Estos departamentos son:

- Departamento de Eólica
- Departamento de Solar Térmica
- Departamento de Solar Fotovoltaica
- Departamento de Biomasa
- Departamento de Energética Edificatoria
- Departamento de Integración en Red de las Energías Renovables



Figura 1. Centro Nacional de Energías Renovables



Es en el último departamento en el que se realiza este TFM. En este primero se estudian sistemas que permitan la adecuada integración de las energías renovables, solucionando problemas como la generación irregular y su inyección en la red. El almacenamiento de energía eléctrica es también un aspecto tratado en el departamento, ya que permite la adecuada integración de las energías renovables en la red. De esta forma, el trabajo desarrollado consiste en buscar soluciones a problemas relacionados con la actual introducción masiva de producción renovable en la red eléctrica, siendo el almacenamiento una de ellas.

Es en este punto cuando nace el presente TFM. Como su título indica, el objetivo es claro: desarrollar un programa/aplicación para ordenador que permita evaluar diversas tecnologías de almacenamiento de energía y seleccionar la más adecuada para cubrir unos servicios de red.

La implementación de esta aplicación requiere de una revisión de los servicios que el almacenamiento puede proveer a la red eléctrica, así como de las tecnologías de almacenamiento existentes y futuras. Es necesario entender cómo se relacionan entre sí estos dos conceptos (servicio de red – tecnologías de almacenamiento). Todos los datos buscados, estudiados y recopilados pueden accederse en el Complemento al Trabajo Fin de Máster, CTFM en adelante, realizado conjuntamente con este TFM. Se trata del CTFM *Estado del Arte de las Aplicaciones de Red, Tecnologías de Almacenamiento y Mercado Eléctrico*.

La razón de ser de este TFM es la necesidad de aclarar de una manera objetiva los pasos a seguir para utilizar un sistema de almacenamiento de energía eléctrica. Utilizando fuentes fiables de información se estudiarán diversas variables, entre ellas los costes relativos a los sistemas, para después realizar una serie de operaciones que inclinen la balanza a favor de una tecnología u otra para almacenar energía.

Con todo esto, los clientes, investigadores e ingenieros involucrados en el tema del almacenamiento de energía eléctrica dispondrán de una fuente fiable y objetiva para dar un primer paso en la implantación de un sistema de este tipo.



CENER

CENTRO NACIONAL DE
ENERGÍAS RENOVABLES

upna
Universidad Pública de Navarra
Nafarroako Unibertsitate Publikoa

CAPÍTULO 3. INTRODUCCIÓN



CENER

CENTRO NACIONAL DE
ENERGÍAS RENOVABLES

upna
Universidad Pública de Navarra
Nafarroako Unibertsitate Publikoa



3.1. Introducción

Un problema habitual relacionado con los sistemas de almacenamiento de energía es la falta de un modelo de negocio para calcular la factibilidad de un sistema u otro. Actualmente, al no haberse establecido un marco de este estilo, resulta complicado tener en cuenta todas las variables que entran en juego y que al final determinarán el uso de una tecnología. Del mismo modo, no existe consenso a la hora de dotar de un valor a los servicios de red, ya que en diferentes países se utilizan diferentes criterios para ello. En conjunto, puede afirmarse que ambas incertidumbres no ayudan a promover el despliegue comercial de los sistemas de almacenamiento de energía.

Como era de esperar, el factor económico está presente en ambos aspectos. A día de hoy no existen casos de negocio rentables, en los que se use una tecnología de almacenamiento de energía, debido a la falta de un esquema de mercado, como ya se ha mencionado. A su vez, las aplicaciones de red tampoco disponen de un esquema objetivo que defina su valor. Por ello, se ha realizado un estudio del estado del arte de ambos aspectos, desarrollado en el CTFM. De los datos recopilados se nutre la herramienta desarrollada, empleando valores provenientes de estudios y proyectos de almacenamiento de energía eléctrica, de forma actualizada.

Es por ello que en este TFM se ha realizado una aplicación, una herramienta informática que reúne los criterios que se han considerado más importantes, evaluando la factibilidad de cada sistema de almacenamiento, realizando una lista final con las tecnologías más adecuadas. De esta forma, se obtiene una herramienta que utiliza un método objetivo y sistemático para realizar una selección inicial.

La aplicación ha sido diseñada poniendo énfasis en la simplicidad, de forma que su uso resulte sencillo y amigable para el usuario. De este modo, el fin último de esta herramienta es sugerir la tecnología de almacenamiento que mejor se sitúa para servir a unas aplicaciones de red, teniendo en cuenta diversos parámetros que más adelante se explican. Sin embargo, es necesario un estudio de viabilidad posterior para confirmar la selección e implantación del sistema sugerido; este programa sirve como un primer paso, una primera toma de contacto con las tecnologías para eliminar opciones incompatibles desde el primer momento.

La metodología empleada, en inglés denominada *cross-check*, se basa en cotejar las necesidades técnicas de las aplicaciones de red con las características técnicas de los



sistemas de almacenamiento, de forma que salgan más beneficiadas las tecnologías que ofrecen valores con similitud a las aplicaciones de red deseadas. Intentar realizar esto sin una herramienta resulta muy complicado, dadas las ingentes cantidades de datos a cotejar. Es por ello que la realización de una aplicación que trate los datos de manera objetiva reviste de gran importancia en el futuro de los sistemas de almacenamiento de energía y su despliegue comercial.

En los siguientes capítulos se mencionan los programas existentes que realizan tareas similares, una revisión del enfoque utilizado y por último se realiza una explicación del programa implementado. Además, al igual que en el CTFM, se habla indistintamente de aplicación o de servicio de red a lo largo de este proyecto.



CENER

CENTRO NACIONAL DE
ENERGÍAS RENOVABLES

upna
Universidad Pública de Navarra
Nafarroako Unibertsitate Publikoa

CAPÍTULO 4. PROGRAMAS EXISTENTES



CENER

CENTRO NACIONAL DE
ENERGÍAS RENOVABLES

upna
Universidad Pública de Navarra
Nafarroako Unibertsitate Publikoa



4.1. Programas existentes en el mercado

Actualmente están disponibles en el mercado diversos programas que realizan tareas variadas relacionadas con el almacenamiento de energía eléctrica. De hecho, algunos realizan también la selección de sistemas de almacenamiento. Realizan la selección de formas diferentes, utilizando otros métodos que los implementados en el programa desarrollado en este TFM, además de realizar múltiples funciones diferentes. A su vez los hay disponibles que realizan funciones diferentes.

Los programas que mayores diferencias presentan con el programa implementado son los siguientes:

- PSS/E
- Positive Sequence Load Flow (PSLF)
- DigSilent
- Plexos
- WindHyGen

Estos programas presentan funcionalidades diferentes a las del programa realizado, como el dimensionamiento de tecnologías, análisis del impacto de sistemas de almacenamiento en la red, etc. Dados los diferentes enfoques que se aplican a los programas existentes, queda demostrada la complejidad de la temática del almacenamiento de energía eléctrica. Puede abordarse desde perspectivas muy diferentes.

Entre los programas estudiados relacionados con la selección de un sistema de almacenamiento se encuentran los siguientes:

- ES-Select™
- Energy Storage Valuation Tool by EPRI
- Energy Storage Computational Tool
- HOMER

En el caso del programa implementado, como se verá más adelante, se ha escogido un enfoque relacionado con la selección porque escoger la tecnología correcta a la hora de realizar un servicio de red es esencial para lograr la viabilidad de un proyecto de almacenamiento.



En esta sección se realiza una revisión de los programas mencionados, comentando sus funcionalidades y destacando las semejanzas y diferencias con el programa implementado.

Se comienza explicando los programas con funcionalidades relacionadas con la selección de una tecnología de almacenamiento y se finaliza comentando los programas con fines diferentes, pero también relativos al almacenamiento de energía eléctrica.

4.1.1. ES-Select™

El primero de los programas mencionados es ES-Select™. Mediante este programa pueden seleccionarse diversas aplicaciones de red, con el fin de encontrar el mejor sistema de almacenamiento que sirva para realizarlas. ES-Select™ calcula factibilidades relativas para 20 tecnologías de almacenamiento posibles, en función de diversos parámetros y relaciones, y las ordena de mayor a menor. De esta forma, el usuario puede acceder a una valoración objetiva de qué tecnología es la más apropiada para cumplir sus aplicaciones de red.

Los datos y las incertidumbres los trata como distribuciones estadísticas en lugar de mediante integrales. El objetivo del programa es hacerse sencillo para un usuario novel, del mismo modo que atractivo para un usuario entendido en la materia.

Una ventaja de este programa es su output final, el cual muestra estudios de viabilidad económica con resultados como *cash flow*, VAN y *payback*. Otra clara ventaja es que se trata de un programa gratuito, al contrario que alguno de los mencionados.

De todas formas, aunque ES-Select tiene sus puntos fuertes, se trata de una herramienta que sirve como ayuda inicial en el proceso de selección de un sistema de almacenamiento.

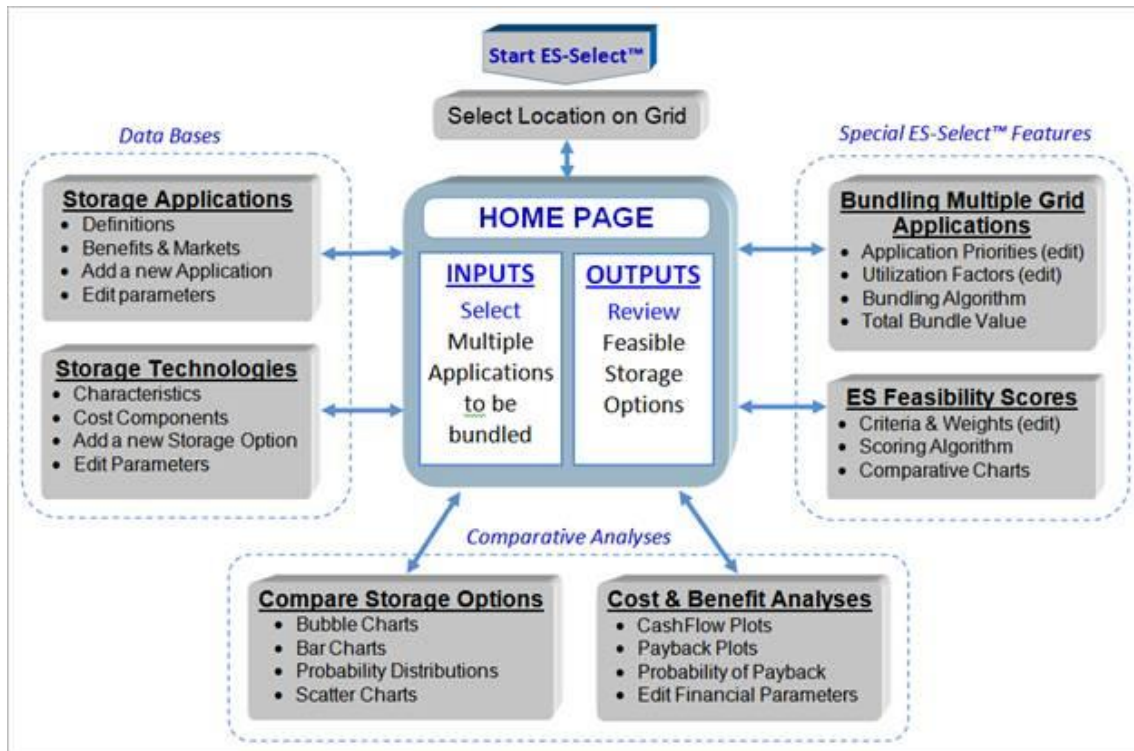


Figura 2. Layout de ES-Select™

En la Figura 2 se muestra un esquema con las funcionalidades de ES-Select™. Se trata de un programa con unos objetivos semejantes al desarrollado en este TFM, con la diferencia de que se han introducido aspectos mejorados y diferenciadores que se explicarán más adelante.

4.1.2. Energy Storage Valuation Tool by EPRI

En esta herramienta se realiza una evaluación de costes de diferentes tecnologías de almacenamiento. Al igual que con ES-Select™, está implementado de forma que sea un software amigable con el usuario y transparente con los modelos utilizados. Presenta una interfaz gráfica que paso por paso lleva al usuario por todo el programa, introduciendo casos de estudio de sistemas de almacenamiento. Finalmente se obtiene como output el VAN, beneficio, factores financieros asociados e información graficada, como puede verse en la Figura 3.

Se trata de un programa de pago, a diferencia de ES-Select™.

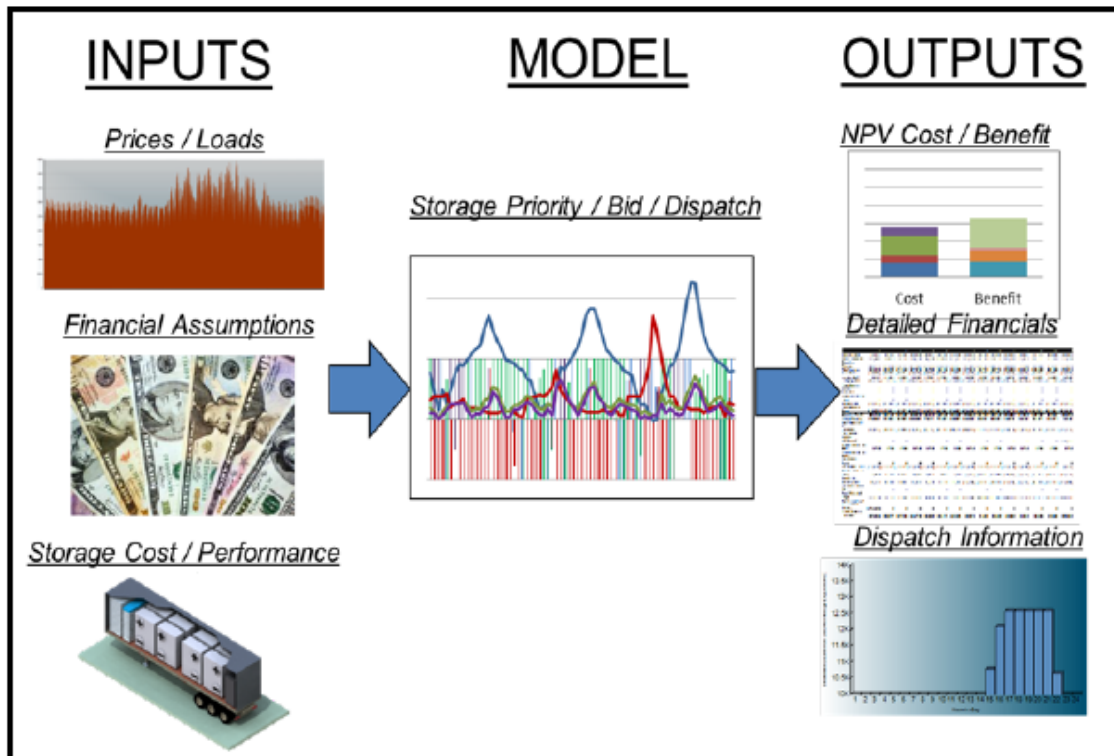


Figura 3. Layout de ESVT

4.1.3. Energy Storage Computational Tool

Se trata de un potente software diseñado por el DOE (*Department Of Energy, USA*) y el NETL (*National Energy Technology Laboratory*), el cual ofrece un cálculo de los beneficios asociados a sistemas de almacenamiento encargados de cumplir diversos servicios de red. Sin embargo, los resultados derivados del uso de esta herramienta no tienen como fin ser utilizados con fines comerciales, sino como parte de una formación académica. En la Figura 4 puede verse la guía del programa.

