



Departamento de Ingeniería Eléctrica

Proyecto Fin de Carrera

**Validación y Optimización de Ultracondensadores como
Sistema de Almacenamiento de Energía para los
Sistemas Eléctricos Aislados**

Autor: Ramón Blanco Villar

Director: Alberto Barrado Sánchez

Madrid, 10 de junio de 2014

B

Autorizada la entrega del proyecto del alumno:

Ramón Blanco Villar

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Alberto Barrado Sánchez

Fdo.:



Fecha: 07 / 06 / 2014

Vº Bº DEL COORDINADOR DE PROYECTOS

Fernando de Cuadra García

Fdo.:

Fecha: / /

Agradecimientos

A mi director de proyecto, Alberto Barrado, por haberme ayudado a lo largo de estos meses a pesar de los contratiempos.

A mi familia, y en especial a mis padres y a mi hermana Elena, por su gran apoyo durante estos cinco años de carrera. Ellos han estado siempre dándome fuerza en los momentos más duros.

A mis amigos, los que me han animado estos años y con los que he compartido experiencias, éxitos y alegrías.

Validación y Optimización de Ultracondensadores como Sistema de Almacenamiento de Energía para los Sistemas Eléctricos Aislados

Autor: Blanco Villar, Ramón

Director: Barrado Sánchez, Alberto

RESÚMEN DEL PROYECTO

Los sistemas eléctricos aislados están, como su propio nombre indica, aislados de toda red eléctrica y cuentan con un número muy limitado de grupos de generación. Este tipo de sistemas tienen una elevada sensibilidad ante la pérdida de un grupo generador. Suelen ser sistemas de baja inercia y la reserva rodante con la que cuentan los grupos puede no ser suficiente para cubrir la cantidad de potencia perdida por el grupo desconectado. Esto hace que haya una variación (en condiciones normales) en el equilibrio de potencia entre la demanda y la generación. Dicho desequilibrio produce una veloz bajada de frecuencia y si no es compensada se pueden producir desastres de carga para evitar que la frecuencia acabe colapsándose. Los planes de deslastre se basan en la desconexión de cargas por etapas (suelen tener varias) debido a valores bajos de frecuencia o a valores negativos de su derivada. Los sistemas eléctricos aislados presentan únicamente el deslastre de cargas como solución a desequilibrios repentinos de potencia debido a desconexiones de grupos generadores. Los desastres de cargas utilizan la frecuencia y su derivada como variables de control, dejando a diversas partes del sistema eléctrico aislado sin suministro. En el caso de los sistemas eléctricos insulares, estos planes de deslastre no son completamente fiables para eliminar el riesgo de un cero energético que deje a la isla entera sin suministro eléctrico. Por lo tanto se debe intentar solucionar este problema sin tener que recurrir a nuevos planes de deslastre y utilizando tecnologías sostenibles como los sistemas de almacenamiento de energía que está implantando Endesa a través de su Proyecto STORE.

Los sistemas de almacenamiento de energía, y en particular los ultracondensadores, se empiezan a contemplar como una opción viable para ayudar a los sistemas eléctricos aislados en la inyección de potencia en los momentos más críticos. Estos momentos críticos se dan justo cuando se pierde uno de los generadores. El objetivo de la implantación de los ultracondensadores es la capacidad de inyectar potencia

IV

activa en el sistema a gran velocidad y así no depender exclusivamente de la velocidad de la regulación primaria de los generadores todavía conectados al sistema (la velocidad en que estos generadores pueden aumentar ligeramente su inyección debido a la variación en frecuencia). Esta inyección de potencia es temporal (no llega al minuto) y no pretende sustituir a un generador, sino dar suficiente tiempo a los generadores a aumentar su inyección. Una vez pasados los momentos más críticos, el ultracondensador dejará de inyectar potencia. Mediante la utilización de estas nuevas tecnologías se pretende evitar que los planes de deslastre lleguen a actuar o, si esto no se puede conseguir, limitar al mínimo la caída en frecuencia para que el plan de deslastre desconecte una cantidad menor de carga.

El objetivo principal de este proyecto es obtener un modelo validado y optimizado del funcionamiento de un ultracondensador que se pueda utilizar en el control de potencia-frecuencia. Dicho modelo debe responder de forma adecuada ante desviaciones de frecuencia debido a desequilibrios en la generación y demanda de potencia, aproximándose lo máximo posible al funcionamiento real del ultracondensador utilizado en la isla de La Palma. Este proyecto también debe detallar el funcionamiento del ultracondensador así como sus características funcionales.

Para obtener dicho objetivo se han realizado las siguientes tareas a lo largo del proyecto:

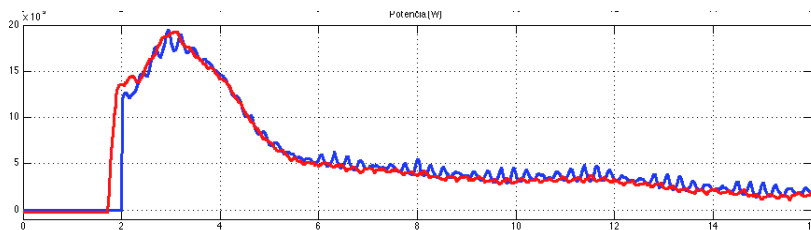
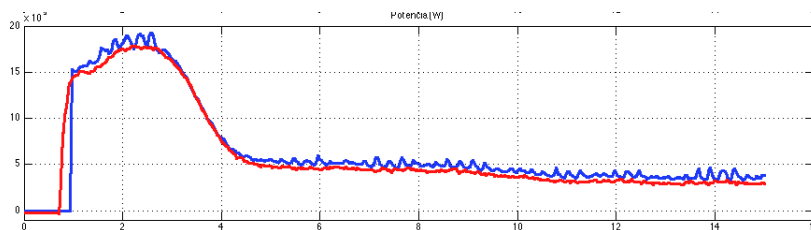
- Simulación de ultracondensadores: utilizando la herramienta *Simulink* de *MatLab* se obtendrán los distintos bloques necesarios para desarrollar la simulación de los ultracondensadores estudiados.
 - Simulación del *Trigger*: bloque que indica al ultracondensador que debe inyectar potencia mediante la medida de la frecuencia y de su derivada.
 - Simulación del Control de Potencia: bloque que calcula la cantidad de potencia que se debe inyectar ante el perfil de frecuencia de un incidente.
- Análisis de las simulaciones obtenidas y conclusiones que se pueden sacar de este proyecto.
- Futuros desarrollos a los que queda abierto el proyecto una vez alcanzado su objetivo principal.

El modelo obtenido en este proyecto presenta las características necesarias y recomendadas para actuar en el escenario propuesto. Dicho modelo actúa con rapidez

verificando las condiciones de desviación y derivada de la frecuencia, produciendo una señal *Trigger* que se puede monitorizar en todo momento para saber si se está o no inyectando potencia. El bloque *Trigger* no sólo cuenta con la capacidad de indicar cuando se debe inyectar potencia sino que también indica en que momento se debe interrumpir la inyección. Este bloque permite la modificación de los límites tanto superior como inferior de la frecuencia y la derivada admisibles así como el tiempo durante el cual se debe mantener dicha condición. Por lo tanto es un bloque optimizado que cumple con su objetivo.

El segundo bloque principal que se ha obtenido dentro del modelo es el bloque de control potencia-frecuencia. En todo momento se ha comparado el modelo que se iba obteniendo con repuestas reales del ultracondensador de La Palma. Era necesario que el perfil de la inyección fuera lo más parecido al perfil real para que el modelo fuera útil y realista. La adaptación que se ha realizado para obtener el modelo en *Simulink* consigue cumplir con esta condición. Este bloque permite la variación de las características de ganancia que tienen los distintos segmentos del bloque así como la potencia total de los ultracondensadores.

Se puede concluir que el modelo obtenido es válido y bastante óptimo en la recreación del ultracondensador real. Para poder obtener esta conclusión se le han introducido varios perfiles de frecuencia reales y se ha comparado la potencia obtenida con el modelo con la inyección real. En las figuras siguientes se muestra el resultado final de la inyección de potencia que produce el modelo (azul) y la inyección real (rojo). Se observa como las salidas son casi idénticas, demostrando la validez del modelo obtenido.



Validation and Optimization of Supercapacitors as an Energy Storage System in Isolated Power Systems

Author: Blanco Villar, Ramón

Director: Barrado Sánchez, Alberto

PROJECT SUMMARY

Isolated power systems are, as their own name says, isolated from other power systems and have a limited number of generating groups. This kind of systems have high sensitivity when a generating group is suddenly disconnected. Isolated power systems usually have low inertia as well as not enough primary reserve to make up for the loss of power due to the loss of a generating group. This fact means that the normally balanced power equilibrium of demand and supply becomes unbalanced. This unbalance generates a quick fall in frequency which, if it's not made up for, it can lead to load shedding in order to stop a total blackout of the power system due to collapsing frequency. Load shedding schemes are the only resort for isolated power systems in order to solve the sudden unbalance of power which results from the loss of a generating group. Load shedding schemes operate disconnecting a specific set of loads in different stages when the frequency reaches low values or its derivative is negative, leaving parts of the system without supply. For isolated power systems on islands, load shedding are not always fully reliable in achieving a no risk scenario of a total blackout. Therefore, this problem should be tackled with other methods which don't include new load shedding schemes. These new methods should be sustainable, such as the energy storage systems which Endesa is introducing through its project STORE.

Energy storage systems, and in particular supercapacitors, are starting to be considered viable to help isolated power systems in injecting active power during critical periods. These periods occur when a generating group is suddenly lost. The objective of the implementation of supercapacitors is their ability to inject active power very quickly and therefore, the system does not only depend on the groups' primary regulation (the speed with which the remaining generators increase their power output due to the frequency variation). This injection of active power is temporary (less than a minute) and its goal is not to substitute a generating group, but to act as a buffer so that the other groups can increase their power output. Once the critical periods have passed, the supercapacitor will stop injecting po-

VIII

wer. The ultimate goal of the use of this new technology is to avoid the use of load shedding. If this cannot be achieved, then the goal would be to limit the decrease in frequency so that the load shedding plan disconnects as less loads as possible. The objective of this project is to obtain a validated and optimised model of the supercapacitor's operation as part of the active power control. This model should respond adequately against frequency deviations due to an unbalance in the supply/demand power equilibrium. The operation of the model should be as close as possible to the operation of the real supercapacitor installed in the La Palma island. The project should also explain in detail how the supercapacitor works as part of the active power control as well as the functional characteristics it possesses.

To achieve this objective, the following tasks have been fulfilled throughout the project:

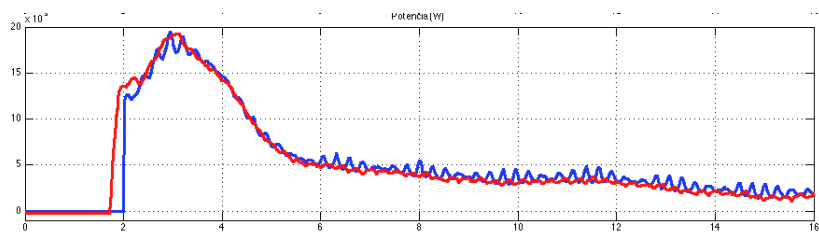
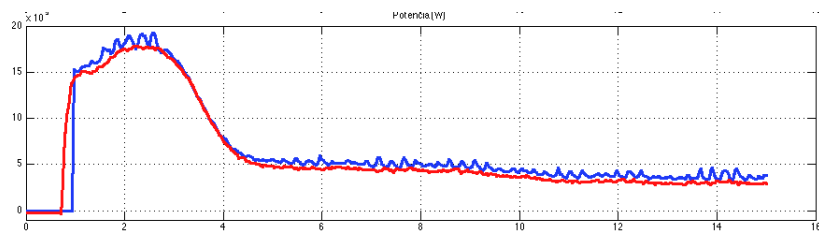
- Simulation of the supercapacitor: modelling the different blocks needed to develop the simulation of the supercapacitor using *MatLab*'s simulation tool *Simulink*.
 - Simulation of the *Trigger*: block that signals the supercapacitor when to start injecting power, using the frequency of the system as well as its derivative.
 - Simulation of the active power control: block that calculates the amount of active power that should be injected into the system using the frequency of the system as well as its derivative.
- Analysis of the simulations obtained with the model and conclusions that can be reached from the results of the project.
- Future developments that the project leaves open to study after achieving its objective.

The model obtained in this project presents the necessary and recommended characteristics to successfully behave in the proposed scenario. The model obtained behaves quickly verifying the conditions for the frequency and its derivative, producing a *Trigger* signal that can be monitored at all times to verify if the supercapacitor is or isn't injecting active power. The *Trigger* block signals when to inject power as well as when to stop injecting power. This block allows the modification

of the different limits of the maximum or minimum frequency and frequency derivative (conditions for the *Trigger* signal). The time during which this condition must be maintained can also be altered. Therefore, it is an optimised block that has achieved its objective.

The second block that has been obtained during the project is the active power control block. During the course of this project, the power output of the model has been compared to the power output of the real supercapacitor installed in la Palma. To validate and optimise the model, it was mandatory that both outputs were very similar. The model obtained with *Simulink* is able to verify this condition and it makes the model more useful and realistic. The active power control block allows the modification of the gains for the different segments of the block, as well as the nominal power of the supercapacitors.

The results show how the model is valid and optimal in the recreation of the real supercapacitor. To be able to reach such conclusion, the model has been subjected to various real frequency profiles. The output power of the model has been compared to the real output of the supercapacitor and this is shown in the next figures. It can be seen how the active power output of the model (blue) and the real output (red) are nearly identical, demonstrating the validity of the model obtained in the project.



Documento I

MEMORIA DESCRIPTIVA

Índice general

| | |
|---|-----------|
| Memoria | 13 |
| 1. Introducción | 13 |
| 1.1. Planteamiento y Definición del Problema | 13 |
| 1.1.1. El Control de Potencia Activa | 14 |
| 1.1.2. Introducción a los Sistemas Eléctricos Aislados | 14 |
| 1.1.3. El Deslastre de Cargas | 14 |
| 1.1.4. La Importancia de la Frecuencia | 15 |
| 1.1.5. Endesa y el Proyecto STORE | 15 |
| 1.1.6. Definición del Problema | 16 |
| 1.2. Motivación | 16 |
| 1.3. Objetivos | 17 |
| 1.4. Metodología del Trabajo y Recursos | 18 |
| 1.5. Estructura del Documento | 19 |
| 2. Estado de la Cuestión | 21 |
| 2.1. Los Sistemas Eléctricos Insulares y Extrapeninsulares (SEIE) | 21 |
| 2.1.1. Introducción a los SEIE | 21 |
| 2.1.2. Datos de los SEIE Españoles | 22 |
| 2.1.3. Red de la isla de La Palma, Islas Canarias | 24 |
| 2.2. Sistemas de Almacenamiento de Energía | 25 |
| 2.2.1. Ultracondensadores | 27 |
| 3. Diseño de un Modelo de Ultracondensador | 31 |
| 3.1. Ultracondensador Real | 32 |
| 3.1.1. Perfiles de Descarga | 33 |
| 3.1.2. Perfil de Descarga Inercial | 34 |
| 3.2. Simulación del <i>Trigger</i> | 36 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 3.2.1. | <i>Trigger</i> con Valor Absoluto de la Frecuencia | 37 |
| 3.2.2. | <i>Trigger</i> con Derivada de la Frecuencia | 38 |
| 3.2.3. | Bloque <i>Trigger</i> Completo | 41 |
| 3.3. | Optimización del Bloque <i>Trigger</i> | 43 |
| 3.3.1. | Optimización de <i>Trigger</i> con Valor Absoluto de la Frecuencia | 43 |
| 3.3.2. | Optimización de <i>Trigger</i> con Derivada de la Frecuencia . . | 45 |
| 3.3.3. | Optimización de Bloque <i>Trigger</i> Completo | 46 |
| 3.3.4. | Diagrama de Flujo del bloque <i>Trigger</i> | 54 |
| 3.4. | Simulación del Bloque de Control de Potencia | 55 |
| 3.4.1. | Control de Frecuencia Primario o Regulación Primaria . . . | 56 |
| 3.4.2. | Respuesta Inercial | 63 |
| 3.4.3. | Conjunto del Bloque de Control de Potencia | 68 |
| 3.5. | Optimización del Bloque de Control de Potencia | 73 |
| 3.6. | Conjunto de Bloques del Ultracondensador | 78 |
| 4. | Conclusiones y Futuros Desarrollos | 83 |
| 4.1. | Conclusiones | 83 |
| 4.2. | Futuros Desarrollos | 85 |
| | Bibliografía | 87 |
| A. | Avance del Informe del Sistema Eléctrico Español 2013 | |
| | Extracto páginas 19-26 | |
| | Fuente: Red Eléctrica de España | 89 |
| B. | Battery Storage System PSS/E Dynamic Model Specification | |
| | Extracto páginas 6-9 | |
| | Fuente: SAFT Baterías S.L. | 101 |
| | Estudio Económico | 109 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| 2.1. Balance eléctrico del año 2013, Apéndice A | 23 |
| 2.2. Información de potencia en las Islas Canarias, Apéndice A | 23 |
| 2.3. Situación Geográfica de las Islas Canarias | 24 |
| 2.4. Isla de La Palma | 24 |
| 2.5. Rangos de Potencia y Energía para Sistemas de Almacenamiento de Energía | 25 |
| 2.6. Acumulación de carga en condensadores, ultracondensadores y ba- terías | 28 |
| 2.7. Relación T-R y T-C en ultracondensadores Maxwell | 28 |
| 2.8. Crecimiento Esperado del Mercado de Ultracondensadores hasta 2018 | 29 |
| 3.1. Esquemas eléctricos de un ultracondensador | 32 |
| 3.2. Variación de potencia descargada ante distintos perfiles de descarga | 33 |
| 3.3. Variación de frecuencia ante distintos perfiles de descarga | 34 |
| 3.4. Ejemplo de perfil inercial de descarga (ante pérdida de 1500kW de potencia) | 35 |
| 3.5. Ejemplo de perfil inercial de descarga (ante pérdida de 2000kW de potencia) | 35 |
| 3.6. Parámetros de la <i>Lookup Table</i> de 1-D utilizada en el bloque <i>Trigger</i> | 36 |
| 3.7. Parte del bloque del <i>trigger</i> en Simulink que compara la frecuencia con los límites admisibles | 37 |
| 3.8. Respuesta del bloque ante un perfil de frecuencia | 38 |
| 3.9. Parte del bloque del <i>trigger</i> en Simulink que compara la derivada de la frecuencia con el mínimo necesario para actuar (0,1 Hz/s) . . | 39 |
| 3.10. Respuesta del bloque de la derivada ante un perfil de frecuencia . . | 40 |
| 3.11. Bloque del <i>Trigger</i> Completo en Simulink | 41 |
| 3.12. Respuesta del bloque <i>Trigger</i> completo ante un perfil de frecuencia | 42 |

| | |
|---|----|
| 3.13. Optimización inicial del bloque del <i>trigger</i> en Simulink que compara la frecuencia con los límites admisibles | 44 |
| 3.14. Optimización final del bloque del <i>trigger</i> en Simulink que compara la frecuencia con los límites admisibles | 45 |
| 3.15. Máscara del bloque del <i>trigger</i> dependiente de la frecuencia | 45 |
| 3.16. Optimización del bloque del <i>trigger</i> en Simulink que compara la derivada de la frecuencia con el mínimo necesario para actuar | 46 |
| 3.17. Máscara del bloque del <i>trigger</i> dependiente de la derivada de frecuencia | 46 |
| 3.18. Máscara del bloque del <i>trigger</i> completo con Flip-Flop S-R | 47 |
| 3.19. Bloque dependiente de la frecuencia para el <i>Reset</i> del Flip-Flop | 49 |
| 3.20. Bloque dependiente de la derivada de la frecuencia para el <i>Reset</i> del Flip-Flop | 49 |
| 3.21. Modelo del <i>Trigger</i> | 50 |
| 3.22. Respuesta de las distintas señales del <i>Trigger</i> ante un perfil de frecuencia | 51 |
| 3.23. Respuesta del <i>Trigger</i> ante perfil 1 de frecuencia | 52 |
| 3.24. Respuesta del <i>Trigger</i> ante perfil 2 de frecuencia | 52 |
| 3.25. Control potencia-frecuencia del Apéndice B | 56 |
| 3.26. Bloque de regulación primaria del control P-f del Apéndice B | 56 |
| 3.27. Curva característica de la regulación primaria del control P-f del Apéndice B | 57 |
| 3.28. Bloque de regulación primaria del control P-f creado en Simulink | 57 |
| 3.29. Máscara del bloque de regulación primaria del control P-f creado en Simulink | 58 |
| 3.30. Inyección de potencia proporcional, $K_p=75$, perfil 1 | 60 |
| 3.31. Inyección de potencia proporcional, $K_p=75$, perfil 2 | 61 |
| 3.32. Inyección de potencia real (PEM), $K_p=50$, perfil 2 | 62 |
| 3.33. Bloque de respuesta inercial del control P-f del Apéndice B | 63 |
| 3.34. Bloque de respuesta inercial del control P-f creado en Simulink | 63 |
| 3.35. Máscara del bloque de respuesta inercial del control P-f creado en Simulink | 64 |
| 3.36. Inyección de potencia inercial, $K_d=10$, perfil 1 | 66 |
| 3.37. Inyección de potencia proporcional, $K_d=10$, perfil 2 | 67 |
| 3.38. Bloque de sumador de potencia para control P-f según Apéndice B | 68 |
| 3.39. Conjunto de bloques de control P-f con sumador | 69 |

| | |
|--|----|
| 3.40. Inyección de potencia total, $K_p=75$, $K_d=10$, perfil 1 | 70 |
| 3.41. Inyección de potencia total, $K_p=75$, $K_d=10$, perfil 2 | 71 |
| 3.42. Conjunto de bloques de control P-f con sumador limitado por energía máxima | 73 |
| 3.43. Inyección de potencia ideal y limitada, $K_p=75$, $K_d=10$, perfil 1 . . | 75 |
| 3.44. Inyección de potencia ideal y limitada, $K_p=75$, $K_d=10$, perfil 2 . . | 76 |
| 3.45. Ultracondensador completo, modelo Simulink | 78 |
| 3.46. Inyección de potencia simulada y real, $K_p=50$, $K_d=10$, PEM 1 . . | 79 |
| 3.47. Inyección de potencia simulada y real, $K_p=100$, $K_d=10$, PEM 2 . . | 80 |
| 3.48. Inyección de potencia simulada y real, $K_p=100$, $K_d=10$, PEM 3 . . | 81 |

Índice de tablas

| | |
|--|----|
| 2.1. Características de Sistemas de Almacenamiento de Energía | 26 |
| 2.2. Comparación entre las Características de los Ultracondensadores y las Baterías de Ion-Litio | 30 |
| 3.1. Características de Respuesta de un Flip-Flop S-R | 47 |
| 3.2. Parámetros de la regulación primaria del control P-f, valores máximos y mínimos | 59 |
| 3.3. Parámetros de la regulación primaria del control P-f, incluyendo valores utilizados | 59 |
| 3.4. Parámetros de la respuesta inercial del control P-f, valores máximos y mínimos | 64 |
| 3.5. Parámetros de la respuesta inercial del control P-f, incluyendo valores utilizados | 65 |

MEMORIA

Capítulo 1

Introducción

En este capítulo se hace una introducción de este proyecto. En la 1ª sección se plantea el problema que se pretende resolver al final de este proyecto, explicando brevemente los sistemas eléctricos aislados, el deslastre de cargas, la importancia de la frecuencia en sistemas eléctricos y el Proyecto STORE de Endesa. En la 2ª sección se explica cual es la motivación de este proyecto. A continuación, en la 3ª sección se indican los objetivos de este proyecto. En la 4ª sección se enumeran las distintas herramientas utilizadas en la realización de este proyecto para la consecución de los objetivos presentados con anterioridad. Para finalizar, en la 5ª sección se muestra la organización de los siguientes capítulos del documento.

1.1. Planteamiento y Definición del Problema

Esta sección presenta el problema que ha motivado el desarrollo de este proyecto. Se empieza con una introducción a los sistemas eléctricos aislados, seguido por una descripción de lo que es un deslastre de cargas. Se continúa ofreciendo una breve descripción de la información que suministra la frecuencia sobre el estado de un sistema eléctrico, seguido por la referencia a un proyecto real que se está llevando a cabo actualmente al que se hará referencia a lo largo de este documento. Una vez explicados los términos base que se utilizarán a lo largo del proyecto se define el problema que se intentará resolver.

1.1.1. El Control de Potencia Activa

Todo sistema eléctrico debe operar bajo una condición de frecuencia constante. Para mantener la frecuencia constante se depende de un sistema de balance de potencia activa que es el siguiente:

$$P_{\text{Generación}} = P_{\text{Demanda}} + P_{\text{Pérdidas Sistema}} \quad (1.1)$$

Se debe mantener este equilibrio en todo momento para que no se produzca una variación de frecuencia. De por sí, las máquinas cuentan con la posibilidad de variar su velocidad para aportar más o menos energía para mantener el equilibrio en la ecuación 1.1. [2]

1.1.2. Introducción a los Sistemas Eléctricos Aislados

Los sistemas eléctricos aislados están, como su propio nombre indica, aislados de toda red eléctrica y cuentan con un número muy limitado de grupos de generación. Este tipo de sistemas tienen una elevada sensibilidad ante la pérdida de un grupo generador, lo que hace que haya una variación (en condiciones normales) en el equilibrio de potencia entre la demanda y la generación. Suelen ser sistemas de baja inercia y la reserva rodante con la que cuentan los grupos puede no ser suficiente para cubrir la cantidad de potencia perdida por el grupo desconectado. Dicho desequilibrio produce una veloz bajada de frecuencia y si no es compensada se pueden producir desastres de carga para evitar el colapso de la frecuencia. Sin embargo, puede ocurrir que incluso utilizando un plan de deslastre de cargas se llegue a producir el colapso de la frecuencia y por lo tanto un “apagón” completo del sistema. Los Sistemas Eléctricos Insulares y Extrapeninsulares (SEIE) son los sistemas eléctricos aislados que se encuentran en España y se analizan en el capítulo 2.[3]

1.1.3. El Deslastre de Cargas

Los planes de deslastre se basan en la desconexión de cargas por etapas (suelen tener varias) debido a valores bajos de frecuencia o a valores negativos de su derivada. Es un sistema de protección para sistemas que, al sufrir desequilibrios entre la generación y la demanda de potencia, responden con variaciones pronunciadas en la frecuencia pudiendo provocar un colapso del sistema. El principio básico de los planes de descarga es el uso de relés de subfrecuencia y de relés de derivada de

frecuencia para ir desconectando cargas de menor a mayor prioridad (en la primera etapa tienen menor prioridad que en las siguientes) para intentar restablecer el equilibrio de potencia. Aunque el deslastre de cargas puede llegar a solucionar un desequilibrio de potencia, produce apagones en diversos puntos del sistema. Los planes de deslastre de cargas son especialmente importantes en sistemas insulares. [4]

1.1.4. La Importancia de la Frecuencia

La frecuencia es la variable más importante de un sistema eléctrico y a su vez proporciona mucha información de dicho sistema. Como se ha comentado en el apartado 1.1.1, la frecuencia se debe mantener constante (normalmente a 50Hz) para que un sistema eléctrico funcione correctamente. La frecuencia es una medida de la velocidad de los generadores que están suministrando potencia a la red y se puede obtener información del sistema eléctrico asociado tanto por el valor de la frecuencia como por el valor de su derivada. Si la frecuencia es menor que el valor de referencia (subfrecuencia), significa que el sistema está desequilibrado, siendo la demanda mayor que la generación. Existe el caso contrario, en el que la frecuencia se encuentra por encima del valor de referencia (sobrefrecuencia) indicando que la generación es mayor que la demanda. La derivada de la frecuencia se puede utilizar para saber la cantidad de potencia que se ha perdido en un momento dado. En momentos de pérdida de grupos generadores la derivada alcanza valores muy negativos.

1.1.5. Endesa y el Proyecto STORE

El Proyecto STORE es un proyecto pionero en España en el campo de los sistemas de almacenamiento de energía. Para llevar a cabo este proyecto, Endesa ha puesto en marcha tres plantas con diversos sistemas de almacenamiento de energía en las islas de La Palma, Gran Canaria y La Gomera. El objetivo del Proyecto STORE es probar y demostrar como distintas tecnologías de almacenamiento de energía son útiles y viables en los sistemas eléctricos insulares para solucionar problemas de estabilidad y problemas de generación. Este proyecto cuenta con la implantación de un sistema de ultracondensadores en la isla de La Palma.

1.1.6. Definición del Problema

Los sistemas eléctricos aislados presentan únicamente el deslastre de cargas como solución a desequilibrios repentinos de potencia debido a desconexiones de grupos generadores. Los deslastres de cargas utilizan la frecuencia y su derivada como variables de control, dejando a diversas partes del sistema eléctrico aislado sin suministro. En el caso de los sistemas eléctricos insulares, estos planes de deslastre no son completamente fiables para eliminar el riesgo de un cero energético que deje a la isla entera sin suministro eléctrico. Por lo tanto se debe intentar solucionar este problema sin tener que recurrir a nuevos planes de deslastre y utilizando tecnologías sostenibles como los sistemas de almacenamiento de energía que está implantando Endesa a través de su Proyecto STORE.

1.2. Motivación

Como se ha comentado anteriormente, los sistemas eléctricos aislados son sistemas muy proclives a sufrir desequilibrios de potencia debido a pérdidas de generación. Hasta ahora, cuando esto ocurría, solo se tenía el deslastre de cargas para solucionarlo y muchas veces ni si quiera esto resultaba suficiente. Durante los últimos cinco años, se han producido hasta cuatro ceros energéticos en la isla de La Palma: el 23 de septiembre de 2009, el 23 y 24 de diciembre de 2009, el 16 de abril de 2010 y el 3 de septiembre de 2014. Por lo tanto es un problema de gran importancia y de gran relevancia en la actualidad. La posibilidad de que algún tipo de sistema almacenamiento de energía presente una solución viable a este problema hace que sea de gran interés entender y aplicar dichos sistemas. No tiene sólo un interés a nivel de conocimiento eléctrico, sino a nivel social y económico. La utilización de los sistemas de almacenamiento de energía, y más concretamente de un sistema de ultracondensadores, puede conseguir que en casos de desequilibrios de potencia no se llegue a niveles de frecuencia y de derivada de frecuencia por debajo de los niveles de deslastre. Es decir, se podría utilizar como una pieza más del control de potencia-frecuencia. Esto ahorraría problemas, recursos económicos y haría que el sistema fuera más fiable. Es la única fórmula que se contempla para garantizar el suministro de energía en sistemas eléctricos aislados sustituyendo a los planes de deslastre.

Otro aspecto importante es la posibilidad de basarse en un proyecto real que sirva de punto de partida a este proyecto de fin de carrera (PFC). La utilización de los ultracondensadores en la isla de La Palma por parte de Endesa como parte

de su Proyecto STORE, supone el elemento realista que persigue un PFC al poder comprobar y contrastar resultados con situaciones reales y pruebas reales.

1.3. Objetivos

El objetivo de la implantación de los ultracondensadores es la capacidad de inyectar potencia activa en el sistema a gran velocidad y así no depender exclusivamente de la velocidad de la regulación primaria de los generadores todavía conectados al sistema (la velocidad en que estos generadores pueden aumentar ligeramente su inyección debido a la variación en frecuencia). Esta inyección de potencia es temporal (no llega al minuto) y no pretende sustituir a un generador, sino dar suficiente tiempo a los generadores a aumentar su inyección. Una vez pasados los momentos más críticos, el ultracondensador dejará de inyectar potencia. Mediante la utilización de estas nuevas tecnologías se pretende evitar que los planes de deslastre lleguen a actuar o, si esto no se puede conseguir, limitar al mínimo la caída en frecuencia para que el plan de deslastre desconecte una cantidad menor de carga.

El objetivo principal de este proyecto es obtener un modelo validado y optimizado del funcionamiento de un ultracondensador que se pueda utilizar en el control de potencia-frecuencia. Dicho modelo debe responder de forma adecuada ante desviaciones de frecuencia debido a desequilibrios en la generación y demanda de potencia, aproximándose lo máximo posible al funcionamiento real del ultracondensador utilizado en La Palma. Se debe detallar el funcionamiento del ultracondensador así como sus características funcionales.

Para obtener dicho objetivo se van a realizar las siguientes tareas:

- Simulación de ultracondensadores: utilizando la herramienta *Simulink* de *MatLab* se obtendrán los distintos bloques necesarios para desarrollar la simulación de los ultracondensadores estudiados.
 - Simulación del *Trigger*: bloque que indica al ultracondensador que debe inyectar potencia mediante la medida de la frecuencia y de su derivada.
 - Simulación del Control de Potencia: bloque que calculada la cantidad de potencia que se debe inyectar ante el perfil de frecuencia de un incidente.
- Simulación de grupos generadores: utilizando la herramienta *Simulink* de

MatLab y esquemas disponibles se aproximarán los grupos generadores que conforman la planta de Los Guinchos en La Palma.

- Simulación del conjunto de ultracondensadores y grupos generadores: una vez obtenidas las dos simulaciones descritas anteriormente se acoplarán para formar un conjunto.
- Análisis de las simulaciones obtenidas y conclusiones que se pueden sacar de este proyecto.
- Futuros desarrollos a los que queda abierto el proyecto una vez alcanzado su objetivo principal.

Para validar los modelos obtenidos se compararán las salidas de dichos modelos con las salidas reales de los componentes. La optimización se realizará al final de la simulación de cada bloque y con los bloques en conjunto para aproximar su funcionamiento al funcionamiento real de los componentes.

1.4. Metodología del Trabajo y Recursos

Se deben utilizar varias herramientas informáticas para poder obtener y analizar datos. Igualmente, otras herramientas para el procesamiento de datos y la creación de modelos de simulación serán necesarias. Durante las distintas etapas del proyecto se utilizarán los programas descritos a continuación:

AREVA Bitronics 70 Series BiView : programa utilizado para conectar con el módulo de ultracondensadores de la planta de Los Guinchos en La Palma. Se obtienen (en .cfg y .dat) datos tanto analógicos como digitales de los eventos más significativos (conexiones/desconexiones de líneas, caídas de grupos generadores, etc.). Los datos analógicos obtenidos incluyen tensión, corriente, potencia activa inyectada y frecuencia entre otros.

Siemens Sigr4 : programa utilizado para mostrar de forma gráfica los datos obtenidos por el AREVA Bitronics. Representa los datos en distintas gráficas dando la opción de leer los datos en puntos seleccionados.

MatLab versión 7.14/Simulink : MatLab se utilizará para leer y procesar datos durante todo el proyecto. Simulink será la herramienta fundamental para simular tanto los ultracondensadores como los grupos generadores. Utilizando

Simulink se simulará el comportamiento de los ultracondensadores en eventos de pérdida de potencia; también se obtendrán perfiles de la evolución de frecuencia en dichos eventos.

L^AT_EX/Microsoft Office Excel : estos programas de ofimática se utilizarán para escribir el proyecto, insertando imágenes y capturas de pantalla de los programas mencionados anteriormente.