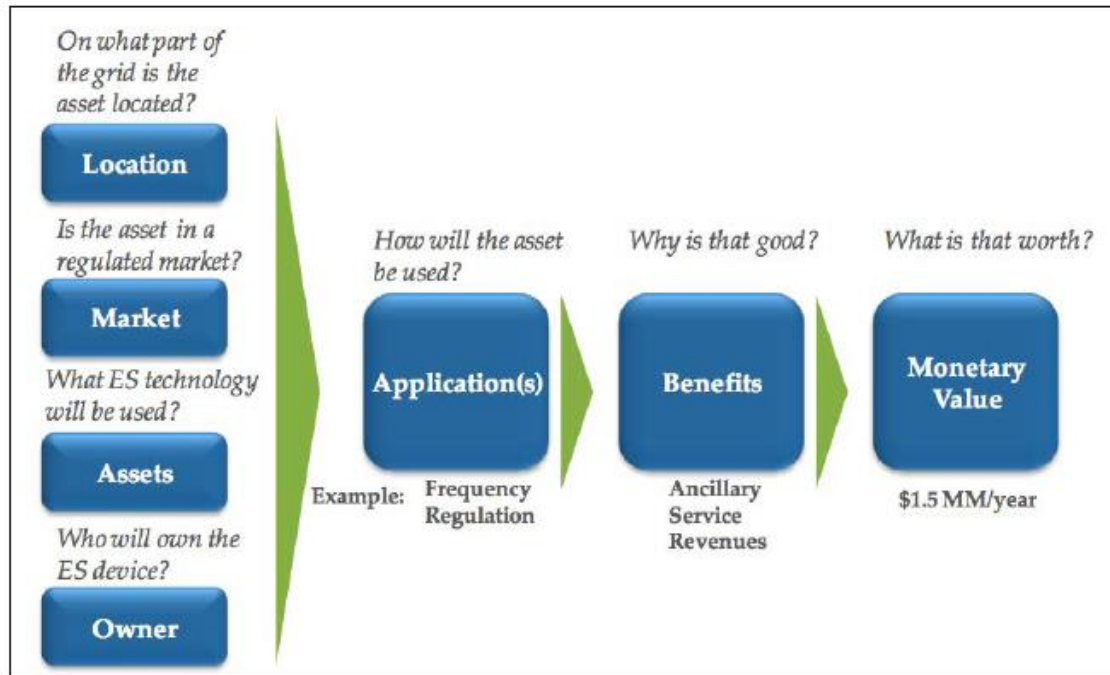


Figura 4. Layout de ESCT

En este caso se trata de un programa gratuito [1]. Está desarrollado en Excel. Esta herramienta realiza un estudio global de un proyecto de almacenamiento, para lo que es necesario introducir multitud de datos, del lado de los servicios de red y del lado de las tecnologías de almacenamiento. Los datos introducidos sirven para calcular viabilidades económicas, amortizaciones, emisiones de CO₂ durante los años siguientes, etc. En definitiva, es un programa más complejo que el implementado en este TFM.

4.1.4. HOMER

HOMER es un programa americano con una versión libre de pago y otra más completa con precio. Se trata del programa más usado a nivel mundial en programas de simulación de este tipo. La versión HOMER Pro [2] es una herramienta encargada de optimizar diseños de microrredes. Su alcance es amplio, incluyendo desde pequeñas redes en pueblos a grandes redes militares.

En resumen, HOMER realiza simulaciones de microrredes, optimiza el diseño de las mismas y calcula análisis de sensibilidad.

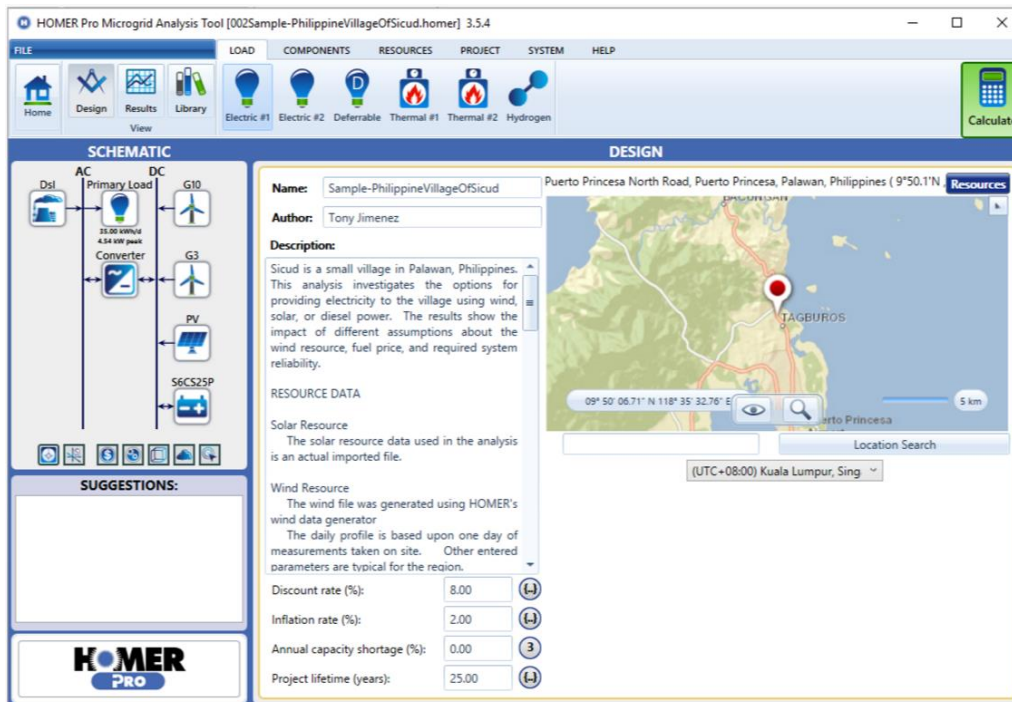


Figura 5. Interfaz gráfica de HOMER

A su vez existen diferentes programas con fines diferentes al implementado en este TFM. Son los mencionados en los apartados siguientes.

4.1.5. PSS/E

Se trata de un software diseñado para trabajar con flujos de energía y estabilidades. Desarrollado por Siemens, este programa ofrece ayuda para diseñar una red de distribución o de transporte de electricidad. Mediante su uso pueden realizarse análisis de flujos de potencia, análisis de fallos y simulaciones en tiempo real, de forma que se identifique y/o cuantifique el impacto de un sistema de almacenamiento conectado a la red. Los sistemas de almacenamiento tienen cabida aquí al poder utilizar el programa para determinar la capacidad necesaria para, por ejemplo, estabilizar la red. En este caso, es un programa de pago.

4.1.6. Positive Sequence Load Flow (PSLF)

Diseñado por General Electric, es un programa ideal para resolver problemas estacionarios relacionados con flujos de energía, así como realizar ensayos dinámicos. Se caracteriza por contener una extensa base de datos con diferentes modelos de líneas de transmisión, de generadores y cargas, de componentes de control, etc., por lo que su uso es verdaderamente amplio.



4.1.7. DigSilent

Se trata de un programa de pago alemán que al igual que PSS/E evalúa el impacto que tiene un sistema de almacenamiento funcionando conectado a red. Este programa adjunta una base de datos y un sistema de gestión para subestaciones eléctricas.

4.1.8. Plexos

Plexos es otro programa de pago cuyo fin es facilitar al usuario la toma de decisiones sobre la compra-venta y almacenamiento de energía eléctrica.

4.1.9. WindHyGen

Este programa no está disponible en el mercado porque se ha desarrollado en CENER. Al igual que plexos, también permite la toma de decisiones acerca de la compra-venta y almacenamiento de energía eléctrica.



CENER

CENTRO NACIONAL DE
ENERGÍAS RENOVABLES

upna
Universidad Pública de Navarra
Nafarroako Unibertsitate Publikoa

CAPÍTULO 5. PROGRAMA REALIZADO



CENER

CENTRO NACIONAL DE
ENERGÍAS RENOVABLES

upna
Universidad Pública de Navarra
Nafarroako Unibertsitate Publikoa

5.1. Enfoque

Tal y como se ha mencionado en apartados anteriores, existe una problemática relacionada con los sistemas de almacenamiento de energía. Hoy en día es extremadamente complicado tener en cuenta todas las variables que entran en juego en el proceso de selección de una tecnología, en adición a la gran cantidad de tecnologías disponibles. A su vez, el número de éstas va en aumento conforme se investiga en nuevos materiales y en nuevas metodologías. Como se describe en el CTFM, las tecnologías pueden proveer diferentes servicios de red.

Además, las aplicaciones que puede demandar la red eléctrica no están universalizadas, tratándose de manera diferente en función de la red eléctrica de cada país.

Puede deducirse de todo ello la dificultad que presenta la selección de un sistema de almacenamiento teniendo en cuenta todas las variables que entran en juego.

El enfoque seguido para la realización del programa de este TFM consiste en tener en cuenta las variables determinantes en el proceso de selección y relacionarlas. Dependiendo del servicio, las funcionalidades demandadas a la tecnología son muy variadas, por lo que no todas las tecnologías son apropiadas para ese servicio. Mediante la metodología del *cross-check* se cruzan las capacidades de las tecnologías con las demandas de las aplicaciones de red, obteniendo una lista con las tecnologías apropiadas.

Esto último puede apreciarse en la Figura 6.

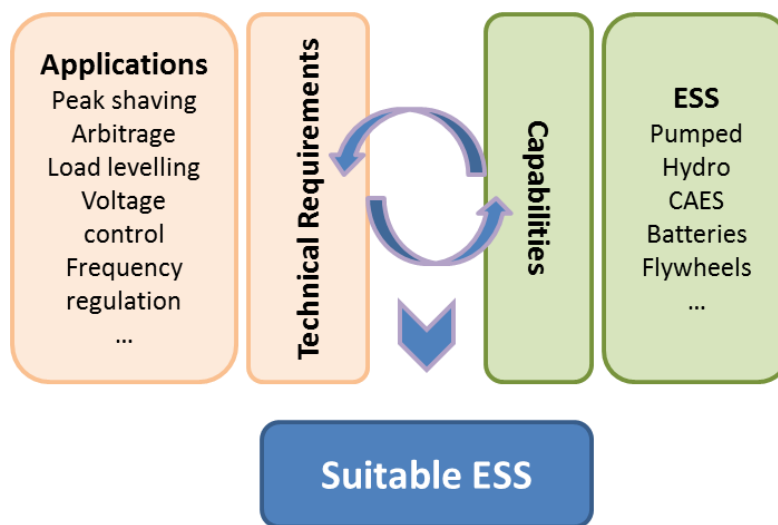


Figura 6. Metodología seguida en la selección de la tecnología de almacenamiento I

Como primer paso, el programa es capaz de identificar las tecnologías de almacenamiento capaces de proveer los servicios requeridos. Sin embargo, hay más parámetros que entran en juego en el proceso de selección, como la madurez, la posición en la cadena de valor, requerimientos técnicos, costes, etc. Por ello, es necesario realizar un análisis comparativo entre las tecnologías aceptables, para luego ordenarlas según factibilidades.

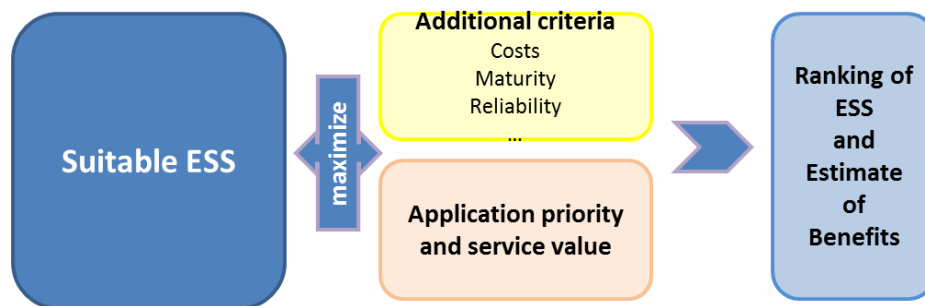


Figura 7. Metodología seguida en la selección de la tecnología de almacenamiento II

Como se ve en la Figura 7, la segunda parte metodológica consiste en aplicar criterios adicionales y definir las distintas prioridades de las aplicaciones a la hora de realizarse, para así calcular beneficios.

A su vez, el programa presenta dos aspectos diferenciadores de los programas expuestos anteriormente. El primero es la capacidad del programa de maximizar los beneficios obtenibles según las aplicaciones de red seleccionadas, mediante un algoritmo de cálculo implementado para ello.

Además, el programa está diseñado para realizar su unión con otro programa desarrollado en CENER para realizar cálculos de viabilidad económica, por lo que la sinergia entre ambos programas es evidente.

Ambos aspectos se vuelven a tratar más adelante.



5.2. Introducción a la programación

Como ya se ha explicado en varias ocasiones, el objetivo principal del presente TFM es desarrollar una aplicación o programa. Para ello es necesario cumplir tres aspectos: disponer de un ordenador, disponer de un entorno de programación y tener los conocimientos necesarios para utilizar dicho entorno. Las opciones disponibles de entornos de programación son muy amplias, cada uno con su función y su forma de utilizarse.

En este apartado se realiza una explicación del programa implementado. Paso a paso, se muestran figuras con imágenes de las pantallas más relevantes del programa. En momentos que se considera necesario se detalla una explicación del funcionamiento interno (códigos implementados, algoritmos, bucles...), ya que una gran parte del peso del presente TFM ha consistido en crear algoritmos de programación.

El primer paso ha sido elegir el entorno de programación con el que realizar la programación. Las opciones que se han considerado son las siguientes:

- C/C++
- Java
- Matlab

En la selección del lenguaje es necesario indicar el conocimiento previo por parte del autor de la programación mediante Matlab. Las otras dos opciones precisan de un periodo inicial de aprendizaje para poder utilizarse. Además, el Departamento de Integración en Red de CENER (en el cual se ha desarrollado el programa) cuenta con otras herramientas implementadas con Matlab, por lo que la compatibilidad entre el programa de este TFM y ellas está asegurada.

Ampliamente conocido y utilizado en la industria, Matlab es un potente entorno de programación. Con su propio lenguaje asociado, su fortaleza es el trabajo y la operación con matrices. Se trata de una herramienta muy versátil que permite cálculos rápidos con ellas. Dado que Matlab puede interpretar las bases de datos del programa implementado como matrices y operar según lo deseado por el programador, resulta una opción interesante.

Debido a las razones expuestas, el entorno de programación elegido ha sido Matlab.



La primera idea que se ha contemplado es escribir el código completo del programa para que al lanzarlo se ejecute de principio a fin, pero este método se considera ineficiente por varias razones:

- No permite interacción con el usuario de forma clara
- Presenta un elevado tiempo de ejecución total
- Visualización básica
- Interrelaciones del programa ambiguas
- Ausencia de interfaz gráfica

Para evitar estos aspectos, se aprovecha una opción que Matlab tiene implementada para la creación de programas. Se trata de un entorno de desarrollo visual con el que se pueden crear desde programas simples (una sumadora, como se ejemplifica más adelante) a programas más complejos (como el presentado en esta sección). El entorno en cuestión es un tipo de GUI (*Graphical User Interface*), renombrado por MATLAB como GUIDE (*Graphical User Interface Development Environment*). Tal y como su nombre indica, consiste en una forma gráfica de programar, orientada a objetos. Cada objeto presenta diferentes características mostradas en sus campos, y su interrelación programada por el usuario consigue funcionalidades y programas completos.

En la Figura 8 se ve la pantalla de inicio de GUIDE. Como puede observarse, en la columna de la izquierda se dispone de los distintos elementos a utilizar (pulsadores, botones, tablas, textos...). En el centro del GUIDE se colocan los elementos que se quieren utilizar, simplemente seleccionándolos de la columna izquierda y arrastrándolos. Cada objeto seleccionado presenta diferentes campos que son editables, como su nombre, su color, su tamaño, etc.