1.5. Estructura del Documento

Este documento consta de 4 capítulos. El capítulo 1 es la introducción que se encuentra sobre estas líneas. El capítulo 2 realiza una descripción del estado de la cuestión, seguido por el capítulo 3 donde se realiza la obtención del modelo y la simulación del ultracondensador. Para finalizar el proyecto, en el capítulo 4 se incluyen las conclusiones así como futuros desarrollos del proyecto.

Capítulo 2

Estado de la Cuestión

Una vez que se tiene claro el objetivo, es importante que se conozcan los antecedentes de los distintos elementos que afectan al contexto de este proyecto. En primer lugar se explicarán de una forma más detallada los sistemas eléctricos aislados españoles (los SEIE), prestando especial atención a la red de la isla de La Palma donde se encuentra el ultracondensador a simular. A continuación se describen diversos sistemas de almacenamientos de energía, incluyendo una explicación detallado de los ultracondensadores.

2.1. Los Sistemas Eléctricos Insulares y Extrapeninsulares (SEIE)

2.1.1. Introducción a los SEIE

En España existen sistemas eléctricos fuera de la red peninsular de electricidad. Estos sistemas eléctricos aislados son denominados Sistemas Eléctricos Insulares y Extrapeninsulares (SEIE). Los SEIE están localizados en varios lugares del territorio español y tienen características distintas al resto del sistema eléctrico. Las localizaciones de estos sistemas son las Islas Canarias, las Islas Baleares y las ciudades autónomas de Ceuta y Melilla. Al estar fuera de la red peninsular, estos sistemas se consideran sistemas eléctricos aislados. Los territorios mencionados forman el 2,5 % del territorio español pero contienen el 7,2 % de la población española (sin tener en cuenta la cantidad de gente que visita dichos territorios debido al turismo). Los SEIE tienen las siguientes características especiales que no incluye el sistema peninsular:

- Incrementos de demanda anuales mayor que en la península (en proporción a la población)
- Capacidad de las plantas de potencia menor que en la península debido a razones de seguridad
- Menor accesibilidad a fuentes de energía primarias, la generación se basa en productos del petróleo
- No hay interconexión con otros sistemas eléctricos, por lo tanto se necesita más capacidad de reserva
- Mayor requisitos medioambientales debido a la menor superficie y mayor cantidad de turismo (de nuevo, proporcionalmente con la península)
- Gran parte de las herramientas necesarias para crear y administrar el sistema eléctrico de las islas se encuentran en la península. Esto incluye materiales, personas y combustibles

Todas las características mencionadas anteriormente hace que la generación en estos sistemas sea más cara en dos aspectos fundamentales: los costes de inversión y los costes de operación. También se presenta la dificultad de garantizar la cantidad mínima de potencia requerida.

2.1.2. Datos de los SEIE Españoles

El Apéndice A muestra un extracto de un documento producido por Red Eléctrica de España (REE). Dicho documento muestra información de los Sistemas Eléctricos Insulares y Extrapeninsulares españoles para el año 2013. A continuación, muestran datos e información de dicho apéndice que se presumen más relevantes para hacerse una idea general de los SEIE. Estos datos son el balance eléctrico anual de los distintos SEIE, mostrando las diferentes tecnología de generación con las que cuentan y en qué cantidad, además de una gráfica en la que se puede ver potencia instalada en las Islas Canarias y sus porcentajes.

| Balance eléctrico anual | Islas Baleares | | Islas Canarias | | Ceuta | | Melilla | |
|--|----------------|--------------|----------------|-------------|------------|-------------|------------|--------------|
| | GWh | % 13/12 | GWh | % 13/12 | GWh | % 13/12 | GWh | % 13/12 |
| Hidráulica | - | - | 0 | - | - | - | - | - |
| Carbón | 2.591 | -11,9 | - | - | - | - | - | - |
| Fuel/gas | 1.296 | -1,4 | 5.243 | -8,9 | 220 | -5,4 | 216 | -6,1 |
| Motores de combustión interna ⁽¹⁾ | 769 | -20,4 | 2.182 | -2,3 | 220 | -5,3 | 216 | -6,0 |
| Turbina de gas | 527 | 51,5 | 382 | -36,4 | 0,2 | -57,3 | 0,1 | -45,1 |
| Turbina de vapor | - | - | 2.679 | -8,4 | - | - | - | - |
| Ciclo combinado | 427 | -54,7 | 3.147 | 5,8 | - | - | - | - |
| Generación auxiliar ⁽²⁾ | 7 | -14,9 | 0 | - | - | - | - | - |
| Régimen ordinario | 4.322 | -17,0 | 8.390 | -3,9 | 220 | -5,4 | 216 | -6,1 |
| Consumos en generación | -302 | -13,4 | -437 | -6,3 | -18 | -11,7 | -14 | -4,5 |
| Hidráulica | - | - | 3 | 67,4 | - | - | - | - |
| Eólica | 6 | -4,5 | 369 | 2,0 | - | - | - | - |
| Solar fotovoltaica | 127 | 12,6 | 288 | 12,6 | - | - | 0,04 | -50,0 |
| Térmica renovable | 1 | 14,1 | 9 | 11,2 | - | - | - | - |
| Térmica no renovable | 252 | -7,3 | 0 | - | - | - | 8 | 258,2 |
| Régimen especial | 386 | -1,5 | 668 | 6,6 | - | - | 8 | 247,4 |
| Generación neta | 4.405 | -16,1 | 8.621 | -3,0 | 202 | -4,8 | 210 | -3,4 |
| Enlace Penín.-Baleares ⁽³⁾ | 1.266 | - | - | - | - | - | - | - |
| Demanda (b.c.) | 5.671 | -2,5 | 8.621 | -3,0 | 202 | -4,8 | 210 | -3,4 |

(1) Incluye generadores cuyo combustible principal es el fueloil, gasoil y gas natural. (2) Grupos de emergencia que se instalan de forma transitoria en determinadas zonas para cubrir un déficit de generación. (3) Enlace Península-Baleares funcionando al mínimo técnico de seguridad hasta el 13/08/2012. Valor positivo: saldo importador; Valor negativo: saldo exportador.

Figura 2.1: Balance eléctrico del año 2013, Apéndice A

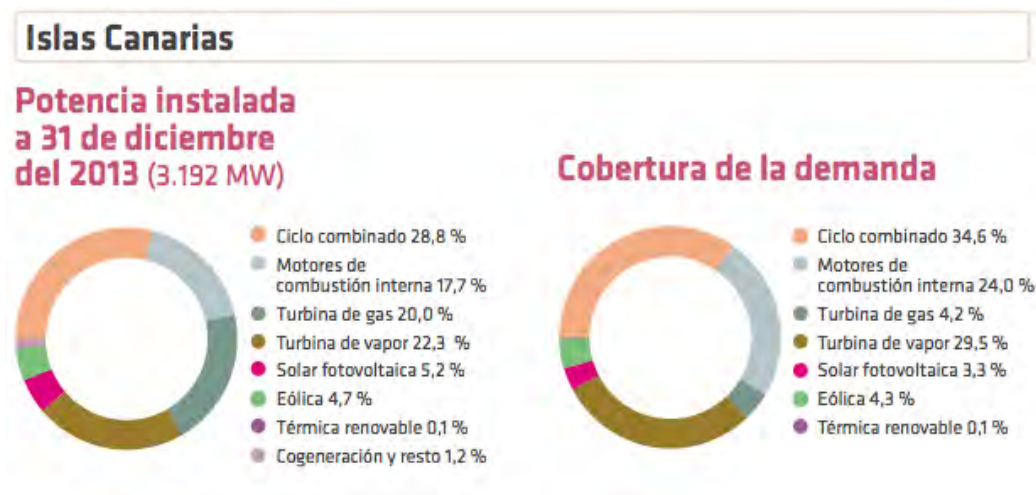


Figura 2.2: Información de potencia en las Islas Canarias, Apéndice A

2.1.3. Red de la isla de La Palma, Islas Canarias

En este proyecto se centrará la localización geográfica en el sistema eléctrico de las Islas Canarias, un ejemplo de un sistema eléctrico insular como se puede comprobar en el apartado anterior. Más concretamente en la isla de La Palma. Las Islas Canarias son un conjunto de siete islas y seis islotes. Se encuentran a 940 km del continente europeo (del islote de Alegranza al Cabo de San Vicente, Portugal) y a 97 km del continente africano. Las Islas Canarias están formadas por: El Hierro, La Gomera, La Palma, Tenerife, Fuerteventura, Gran Canaria y Lanzarote, y su superficie total es de 7.446 km^2 .

En la isla de La Palma se encuentra una planta de generación, la planta de Los Guinchos en la zona de Breña Alta, la cual cuenta con turbinas de gas y diesel. Esta planta tiene 107,74 MW de potencia instalada y un total de 11 grupos.



Figura 2.3: Situación Geográfica de las Islas Canarias



Figura 2.4: Isla de La Palma (Google Maps)

Al ser una de las islas con menor inercia y potencia de corto circuito, es uno de los sistemas insulares aislados que se pueden ver más afectados por pérdidas súbitas de generación. Esto produciría un desequilibrio repentino entre la demanda y el consumo de potencia activa haciendo que la frecuencia caiga a gran velocidad (como se describe en el apartado 1.1.1. Cuando esto ocurre, los grupos que siguen generando potencia e inyectándola en la red deben utilizar su reserva rodante. Utilizando sistemas de almacenamiento de energía, se podría evitar este desequilibrio inyectando potencia cuasi-instantáneamente evitando el desplome frecuencial. Por estas razones, las Islas Canarias y en especial la isla de La Palma, son los más indicados para implementar estos sistemas de almacenamiento de energía: motivos geográficos y motivos de precariedad de suministro. El modelo que se obtendrá en

este proyecto es el de un ultracondensador que está instalado actualmente en la isla de La Palma como parte del Proyecto STORE que está llevando a cabo Endesa. Con este ultracondensador (o sistema de ultracondensadores) se pretende ayudar al control de potencia activa del sistema, teniendo una generación de potencia casi instantánea que pueda inyectar potencia en el sistema.

2.2. Sistemas de Almacenamiento de Energía

Hoy en día existen varios métodos de almacenamiento de energía. Los diferentes métodos se muestran a continuación:

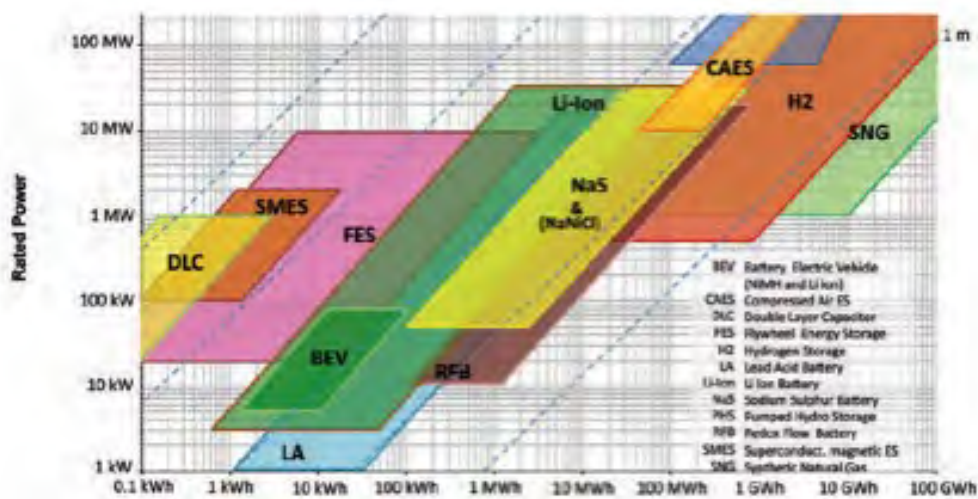


Figura 2.5: Rangos de Potencia y Energía para Sistemas de Almacenamiento de Energía

Como se puede comprobar, las diferentes tecnologías cuentan con distintas características. Dichas características se muestran en la tabla siguiente:

| Tecnología | Rango de Potencia/Energía | Aplicaciones | Estado de Desarrollo |
|---|-----------------------------------|---|----------------------|
| Ultracondensadores, súperconductores magnéticos | Alta potencia Baja energía | UPS | Pre-maduro |
| Volantes de Inercia | Alta potencia Baja energía | Calidad de energía | Maduro |
| Baterías: Li, NaS, Ni | Media potencia Media energía | UPS, reducción de Fluctuaciones de red | Pre-Maduro Maduro |
| Baterías de flujo: BrS, ZnBr, V | Media potencia Alta energía | Congestión de redes, Gestión de la demanda, regulación de tensión integración de renovables | Pre-maduro |
| Bombeo | Alta potencia Muy alta energía | Reducción de reservas de energía, arbitraje de energía | Maduro |
| Aire Comprimido | Alta potencia Muy alta energía | Reducción de reservas de energía, arbitraje de energía | Maduro |
| Hidrógeno | Media potencia Alta | Reducción de reservas de energía, arbitraje de energía | Prototipo |
| Térmico | — | Reducción de reservas de energía, arbitraje de energía | Maduro |

Tabla 2.1: Características de Sistemas de Almacenamiento de Energía

La mayor parte de estos sistemas de almacenamiento de energía son o muy caros o poco maduros para utilizar en aplicaciones reales. Sin embargo, algunos países y algunas empresas están estudiando su uso y han puesto en marcha varios proyectos para comprobar su viabilidad. Un ejemplo es el Proyecto STORE de Endesa usa ultracondensadores, baterías y volantes de inercia en las Islas Canarias.

2.2.1. Ultracondensadores

2.2.1.1. Características Generales

Los ultracondensadores son condensadores electroquímicos que presentan una alta densidad de energía en comparación a los condensadores convencionales. Los ultracondensadores cuentan con una capacidad mucho mayor que los condensadores convencionales; mientras que los condensadores mas comunes tienen capacidades de microfaradios (μF) o milifaradios (mF), los ultracondensadores pueden llegar a tener centenares o miles de Faradios. Hoy en día los ultracondensadores son una alternativa viable de almacenamiento de energía gracias a los avances en electrónica de potencia. Su funcionamiento es básicamente igual a un condensador convencional rigiéndose la cantidad de energía por las siguientes ecuaciones:

$$E = \frac{1}{2}QU = \frac{1}{2}CU^2 \quad (2.1)$$

$$C = \frac{Q}{U} \quad (2.2)$$

Para las ecuaciones anteriores, E representa la energía almacenada, Q la carga eléctrica almacenada, U la diferencia de potencial entre las placas y C la capacidad (o capacitancia). Esto es en realidad una aproximación, ya que en realidad en los ultracondensadores la acumulación de carga no se debe al medio dieléctrico que existe entre las placas sino a la deficiencia electrónica que se presenta al utilizar carbono. El material que se utiliza en los ultracondensadores es el carbono activado, un material muy poroso (poros de tamaño nanométrico), lo que hace que el área de las placas sea mucho mayor. El carbono activado es un material carbonizado (calentado en ausencia de aire para obtener un producto sólido) que se ha expuesto a una reacción con gases oxidantes, vapor de agua o se ha tratado con productos químicos para aumentar enormemente su porosidad. Aumentando el área se aumenta enormemente la capacidad, ya que son directamente proporcionales. Por lo tanto el carbono activado permite la obtención de ultracondensadores de gran capacidad y pequeño tamaño.

2.2.1.2. Ultracondensadores frente a Baterías

Si comparamos los ultracondensadores con el sistema de almacenamiento de energía más conocido y utilizado, las baterías, se comprueba que presentan tanto ventajas como desventajas. En primer lugar, los ultracondensadores mantienen su

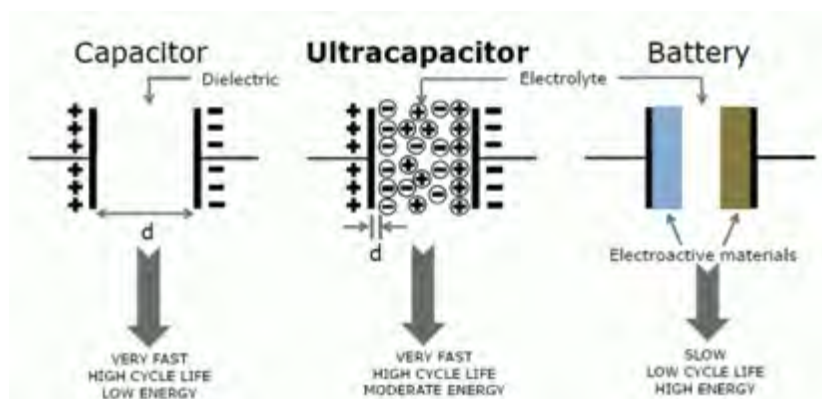


Figura 2.6: Acumulación de carga en condensadores, ultracondensadores y baterías

capacidad en un rango muy amplio de temperaturas (entre -40°C y 70°C) mientras que las baterías no trabajan correctamente por debajo de los -10°C . El siguiente gráfico muestra la relación del valor relativo de la resistencia y de la capacidad para un rango de temperaturas (ultracondensador Maxwell):

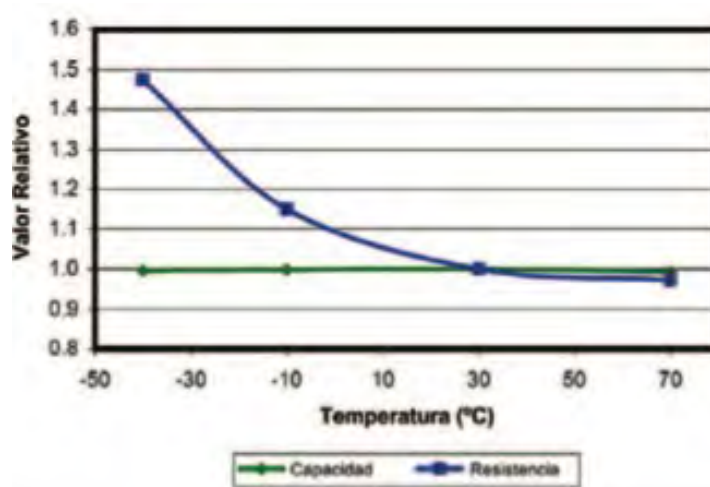


Figura 2.7: Relación T-R y T-C en ultracondensadores Maxwell

Aunque la densidad de energía tanto de los ultracondensadores como de las baterías de ion-litio sea bastante pareja (del orden de 10 a 100 Wh/kg), los ultracondensadores cuentan con una densidad de potencia mucho más elevada. Si las baterías pueden llegar a 150-200 W/kg, los ultracondensadores presentan hasta 10kW/kg, o lo que es lo mismo, casi 100 veces aquella de las baterías.