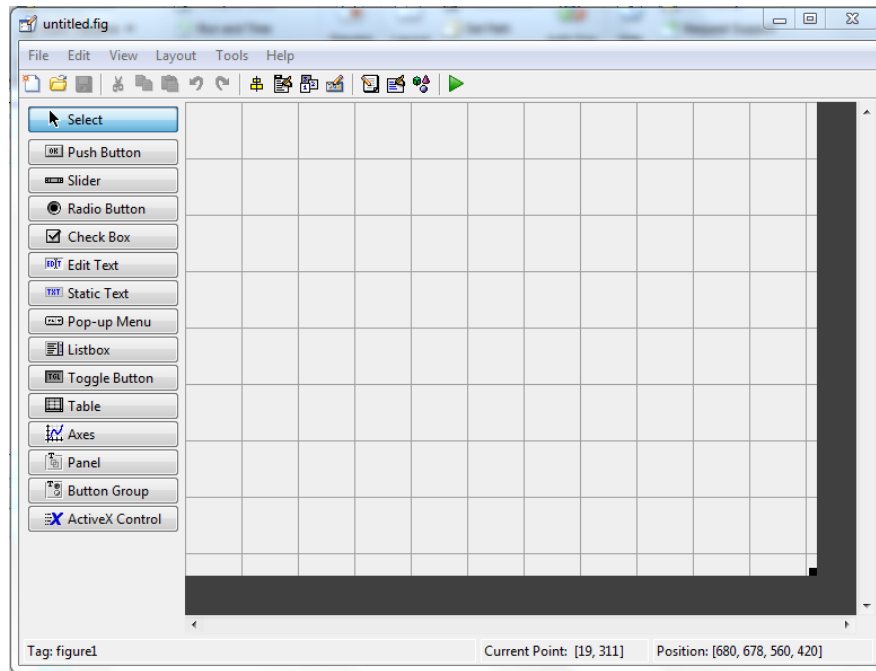


Figura 8. GUIDE inicial

Una vez introducidos los elementos a utilizar, es necesario programarlos. Esto no significa solo modificar sus campos, sino conseguir que el GUIDE realice lo que el usuario desea. Es realmente este paso el que requiere conocimiento y trabajo por parte del programador. Una vez realizada la programación, el GUIDE está preparado para lanzarse, mediante el símbolo de *play* verde.

A continuación se muestra un ejemplo sencillo. Supongamos que queremos realizar una sumadora, a la cual sea necesario introducir dos números, y, apretando el botón correspondiente, se realice la suma. En la imagen de la izquierda se muestra la figura del GUIDE realizado, y en la derecha se muestra la suma realizada.

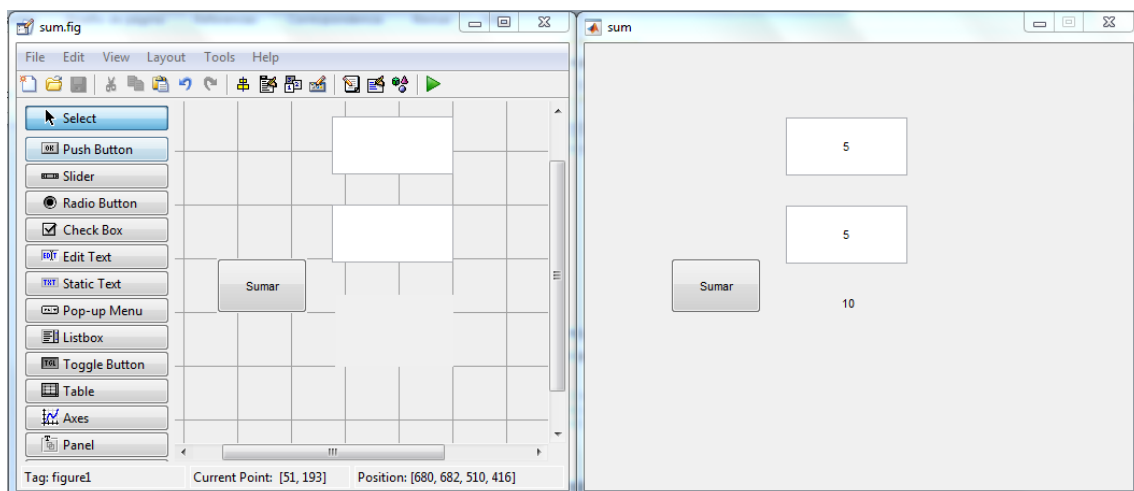


Figura 9. Ejemplo de sumadora



En este ejemplo es necesario programar que cuando se pulse el botón ‘Sumar’ se lea los números introducidos en las dos casillas blancas y se realice su suma, mostrándose en la casilla inferior. De la misma forma que en este ejemplo, en el programa implementado se han tenido en cuenta todo lo expuesto en el CTFM para conseguir seleccionar la tecnología de almacenamiento más adecuada a unos servicios de red.

Hay que remarcar que la mayor carga de trabajo de este proyecto ha sido la de aprender a programar con GUIDE y conseguir que el programa realice lo expuesto anteriormente, para lo cual ha sido necesario crear códigos de hasta 3000 instrucciones por GUIDE. Por ello, a continuación se explica la lógica y el desarrollo de algún algoritmo que ha sido necesario implementar.

5.3. Funcionamiento

El programa que se ha desarrollado consta de varios GUIDE enlazados entre sí, de manera que los datos introducidos en unos son variables de entrada de los siguientes, los cuales los utilizan para operar, definir limitaciones, etc. En las siguientes líneas se mencionan los apartados que presenta el programa, coincidiendo con el orden que es necesario seguir para hacerlo funcionar correctamente.

- *Pantalla inicial*
- *Selección de la posición en la cadena de valor del sistema eléctrico*
- *Selección de los servicios de red deseados*
- *Cálculo de factores de uso de los servicios y beneficio anual asociado*
- *Cálculo de factores de uso de la mejor combinación de servicios y beneficio anual asociado*
- *Cálculo de factibilidades de las tecnologías de almacenamiento*
- *Selección del sistema de almacenamiento*

Además se presentan pantallas diferentes, en las cuales pueden visualizarse las bases de datos utilizadas.

El primero de los GUIDE se muestra en la Figura 10. Comentar que las diversas interfaces se han realizado en inglés, de forma que uso del programa no se limite innecesariamente.



Figura 10. Pantalla inicial

Diseñado íntegramente por el autor, al igual que los demás GUIDE que se muestran más adelante, en el anterior se aprecia la imagen del embalse de La Muela II, central hidroeléctrica de bombeo situada en Valencia. Se considera estética y técnicamente apto como primera interfaz del programa.

A su vez, se han introducido pulsadores que realizan diversas acciones:

- *EXIT*: Cierra el programa
- *About the author*: Abre un cuadro con breve información acerca del autor
- *About the program*: Abre un cuadro con breve información acerca del programa
- *GO*: Abre el siguiente GUIDE

Como primera interfaz, sus funcionalidades están limitadas a presentar el programa y al autor. En los siguientes GUIDE se entra más a fondo en materia técnica de almacenamiento y servicios de red.

El botón *GO* lleva al GUIDE representado en la Figura 11.

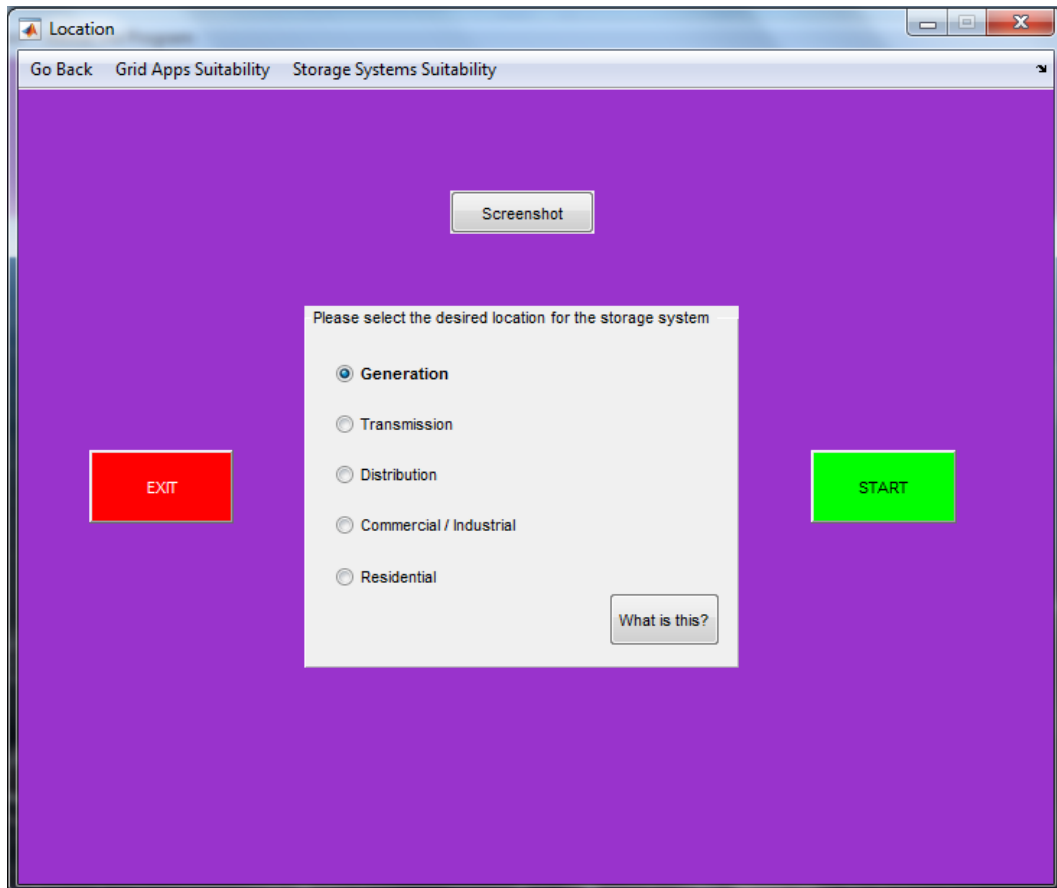


Figura 11. Selección de la posición en la cadena de valor del sistema eléctrico

Se trata de la segunda parte del programa. Sirve básicamente para seleccionar la localización de la tecnología de almacenamiento en la cadena de valor de la electricidad. De acuerdo con lo expuesto en el CTFM, resulta necesario conocer la posición que tendrá el sistema de almacenamiento en la red eléctrica. Tal y como ahí se explica, la localización es un parámetro importante, e incluso en ocasiones limitante, a la hora de seleccionar una tecnología. Las localizaciones posibles son las siguientes, indicadas con sus tamaños orientativos:

- *Generation*: Centrales o puntos de Generación (De 50 MW en adelante)
- *Transmission*: Red de Transporte (Hasta 10 MW)
- *Distribution*: Red de Distribución (Hasta 2 MW)
- *Commercial/Industrial*: Comercial e Industrial (Hasta 1 MW)
- *Residential*: Residencial (Hasta 100 KW)

La selección de una u otra posición en la cadena de valor del sistema eléctrico supone que los servicios de red a seleccionar estén disponibles o no, a la par que afecta también a los costes de instalación. Por ejemplo, si se selecciona la posición de Centrales o puntos de

Generación, servicios como el control de tensión o la calidad de la energía propios de sistemas de distribución y de menor tamaño carecen de sentido, por lo que no estarán disponibles para seleccionarse. La carencia de sentido siempre viene dada por incompatibilidades entre potencias o tiempos de respuesta entre tecnologías y los servicios de red.

Para conocer qué servicios de red son compatibles con qué posición en la cadena de valor se implementa el botón de *Grid Apps Suitability*. En la Figura 12 se aprecia la tabla que se abre al pulsar sobre él. Una 'x' significa aptitud, y su ausencia determina lo contrario. Pueden visualizarse las 23 aplicaciones o servicios de red explicados en el CTFM. La asignación de 'x' o un vacío se realiza cualitativamente.

Grid Applications	Generation	Transmission	Distribution	Commercial / Industrial	Residential
1 Retail Demand Charges				x	x
2 Retail TOU Energy Charges				x	x
3 Supply Capacity	x	x	x		
4 Energy Time-Shift (Arbitrage)	x	x	x	x	x
5 Transmission Upgrade Deferral	x	x	x		
6 Wind Energy Time-Shift (Arbitrage)	x	x	x	x	x
7 Distribution Upgrade Deferral		x	x		
8 Solar Energy Time-Shift (Arbitrage)	x	x	x	x	x
9 Transmission Congestion Relief	x	x	x		
10 Load Following	x	x	x	x	x
11 Renewable Capacity Firming	x	x	x	x	x
12 Black Start	x	x			
13 Service Reliability (Utility Backup)	x	x	x		
14 Service Reliability (Customer Backup)				x	x
15 Voltage Support		x	x		
16 Supply Spinning Reserve	x	x	x		
17 Area Regulation	x	x	x	x	x
18 Fast Regulation	x	x	x	x	x
19 Wind Energy Smoothing	x	x	x	x	x
20 Solar Energy Smoothing	x	x	x	x	x
21 Power Quality (Customer)				x	x
22 Power Quality (Utility)			x		
23 Transmission Support	x	x	x		

This table shows whether the grid applications are suitable for each location of the storage system or not.
 - x: suitable
 - void: unsuitable

Figura 12. Compatibilidad (servicios de red)

Del mismo modo, esta selección afecta también a la aptitud o no de las diversas tecnologías de almacenamiento. De poco sirven los sistemas SMES (*Super Magnetic Energy Storage*) en centrales de generación. Mediante el botón *Storage Systems Suitability* se accede a la tabla mostrada en la Figura 13.

	Storage Technologies	Abbreviation	Generation	Transmission	Distribution	Commercial / Industrial	Residential
1	Pumped Hydroelectricity Storage	PHS	x				
2	Compressed Air Storage System (Classic)	CAES	x	x			
3	Compressed Air Storage System (Advanced)	CAES-Adv	x	x			
4	Flywheel	Flwhl	x	x	x	x	x
5	Lead-Acid Battery	OPzS	x	x	x	x	x
6	Lead-Acid Battery (Advanced)	Adv-LA	x	x	x	x	x
7	Valve Regulated Lead-Acid Battery	VRLA	x	x	x	x	x
8	Ion-Lithium Battery (High Power)	Li-P	x	x	x	x	x
9	Ion-Lithium Battery (High Energy)	Li-E	x	x	x	x	x
10	Sodium-Sulfur Battery	Na-S	x	x	x	x	
11	Zebra Battery	Na-Ni-Cl	x	x	x	x	x
12	Vanadium Redox Battery	VRB	x	x	x	x	
13	Zinc-Bromide Flux Battery	Zn-Br	x	x	x	x	x
14	Zinc-Air Battery	Zn-Air	x	x	x	x	x
15	Nickel-Cadmium Battery	Ni-Cd		x	x	x	x
16	Nickel-Metal Hydride Battery	Ni-MH		x	x	x	x
17	Nickel-Zinc Battery	Ni-Zn		x	x	x	x
18	Super Magnetic Energy Storage	SMES		x	x	x	x
19	Thermal Energy Storage (Cold)	TES-C		x		x	x
20	Thermal Energy Storage (Hot)	TES-H				x	x
21	Electric Double Layer Capacitors	EDLC	x	x	x	x	

This table shows whether the storage systems are suitable for each position at the grid or not.
 - x: suitable
 - void: unsuitable

Figura 13. Compatibilidad (tecnologías de almacenamiento)

Una vez seleccionada la posición de la tecnología de almacenamiento en la red eléctrica, se está en disposición de pasar al siguiente GUIDE. Para sobrellevar la explicación del manejo del programa, y a modo de ejemplo, se elige la posición de *Distribution*, es decir, red de distribución. Una vez elegido, hay que pulsar el botón *START*, el cual nos lleva al GUIDE mostrado en la Figura 14.