Un punto de comparación muy importante es la eficiencia de una y otra tecnología, ya que esto tendrá un gran peso en la viabilidad económica de la instalación. De la eficiencia depende tanto la vida útil que se le puede suponer a un sistema de almacenamiento de energía como su fiabilidad a medio o largo plazo. Si las baterías cuentan con un rendimiento para los ciclos de carga y descarga del 70 %, los ultracondensadores presentan un rendimiento de hasta el 95 %. Esto también influirá en la vida útil dado que los ultracondensadores se calentarean mucho menos que las baterías (por el incremento de eficiencia energética). Si se sigue analizando la vida útil de una y otra tecnología, el número de ciclos que pueden realizar es muy diferente. Por un lado, los ultracodensadores pueden realizar hasta 1.000.000 de ciclos mientras que las baterías rara vez alcanzan los 1000 ciclos.

La mayor desventaja que presentan los ultracondensadores con respecto a las baterías es su precio. Los ultracondensadores tienen un precio mucho más elevado, llegando a valer el doble o triple que las baterías. Sin embargo, las expectativas de los precios experimentan una tendencia bajista. Las expectativas del crecimiento de la utilización de ultracondensadores va ligada al crecimiento del mercado que se espera en los próximos años. Esto se debe a que una vez que haya más demanda, se producirán más ultracondensadores económicamente accesibles. Como se muestra en la figura 2.8, el tamaño del mercado se espera que doble en los próximos 4/5 años.

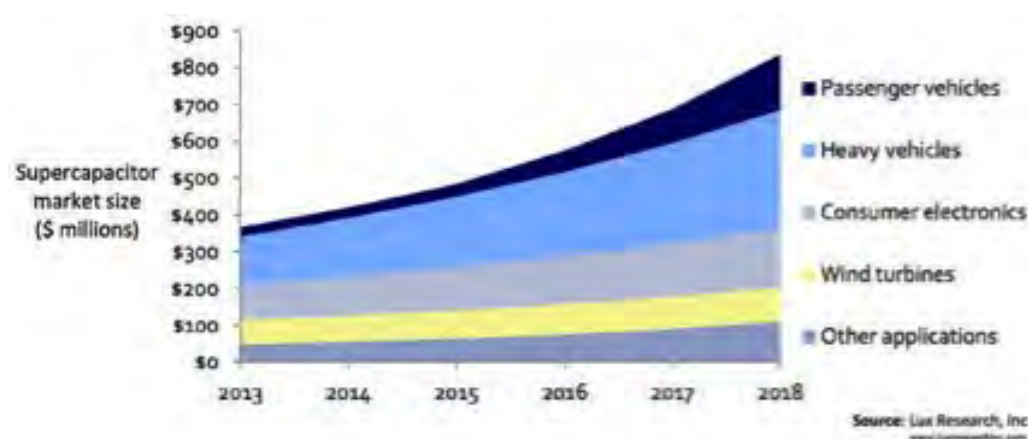


Figura 2.8: Crecimiento Esperado del Mercado de Ultracondensadores hasta 2018

La siguiente tabla presenta un resumen de la comparación entre ultracondensadores y baterías de ion-litio:

| Característica | Ultracondensador | Batería Ion-Litio |
|-------------------|-----------------------|-------------------|
| Capacidad | Hasta 5000F | — |
| Temperaturas | -40°C a 70°C | desde -10°C |
| Densidad Energía | 10-100 W·h/kg | 100 W·h/kg |
| Densidad Potencia | 1-10 kW/kg | 100-200 W/kg |
| Rendimiento | Hasta 95 % | Hasta 70 % |
| Ciclos Totales | Hasta 10 ⁶ | Hasta 1000 |
| Precio | Elevado | Medio-Alto |

Tabla 2.2: Comparación entre las Características de los Ultracondensadores y las Baterías de Ion-Litio

2.2.1.3. Aplicaciones de los Ultracondensadores

En este proyecto se analizara la viabilidad de la tecnología de ultracondensadores como sistema de almacenamiento de energía en un sistema eléctrico aislado (en particular en un SEIE). En concreto, los ultracondensadores se utilizarán como un sistema que inyecte energía para evitar colapsos de frecuencia. Esta no es la única aplicación que existe para los ultracondensadores. Usos más comunes incluyen el uso dentro de automóviles eléctricos o híbridos, en sistemas de apoyo energético tales como elevadores, sistemas UPS (sistemas de alimentación ininterrumpida o *uninterruptible power supply*) o en sistemas de transferencia de potencia.

La gran densidad de potencia de los ultracondensadores hace que se estén buscando nuevas aplicaciones constantemente. Hoy en día se pueden encontrar varios aparatos que utilizan ultracondensadores en forma de cargadores de baterías debido a su rápida inyección de potencia. Existen ejemplos en herramientas de construcción, desde destornilladores eléctricos hasta carretillas elevadoras. Una de las aplicaciones que más se está estudiando es su uso para almacenar la energía de fuentes renovables como la eólica o la solar.

2.2.1.4. Ultracondensador a Simular en el Proyecto

En este proyecto se va a simular una unidad fija de 4MW de inyección durante 6 segundos basada en tecnología de ultracondensadores que se encuentra conectada a un nudo de media tensión, instalada en la Subestación de Los Guinchos en la isla de La Palma que cuenta con problemas de desequilibrios de demanda-generación por pérdidas de unidades de generación.

Capítulo 3

Diseño de un Modelo de Ultracondensador

En este capítulo se llevará a cabo el modelaje, la validación y la optimización del sistema de ultracondensadores¹ que está instalado en la isla de La Palma. Como ya se ha comentado en la introducción de este proyecto, el programa que se utilizará para implementar y analizar las distintas simulaciones será la herramienta de simulación que presenta MatLab, Simulink.

En este proyecto no se pretende obtener una simulación de toda la parte eléctrica de un ultracondensador. Se pretende obtener un modelo de las partes necesarias para simular el sistema de detección de incidente, llamado más adelante bloque *Trigger*, así como un bloque de cálculo de la cantidad de potencia que debe inyectar el ultracondensador durante dicho incidente, bloque de Control Potencia-frecuencia. Aunque el modelo de la parte eléctrica no se va ni a crear ni a simular, sí que se deben tener en cuenta algunas restricciones que presenta el hecho de que el ultracondensador tenga una estructura eléctrica que no podemos obviar. Más concretamente, se tendrá en cuenta la restricción que presenta la cantidad de energía que puede almacenar el ultracondensador y la potencia por unidad de tiempo que puede inyectar. Para que se tenga una idea de los modelos eléctricos que pueden representar a un ultracondensador se debe tener en cuenta que hay varios ejemplos de modelos de su estructura eléctrica. Estos modelos dependen enormemente de la simplicidad o complejidad que se quiera tener. Para poder hacerse una idea de los tipos de modelos que hay, a continuación se muestran algunos esquema eléctricos

¹A lo largo del capítulo y de lo que resta de proyecto se hablará de un ultracondensador como referencia al sistema de ultracondensadores.

utilizados para un ultracondensador:

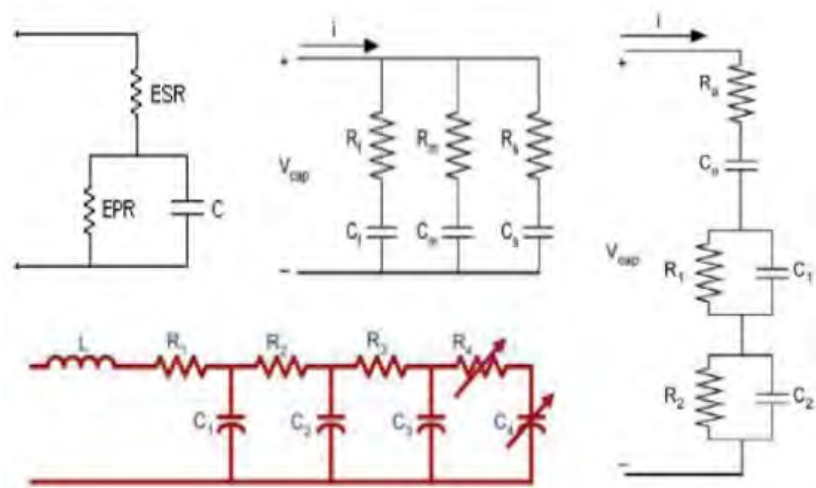


Figura 3.1: Esquemas eléctricos de un ultracondensador, a) RC serie, b) RC paralelo, c) RC paralelo en serie, d) modelo no lineal

Para empezar la simulación de la actuación del ultracondensador debemos saber cuáles son las variables que se utilizan y comprueban para que el ultracondensador actúe. Este capítulo explicará los pasos que se han llevado a cabo para llegar a un modelo de inyección de potencia parecido al modelo real. Lo primero que necesitamos obtener son las variables de las que dependerá nuestro sistema a simular. Como se comentó con anterioridad, el perfil a utilizar es el perfil inercial. El primer paso que se va a llevar a cabo es obtener el modelo de un *"trigger"* (o señal de disparo) que sepa e indique cuando debe disparar el ultracondensador. Para esta primera parte del modelo se utilizará exclusivamente la frecuencia. Una vez obtenido dicho *trigger*, se debe obtener un bloque que pueda dar la consigna de potencia que debe inyectar el ultracondensador, el bloque de control potencia-frecuencia. Como para el bloque anterior, la única entrada al bloque debe ser la frecuencia.

3.1. Ultracondensador Real

A continuación se explica una de las particularidades de este proyecto, una particularidad que demuestra su utilidad así como su aplicabilidad. Como se ha ido comentando a lo largo de los distintos capítulos, este proyecto surgió a partir de la instalación por parte de Endesa de un sistema de ultracondensadores en la

red de La Palma. Por lo tanto ya se tiene una idea de como se debe plantear la simulación del funcionamiento del ultracondensador. Se podría decir que existe una especie de guión que se debe seguir para que así los resultados que se van obteniendo se puedan comparar con resultados reales.

3.1.1. Perfiles de Descarga

Las primeras pruebas que se realizaron fueron las pruebas de puesta en marcha (PEM). Inicialmente el método de descarga era una descarga trapezoidal. Sin embargo, se debía mejorar para obtener una regulación de frecuencia mas sensible, resultando en que la frecuencia no cayera demasiado. De esa forma se utilizó un segundo método de descarga, la descarga inercial. Con este nuevo perfil de descarga se consiguieron resultados mucho más útiles ya que se descarga menos potencia y la frecuencia es más estable. El perfil de descarga inercial se explica con más detalle en el apartado 3.1.2. Los perfiles de inyección de potencia así como la variación de la frecuencia durante dichas inyecciones se muestran en las figuras 3.2 y 3.3.

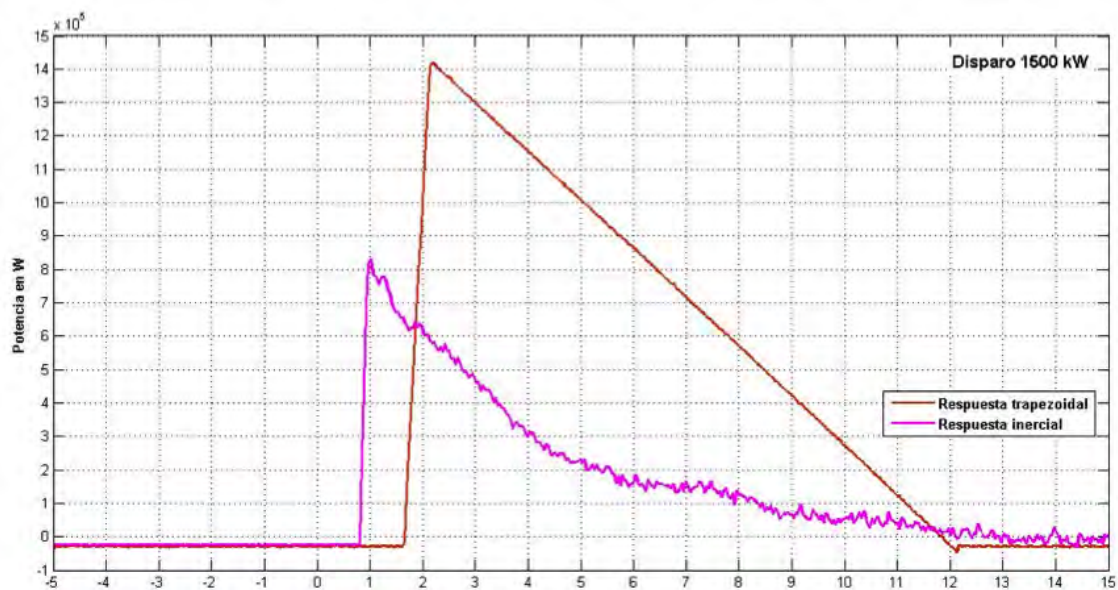


Figura 3.2: Variación de potencia descargada ante distintos perfiles de descarga

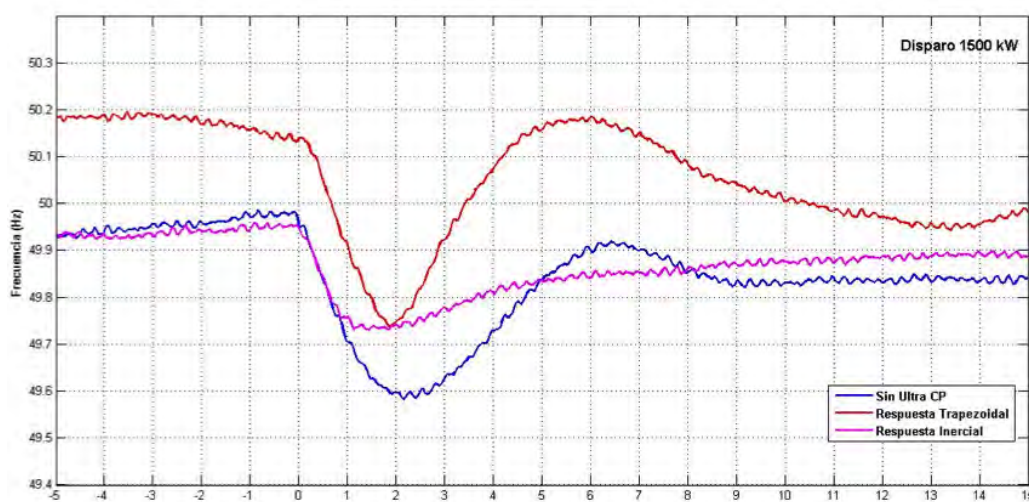


Figura 3.3: Variación de frecuencia ante distintos perfiles de descarga

Se puede comprobar como la configuración de control que mejor responde ante una pérdida de generación súbita es el perfil de descarga inercial. Este perfil hace que se produzcan muchas menos sobre oscilaciones de frecuencia con respecto al perfil trapezoidal además de la ya comentada propiedad de inyectar menos potencia.

3.1.2. Perfil de Descarga Inercial

Como se ha mostrado en el apartado 3.1.1, el perfil más eficiente para la descarga es el perfil inercial. Esta es la primera optimización que presenta este modelo, ya que se va a realizar en Simulink utilizando dicho perfil.