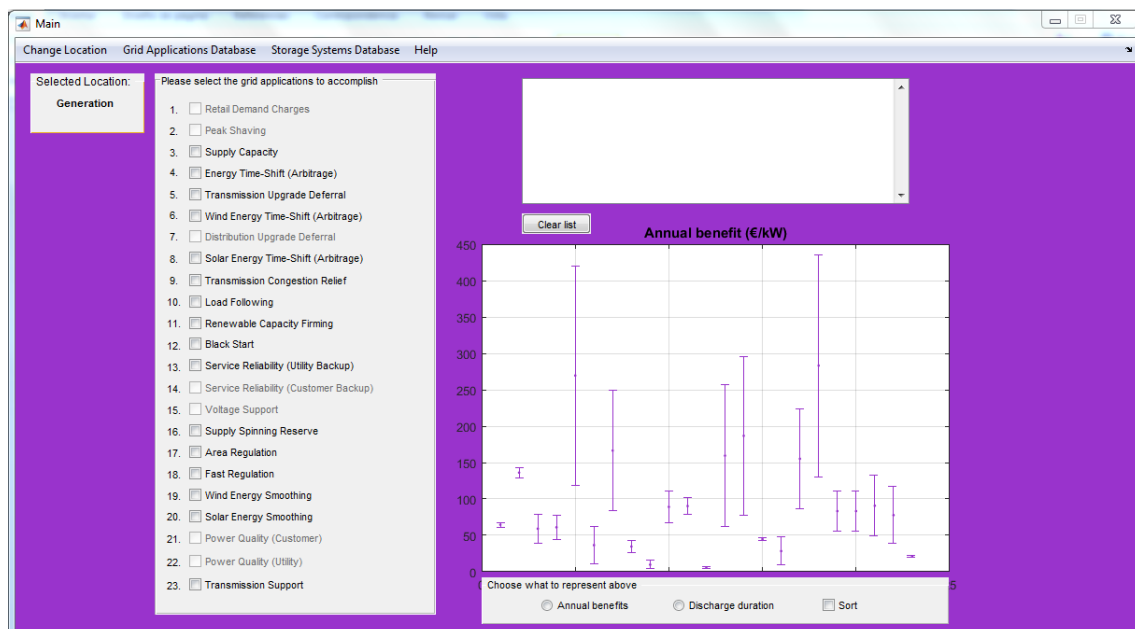


Figura 14. Selección de los servicios de red deseados I

Esta interfaz gráfica es la principal. Con esto se quiere decir que es donde se pueden seleccionar diferentes aplicaciones de red, ver características de cada una, y acceder al cálculo de qué tecnología serviría mejor a esas aplicaciones.

Pueden verse varias zonas diferenciadas. La columna de la izquierda consta de una lista de los 23 servicios de red escogidos (ya explicados en el CTFM). Como puede observarse algunas no están disponibles para su selección, mientras que otras sí están disponibles. Esto es así por la selección llevada a cabo en la interfaz mostrada en la Figura 11, la cual mediante lo mostrado en la Figura 12 determina la disponibilidad de cada servicio.

Por otra parte, en la gráfica central se grafican los beneficios anuales que ofrece cada servicio de red, así como la duración de descarga. Para graficar uno u otro aspecto hay que utilizar el pulsador correspondiente. Por último, en la tabla superior se genera una lista con los servicios de red seleccionados.

En la esquina superior izquierda se aprecia la posición elegida en la red eléctrica para instalar la tecnología de almacenamiento. En caso de que se desee cambiar la posición en la cadena de valor de la electricidad, se crea el botón *Change Location*, visible justo encima, en el menú implementado.

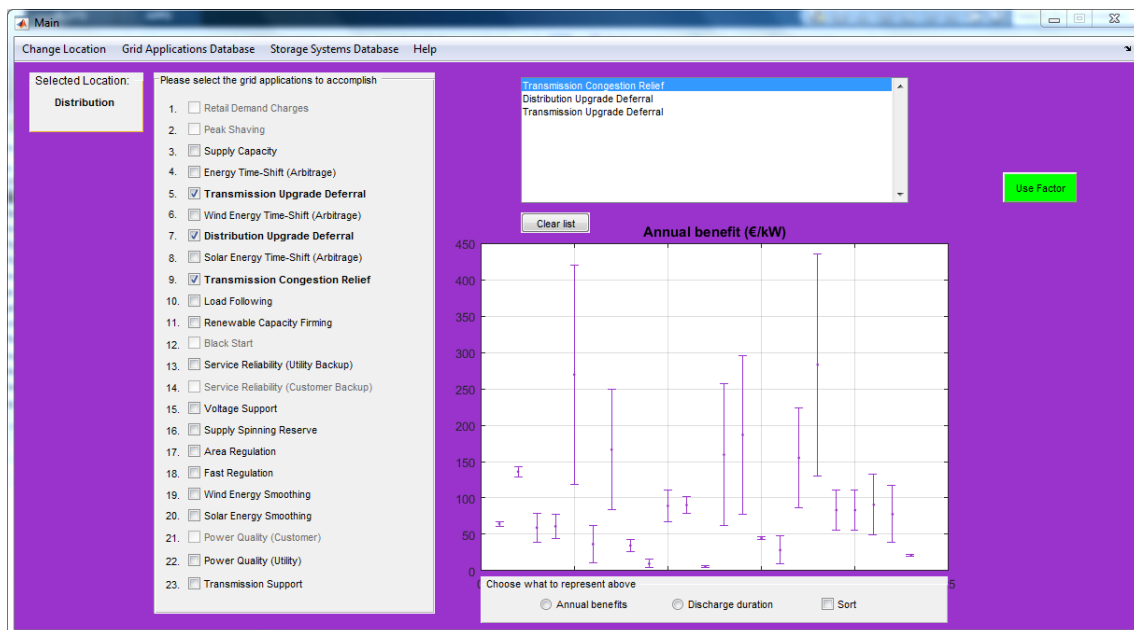


Figura 15. Selección de los servicios de red deseados II

Se puede acceder a las características de cada aplicación mediante el botón de *Grid Applications Database*. De esta forma se accede a las dos tablas mostradas a continuación (Figura 16 y Figura 17).



AppsDatabase

Benefits & Requirements This tab shows the minimum required discharge duration at rated power, the annual benefit and the minimum required response time of the grid applications.

Grid Applications	Minimum Required Discharge Time (h)			Annual Benefit (€/kW)			Required Response Time	
	Low	High	Average	Low	High	Average	Low	High
1 Retail Demand Charges	5.00	8.00	6.50	61.46	67.69	64.58	m	
2 Retail TOU Energy Charges	4.00	6.00	5.00	129.15	143.16	136.15	m	
3 Supply Capacity	4.00	6.00	5.00	39.68	78.58	59.13	h	
4 Energy Time-Shift (Arbitrage)	3.00	7.00	5.00	44.35	77.80	61.07	h	
5 Transmission Upgrade Deferral	3.00	6.00	4.50	119.04	420.13	269.58	m	
6 Wind Energy Time-Shift (Arbitrage)	3.00	6.00	4.50	10.89	62.24	36.57	h	
7 Distribution Upgrade Deferral	3.00	6.00	4.50	84.03	248.97	166.50	m	
8 Solar Energy Time-Shift (Arbitrage)	3.00	5.00	4.00	25.67	43.57	34.62	h	
9 Transmission Congestion Relief	3.00	5.00	4.00	3.89	15.56	9.73	m	
10 Load Following	2.00	4.00	3.00	66.91	111.26	89.08	m	
11 Renewable Capacity Firming	2.00	3.00	2.50	78.58	101.92	90.25	s	
12 Black Start	1.50	2.00	1.75	3.89	7.00	5.45	m	
13 Service Reliability (Utility Backup)	0.50	2.00	1.25	62.24	256.75	159.49	s	
14 Service Reliability (Customer Backup)	0.50	2.00	1.25	77.80	295.65	186.72	s	
15 Voltage Support	0.30	1.00	0.65	42.79	46.68	44.74	s	
16 Supply Spinning Reserve	0.30	1.00	0.65	9.34	47.46	28.40	s	
17 Area Regulation	0.30	0.50	0.40	87.14	223.29	155.21	s	
18 Fast Regulation	0.30	0.50	0.40	130.71	435.69	283.20	s	
19 Wind Energy Smoothing	0.30	0.50	0.40	55.24	111.26	83.25	s	
20 Solar Energy Smoothing	0.30	0.50	0.40	55.24	111.26	83.25	s	
21 Power Quality (Customer)	0.00	0.02	0.01	49.02	132.26	90.64	ms	
22 Power Quality (Utility)	0.00	0.02	0.01	38.90	116.70	77.80	ms	
23 Transmission Support	0.00	0.00	0.00	20.23	22.56	21.40	s	

Definition
"Energy Time-Shift" consists of purchasing the electricity when the price is low and selling it back to the grid when the price is high, taking advantage of this difference. Using a storage technology, end users can save the electricity for hours to sell it back when applies.

Figura 16. Apps Database I

AppsDatabase

Bundling This tab shows the bundling characteristics of the grid applications.

Grid Applications	Grupo Duración	Application Type (Use Pattern)	Peak-Time Compatibility		Availability for Other Applications		Grupo Frecuencia
			Low	High	Low	High	
1 Retail Demand Charges	1.00	1.00	0.95	1.00	0.75	0.83	1.00
2 Retail TOU Energy Charges	1.00	1.00	0.95	1.00	0.70	0.72	1.00
3 Supply Capacity	1.00	1.00	0.95	1.00	0.75	0.83	1.00
4 Energy Time-Shift (Arbitrage)	1.00	1.00	0.95	1.00	0.75	0.83	1.00
5 Transmission Upgrade Deferral	1.00	1.00	0.95	1.00	0.85	0.95	2.00
6 Wind Energy Time-Shift (Arbitrage)	1.00	1.00	0.80	0.90	0.10	0.30	1.00
7 Distribution Upgrade Deferral	1.00	1.00	0.95	1.00	0.85	0.98	2.00
8 Solar Energy Time-Shift (Arbitrage)	1.00	1.00	0.90	0.95	0.35	0.55	1.00
9 Transmission Congestion Relief	1.00	3.00	0.00	0.00	0.75	0.80	2.00
10 Load Following	1.00	1.00	0.95	1.00	0.75	0.83	1.00
11 Renewable Capacity Firming	1.00	2.00	0.00	0.00	0.50	0.60	1.00
12 Black Start	1.00	3.00	0.00	0.00	0.95	0.99	2.00
13 Service Reliability (Utility Backup)	1.00	3.00	0.00	0.00	0.85	0.90	2.00
14 Service Reliability (Customer Backup)	1.00	3.00	0.00	0.00	0.85	0.90	2.00
15 Voltage Support	2.00	2.00	0.00	0.00	0.05	0.10	1.00
16 Supply Spinning Reserve	1.00	3.00	0.00	0.00	0.90	0.95	2.00
17 Area Regulation	2.00	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
18 Fast Regulation	2.00	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
19 Wind Energy Smoothing	2.00	2.00	0.00	0.00	0.10	0.30	1.00
20 Solar Energy Smoothing	2.00	2.00	0.00	0.00	0.40	0.70	1.00
21 Power Quality (Customer)	2.00	3.00	0.00	0.00	0.90	0.95	2.00
22 Power Quality (Utility)	2.00	3.00	0.00	0.00	0.90	0.95	2.00
23 Transmission Support	2.00	3.00	0.00	0.00	0.90	0.95	2.00

Definition
"Energy Time-Shift" consists of purchasing the electricity when the price is low and selling it back to the grid when the price is high, taking advantage of this difference. Using a storage technology, end users can save the electricity for hours to sell it back when applies.

Figura 17. Apps Database II

Es una base de datos de las aplicaciones o de los servicios de red explicados en el CTFM. En la primera tabla se guardan variables (en rangos) como la duración mínima requerida de descarga del almacenamiento asociado, el beneficio anual que provee cada servicio y la rapidez de respuesta requerida. Como puede verse en el CTFM ha sido necesario actualizar los datos de las fuentes utilizadas, de forma que se obtengan precios y beneficios fiables y aplicables a día de hoy.



Por su parte, en la segunda tabla se muestran valores de compatibilidad usados más adelante en algoritmos para que funcione el programa. Se explica su significado más adelante.

A su vez, haciendo clic encima del nombre de cada aplicación de red, se ofrece una definición de la misma en la zona inferior de la pantalla, de acuerdo con [3]. En el ejemplo anterior, puede verse la aplicación *Energy Time-Shift (Arbitrage)* seleccionada, con su definición en la base.

Otra funcionalidad clave del programa es su capacidad de actualizarse, de forma que un usuario experimentado en la materia puede introducir o modificar los datos de las tablas anteriores, mediante el botón *Save*. De esta forma es posible mantener el programa actualizado en el tiempo y no ser estático.

Mediante el botón *Load* se accede a archivos que se hayan podido crear anteriormente, de forma que se cargue en el programa y se use para los cálculos posteriores.

Por último, el pulsador *Default* sirve para mostrar y utilizar la base de datos originalmente creada junto al programa.

Del mismo modo, se presenta en la Figura 18, Figura 19 y Figura 20 las bases de datos de las tecnologías de almacenamiento. En la primera se citan las características técnicas de cada tecnología, en la segunda se citan los costes y los ciclos de vida y en la tercera se muestran los parámetros de factibilidad utilizados en el algoritmo de cálculo de los factores de uso. La razón de los valores mostrados se explica en el CTFM.



StorageDatabase

This tab presents the technical characteristics of each storage system.

Storage Technologies	Power Rating (MW)			Gravimetric Energy Density (Wh/kg)			Volumetric Energy Density (Wh/L)		
	Low	High	Average	Low	High	Average	Low	High	
1 Pumped Hydroelectric Storage	100.00	5000.00	2550.00	0.50	1.50	1.00	0.50		
2 Compressed Air Energy Storage (Classic)	300.00	500.00	400.00	30.00	60.00	45.00	3.00		
3 Compressed Air Energy Storage (Advanced)	300.00	500.00	400.00	30.00	60.00	45.00	3.00		
4 Flywheel	0.00	20.00	10.00	5.00	130.00	67.50	20.00		
5 Lead-Acid Battery	NaN	NaN	NaN	25.00	40.00	32.50	60.00		
6 Lead-Acid Battery (Advanced)	0.00	50.00	25.00	18.00	30.00	24.00	30.00		
7 Valve Regulated Lead-Acid Battery	0.00	50.00	25.00	30.00	40.00	35.00	80.00		
8 Lithium-Ion Battery (High Power)	0.10	50.00	25.05	70.00	130.00	100.00	150.00		
9 Lithium-Ion Battery (High Energy)	0.10	50.00	25.05	110.00	220.00	165.00	150.00		
10 Sodium-Sulfur Battery	0.05	34.00	17.03	100.00	150.00	125.00	150.00		
11 Sodium-Nickel-Chloride Battery (Zebra)	0.00	1.00	0.50	90.00	120.00	105.00	150.00		
12 Vanadium Redox Battery	0.01	1.50	0.75	10.00	75.00	42.50	15.00		
13 Zinc-Bromide Redox Battery	0.03	1.00	0.51	60.00	85.00	72.50	30.00		
14 Zinc-Air Battery	0.02	10.00	5.01	110.00	3000.00	1555.00	500.00	10	
15 Nickel-Cadmium Battery	0.01	46.00	23.01	25.00	50.00	37.50	80.00		
16 Nickel-Metal Hydride Battery	0.01	30.00	15.01	45.00	80.00	62.50	80.00		
17 Nickel-Zinc Battery	0.01	30.00	15.01	60.00	80.00	70.00	200.00		
18 Super Magnetic Energy Storage	0.01	10.00	5.01	0.50	5.00	2.75	0.20		
19 Thermal Energy Storage (Cold)	0.10	300.00	150.05	80.00	250.00	165.00	50.00		
20 Thermal Energy Storage (Hot)	0.10	300.00	150.05	80.00	250.00	165.00	50.00		
21 Electric Double-Layered Capacitors	0.00	10.00	5.00	4.00	8.00	6.00	100000.00	100	

Definition: Pumped Hydroelectricity Storage can provide big quantities of power and energy. It can also response in minutes and work for several hours.