El perfil de descarga inercial tiene dos funciones características con respecto al cálculo de la inyección de potencia. La potencia a inyectar depende tanto de la desviación de frecuencia como de la derivada de la frecuencia. Una vez que el bloque *trigger* (modelado en la sección 3.2) envía una señal indicando que el ultracondensador debe inyectar potencia, se tiene que indicar una potencia total a inyectar, que será la suma de una potencia que dependerá del valor de la derivada de la frecuencia (parte inercial) y de otra potencia que dependerá del valor de la desviación de la frecuencia (parte proporcional). De esta forma se obtiene la potencia total que debe suministrar el ultracondensador y es por esta razón que este perfil no tiene un perfil geométrico constante cada vez que inyecta potencia. El perfil descrito se muestra con algunos ejemplos reales de pruebas realizadas en la isla de La Palma a finales del 2013:

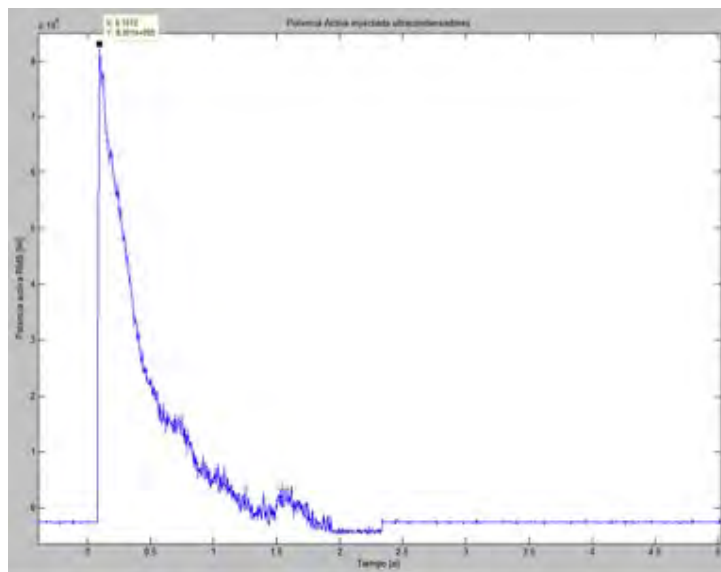


Figura 3.4: Ejemplo de perfil inercial de descarga (ante pérdida de 1500kW de potencia)

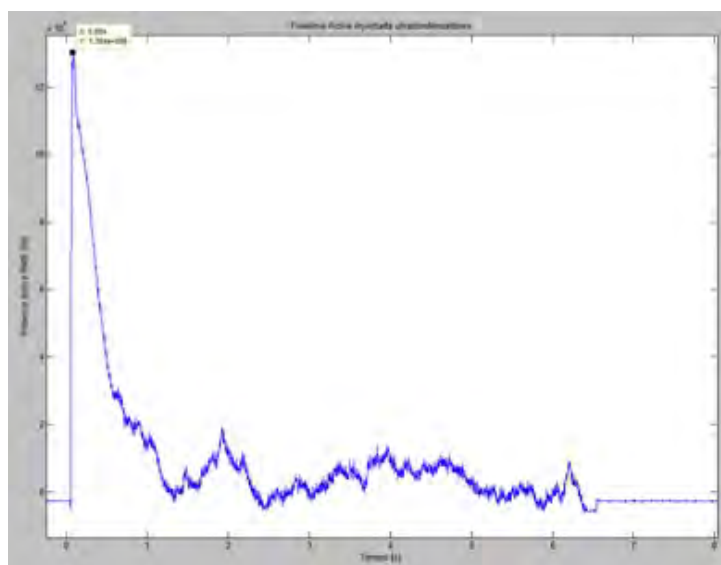


Figura 3.5: Ejemplo de perfil inercial de descarga (ante pérdida de 2000kW de potencia)

3.2. Simulación del *Trigger*

Para empezar con el modelo del ultracondensador, debemos modelar el *trigger*, la señal lógica que indica que se debe realizar un disparo. El *trigger* va a depender exclusivamente de una variable: la frecuencia del sistema. El *trigger* va a recibir la frecuencia y la utilizará directamente (o tras modificarla de alguna manera, obteniendo su derivada) a través de los distintos bloques con los que cuenta Simulink. La frecuencia se obtiene mediante una *Lookup Table* de una dimensión, cuyas variables de interpolación estarán inicializadas en el *workspace*, y utilizando un *clock*. Es muy importante que las variables de interpolación que utiliza la *Lookup Table* tengan exactamente el nombre que se muestra a continuación:

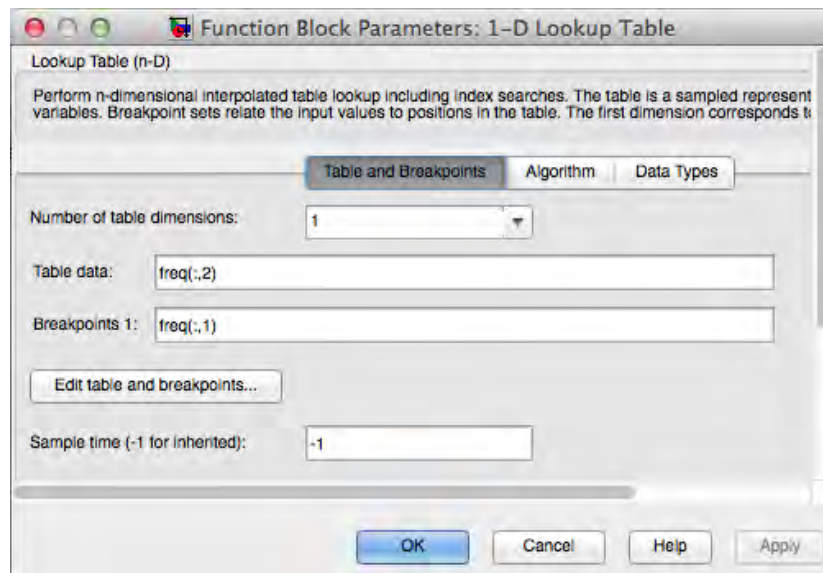


Figura 3.6: Parámetros de la *Lookup Table* de 1-D utilizada en el bloque *Trigger*

La variable llamada $freq(:,2)$ es el vector de la frecuencia del sistema mientras que la variable $freq(:,1)$ se refiere al tiempo asociado con cada valor del vector de frecuencia.

El bloque del *trigger* propuesto cuenta con dos partes distintas, donde ambas emplean la frecuencia. Una parte utiliza el valor absoluto de la frecuencia mientras que la otra parte utiliza la derivada de la frecuencia, y acaban juntándose con un *AND* que producirá el pulso del *trigger*, un 0 o un 1.

3.2.1. *Trigger* con Valor Absoluto de la Frecuencia

La primera parte del *trigger* debe comparar la frecuencia del sistema con dos constantes. Se debe comparar con dos constantes ya que tendremos tanto un mínimo de frecuencia admisible como un máximo de frecuencia admisible. Es recomendable que estos límites no sean ni muy elevados ni muy pequeños. Por un lado, tener límites muy elevados permitiría que el sistema funcionara a niveles de frecuencia que se consideran peligrosos o incluso imposibles de mantener. En estos casos, el modelo producido no se aproximaría a la situación real, haciendo inútil cualquier uso de dicho modelo. A continuación se muestra el bloque creado en Simulink.

Para simular dicho bloque incrementalmente, se ha permitido un rango de $\pm 1,5$ Hz ($\pm 3\%$) con respecto a los 50 Hz habituales, situando los límites admisibles en 48,5 Hz y 51,5 Hz. Estos valores se podrán modificar en cualquier momento para que el rango de frecuencia sea más o menos restrictivo, dependiendo de lo que más convenga al modelo y lo que más se aproxime a la programación real.

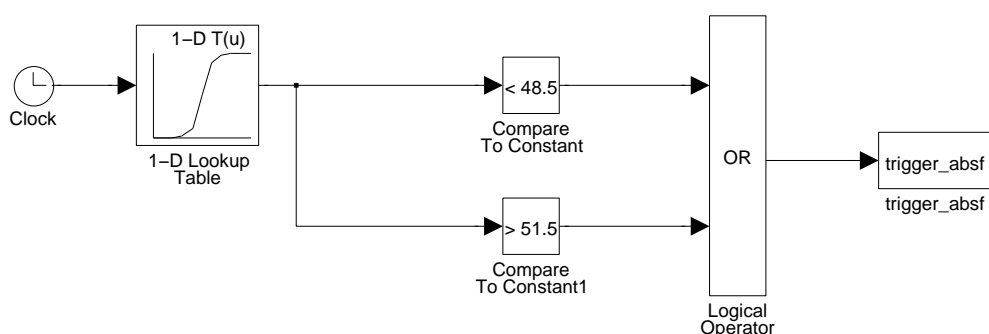


Figura 3.7: Parte del bloque del *trigger* en Simulink que compara la frecuencia con los límites admisibles

Se utiliza un bloque *OR* para tener en cuenta que puede cumplirse que la frecuencia esté por encima del límite superior, o por debajo del límite inferior (en ningún caso ambos simultáneamente por razones obvias). Para comprobar que el bloque funciona correctamente, se prueba la salida de esta parte del *trigger* utilizando un perfil de frecuencia que se aproxime a un posible incidente (los perfiles utilizados corresponden a incidentes ocurridos en la planta de Los Guinchos antes de la instalación del ultracondensador). Esto hace que la comprobación sea más realista y se pueda validar el funcionamiento del bloque. Como en el perfil seleccionado no se muestran valores de frecuencia por encima del límite superior,

se ha modificado el principio de dicho perfil utilizando el valor de 52 Hz. Esto se hace para verificar que tanto el límite superior como el límite inferior se comparan correctamente.

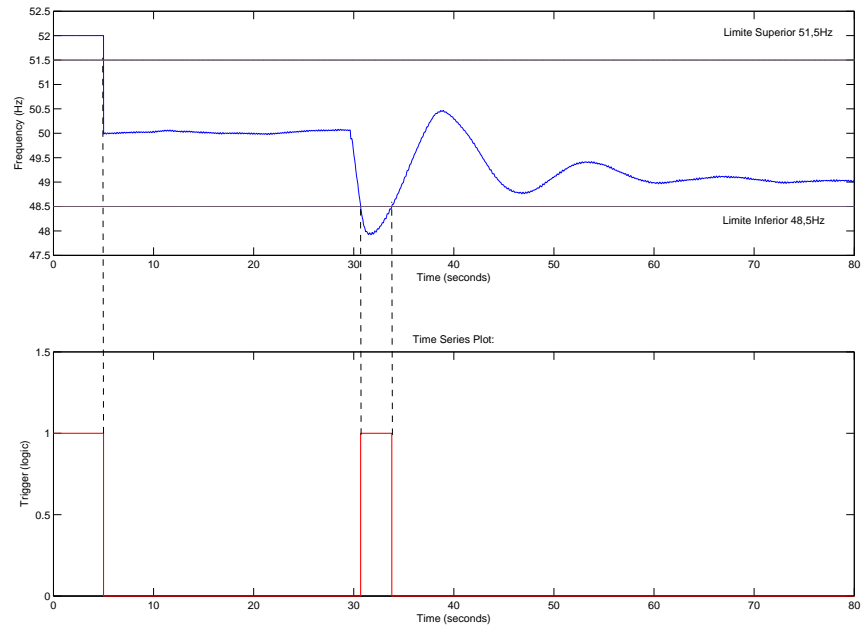


Figura 3.8: Respuesta del bloque ante un perfil de frecuencia

Las líneas horizontales que se muestran superpuestas al perfil de frecuencia son los límites superior e inferior que se han seleccionado en el bloque. Las líneas discontinuas muestran como el *trigger* responde únicamente a valores que se encuentran por encima de su límite superior o por debajo de su límite inferior. Por lo tanto, se comprueba como el bloque responde correctamente en su rango de frecuencias. Tanto el límite superior como el límite inferior se comparan correctamente y producen una señal cuando la frecuencia está por encima o por debajo de los límites impuestos.

3.2.2. *Trigger* con Derivada de la Frecuencia

La segunda parte del *trigger* debe utilizar la derivada de la frecuencia para producir la activación de la señal de salida del *trigger*. Puede no parecer obvio la razón de utilizar la derivada de la frecuencia para la respuesta del *trigger*. Su uso se debe sobre todo para poder predecir una fuerte caída de la frecuencia. No

sólo queremos que los ultracondensadores inyecten potencia cuando la frecuencia ha caído por debajo de cierto valor, sino que queremos que inyecten frecuencia mientras que la frecuencia empieza a desplomarse y, de esta forma, evitar que la frecuencia llegue a bajar a niveles no deseados.

block_dfdt

Simulink presenta un bloque que calcula la derivada directamente, por lo que se obtiene de una manera muy simple el esquema de la obtención de la derivada. La frecuencia es introducida en el bloque de la misma manera que en el apartado 3.2.1. Para analizar este bloque por separado, se han introducido dos salidas al *workspace*, una para la salida lógica y otra con el valor de la derivada de la frecuencia en el tiempo. Esto permitirá un mejor entendimiento del funcionamiento de este bloque:

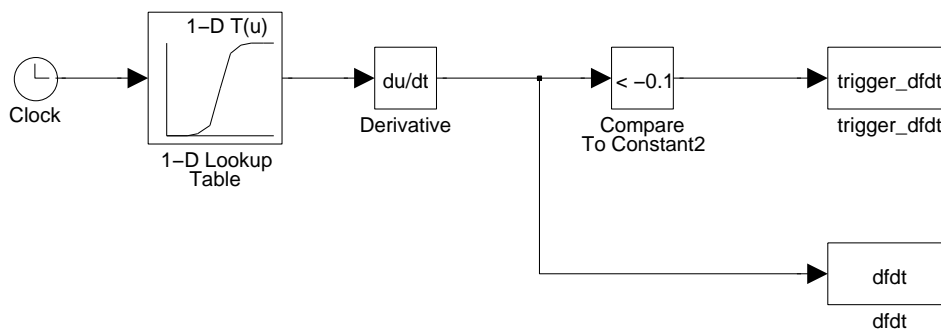


Figura 3.9: Parte del bloque del *trigger* en Simulink que compara la derivada de la frecuencia con el mínimo necesario para actuar (0,1 Hz/s)

A continuación se muestra la respuesta del bloque ante un perfil de frecuencia (el mismo que el usado en el apartado 3.2.1). Se muestra el perfil de frecuencia utilizado, la derivada de dicho perfil de frecuencia y la respuesta del *trigger* que se ha simulado en Simulink:

/Users/Ramon/Documents/ICAI/PFC/PFC/simulink/block_dfdt.mdl

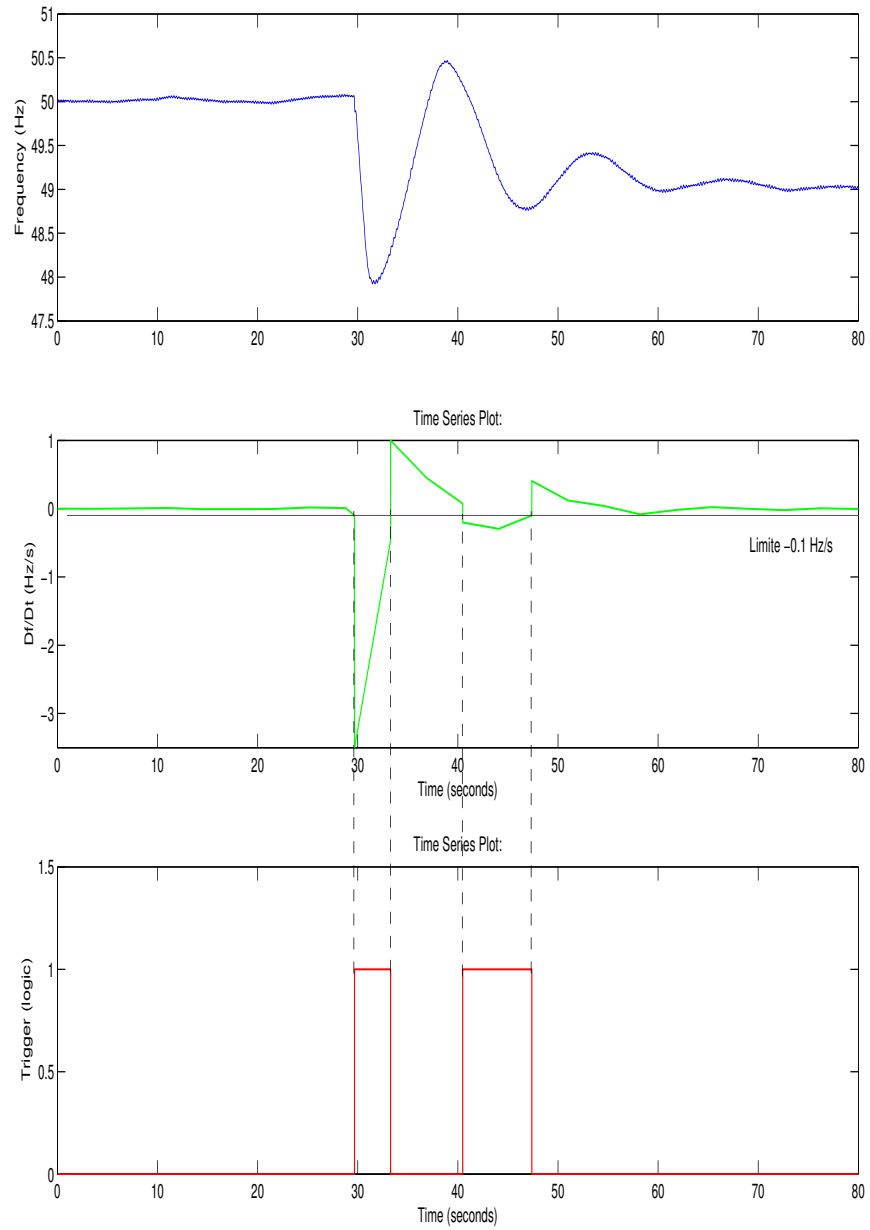


Figura 3.10: Respuesta del bloque de la derivada ante un perfil de frecuencia

La línea horizontal que se muestra superpuesta al perfil de la derivada de la frecuencia es el límite seleccionado en el bloque, a partir del cual, si la derivada es menor, el *trigger* debe activarse. Las líneas discontinuas muestran como el trigger responde únicamente a valores de la derivada que se encuentran por debajo de ese límite. Por lo tanto, se comprueba como el bloque responde correctamente en su rango de derivadas de frecuencia.

3.2.3. Bloque *Trigger* Completo

Una vez obtenidas las dos partes descritas en los apartados 3.2.1 y 3.2.2, se pueden juntar para obtener un sólo bloque de la parte lógica del *trigger*. De esta forma, se obtiene una única señal para el *trigger* utilizando un bloque *AND* con dos entradas, una entrada para el bloque obtenido en el apartado 3.2.1 (la salida del *OR*) y otra entrada para el bloque obtenido en el apartado 3.2.2. Se debe utilizar un bloque *AND* ya que se quiere que ambas condiciones se cumplan simultáneamente para poder producir una salida positiva.

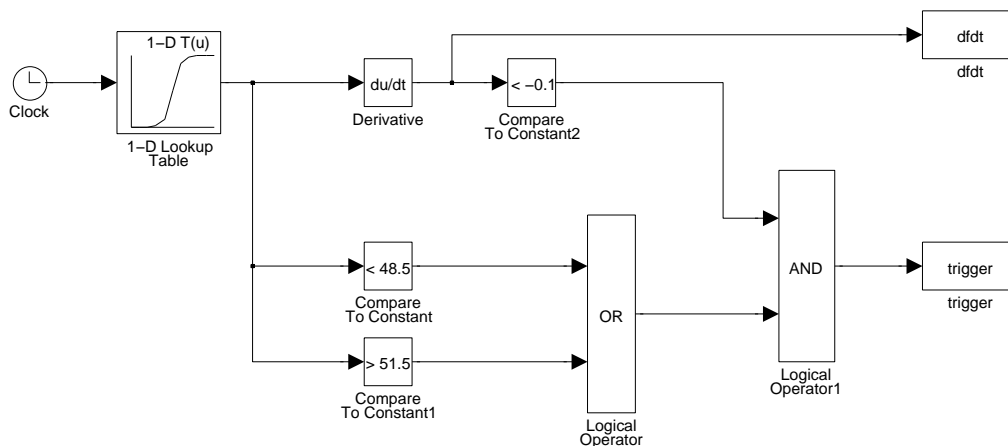


Figura 3.11: Bloque del *Trigger* Completo en Simulink

También podemos crear una máscara de lo anterior para que sea más manejable en Simulink. La máscara no tendrá ninguna entrada (ya que la frecuencia entra a través de la *Lookup Table*) y tendrá como salida la señal de *trigger*.

Para ver si la unión de los bloques funciona correctamente, se utilizará el perfil de frecuencia usado en los apartados anteriores, y veremos si el conjunto del *trigger* responde como se espera, únicamente actuando cuando se cumplen las dos condiciones, para la frecuencia y para su derivada:

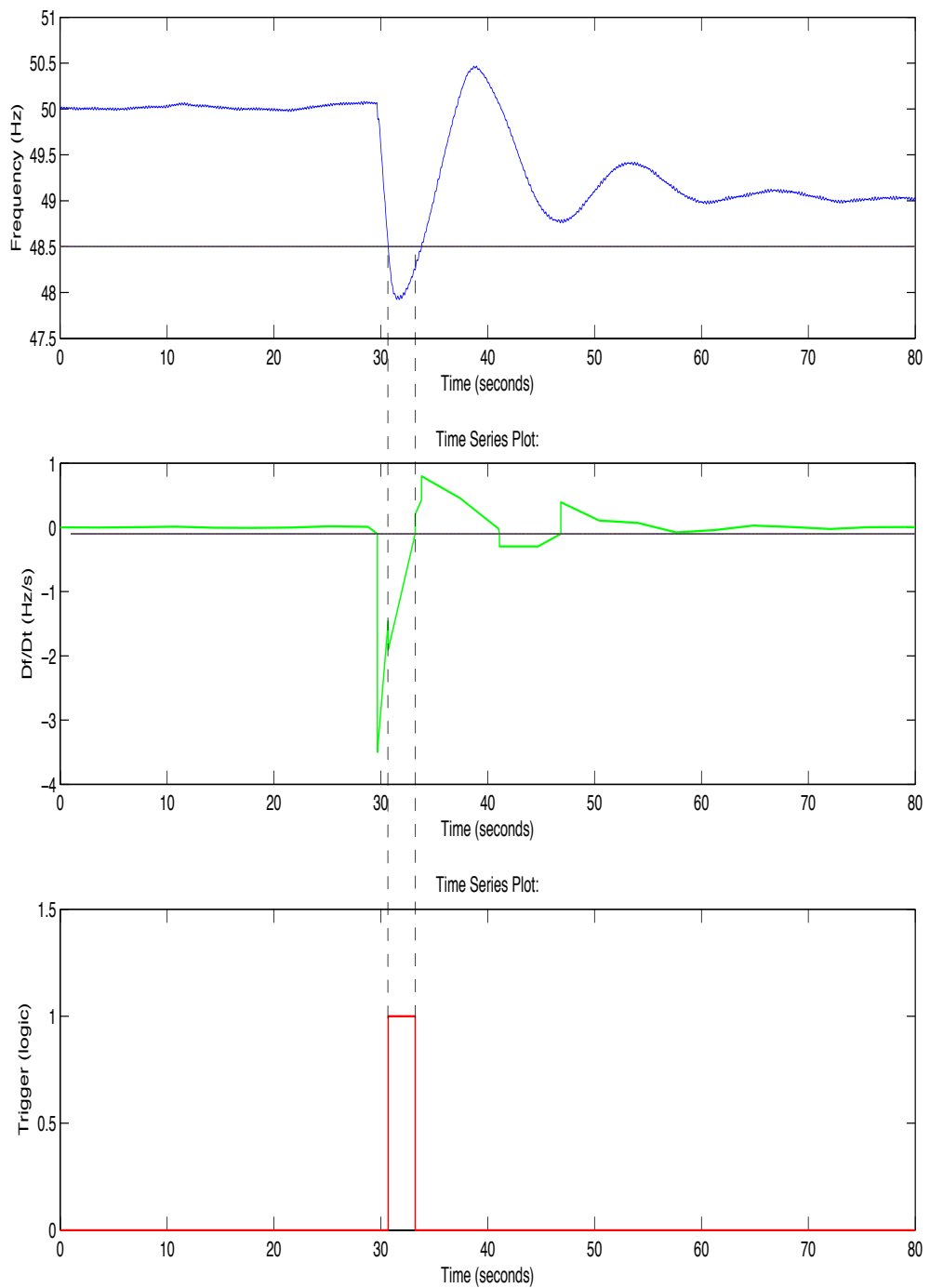


Figura 3.12: Respuesta del bloque *Trigger* completo ante un perfil de frecuencia

Se puede comprobar que la señal de salida *trigger* solo tiene valor 1 cuando se cumplen las dos condiciones. Por lo tanto el bloque completo funciona correctamente. La salida se mantiene en el valor lógico 1 durante el tiempo en el que se cumplan ambas condiciones, al no cumplirse una de las dos el valor vuelve a bajar a valor 0.

3.3. Optimización del Bloque *Trigger*

Como se ha visto al final de la sección 3.2, el modelo que se muestra en la figura 3.11 cumple los requisitos que se impusieron al principio de dicha sección. Sin embargo, falta un requisito importante que no se ha impuesto en ningún momento en la sección 3.2. Este requisito es que cada una de las condiciones para que se active cada una de las partes del *trigger* se mantengan durante un tiempo. Esto se debe imponer para evitar que picos de frecuencia o cálculos puntuales de derivadas muy negativas se tengan en cuenta en el modelo. Siempre puede ocurrir que los sistemas de medida de un bloque se equivoquen o no midan correctamente durante un tiempo muy pequeño y por lo tanto, no se esté dando una de las condiciones. Esto limita el funcionamiento del bloque mostrado en la figura 3.11 ya que el *trigger* se activa en el momento en el que ambas condiciones de la frecuencia se cumplan (de manera instantánea).

Para resolver este problema se deben modificar los bloques obtenidos hasta el momento, incluyendo algún tipo de comprobación temporal. Esta comprobación temporal puede implementarse de muchas maneras. En este proyecto se busca obtener un modelo relativamente simplificado y fácil de entender, por lo que se utilizará un método claro y sencillo que cumpla con dichos requerimientos.

3.3.1. Optimización de *Trigger* con Valor Absoluto de la Frecuencia

Se debe modificar el modelo de Simulink que se muestra en la figura 3.7 para que pueda tener en cuenta que se cumple la condición del bloque durante un tiempo. Para hacer esto se utilizan diversos módulos de Simulink y así se muestra en la siguiente figura:

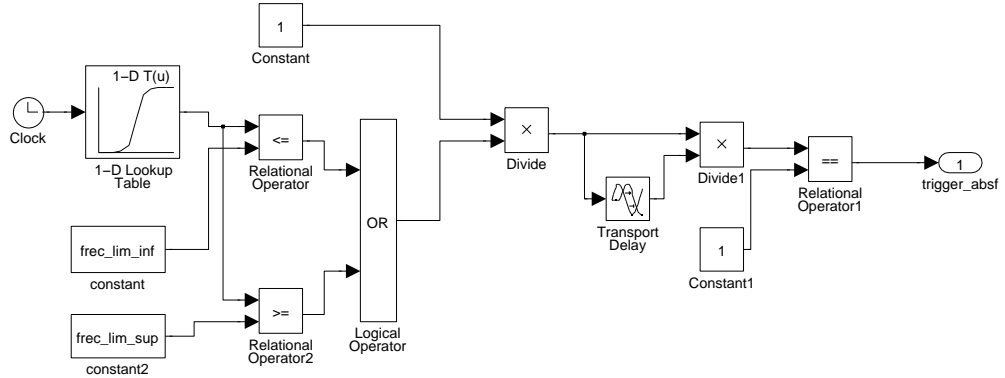


Figura 3.13: Optimización inicial del bloque del *trigger* en Simulink que compara la frecuencia con los límites admisibles

El primer cambio que se muestra es que se han cambiado los comparadores. Esto se debe a que, una vez terminado el bloque, podamos modificar los valores de *frec_lim_inf* y *frec_lim_sup* desde fuera, una vez creada la máscara del subsistema. La salida del *OR* será booleana (0 o 1, álgebra de Boole), para modificar el tipo de variable solamente tenemos que multiplicar la salida booleana por una constante de valor 1^2 . Esto hace que la salida ya no sea considerada booleana y es necesario para aplicar los retardos que tiene implementados Simulink con el bloque (*Transport Delay*). Con este *Transport Delay* se ayuda a que se comparen las salidas del comparador en un tiempo N con las salidas en el tiempo $N-1$. De esta forma se puede tener en cuenta si el estado anterior y el estado actual son iguales. La diferencia de tiempo entre $N-1$ y N se define con la variable *temporización* del *Transport Delay* y de esa forma se implementa el sistema lógico del *trigger* con un tiempo. Para que la salida del bloque vuelva a ser booleana, se incluye al final del bloque un nuevo comparador que comprueba si la salida es igual a 1.

Otra optimización que se le aplica a este bloque es la eliminación del límite superior. Aunque en principio no parezca necesario, es importante eliminar esta parte ya que más adelante, en el apartado 3.3.3.1, se debe utilizar esta condición para que el uso del bloque completo del *trigger* optimizado sea viable. Por lo tanto

²Como se mostrará más adelante, Simulink cuenta con un bloque de *Data Converter* que convierte la salida de bloque en el tipo de variable adecuada para la entrada del siguiente. Aquí se explica una forma alternativa de conseguirlo.

el bloque anterior queda de la siguiente manera:

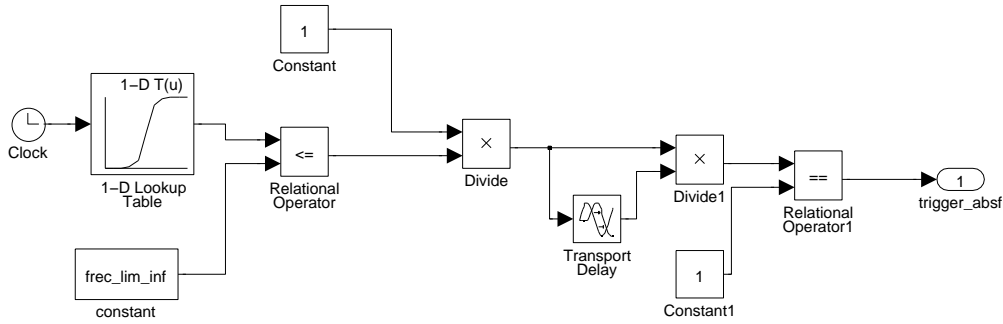


Figura 3.14: Optimización final del bloque del *trigger* en Simulink que compara la frecuencia con los límites admisibles

Una vez obtenido el bloque optimizado con su funcionamiento verificado, se crea una máscara para el bloque:

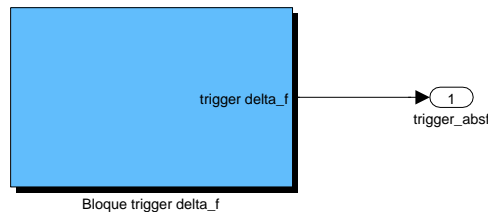


Figura 3.15: Máscara del bloque del *trigger* dependiente de la frecuencia

3.3.2. Optimización de *Trigger* con Derivada de la Frecuencia

Al igual que en el apartado anterior, se debe modificar el modelo de Simulink que se muestra en la figura 3.9 para que pueda tener en cuenta que se cumple la condición del bloque durante un tiempo. Se utilizan los mismos módulos de Simulink que en el apartado anterior y así se muestra en la siguiente figura:

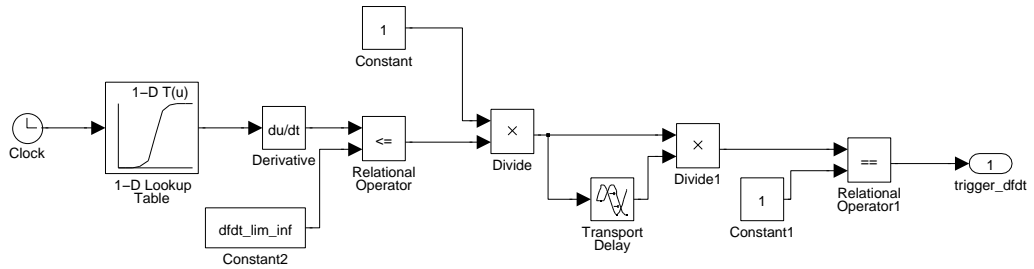


Figura 3.16: Optimización del bloque del *trigger* en Simulink que compara la derivada de la frecuencia con el mínimo necesario para actuar

Una vez obtenido el bloque optimizado con su funcionamiento verificado, se crea una máscara para el bloque. En este caso, el límite de la derivada de la frecuencia que utiliza este bloque se ha cambiado por la variable *dfd_lim* para que se pueda modificar en los parámetros del bloque que se muestran al seleccionar la máscara:

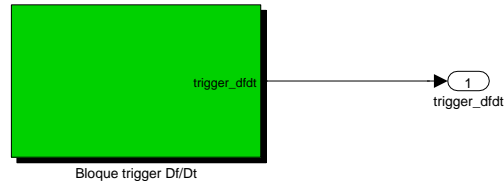


Figura 3.17: Máscara del bloque del *trigger* dependiente de la derivada de frecuencia

3.3.3. Optimización de Bloque *Trigger* Completo

En los apartados 3.3.1 y 3.3.2 se han obtenido por separado los dos bloques necesarios para el *trigger*. Lo único que se debe hacer es encontrar la forma de que ambos se comprueben de manera adecuada y simultánea en el tiempo. Esto se hace de la misma forma que en el apartado 3.2.3, haciendo que las salidas de cada bloque entren a un bloque *AND* (de manera que se deban cumplir tanto la condición de la desviación de la frecuencia como la de su derivada).

Una vez que funcione este bloque completo optimizado, se debe incluir un bloque final que mantenga la salida del *trigger* a 1 mientras el ultracondensador virtual (el ultracondensador modelado) inyecte potencia al sistema. Para conseguir esto, se decide utilizar un Flip-Flop S-R. Este Flip-Flop tiene la siguiente característica

de respuesta:

| Entradas | | Salidas n-1 | | Salidas n | |
|----------|---|-------------|------------|---------------|--------|
| S | R | Q_{n-1} | $!Q_{n-1}$ | Q_n | $!Q_n$ |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 1 | 1 | 0 | 1 | Indeterminado | |
| 1 | 1 | 1 | 0 | Indeterminado | |

Tabla 3.1: Características de Respuesta de un Flip-Flop S-R

Incluyendo este Flip-Flop al final del esquema se obtiene el siguiente bloque:

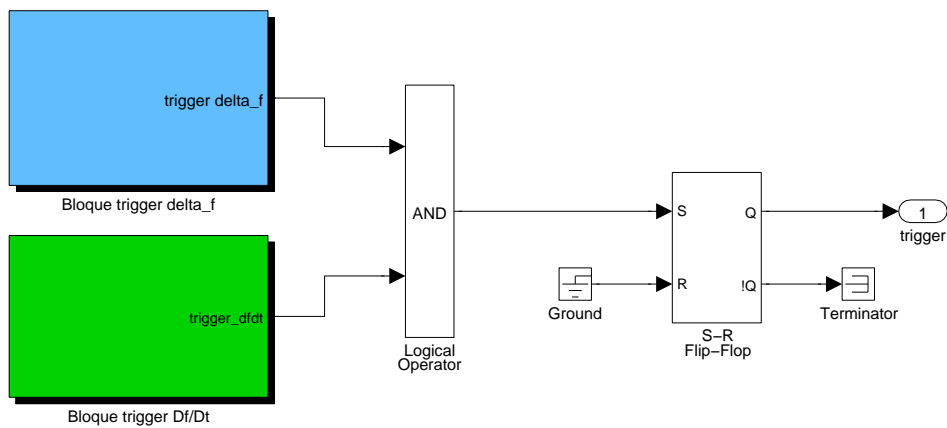


Figura 3.18: Máscara del bloque del *trigger* completo con Flip-Flop S-R

Aquí se muestra como la entrada R del Flip-Flop se ha puesto a 0, poniéndolo a tierra (*ground*). Esto hace que en ningún momento se ponga a 0 la salida Q una vez que se haya puesto a 1. Este 1 lógico se mantendrá hasta que el *reset* tenga entrada 1. Se debe buscar la forma de poner la entrada R (*reset*) a 1 en el momento adecuado para que el *trigger* indique cuando se debe parar de inyectar potencia.