Figura 18. Storage Database I (Features)

StorageDatabase

This tab presents the number of cycles at 80% of Depth Of Discharge and the cost of each storage system.

Storage Technologies	Cycles (80% DOD)			AC Storage Unit Price At Factory (€/kW)		
	Min	Max	Medio	Min	Max	Medio
1 Pumped Hydroelectric Storage	20000.00	50000.00	35000.00	1400.43	1711.64	1556.03
2 Compressed Air Energy Storage (Classic)	20000.00	50000.00	35000.00	544.61	1011.42	778.02
3 Compressed Air Energy Storage (Advanced)	50000.00	75000.00	62500.00	544.61	1011.42	778.02
4 Flywheel	1000000.00	2000000.00	1500000.00	933.62	1244.83	1089.22
5 Lead-Acid Battery	200.00	1500.00	850.00	933.62	1244.83	1089.22
6 Lead-Acid Battery (Advanced)	1200.00	2400.00	1800.00	1711.64	3034.27	2372.95
7 Valve Regulated Lead-Acid Battery	300.00	1000.00	650.00	1244.83	1945.04	1594.94
8 Lithium-Ion Battery (High Power)	800.00	3000.00	1900.00	622.41	933.62	778.02
9 Lithium-Ion Battery (High Energy)	800.00	7000.00	3900.00	1945.04	2723.06	2334.05
10 Sodium-Sulfur Battery	2000.00	5000.00	3500.00	2022.84	2411.85	2217.35
11 Sodium-Nickel-Chloride Battery (Zebra)	2500.00	3000.00	2750.00	1556.03	2334.05	1945.04
12 Vanadium Redox Battery	10000.00	15000.00	12500.00	1711.64	2411.85	2061.75
13 Zinc-Bromide Redox Battery	1000.00	3000.00	2000.00	933.62	2334.05	1633.84
14 Zinc-Air Battery	5000.00	10000.00	7500.00	933.60	2334.10	1633.80
15 Nickel-Cadmium Battery	800.00	1500.00	1150.00	855.82	1478.23	1167.03
16 Nickel-Metal Hydride Battery	500.00	2000.00	1250.00	855.82	1478.23	1167.03
17 Nickel-Zinc Battery	200.00	1000.00	600.00	855.82	1478.23	1167.03
18 Super Magnetic Energy Storage	500000.00	1000000.00	750000.00	778.02	1167.03	972.52
19 Thermal Energy Storage (Cold)	2000.00	14600.00	8300.00	389.01	1011.42	700.22
20 Thermal Energy Storage (Hot)	2000.00	14600.00	8300.00	85.58	233.41	159.49
21 Electric Double-Layered Capacitors	1000000.00	200000.00	600000.00	466.81	778.02	622.41

Definition: Pumped Hydroelectricity Storage can provide big quantities of power and energy. It can also response in minutes and work for several hours.

Figura 19. Storage Database II (Cycles & Costs)

Storage Technologies	Residential	Com / Ind	Location			Maturity	Requirements (Discharge Duration)			Requirements (Frequency)
			Distribution	Transmission	Generation		Group 1 (Long)	Group 2 (Short)	Group 1' (Frequent)	
1 Pumped Hydroelectric Storage	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00		0.90	0.00	
2 Compressed Air Energy Storage (Classic)	0.00	0.00	0.00	0.30	1.00	1.00		0.80	0.00	
3 Compressed Air Energy Storage (Advanced)	0.00	0.00	0.00	0.30	1.00	0.30		0.70	0.20	
4 Flywheel	0.20	0.40	0.20	0.90	0.80	0.80		0.00	1.00	
5 Lead-Acid Battery	0.80	0.80	0.50	0.50	0.10	1.00		0.50	0.40	
6 Lead-Acid Battery (Advanced)	0.80	0.80	0.50	0.50	0.10	0.60		0.70	0.50	
7 Valve Regulated Lead-Acid Battery	0.80	0.80	0.50	0.50	0.10	1.00		0.70	1.00	
8 Lithium-Ion Battery (High Power)	0.30	0.60	1.00	0.80	0.50	0.70		0.00	0.80	
9 Lithium-Ion Battery (High Energy)	1.00	1.00	1.00	0.80	0.30	0.60		0.70	0.50	
10 Sodium-Sulfur Battery	0.00	1.00	0.20	1.00	0.90	0.90		0.90	0.60	
11 Sodium-Nickel-Chloride Battery (Zebra)	0.30	1.00	1.00	0.80	0.20	0.70		0.70	0.60	
12 Vanadium Redox Battery	0.00	0.50	0.40	0.60	0.30	0.50		0.60	0.30	
13 Zinc-Bromide Redox Battery	0.20	0.50	0.40	0.60	0.10	0.40		0.60	0.30	
14 Zinc-Air Battery	0.30	0.30	0.20	0.30	0.00	0.20		0.40	0.10	
15 Nickel-Cadmium Battery	0.30	0.30	0.30	0.30	0.00	0.80		0.50	0.40	
16 Nickel-Metal Hydride Battery	0.30	0.30	0.30	0.30	0.00	0.70		0.50	0.40	
17 Nickel-Zinc Battery	0.30	0.30	0.30	0.30	0.00	0.60		0.50	0.40	
18 Super Magnetic Energy Storage	1.00	1.00	0.50	0.20	0.00	0.60		0.40	0.70	
19 Thermal Energy Storage (Cold)	0.10	0.90	0.00	0.50	0.00	0.60		0.70	0.00	
20 Thermal Energy Storage (Hot)	1.00	0.70	0.00	0.00	0.00	0.70		0.70	0.00	
21 Electric Double-Layered Capacitors	0.00	0.50	0.20	0.30	0.10	0.50		0.00	0.60	
22										

Definition
Pumped Hydroelectricity Storage can provide big quantities of power and energy. It can also response in minutes and work for several hours.

Figura 20. Storage Database III (Feasibility Parameters)

Como puede observarse en las tres figuras anteriores, se presentan los pulsadores *Save*, *Load* y *Default*, con las mismas funcionalidades que en el caso de las aplicaciones de red. De esta forma, conforme las tecnologías de almacenamiento van mejorando sus prestaciones o se van descubriendo nuevas opciones el programa es capaz de recibir datos por parte del usuario y trabajar con ellos.

En la Figura 15 se muestra la elección de tres servicios de red, de forma que en los siguientes párrafos se utilizan como ejemplo para realizar cálculos con el programa y así mostrar su funcionamiento de forma más visual. Se trata de los siguientes, en este orden:

- *Transmission Congestion Relief*
- *Distribution Upgrade Deferral*
- *Transmission Upgrade Deferral*

Los tres servicios se introducen por orden de selección en la tabla contigua y se utilizan para los siguientes aspectos:

- Calcular el beneficio anual derivado de la realización de los mismos
- Evaluar las factibilidades de cada tecnología de almacenamiento y elegir la óptima

Estos son los dos objetivos del programa implementado. Evidentemente también pueden conseguirse seleccionando un número diferente de tres servicios de red o realizando diversas combinaciones en distintos órdenes. El programa acepta la selección de hasta seis servicios de red. Elegir un número mayor carece de sentido, ya que la mayor

parte de empresas o personas físicas no están interesadas en abarcar muchos servicios, sino hacerlo con unos pocos y hacerlo bien. Además, el algoritmo implementado para su cálculo tardaba del orden de varios minutos en realizar el cálculo de los factores de uso para 5 aplicaciones seleccionadas. Por estas dos razones, se decidió permitir la selección de hasta 6 servicios de red. Más adelante, tras una revisión del código y tras diversas modificaciones, esto último no supone un problema, ya que se han acertado los tiempos de cálculo notablemente (los factores de uso de 5 servicios de red se calculan en 1'5 s, y los de 6 servicios, en 2 s).

Una vez seleccionadas las aplicaciones deseadas, se muestra a la derecha un pulsador con el que se accede a otro GUIDE. El botón en cuestión se llama *Use Factor*, con el que se accede a lo mostrado en la Figura 21.

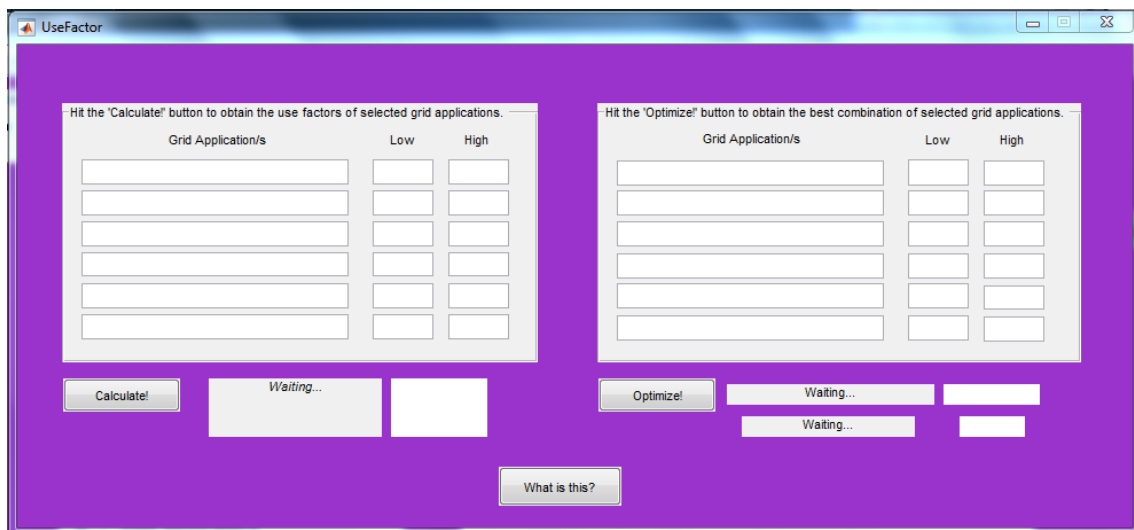


Figura 21. Cálculo de los factores de uso de los servicios y beneficio anual asociado I

Este GUIDE lleva implementado dos códigos. El primero sirve para hallar los factores de uso de cada servicio de red, calculando el beneficio anual derivado de la combinación elegida. El segundo sirve para ordenar los servicios de forma que se maximice el beneficio anual. Este punto es de amplia importancia en la herramienta, ya que constituye un elemento diferenciador de los programas explicados en la sección anterior. En este punto resulta necesario explicar qué son los factores de uso.

Como ya se ha visto, se pueden seleccionar varias aplicaciones de red a la vez. Para aumentar el valor de una instalación de almacenamiento, las aplicaciones de red deben ser capaces de compartir el sistema de almacenamiento y la energía almacenada de forma coordinada. Con el control apropiado es posible priorizar cada aplicación, es decir, establecer una orden de mérito de los servicios energéticos que el sistema de



almacenamiento debe proveer en cada momento, y así maximizar beneficios, ya que cada servicio genera diferente beneficio. Así, las características de una aplicación pueden limitar el acceso del almacenamiento a otras.. Los factores de uso son multiplicadores de los beneficios unitarios (o anuales) de cada una, y se calculan mediante un algoritmo desarrollado basado en uno similar utilizado en ES-Select™, uno de los programas comentados previamente.

Mediante cuatro criterios como son el orden de selección (prioridad), el tipo de aplicación (patrón de descarga o patrón de llamada al almacenamiento), la alineación tiempo-pico y la disponibilidad para aplicaciones de uso posterior, se crea el código que calcula los factores de uso.

En la Figura 21 se muestra el GUIDE en el que se calculan los factores de uso. Mediante el botón *Calculate!* se lanza el algoritmo de cálculo de los factores de uso, generándose uno máximo y otro mínimo para cada aplicación de red, puesto que todos los valores de las bases de datos se dan mediante rangos. En este caso concreto, se han obtenido los siguientes factores expresados en tanto por uno:

- *Transmission Congestion Relief*: 1 - 1
- *Distribution Upgrade Deferral*: 0,75 – 0,8
- *Transmission Upgrade Deferral*: 0,9 - 1
- Se ha obtenido un beneficio anual de 404,6 €/kW.

No significa que el sistema de almacenamiento vaya a servir a la primera aplicación el 100% del tiempo, a la segunda entre un 75 y un 80% y a la tercera entre un 90 y un 100%, sino que cada una va a ponderar con el factor calculado el beneficio anual que aporta al servirse a la red, si el sistema de almacenamiento que provee estos servicios está programado mediante el control adecuado.

El cálculo final resulta ser el siguiente:

$$\text{Beneficio anual} = \sum_{i=1}^n \frac{uf_{inf,i} \cdot BA_{inf,i} + uf_{sup,i} \cdot BA_{sup,i}}{2}$$

Donde

n = número de servicios de red seleccionados

uf_{inf,i} = factor de uso inferior del servicio *i*

$uf_{sup,i}$ = factor de uso superior del servicio i

$BA_{inf,i}$ = beneficio anual inferior del servicio i

$BA_{sup,i}$ = beneficio anual superior del servicio i

$$\begin{aligned}
 \text{Beneficio anual} &= \sum_{i=1}^n \frac{uf_{inf,i} \cdot BA_{inf,i} + uf_{sup,i} \cdot BA_{sup,i}}{2} = \\
 &= \frac{1 \cdot 3,9 + 1 \cdot 15,6}{2} + \frac{0,75 \cdot 84 + 0,8 \cdot 249}{2} + \frac{0,9 \cdot 119 + 1 \cdot 420,1}{2} = 404,6 \text{ €/kW}
 \end{aligned}$$

De esta forma, instalando un sistema de almacenamiento de 100 kW, se obtendría un beneficio anual de 40460 € al realizar los tres servicios anteriores. El servicio *Transmission Congestion Relief* contribuiría con el 100% de su potencial para generar beneficios, mientras que *Distribution Upgrade Deferral* y *Transmission Upgrade Deferral* contribuirían con menos potencial.

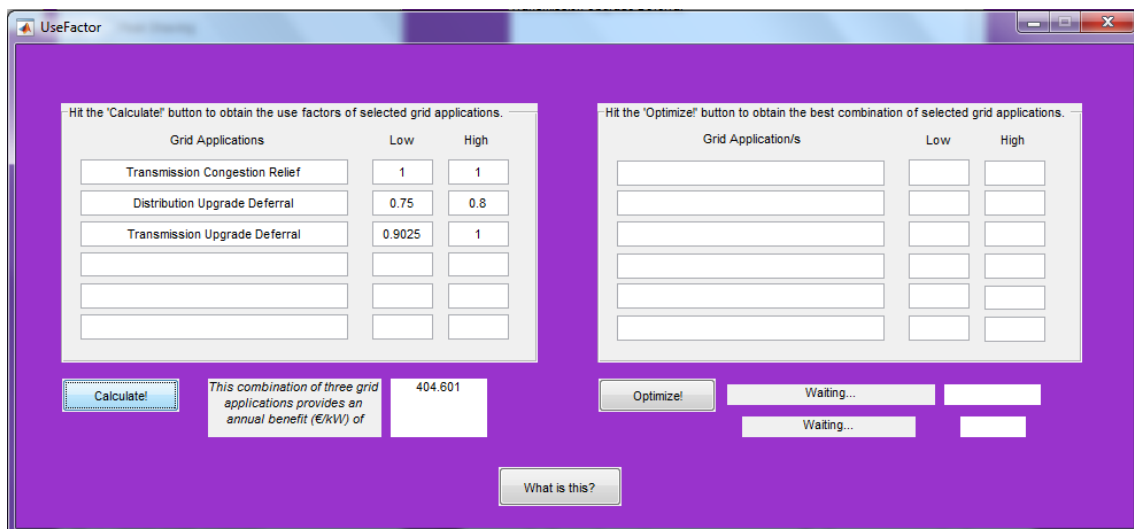


Figura 22. Cálculo de los factores de uso de los servicios y beneficio anual asociado II

A continuación se dan unas nociones de la lógica utilizada para el cálculo de los factores de uso.

En la base de datos mostrada en la Figura 16 y en la Figura 17 se tienen todas las variables necesarias para el cálculo de los factores de uso. Las cuatro variables que definen cada aplicación se muestran en la Figura 17. En función del tipo de cada aplicación (patrón de descarga o patrón de llamada al almacenamiento), se calculan sus factores de uso multiplicando sus factores relativos a la compatibilidad tiempo-pico si son del mismo tipo o multiplicando sus factores relativos a la disponibilidad para apps posteriores si no son del

mismo tipo. Así, para cada servicio de red se calculan sus factores de uso, que se exponen en la Figura 23.

Un aspecto diferenciador del programa implementado es que se ha desarrollado un algoritmo capaz de buscar y encontrar el mejor orden de los servicios de red seleccionados (ya se ha mencionado que el orden de selección es un parámetro para calcular los factores de uso, por lo que se justifica que éstos cambien si varía el orden), de forma que se obtenga el mayor beneficio anual posible. Todo ello pulsando el botón *Optimize!*. El algoritmo desarrollado comprueba todas las combinaciones posibles, con sus factores de uso, guardándose internamente el mayor valor de beneficio anual. En el momento que se encuentra un beneficio anual superior al anterior calculado, se visualiza en los recuadros correspondientes, así como los factores de uso asociados que han servido para calcularlo. El bucle finaliza cuando se han comprobado todas las combinaciones.

Como ya se ha mencionado, del mismo modo que se ha mejorado el algoritmo de cálculo de los factores de uso, se han realizado modificaciones en el código implementado para calcular beneficios, de forma que el programa es 2000 veces más rápido (4000 s antes por los 2 s de ahora).

The screenshot shows the 'UseFactor' application window with a purple background. It contains two main panels for grid applications and their use factors.

Grid Applications	Low	High
Transmission Congestion Relief	1	1
Distribution Upgrade Deferral	0.75	0.8
Transmission Upgrade Deferral	0.9025	1

Below the first panel, a 'Calculate!' button is shown. The result is: 'This combination of three grid applications provides an annual benefit (€/kW) of 404.601'.

Grid Applications	Low	High
Transmission Upgrade Deferral	1	1
Distribution Upgrade Deferral	0.95	1
Transmission Congestion Relief	0.85	0.95

Below the second panel, an 'Optimize!' button is shown. The results are: 'The highest annual benefit (€/kW) is 443.022' and 'Time to resolve in seconds is 0.471667'.

Figura 23. Cálculo de factores de uso de la mejor combinación de servicios y beneficio anual asociado

Como puede verse, las aplicaciones de red han sido reordenadas, modificando sus factores de uso, para generar un beneficio anual de 443 €/kW. Se asegura que ninguna otra combinación de las tres aplicaciones de red conlleva un beneficio mayor que este. El programa presenta una barra de estado con la que estimar el tiempo que le va a tomar

realizar la búsqueda mientras realiza los cálculos. Finalmente, muestra por la casilla inferior izquierda el tiempo que le ha llevado completar el bucle.

Una barra de estado muestra el proceso de cálculo.

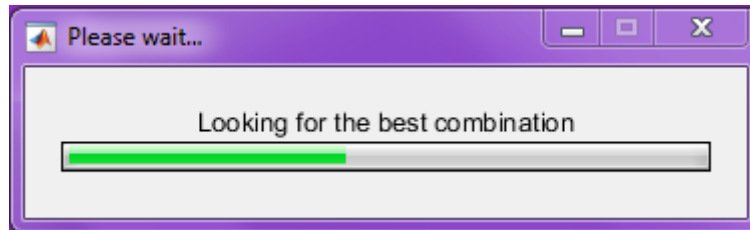


Figura 24. Barra de estado

Una vez cumplido el objetivo de calcular beneficios anuales, el programa permite acceder al cálculo de las factibilidades de las tecnologías de almacenamiento. Para ello se genera un botón en la esquina inferior derecha del GUIDE donde se seleccionan las aplicaciones de red, llamado *Score*.

Pulsándolo, se accede al GUIDE mostrado en la Figura 25.

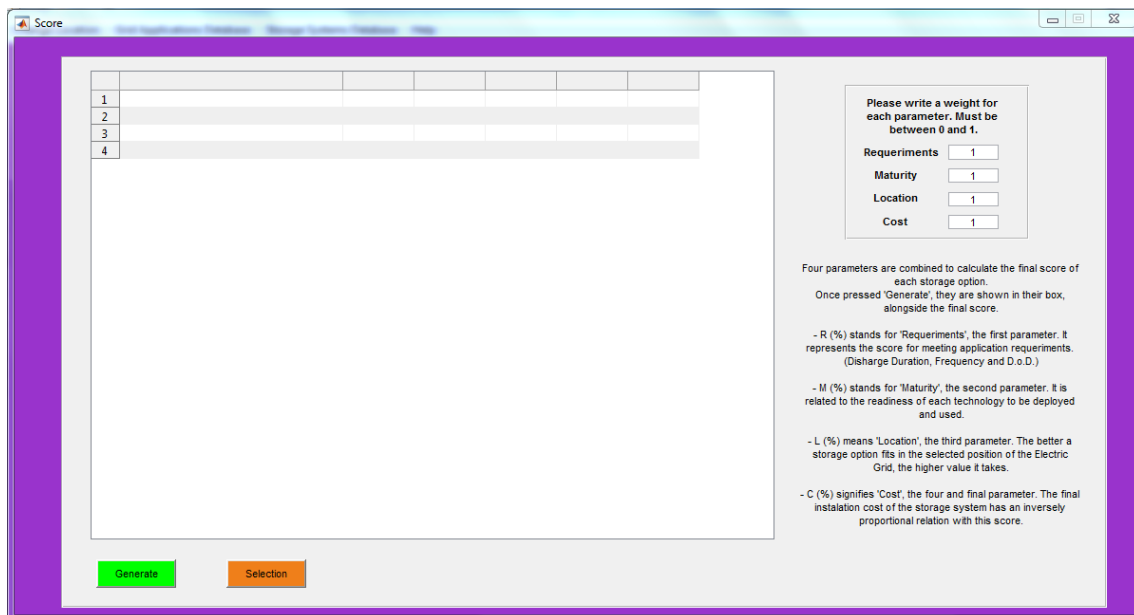


Figura 25. Cálculo de factibilidades de las tecnologías de almacenamiento I

Se trata del penúltimo GUIDE implementado. En él se utilizan las variables introducidas en las bases de datos asociadas y los servicios de red seleccionados para ordenar las tecnologías de almacenamiento según su adecuación.

**Tabla 1. Tecnologías de almacenamiento**

PHS	Bombeo hidráulico
CAES	CAES Clásico
CAES-Adv	CAES Avanzado
Flwhl	Volante de inercia
OPzS	Batería Plomo-Ácido
Adv-LA	Batería Plomo-Ácido Avanzada
VRLA	Batería Plomo-Ácido regulada por válvula
LI-P	Batería Ion-Litio de alta potencia
LI-E	Batería Ion-Litio de alta energía
Na-S	Batería Sodio-Azufre
Na-Ni-Cl	Batería Zebra
VRB	Batería de flujo de Vanadio
Zn-Br	Batería de flujo de Cinc-Bromuro
Zn-Air	Batería de Zinc-Aire
Ni-Cd	Batería de Níquel-Cadmio
Ni-MH	Batería de Níquel-Metalhidruro
Ni-Zn	Batería de Níquel-Zinc
SMES	Sistema de supercondensadores
TES-C	Almacenamiento térmico frío
TES-H	Almacenamiento térmico caliente
EDLC	Condensadores de doble capa

Las tecnologías de almacenamiento consideradas han sido explicadas en el CTFM conjunto a esta memoria. En la Tabla 1 se ha realizado una lista para recordarlas, además de introducir su abreviación, la cual es la que se muestra en el resultado final.

La forma de calcular la factibilidad de cada tecnología de almacenamiento es mediante una media geométrica entre cuatro factores. Tales factores se mencionan en la parte superior derecha del GUIDE anterior. Cada tecnología tiene un valor entre 0 y 1 para cada factor (guardados en las bases de datos). Se explica en las siguientes líneas qué representa cada uno. Del mismo modo, en el GUIDE se detalla una explicación acerca de qué representa cada uno.

- **Requerimientos:** Este factor simboliza la puntuación que se da a cada tecnología en función de su concordancia con los requerimientos de los servicios de red seleccionados en términos de eficiencia, vida, ciclos, duración de descarga, etc...
- **Madurez:** Este factor representa la puntuación que se da a cada tecnología por estar preparada o no para su despliegue comercial y está relacionado con la disponibilidad y fiabilidad de la tecnología



- Localización: Este factor reproduce la puntuación que se da a cada tecnología por ser más o menos apropiada para la posición seleccionada en la cadena de valor del sistema eléctrico
- Coste: El último de los factores también toma valores entre 0 y 1. Es tanto más cercano a 1 cuanto menor es el coste de instalación de la tecnología y viceversa. Se utilizan dos fórmulas diferentes para calcular este parámetro, en función de si la tecnología está desarrollada para trabajar otorgando potencia o energía:

$$Puntuación_{Coste}(kW) = \frac{1000}{1000 + Coste \left(\frac{\text{€}}{kW} \right)_{tecnología x}}$$
$$Puntuación_{Coste}(kWh) = \frac{300}{300 + Coste \left(\frac{\text{€}}{kWh} \right)_{tecnología x}}$$

Como puede observarse, las fórmulas anteriores son la una relación inversamente proporcional entre el coste y la puntuación asociada, con el valor objetivo de 1000 €/kW para tecnologías de potencia y utilizando un valor objetivo de 300 €/kWh para tecnologías de energía. Son valores de costes previstos para que las tecnologías sean competitivas actualmente.

Los factores *madurez* y *localización* no están influenciados por la selección de servicios de red, sino que las puntuaciones son intrínsecas a cada tecnología. Sin embargo, los factores *requerimientos* y *coste* sí dependen de esa selección, puesto que no es lo mismo en términos económicos el implantar un kW de potencia de baterías de plomo en una red de distribución que en tu propia casa.

De esta forma, una vez que se tienen todos los valores necesarios, se procede a relacionarlos mediante una media geométrica. La elección de una media geométrica en lugar de una aritmética responde a que mediante la primera, el cálculo es menos sensible a valores extremos y ante un valor nulo, vale 0. De esta forma, si alguno de los parámetros anteriores vale 0, la puntuación final también lo valdrá.

Se calcula como sigue. Para cada tecnología de almacenamiento el programa realiza el siguiente cálculo:

$$Puntuación_i = (R_i^{P_R} \cdot M_i^{P_M} \cdot L_i^{P_L} \cdot C_i^{P_C})^{\left(\frac{1}{P_R + P_M + P_L + P_C} \right)}$$

Donde



Ri = Parámetro *requerimientos* de la tecnología *i*

Mi = Parámetro *madurez* de la tecnología *i*

Li = Parámetro *localización* de la tecnología *i*

Ci = Parámetro *coste* de la tecnología *i*

PR = Peso del parámetro *requerimientos*

PM = Peso del parámetro *madurez*

PL = Peso del parámetro *localización*

PC = Peso del parámetro *coste*

Los pesos son necesarios introducirlos para realizar el cálculo final. Si bien podrían haberse implementado internamente, se hubiera perdido la posibilidad de que el usuario aísle alguna variable con el fin de ver su influencia en el cálculo final.

De esta manera el usuario gana en flexibilidad a la hora de realizar diferentes cálculos con diferentes pesos (según importancia de cada factor). Se debe introducir un número entre 0 y 1 en la casilla correspondiente del GUIDE. El programa muestra un mensaje de advertencia si se introduce un carácter diferente de un número.

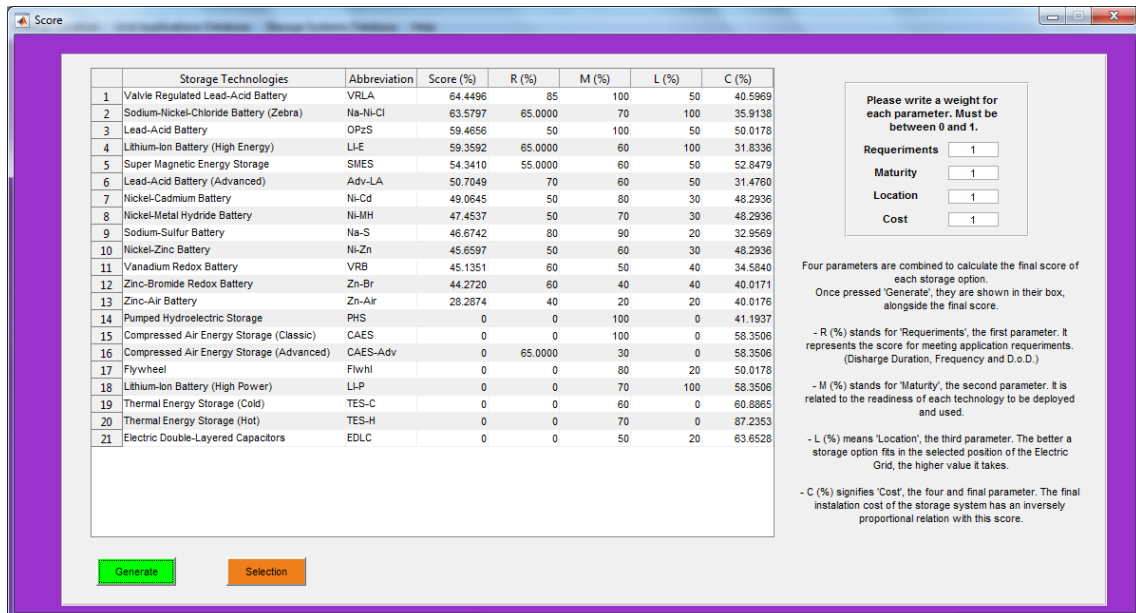


Figura 26. Cálculo de factibilidades de las tecnologías de almacenamiento II



Una vez introducidos los pesos, mediante el botón *Generate* se procede a calcular mediante la fórmula anterior las factibilidades de cada tecnología, mostrándose en las casillas anexas. A continuación, el programa ordena todas las tecnologías de mayor a menor factibilidad para después mostrar lo expuesto en la Figura 26.

Los resultados obtenidos en la Figura 26 se obtienen de seleccionar las aplicaciones que se han puesto como ejemplo anteriormente. De este modo, el programa nos dice que 13 tecnologías de almacenamiento son factibles, mientras que otras 8 no lo son. A su vez, de las 13 factibles, unas lo son más que otras. La mejor tecnología de almacenamiento para el ejemplo puesto es utilizar baterías de VRLA (baterías de plomo-ácido reguladas por válvula) con una factibilidad del 64,4%, seguida con un 63,6% por las baterías de Na-Ni-Cl (baterías de sodio-cloruro de níquel). Ambos tipos de baterías han sido descritos en el CTFM.