3.3.3.1. Lógica del *Reset* para el Flip-Flop S-R

Lo primero que se debe decidir es en que momentos se necesita que la entrada del *Reset* tenga valor 1. Tendremos tres casos en los cuales la entrada del *Reset* debe ser 1 y de esta forma la salida del Flip-Flop (y por lo tanto del *trigger*) debe ser 0 para que el ultracondensador deje de inyectar potencia. Estos tres casos son:

- La frecuencia ha superado un cierto valor durante un tiempo específico. Esto es una indicación de que el sistema se ha recuperado y es por esta razón que se debe dejar de inyectar potencia. El ultracondensador ha cumplido su propósito.
- La derivada de la frecuencia ha superado un cierto valor durante un tiempo específico. Como en el caso anterior, esto es una indicación de que el sistema se ha recuperado y es por esta razón que se debe dejar de inyectar potencia. El ultracondensador ha cumplido su propósito.
- La cantidad de energía que queda en el ultracondensador y que todavía se puede inyectar en el sistema es muy baja. En este caso, se debe dejar de inyectar potencia ya que, al estar simulando un equipo real, se debe tener en cuenta que la energía que almacena el ultracondensador no es infinita y puede acabarse. Este caso se menciona en este apartado pero se implementará en una sección más adelante (3.5), donde se simulará la inyección de potencia.

Teniendo en cuenta lo explicado en los puntos anteriores, se pueden utilizar los bloques obtenidos en los apartados 3.3.1 y 3.3.2. Estos bloques necesitarían una pequeña modificación, en vez de comparar la frecuencia y la derivada de frecuencia con un valor mínimo, se deben comparar con un valor máximo. Estos valores máximos son a partir de los cuales se considera que el sistema se ha recuperado de un incidente de pérdida de generación. Los valores que se utilicen como límite superior tanto de frecuencia como de derivada en ningún momento pueden estar por debajo de los valores de límite inferior que se utilizan en los bloques de entrada al *Set* del Flip-Flop. Por lo tanto, los dos bloques necesarios para activar el *Reset* se muestran a continuación (sin tener en cuenta por ahora el bloque dependiente de la energía):

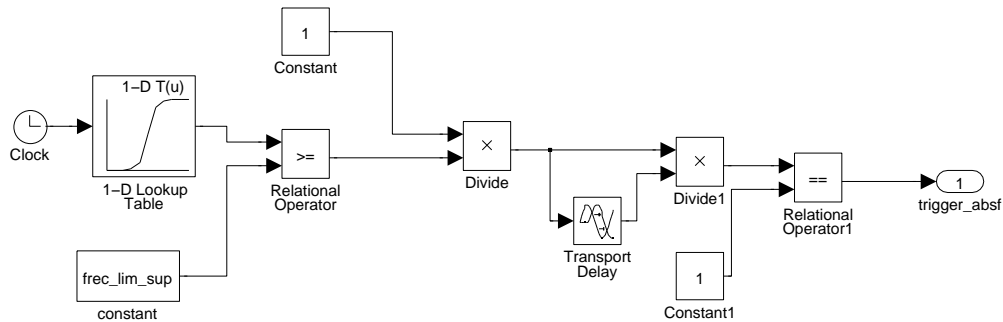


Figura 3.19: Bloque dependiente de la frecuencia para el *Reset* del Flip-Flop

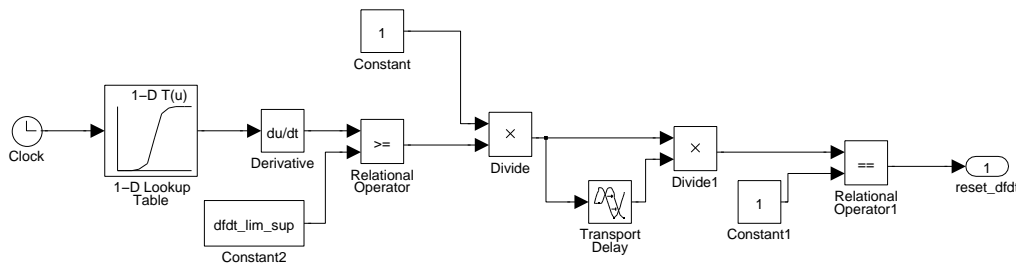


Figura 3.20: Bloque dependiente de la derivada de la frecuencia para el *Reset* del Flip-Flop

Con los bloques mostrados se puede utilizar una puerta *OR* para que, en el caso de que se cumpla cualquiera de las condiciones anteriores, se obtenga un 1. Sin embargo, este 1 sólo debería entrar en el *Reset* en el caso de que se hubiera producido anteriormente un 1 en la salida del *trigger*. Es por esta razón que se debe emplear una puerta *AND* que tenga como entradas el bloque que se ha propuesto como entrada del *Reset* así como la salida del *trigger* ya que solo se puede indicar que se ha resuelto un incidente si se ha producido un incidente. De esta manera, solo se podrá introducir un 1 en el *Reset* cuando el *trigger* esté en 1 (es decir, el ultracondensador está inyectando potencia).

Al hacer la realimentación del sistema con la salida del Q del Flip-Flop S-R, se localiza un problema al cerrar el bucle. Simulink normalmente intenta resolver este tipo de problemas iterando pero, en este caso, no es factible aplicar dicho método de solución. Por lo tanto se ha incluido una memoria (bloque *Memory*) que consigue que la simulación se lleve a cabo. Aplicando todo lo anterior, el modelo final del trigger queda de la siguiente manera:

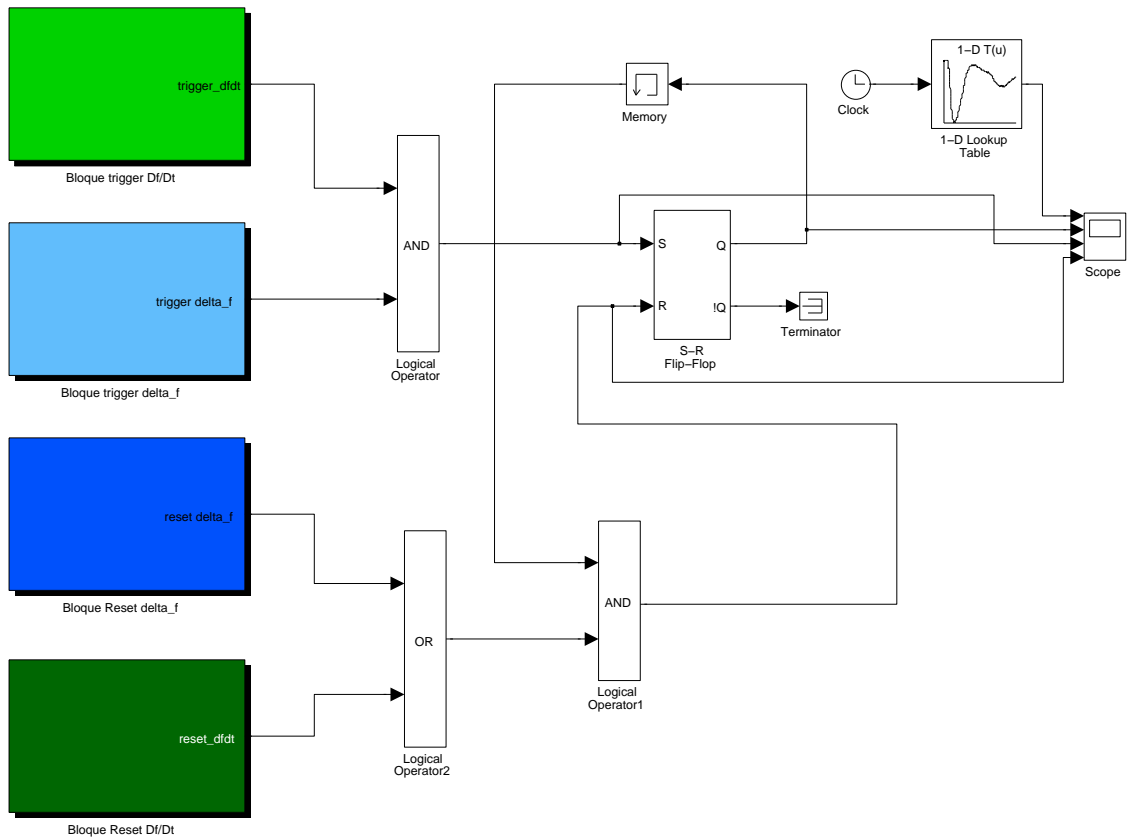


Figura 3.21: Modelo del *Trigger*

Como se puede observar en la figura 3.21, el sistema lógico cuenta con las cuatro máscaras de las cuatro condiciones que se comprueban en cada momento. Por un lado se tiene la entrada al *Set* del Flip-Flop indicando cuando se produce una variación pronunciada en la frecuencia; por otro lado, se tiene la entrada al *Reset* que indica cuando la frecuencia ha recuperado valores admisibles, indicando el final del incidente. Se reitera la necesidad de conectar las condiciones de *Reset* con la salida del *trigger* para asegurar el correcto funcionamiento del conjunto. En la figura anterior la frecuencia, la salida del *Trigger* y unas señales intermedias (las señales de entrada al Flip-Flop S-R) se han conectado con un *Scope* para poder observar como evolucionan frente a distintos perfiles de frecuencia:

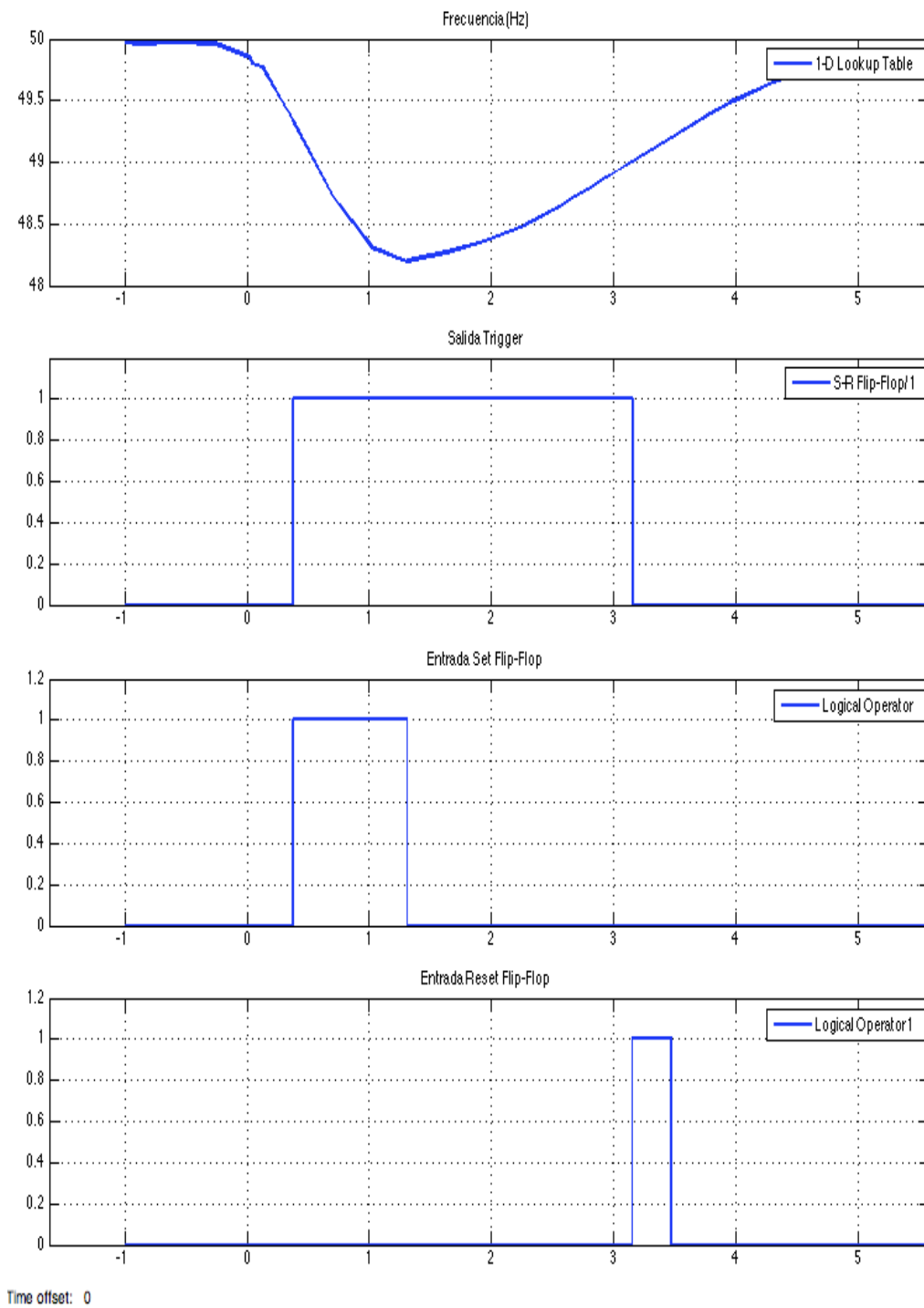


Figura 3.22: Respuesta de las distintas señales del *Trigger* ante un perfil de frecuencia

Para mostrar como actúa frente a distintos perfiles, se mostrará el perfil y la señal de salida del *trigger* para varios perfiles reales:

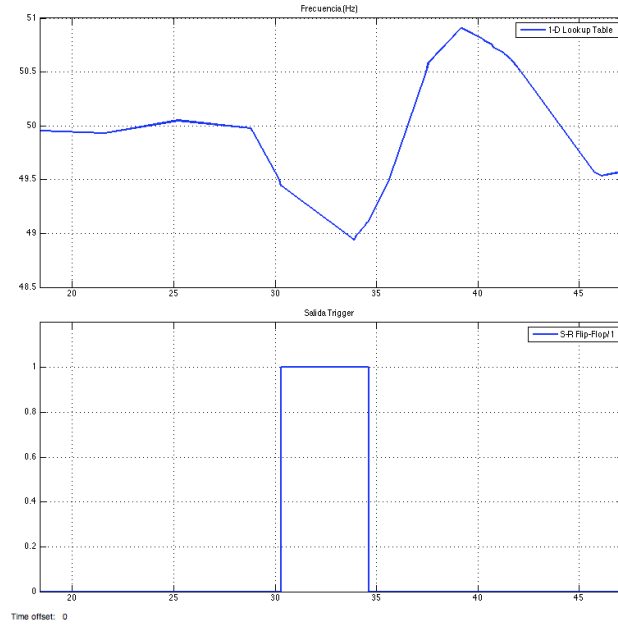


Figura 3.23: Respuesta del *Trigger* ante perfil 1 de frecuencia

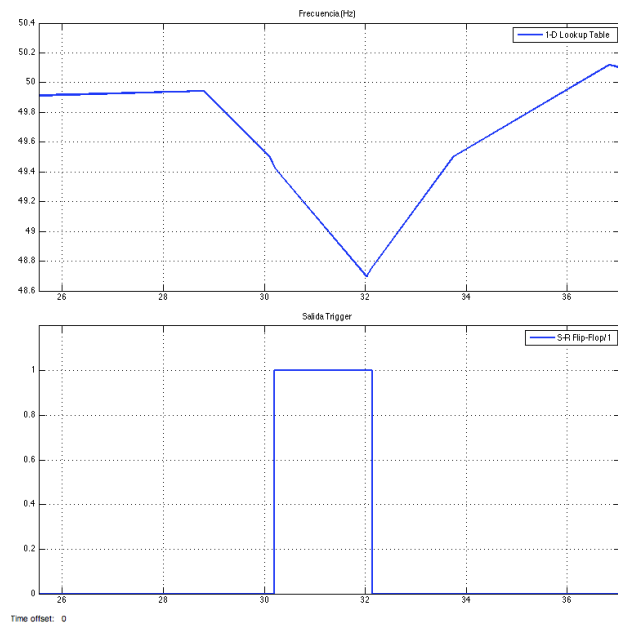


Figura 3.24: Respuesta del *Trigger* ante perfil 2 de frecuencia

Lo único necesario para completar el bloque *Trigger* es elegir valores para las siguientes variables:

- **dfdt_lim_inf**: regula el límite por debajo del cual la derivada de la frecuencia es peligrosa para el funcionamiento del sistema y se tiene un posible incidente para el cual debería actuar el ultracondensador, se encuentra en el Bloque trigger Df/Dt.
- **frec_lim_inf**: regula el límite por debajo del cual la frecuencia es peligrosa para el funcionamiento del sistema y se tiene un posible incidente para el cual debería actuar el ultracondensador, se encuentra en el Bloque delta_f.
- **dfdt_lim_sup**: regula el límite por encima del cual la derivada de la frecuencia ya no es peligrosa para el funcionamiento del sistema y se ha resuelto el incidente para el cual ha actuado el ultracondensador, se encuentra en el Bloque Reset Df/Dt.
- **frec_lim_sup**: regula el límite por encima del cual la frecuencia ya no es peligrosa para el funcionamiento del sistema y se ha resuelto el incidente para el cual ha actuado el ultracondensador, se encuentra en el Bloque Reset delta_f.