Hay que destacar que estos resultados se obtienen con los pesos de los factores iguales a uno. De esta forma se le da igual importancia a todos, sin destacar a ninguno por encima de los demás. Como ya se ha visto, el usuario puede variar los pesos a placer con el fin de obtener resultados diferentes.

Recordemos que los tres servicios de red seleccionados en este ejemplo son los siguientes:

- *Transmission Congestion Relief*. Como ya se ha explicado en el CTFM, se requiere varias horas (4 por ejemplo) de suministro eléctrico, de entre 1 y 100 MW de potencia, para cumplir con este servicio de red.

- *Distribution Upgrade Deferral*. Al igual que en el anterior caso, se requiere de un número similar de horas de suministro eléctrico de potencias de hasta 10 MW para realizar este servicio a la red.

- *Transmission Upgrade Deferral*. Muy similar al caso inmediatamente anterior pero con mayores potencias.

Analizando las tecnologías de almacenamiento propuestas por el programa (baterías VRLA y Na-Ni-Cl) se aprecia que pueden funcionar bajo estas condiciones, sirviendo como suministro eléctrico para realizar estos tres servicios de red.

Del mismo modo, se aprecia que tecnologías como el bombeo hidráulico o el CAES no son adecuadas para servir este tipo de servicios de red, de ahí que el programa otorgue un

0% de factibilidad. Si se revisa la Figura 13 puede verse como ninguna de las dos tecnologías es factible para la posición elegida (red de distribución). Ello implica que el valor “L” de la fórmula anterior valga 0, y por ende el resultado final.

Por estas dos razones se puede afirmar que las opciones de almacenamiento otorgadas por el programa son consistentes con las aplicaciones de red seleccionadas.

Entre medio de las tecnologías anteriores están las baterías de plomo-ácido convencionales y las baterías de ion-litio de alta energía, con un 59’5 y un 59’4% respectivamente. Las baterías con electrolito alcalino (Ni-MH, Ni-Cd y Ni-Zn) y otras tecnologías completan la lista.

Una vez obtenida la lista final con las tecnologías evaluadas y ordenadas, el programa ofrece la posibilidad de acceder a una última pantalla, la mostrada en la Figura 27.

Select the desired technology

	Storage Technologies	Abbreviation	Score (%)	R (%)	M (%)	L (%)	C (%)	Efficiency (%)	Cost (€/kW)	Durability (Years)
1	Valve Regulated Lead-Acid Battery	VRLA	64.4496	85	100	50	40.5969	82.5000	1.5949e+03	15
2	Sodium-Nickel-Chloride Battery (Zebra)	Na-Ni-Cl	63.5797	65.0000	70	100	35.9138	90	1.9450e+03	14
3	Lead-Acid Battery	OPzS	59.4656	50	100	50	50.0178	80	1.0892e+03	10
4	Lithium-Ion Battery (High Energy)	Li-E	59.3592	65.0000	60	100	31.8336	92.5000	2.3341e+03	20
5	Super Magnetic Energy Storage	SMES	54.3410	55.0000	60	50	52.8479	92	972.5216	30
6	Lead-Acid Battery (Advanced)	Adv-LA	50.7049	70	60	50	31.4760	81	2.3730e+03	12

Figura 27. Selección del sistema de almacenamiento

Se trata de la pantalla de unión con el programa de análisis de viabilidades económicas que se ha desarrollado también en CENER. En ella se muestra una tabla con las seis tecnologías mejor situadas para servir los servicios de red deseados. El programa muestra como variables de salida valores como la eficiencia (*round-trip efficiency*), el coste de instalación (€/kW) y la vida útil de las tecnologías. Estos parámetros sirven de entrada al programa de análisis de sensibilidad para evaluar la viabilidad económica de la tecnología de almacenamiento seleccionada. Tal y como se ha comentado en la introducción, el programa implementado realiza una criba inicial, otorgando a las tecnologías puntuaciones relativas en función de su concordancia con los requerimientos de las aplicaciones.



Como es lógico, para ver la viabilidad de la implantación de un sistema de almacenamiento es necesario realizar el análisis de sensibilidad con el programa mencionado.

Aunque esto queda fuera del alcance del TFM, se diseña este último paso para que la conexión entre ambos programas sea sencilla y eficaz. Para ello, se crean seis pulsadores con los nombres y los datos de las tecnologías de almacenamiento que mejor paradas han salido del proceso de evaluación. Puede verse en la Figura 27.



CENER

CENTRO NACIONAL DE
ENERGÍAS RENOVABLES

upna
Universidad Pública de Navarra
Nafarroako Unibertsitate Publikoa

CAPÍTULO 6. CASO REAL DE APLICACIÓN



CENER

CENTRO NACIONAL DE
ENERGÍAS RENOVABLES

upna
Universidad Pública de Navarra
Nafarroako Unibertsitate Publikoa



6.1. Caso real de aplicación

En el marco del proyecto europeo LIFE ZAESS (www.zaess.eu), CENER está realizando un estudio de viabilidad técnico-económica de baterías de Zn-Aire con el fin de determinar el potencial de esta tecnología para proveer servicios a la red y dar soporte a la integración de renovables a gran escala.

El estudio de viabilidad técnica requiere de una comparativa sistemática de la tecnología con sus más directos competidores, otras tecnologías de almacenamiento, y el programa desarrollado en este TFM se adecua perfectamente a este fin.

Para este caso de estudio se han seleccionado una serie de escenarios que combinan posiciones de la tecnología de almacenamiento en la cadena de valor con diversos servicios que pueden proveerse en esas posiciones y se ha analizado la posición que ocupa la tecnología de Zn aire comparada con otras tecnologías y cuáles son los parámetros que más impactan en su viabilidad. En la Tabla 2 se recogen los escenarios analizados.

Tabla 2. Escenarios de análisis de viabilidad técnica

Escenario	Posición Cadena de Valor	Aplicaciones
1	Generación	Capacidad de suministro Arbitraje Arbitraje solar y eólico Reserva rodante
2	Transporte	Capacidad de suministro Arbitraje Arbitraje solar y eólico Reserva rodante
3	Transporte	Seguimiento de carga Black Start Soporte de Tensión Regulación de área
4	Transporte	Refuerzo de capacidad renovable Suavizado solar y eólico Arbitraje solar y eólico
5	Distribución	Seguimiento de carga Refuerzo de capacidad renovable Suavizado solar y eólico Soporte de Tensión
6	Comercial/Industrial	Gestión de demanda Control de picos Fiabilidad de suministro



6.1.1. Escenario 1

El primero de los escenarios estudiados comprende servicios de red realizados en la posición de generación. Tras lanzar el programa, los resultados se pueden visualizar en la Tabla 3.

Tabla 3. Escenario 1

	Storage Technologies	Abbreviation	Score (%)	R (%)	M (%)	L (%)	C (%)	Efficiency (%)	Cost (€/kW)	Durability (Years)
1	Compressed Air Energy Storage (Classic)	CAES	85.1279	90	100	100	58.3506	51	778.0172	70
2	Pumped Hydroelectric Storage	PHS	80.1139	100	100	100	41.1937	78.5000	1.5560e+03	70
3	Compressed Air Energy Storage (Advanced)	CAES-Adv	68.6210	95	40	100	58.3506	75	778.0172	70
4	Sodium-Sulfur Battery	Na-S	63.0662	75	80	80	32.9569	87.5000	2.2173e+03	15
5	Lithium-Ion Battery (High Power)	LI-P	49.7518	30.0000	70	50	58.3506	92.5000	778.0172	15
6	Vanadium Redox Battery	VRB	45.6890	70	60	30	34.5840	75	2.0617e+03	20

Como puede observarse, las tecnologías de almacenamiento mejor paradas en la evaluación para su selección son el CAES, el bombeo, el CAES avanzado... Es decir, tecnologías adecuadas a grades flujos de energía. Los cuatro parámetros evaluados son R (requerimientos técnicos), M (madurez), L (Localización) y C (coste), tal y como se ha explicado anteriormente.

En este caso, la batería de Zn-Aire obtiene la decimotercera posición, con un 28,5% de factibilidad relativa y una diferencia amplia con el primer clasificado, el CAES (85,1%):

13	Zinc-Air Battery	Zn-Air	28.5058	55.0000	30	10	40.0176
----	------------------	--------	---------	---------	----	----	---------

Figura 28. Zn-Aire, escenario 1

Como ya se ha indicado previamente, el programa permite la modificación de los cuatro parámetros (requerimientos técnicos, madurez, localización y coste) evaluados en cada tecnología. Poniendo a 0 independientemente cada parámetro, se obtienen que con el que más escala posiciones la batería de Zn-Aire es anulando la madurez:

12	Zinc-Air Battery	Zn-Air	28.0245	55.0000	30	10	40.0176
----	------------------	--------	---------	---------	----	----	---------

Figura 29. Zn-Aire, escenario 1 (madurez = 0)

Se deduce que el parámetro más limitante en la Zn-Aire es la escasa madurez de la tecnología.

También puede concluirse que no sale bien evaluada en comparación con las tecnologías competidoras, posiblemente debido a lo expuesto en el párrafo anterior.



6.1.2. Escenario 2

El segundo de los escenarios evalúa las distintas tecnologías con las mismas aplicaciones de red, modificando en este caso la posición de generación a red de transporte. En este caso, las tecnologías que mejor puntuación obtienen se ven en la Tabla 4.

Tabla 4. Escenario 2

	Storage Technologies	Abbreviation	Score (%)	R (%)	M (%)	L (%)	C (%)	Efficiency (%)	Cost (€/kW)	Durability (Years)
1	Compressed Air Energy Storage (Classic)	CAES	71.5838	90	100	50	58.3506	51	778.0172	70
2	Pumped Hydroelectric Storage	PHS	67.3675	100	100	50	41.1937	78.5000	1.5560e+03	70
3	Sodium-Sulfur Battery	Na-S	66.6844	75	80	100	32.9569	87.5000	2.2173e+03	15
4	Sodium-Nickel-Chloride Battery (Zebra)	Na-Ni-Cl	63.3337	70	80	80	35.9138	90	1.9450e+03	14
5	Valve Regulated Lead-Acid Battery	VRLA	62.4642	75	100	50	40.5969	82.5000	1.5949e+03	15
6	Compressed Air Energy Storage (Advanced)	CAES-Adv	60.3942	95	40	60	58.3506	75	778.0172	70

Las tecnologías mejor evaluadas vuelven a ser parecidas a las del escenario 1, solo que obtienen menor puntuación relativa. En este caso, la batería de Zn-Aire aparece en la decimoséptima posición:

17	Zinc-Air Battery	Zn-Air	44.6140	55.0000	30	60	40.0176
----	------------------	--------	---------	---------	----	----	---------

Figura 30. Zn-Aire, escenario 2

Anulando el parámetro de la madurez:

11	Zinc-Air Battery	Zn-Air	50.9239	55.0000	30	60	40.0176
----	------------------	--------	---------	---------	----	----	---------

Figura 31. Zn-Aire, escenario 2 (madurez = 0)

En este caso, la batería de Zn-Aire da un salto de seis posiciones en la lista, situándose en la undécima posición. La madurez vuelve a ser un parámetro limitante en este caso, con la adición de que al subir más posiciones que en el escenario 1 puede concluirse que la batería estudiada es más apropiada para dar soporte a aplicaciones de red de transporte que a aplicaciones de generación.



6.1.3. Escenario 3

El tercero de los escenarios mantiene la posición en la red de transporte pero modifica las aplicaciones, como puede verse en la Tabla 2. En esta ocasión se quiere evaluar la viabilidad de la batería de Zn-Aire para servir aplicaciones de red que requieren menores tiempos de uso y/o menores energías. Las seis mejores tecnologías tras lanzar el programa se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Escenario 3

	Storage Technologies	Abbreviation	Score (%)	R (%)	M (%)	L (%)	C (%)	Efficiency (%)	Cost (€/kW)	Durability (Years)
1	Compressed Air Energy Storage (Classic)	CAES	65.9906	65	100	50	58.3506	51	778.0172	70
2	Sodium-Sulfur Battery	Na-S	64.3409	65	80	100	32.9569	87.5000	2.2173e+03	15
3	Sodium-Nickel-Chloride Battery (Zebra)	Na-Ni-Cl	62.7605	67.5000	80	80	35.9138	90	1.9450e+03	14
4	Pumped Hydroelectric Storage	PHS	62.6925	75	100	50	41.1937	78.5000	1.5560e+03	70
5	Valve Regulated Lead-Acid Battery	VRLA	62.4642	75	100	50	40.5969	82.5000	1.5949e+03	15
6	Lithium-Ion Battery (High Power)	Li-P	61.9244	45	70	80	58.3506	92.5000	778.0172	15

Las tecnologías mejor paradas en el proceso de evaluación son, de nuevo, tecnologías potentes y con capacidad de adaptarse bien a la posición elegida en la cadena de valor. De nuevo, la batería de Zn-Aire queda en decimoséptima posición:

17	Zinc-Air Battery	Zn-Air	45.1126	57.5000	30	60	40.0176
----	------------------	--------	---------	---------	----	----	---------

Figura 32. Zn-Aire, escenario 3

La batería de Zn-Aire obtiene posiciones bajas, pero en esta ocasión la diferencia de factibilidades entre la primera clasificada y la de Zn-Aire se ha reducido, siendo de solo un 21%, siendo de un 56,5% en el escenario 1 y de un 27% en el escenario 2, por lo que en esta ocasión es más factible.

Al anular la importancia en el cálculo de la madurez, su posición aumenta en siete puestos, escalando hasta la décima posición:

10	Zinc-Air Battery	Zn-Air	51.6841	57.5000	30	60	40.0176
----	------------------	--------	---------	---------	----	----	---------

Figura 33. Zn-Aire, escenario 3 (madurez = 0)

Más argumentos a favor de lo expuesto en el escenario 2; que la tecnología de Zn-Aire es más adecuada para la posición de transporte.



6.1.4. Escenario 4

Manteniéndose la posición de la red de transporte, se vuelven a evaluar las tecnologías con aplicaciones de red relacionadas con la integración de las renovables en el sistema, como puede verse en la Tabla 2.

En esta ocasión, se obtiene este orden.

Tabla 6. Escenario 4

	Storage Technologies	Abbreviation	Score (%)	R (%)	M (%)	L (%)	C (%)	Efficiency (%)	Cost (€/kW)	Durability (Years)
1	Compressed Air Energy Storage (Classic)	CAES	71.5838	90	100	50	58.3506	51	778.0172	70
2	Pumped Hydroelectric Storage	PHS	67.3675	100	100	50	41.1937	78.5000	1.5560e+03	70
3	Sodium-Sulfur Battery	Na-S	66.6844	75	80	100	32.9569	87.5000	2.2173e+03	15
4	Sodium-Nickel-Chloride Battery (Zebra)	Na-Ni-Cl	63.3337	70	80	80	35.9138	90	1.9450e+03	14
5	Valve Regulated Lead-Acid Battery	VRLA	62.4642	75	100	50	40.5969	82.5000	1.5949e+03	15
6	Compressed Air Energy Storage (Advanced)	CAES-Adv	60.3942	95	40	60	58.3506	75	778.0172	70

Se confirma que las tecnologías con mayores potencias y energías son las más adecuadas para servir aplicaciones en la red de transporte, aunque en esta ocasión se obtienen buenos resultados para baterías diversas.

La batería de Zn-Aire vuelve a quedar en decimoséptima posición, señal de que no influyen las aplicaciones a servir sino la posición en la cadena de valor.

17	Zinc-Air Battery	Zn-Air	44.6140	55.0000	30	60	40.0176
----	------------------	--------	---------	---------	----	----	---------

Figura 34. Zn-Aire, escenario 4

Anulando la importancia de la madurez, esta tecnología aumenta su posición en 6 puestos. Se confirma su adecuación a la posición de red de transporte:

11	Zinc-Air Battery	Zn-Air	50.9239	55.0000	30	60	40.0176
----	------------------	--------	---------	---------	----	----	---------

Figura 35. Zn-Aire, escenario 4 (madurez = 0)



6.1.5. Escenario 5

En este escenario modificamos la posición. Esta vez actuamos sobre la red de distribución. En este caso, seleccionamos aplicaciones más aptas para esta localización de la tecnología. Se obtienen las siguientes puntuaciones.

Tabla 7. Escenario 5

	Storage Technologies	Abbreviation	Score (%)	R (%)	M (%)	L (%)	C (%)	Efficiency (%)	Cost (€/kW)	Durability (Years)
1	Lithium-Ion Battery (High Power)	LI-P	70.3597	60.0000	70	100	58.3506	92.5000	778.0172	15
2	Sodium-Nickel-Chloride Battery (Zebra)	Na-Ni-Cl	65.7380	65.0000	80	100	35.9138	90	1.9450e+03	14
3	Valvle Regulated Lead-Acid Battery	VRLA	62.4642	75	100	50	40.5969	82.5000	1.5949e+03	15
4	Lead-Acid Battery	OPzS	57.9198	45	100	50	50.0178	80	1.0892e+03	10
5	Lithium-Ion Battery (High Energy)	LI-E	56.9312	55.0000	60	100	31.8336	92.5000	2.3341e+03	20
6	Lead-Acid Battery (Advanced)	Adv-LA	51.7297	65.0000	70	50	31.4760	81	2.3730e+03	12

Vemos como las tecnologías mejor adaptadas a esta posición varían respecto a los escenarios anteriores. Las baterías son las mejor paradas para servir aplicaciones en la red de distribución. Sin embargo, las baterías de Zn-Aire no aparecen entre las seis mejores opciones. Obtiene un decimosexto puesto que se transforma en un décimo al anularse la importancia de la demostrada poca madurez.

16	Zinc-Air Battery	Zn-Air	41.1999	60	30	40	40.0176
----	------------------	--------	---------	----	----	----	---------

Figura 36. Zn-Aire, escenario 5

10	Zinc-Air Battery	Zn-Air	45.7953	60	30	40	40.0176
----	------------------	--------	---------	----	----	----	---------

Figura 37. Zn-Aire, escenario 5 (madurez = 0)

La adecuación a la red de distribución también aparece en este caso.

6.1.6. Escenario 6

Por último, se modifica la posición a comercial / industrial, con menores potencias contratadas. Las aplicaciones para realizar en este caso son las adecuadas a los usuarios finales, como puede verse en la Tabla 2.

Las tecnologías ordenadas tras su evaluación son las siguientes.

**Tabla 8. Escenario 6**

	Storage Technologies	Abbreviation	Score (%)	R (%)	M (%)	L (%)	C (%)	Efficiency (%)	Cost (€/kW)	Durability (Years)
1	Valve Regulated Lead-Acid Battery	VRLA	70.2524	75	100	80	40.5969	82.5000	1.5949e+03	15
2	Thermal Energy Storage (Hot)	TES-H	67.0002	55.0000	60	70	87.2353	45.0000	159.4935	40
3	Sodium-Nickel-Chloride Battery (Zebra)	Na-Ni-Cl	66.9672	70	80	100	35.9138	90	1.9450e+03	14
4	Lead-Acid Battery	OPzS	66.8800	50	100	80	50.0178	80	1.0892e+03	10
5	Sodium-Sulfur Battery	Na-S	66.6844	75	80	100	32.9569	87.5000	2.2173e+03	15
6	Thermal Energy Storage (Cold)	TES-C	65.2108	55.0000	60	90	60.8865	45.0000	700.2155	40

En esta ocasión entran en juego sistemas como el almacenamiento térmico, mientras las baterías copan la mayor parte de la importancia en el proceso de evaluación. En este caso, la batería de Zn-Aire obtiene una decimoquinta posición que no varía al anularse su hasta ahora parámetro más limitante.

15	Zinc-Air Battery	Zn-Air	42.6262	55.0000	30	50	40.0176
----	------------------	--------	---------	---------	----	----	---------

Figura 38. Zn-Aire, escenario 6

15	Zinc-Air Battery	Zn-Air	46.9145	55.0000	30	50	40.0176
----	------------------	--------	---------	---------	----	----	---------

Figura 39. Zn-Aire, escenario 6 (madurez = 0)

6.2. Resumen

Tras analizar el caso de estudio real sobre la batería de Zn-Aire, puede verse que su escasa madurez es su principal hándicap a la hora de evaluarse. Hoy en día es necesaria más investigación para así poderla hacer comercialmente disponible, desplegar su uso y aumentar su grado de madurez. Las demás baterías analizadas han obtenido mejores puntuaciones en todas las evaluaciones en las que entra en juego este parámetro.

Además, se ha visto que la batería estudiada es más adecuada para posiciones en la cadena de valor como el transporte y la distribución, además que con algo peores resultados en la posición comercial / industrial.

En la Figura 40 se muestra la diferencia de factibilidades con la tecnología mejor puntuada. En el eje vertical se representa la factibilidad en %, mientras que en el eje horizontal se ven los seis escenarios.

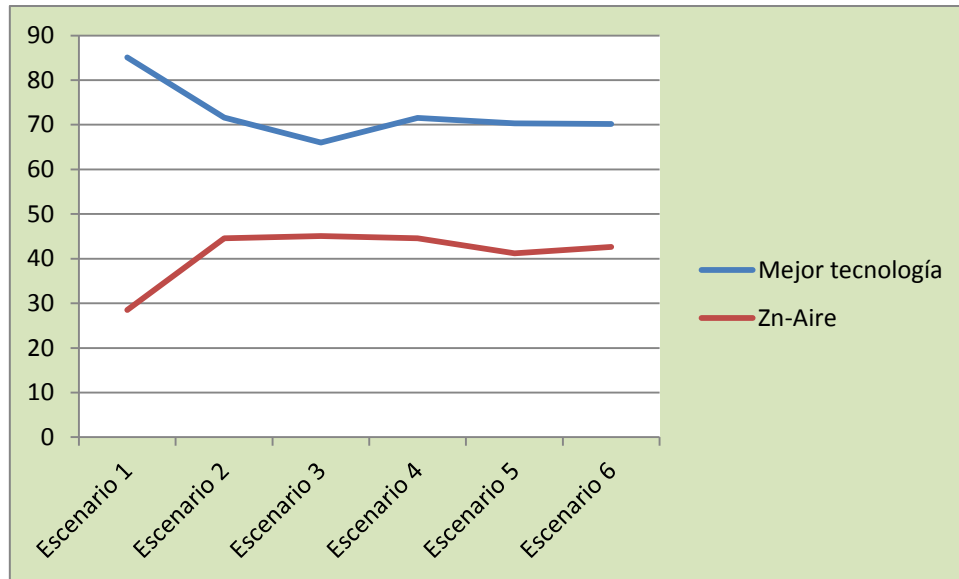


Figura 40. Factibilidades relativas comparadas con la mejor tecnología

Como se ve, la batería de Zn-Aire cobra más relevancia en los escenarios 2, 3, 4 y 5, que son los que se han realizado en la posición de transporte y distribución. El valor del escenario 6 también es alto, aunque si se revisan los datos se aprecia que la posición es la decimoquinta, peor que en otros escenarios. Si se tuviera que escoger el mejor escenario de acuerdo a este criterio de diferencia relativa de factibilidad, el escenario 3 resulta el más adecuado, por lo que las aplicaciones de red que se han seleccionado son las mejor situadas para proveerse por un sistema de baterías de Zinc-Aire.

Puede concluirse pues que la batería de Zinc-Aire, en cuanto mejore su grado de madurez, puede tener potencial en estas posiciones. Sin embargo, en la posición de generación o en usuarios finales de consumo no presenta los mejores resultados.



CENER

CENTRO NACIONAL DE
ENERGÍAS RENOVABLES

upna
Universidad Pública de Navarra
Nafarroako Unibertsitate Publikoa

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES



CENER

CENTRO NACIONAL DE
ENERGÍAS RENOVABLES

upna
Universidad Pública de Navarra
Nafarroako Unibertsitate Publikoa



7.1. Conclusiones

En este TFM se ha desarrollado una herramienta informática que evalúa diferentes tecnologías de almacenamiento de energía eléctrica en función de unos servicios de red que realizar, ordenándolas por su factibilidad. Tal y como se ha visto en el CTFM y en este TFM, hoy en día no existe un consenso en la forma de trabajar a la hora de seleccionar e implementar un sistema de almacenamiento. Se han visto que entran en juego múltiples variables. Ante la dificultad, ha sido interesante la creación de una herramienta que simplifique, sistematice y haga objetivo un proceso de selección.

Para su realización ha sido necesario realizar un estudio del arte de las tecnologías de almacenamiento, así como de las aplicaciones de la red eléctrica y del mercado eléctrico. De ese estudio se han obtenido los datos necesarios para utilizar en el programa. En el CTFM está disponible toda la información al respecto.

Actualmente, en el mercado están disponibles de forma gratuita o en forma de pago diferentes programas que realizan funciones relacionadas con el almacenamiento, por lo que se ha realizado una revisión de los más utilizados con el fin de conocer sus funcionalidades. De esta forma, a la hora de implementar el programa de este TFM se ha dispuesto de ideas que han servido para realizarlo. El entorno elegido ha sido Matlab, previa discusión de diferentes entornos.

La realización del programa ha supuesto para el autor la necesidad de aprender a programar con Matlab, más concretamente de una herramienta que éste ofrece para realizar interfaces gráficas, GUIDE. Mediante la programación se ha creado el programa expuesto en el capítulo 5.

En el proceso de implementación se han encontrado múltiples problemas relacionados con errores de programación, aunque con trabajo se ha conseguido depurar el programa de forma que es más rápido que en versiones primeras y permite crear o guardar casos de estudio. Esto último es de suma importancia, ya que la posibilidad de modificar las bases de datos utilizadas permite que el programa no sea estático en el tiempo, y que mientras se actualizan las tecnologías de almacenamiento el programa puede hacerlo también, siempre que sea utilizado por un usuario experimentado.

La aplicación es diferenciadora de las demás utilizadas en el mercado por el algoritmo desarrollado que maximiza los beneficios obtenidos al proveer el



almacenamiento de energía eléctrica a los diferentes servicios de red. Junto con lo anterior, y teniendo en cuenta la posibilidad de proseguir con un análisis de viabilidad realizable por un programa aparte (también desarrollado en CENER), se considera un programa novedoso.

Se ha realizado un caso real de estudio utilizando el programa implementado en el cual se utilizan datos del proyecto europeo LIFE ZAESS para analizarse la viabilidad técnico-económica de una batería de Zinc-Aire en comparación con las demás tecnologías de almacenamiento disponibles. Tras realizarse seis escenarios diferentes, el programa sugiere dos aspectos:

- Las baterías de Zinc-Aire necesitan aumentar su grado de madurez para poder competir en igualdad con las demás baterías o tecnologías
- Las baterías de Zinc-Aire se adecúan mejor a la red de transporte y distribución que a posiciones como generación o puntos de consumo

Por todo lo expuesto, puede concluirse que se han cumplido los objetivos propuestos. El programa realiza una evaluación de todas las tecnologías utilizadas, a diferentes niveles, para después otorgar factibilidades a todas ellas y ordenarlas para que la selección de una o varias conlleve un mayor acierto comercial que hacerlo considerando otros métodos.



CENER

CENTRO NACIONAL DE
ENERGÍAS RENOVABLES

upna
Universidad Pública de Navarra
Nafarroako Unibertsitate Publikoa

CAPÍTULO 8. BIBLIOGRAFÍA



CENER

CENTRO NACIONAL DE
ENERGÍAS RENOVABLES

upna
Universidad Pública de Navarra
Nafarroako Unibertsitate Publikoa



8.1. Bibliografía

- [1] «Smart Grid,» [En línea]. Available: <https://goo.gl/lJoNlk>. [Último acceso: 6 Junio 2017].
- [2] «HOMER ENERGY,» [En línea]. Available: <https://goo.gl/H6xTBO>. [Último acceso: 6 Junio 2017].
- [3] A. e. a. Akhil, «Sandia National Laboratories,» Julio 2013. [En línea]. Available: <https://goo.gl/2GBrM1>. [Último acceso: 10 Febrero 2017].
- [4] «xe,» 9 Mayo 2017. [En línea]. Available: <https://goo.gl/KjiTa>. [Último acceso: 10 Mayo 2017].
- [5] «Instituto Nacional de Estadística,» 2017. [En línea]. Available: <https://goo.gl/iBrESM>. [Último acceso: 10 Mayo 2017].



CENER

CENTRO NACIONAL DE
ENERGÍAS RENOVABLES

upna
Universidad Pública de Navarra
Nafarroako Unibertsitate Publikoa

CAPÍTULO 9. ANEXOS



CENER

CENTRO NACIONAL DE
ENERGÍAS RENOVABLES

upna
Universidad Pública de Navarra
Nafarroako Unibertsitate Publikoa

9.1. Anexo I

En este anexo se muestra el proceso que se ha llevado a cabo para actualizar la información encontrada en la bibliografía acerca de los beneficios de las aplicaciones de red, utilizados en las bases de datos mostradas en la Figura 16 y en la Figura 19.

Resulta evidente que la información que contiene la Figura 10 del CTFM ha de ser transformada a términos monetarios europeos (€) y a valores actuales (los informes utilizados datan de 2010). El primer paso lógico consiste realizar la equivalencia de los dólares americanos en 2010 a euros en 2010. Para ello se utiliza un registro histórico de las relaciones monetarias en todo el mundo [4].

El informe estudiado se imprimió en febrero de 2010, por lo que se asume que los estudios se realizaron durante el 2009. En la Figura 41 se ha representado la relación entre el euro y el dólar americano durante el año 2009, mes a mes. Los valores son:



Figura 41. Relación €/\$. (2009-2010)

Para hallar la relación euro/dólar, realizamos la media entre los valores mes a mes para el año 2009:

Enero: 1,336; Febrero: 1,297; Marzo: 1,255; Abril: 1,325; Mayo: 1,341; Junio: 1,429; Julio: 1,395; Agosto: 1,436; Septiembre: 1,431; Octubre: 1,472; Noviembre: 1,484; Diciembre: 1,505.



Media: €/\$ = 1,392. Esto quiere decir que 1 euro equivalió a 1,392 dólares estadounidenses durante el año 2009 (de media).

Una vez transformados todos los valores de la tabla de la Figura 41 a € de 2010, es necesario actualizar el valor de esas cantidades de dinero, debido a la inflación anual. Se utiliza para ello la herramienta facilitada por el INE (Instituto Nacional de Estadística) [5]. En la Figura 42 se muestra el cálculo realizado. Como puede observarse, se ha producido un aumento de un 8,3% en el IPC, por lo que el valor del dinero ha disminuido.

Variación del Índice General Nacional según el sistema IPC base 2016 desde **Diciembre de 2009 hasta Marzo de 2017**

	Índice	Porcentaje(%)
Nacional		8,3

Figura 42. Variación del IPC desde diciembre de 2009 hasta marzo de 2017

De esta forma, se obtiene una base de datos con precios y beneficios actualizados para Europa a mes de Marzo de 2017, una fecha actual. Esta base de datos es la utilizada en el programa que se ha implementado en el TFM.