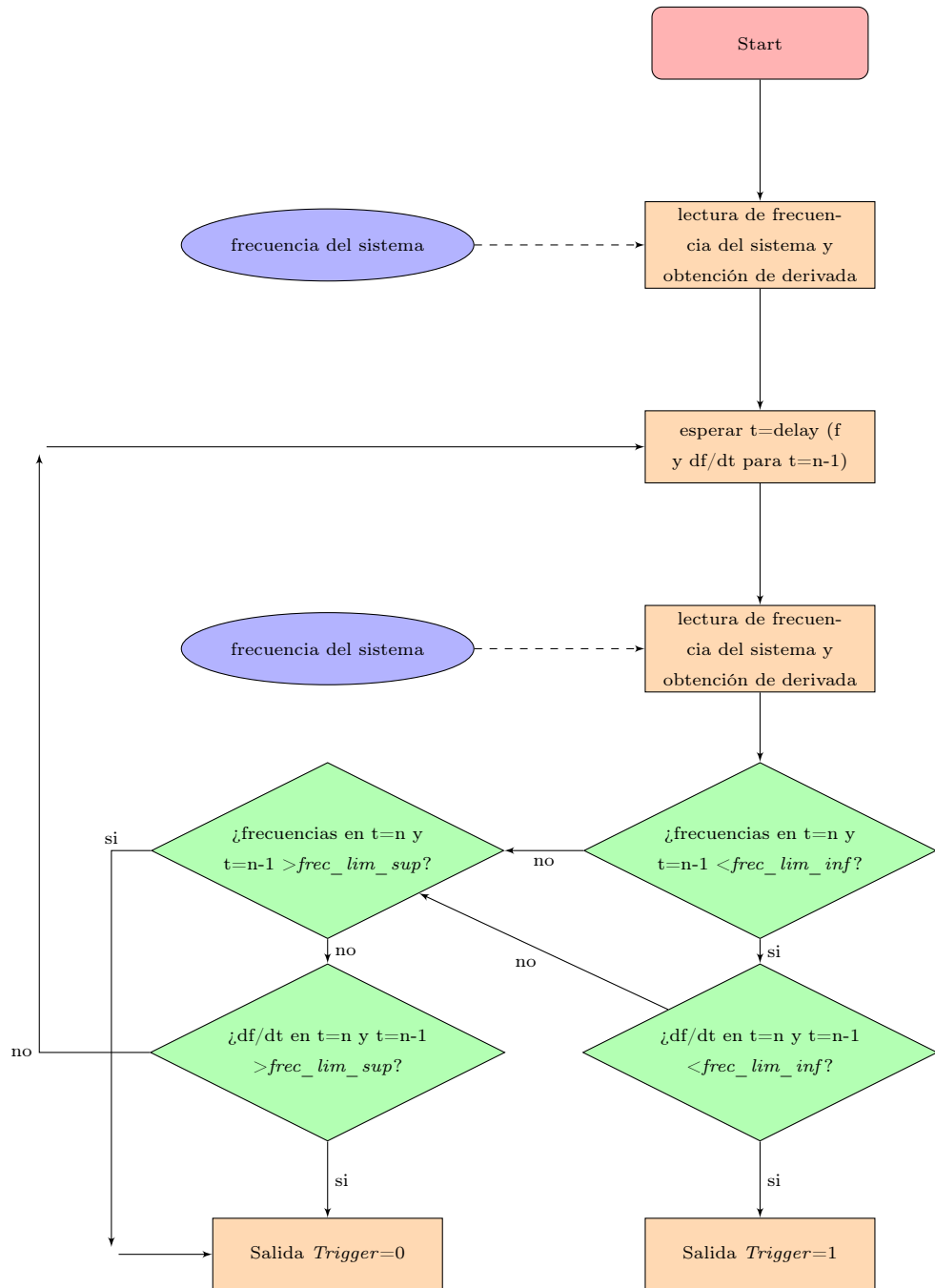
Para los ejemplos anteriores con el bloque *trigger* completo se han utilizado los siguientes valores:

- $dfdt_lim_inf = -0,4Hz/s$
- $frec_lim_inf = 49,5Hz$
- $dfdt_lim_sup = 0,2Hz/s$
- $frec_lim_sup = 50,5Hz$

Idealmente se utilizarán los valores que se utilizan en la instalación real de La Palma y así se podrá comparar el modelo simulado con la instalación en planta.

3.3.4. Diagrama de Flujo del bloque *Trigger*

A continuación se muestra un diagrama de flujo simplificado que resume las características del bloque Trigger que se he creado en las secciones anteriores ³:



³No se ha incluido la condición de máxima energía.

3.4. Simulación del Bloque de Control de Potencia

La verdadera utilidad que tiene el ultracondensador es la rápida inyección de potencia cuando se lo indique la señal *trigger*. En esta sección se hará la simulación del bloque de inyección de potencia. Como se ha ido explicando a lo largo de los capítulos anteriores, estas simulaciones se están basando, dentro de lo posible, en los aspectos reales de un ultracondensador instalado en la subestación de Los Guinchos en la isla de La Palma. Esta sección continuará aplicando esta premisa y utilizará un perfil de inyección de potencia como el mostrado en el apartado 3.1.2.

Para empezar la simulación del control de inyección de potencia se cuenta con un documento de la empresa SAFT Baterías S.L.⁴ que ha sido utilizado por Endesa en la implantación de los ultracondensadores. Todas las partes que se refieren a la inyección de potencia en este documento se han incluido en el Apéndice B. Sin embargo, en esta sección se incluirán las partes más relevantes y las que se utilizarán directamente para realizar la simulación.

El control de inyección de potencia de los ultracondensadores que se va a presentar a continuación cuenta con tres partes distintas. Una primera parte que utiliza la desviación de la frecuencia del sistema (llamada de regulación primaria), una segunda parte que utiliza la derivada de dicha variación y una tercera parte que impone un máximo o un mínimo de potencia inyectada/absorbida, sin valores intermedios. La segunda parte mencionada se obtiene, como se verá más adelante, utilizando una función de transferencia que tendrá como valor más característico una constante de inercia (parte inercial).

En la figura 3.25 se muestran tres partes principales que afectan al control de potencia-frecuencia (P-f). En la parte superior de la imagen se muestra la parte descrita anteriormente como de regulación primaria. Justo debajo se encuentra la parte inercial con su función de transferencia característica. La tercera parte mostrada no se va a tener en cuenta en este proyecto ya que solo se utilizaría en el caso de que se quisiera utilizar el ultracondensador como fuente de alimentación de potencia activa. Al no ser este el propósito de este tipo de almacenamiento de energía, se va a eliminar del esquema a utilizar. Todos los bloques que se encuentran aguas arriba del sumador (tanto el bloque de regulación primaria como el inercial) recibirán la variación de frecuencia (Δf) en por unidad (p.u.) y se obtendrá a la salida del sumador una potencia en p.u..

⁴SAFT, empresa francesa líder en diseño y fabricación de tecnologías avanzadas de baterías

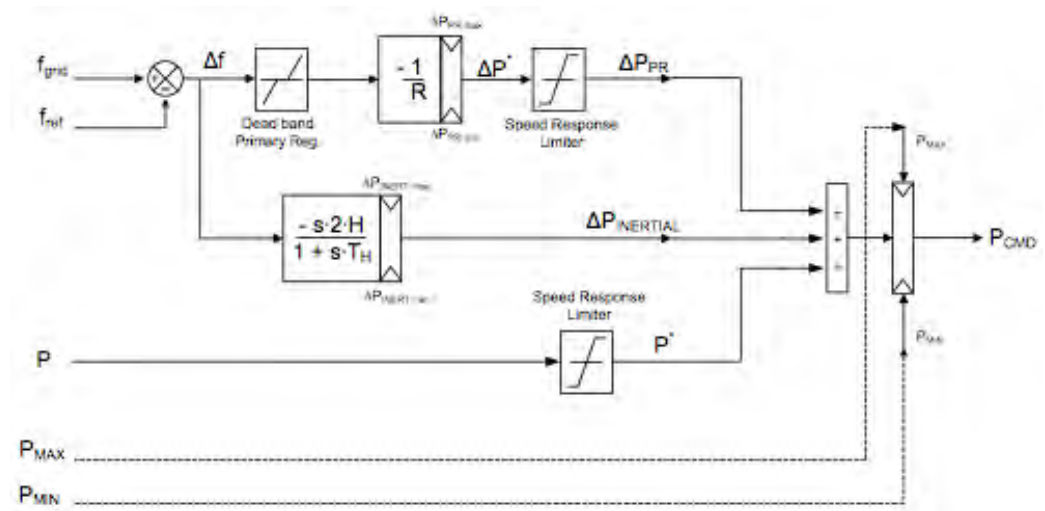


Figura 3.25: Control potencia-frecuencia del Apéndice B

3.4.1. Control de Frecuencia Primario o Regulación Primaria

El bloque de control de frecuencia primario cuenta con diversas partes que consiguen que se calcule y limite una cantidad de potencia con respecto a la desviación de frecuencia que sufre el sistema. Se intentará implementar en Simulink el bloque de Regulación Primaria que se presenta en el Apéndice B mostrado en la siguiente figura:

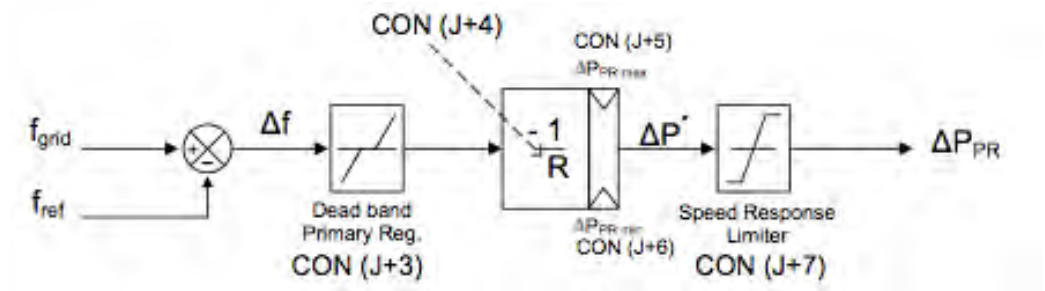


Figura 3.26: Bloque de regulación primaria del control P-f del Apéndice B

Al no tener todos los bloques exactos mostrados en la figura 3.26 en Simulink, se deben utilizar los que sí se tienen e intentar utilizar otros bloques que tengan la misma función. La característica de la regulación primaria del control P-f que se quiere obtener es la mostrada a continuación:

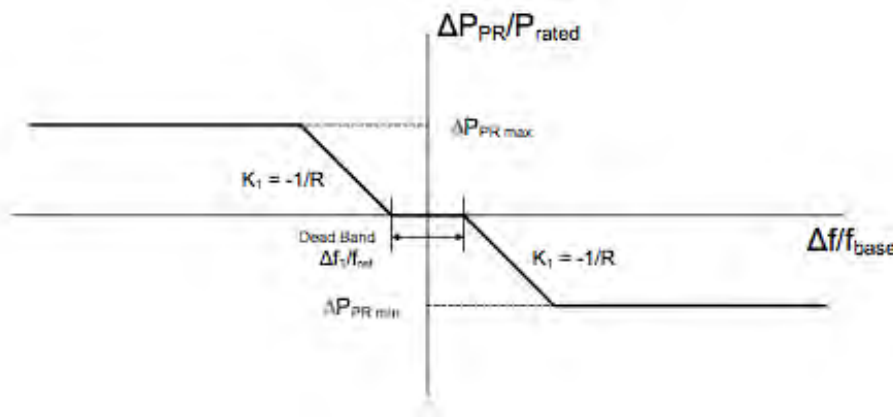


Figura 3.27: Curva característica de la regulación primaria del control P-f del Apéndice B

Esta curva muestra la banda muerta ($\Delta f_1/f_{ref}$), una ganancia (que se muestra en la curva característica como la pendiente $K_1 = -1/R$) y unos valores máximos y mínimos de inyección (ΔP_{PRmax} y ΔP_{PRmin}). Se debe encontrar la forma de obtener la misma característica con simulink. Algunos de los bloques anteriores se encuentran directamente creados en Simulink. Estos son los bloques de la banda muerta (*Dead Zone*) o del limitador de respuesta (*Speed Response Limiter*). El bloque que se ha creado en Simulink tiene la siguiente forma:

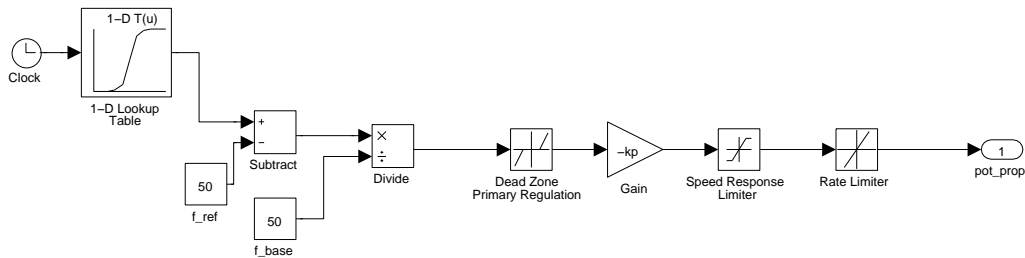


Figura 3.28: Bloque de regulación primaria del control P-f creado en Simulink

Y su respectiva máscara:

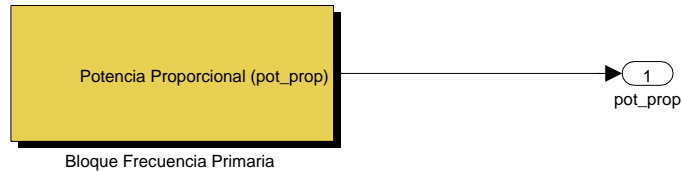


Figura 3.29: Máscara del bloque de regulación primaria del control P-f creado en Simulink

En la figura 3.28 se observa como se tiene el modelo equivalente en Simulink de los bloques mostrados en la figura 3.27. Como se ha comentado, la banda muerta y el limitador de respuesta se han incluido como bloques prediseñados de Simulink. Los bloques que se muestran en la figura 3.28 tienen los siguientes objetivos:

- Banda muerta, el objetivo de este bloque es que el ultracondensador no responda ante desviaciones de frecuencia muy bajas, algo característico de sistemas eléctricos aislados (o SEIE en este caso). Esto se debe a que se quiere que el ultracondensador no esté inyectando pequeñas cantidades de potencia, sino que se reserve toda la potencia para inyectar en incidentes importantes que podrían acabar en un desplome frecuencial (su objetivo es parecido al objetivo del *Trigger*).
- Comparador de frecuencia, se compara la frecuencia con una frecuencia base de 50 Hz. Esta desviación de frecuencia se divide por 50 Hz para obtener la desviación en p.u..
- *Gain*, aplica una ganancia multiplicando el valor de la desviación de frecuencia en p.u. por un valor $-Kp$ que se selecciona previamente como parámetro de la máscara. Es importante hacer hincapié en que la constante de ganancia debe ser negativa. Esto se debe a que el ultracondensadores inyectará potencia cuando la frecuencia se encuentre por debajo de la frecuencia de referencia (50 Hz), y por lo tanto para obtener una inyección de potencia positiva se debe utilizar una constante negativa.
- *Speed Response Limiter*, limita la cantidad de potencia, positiva o negativa, que inyecta el ultracondensador en cualquier momento. No se puede superar

la capacidad máxima de inyección y este bloque impide que se exceda dicho valor máximo.

- *Rate Limiter*, se utiliza para limitar la velocidad con la que se inyecta potencia, ya que el ultracondensador está limitado a inyectar 4 MW cada 100 ms (1 p.u. cada 100ms).

Se debe saber qué valores utilizar para las distintas características de la curva. La tabla siguiente muestra cuáles son dichos parámetros y el rango de valores que pueden tener:

| Parámetro | Valor Mínimo | Valor Máximo |
|---|-----------------|-----------------|
| $\Delta f_1/f_{base}$, Banda Muerta (p.u.) | 0,0006 | 0,004 |
| R, Droop (Hz p.u./MW p.u.) | 1/50 | 1/15 |
| ΔP_{PRmax} (p.u.) | 0 | 1 |
| ΔP_{PRmin} (p.u.) | -1 | 0 |
| $\Delta P/\Delta t$, Rampa de Inyección (p.u./s) | 0 | 0,2 |

Tabla 3.2: Parámetros de la regulación primaria del control P-f, valores máximos y mínimos

Los valores que se van a utilizar para la simulación son, en principio, los que ha utilizado Endesa. Estos datos han sido facilitados por Endesa Generación y son los siguientes ⁵:

| Parámetro | Valor Mínimo | Valor Máximo | Valor Utilizado |
|---|-----------------|-----------------|--------------------|
| $\Delta f_1/f_{base}$, Banda Muerta (p.u.) | 0,0006 | 0,004 | 0,002 |
| R, Droop (Hz p.u./MW p.u.) | 1/50 | 1/15 | 1/75 |
| ΔP_{PRmax} (p.u.) | 0 | 1 | 1 |
| ΔP_{PRmin} (p.u.) | -1 | 0 | 0 |
| $\Delta P/\Delta t$, Rampa de Inyección (p.u./s) | 0 | 0,2 | 1 |

Tabla 3.3: Parámetros de la regulación primaria del control P-f, incluyendo valores utilizados

Para comprobar como funciona el modelo creado, se comprobará como actúa dicho modelo ante perfiles reales de frecuencia observando las salidas de potencia que presenta. Para estas primeras pruebas se va a utilizar una ganancia (variable Kp del bloque *Gain*) de -50 p.u. que se puede variar en el rango de -75 a -100

⁵Se ha comprobado que se necesitan valores más pequeños que 1/50 para R (Droop).

p.u. según los datos proporcionados por Endesa. Al introducir este valor de K_p como parámetro de la máscara se puede introducir directamente como un valor positivo, ya que se tiene en cuenta el signo negativo al introducir $-K_p$ en el bloque de *Gain*. Se van a utilizar dos perfiles bastante distintos el uno del otro. El primer perfil tiene valores de frecuencia muy por debajo de la referencia (llega a estar por debajo de los 48,5Hz) mientras que el segundo perfil es un ejemplo de una prueba de puesta en marcha y cuenta con valores de frecuencia por debajo de la referencia, pero en ningún caso tan bajos como en el primero. Los distintos perfiles con sus respectivas inyecciones proporcionales de potencia se muestran en las siguientes figuras:

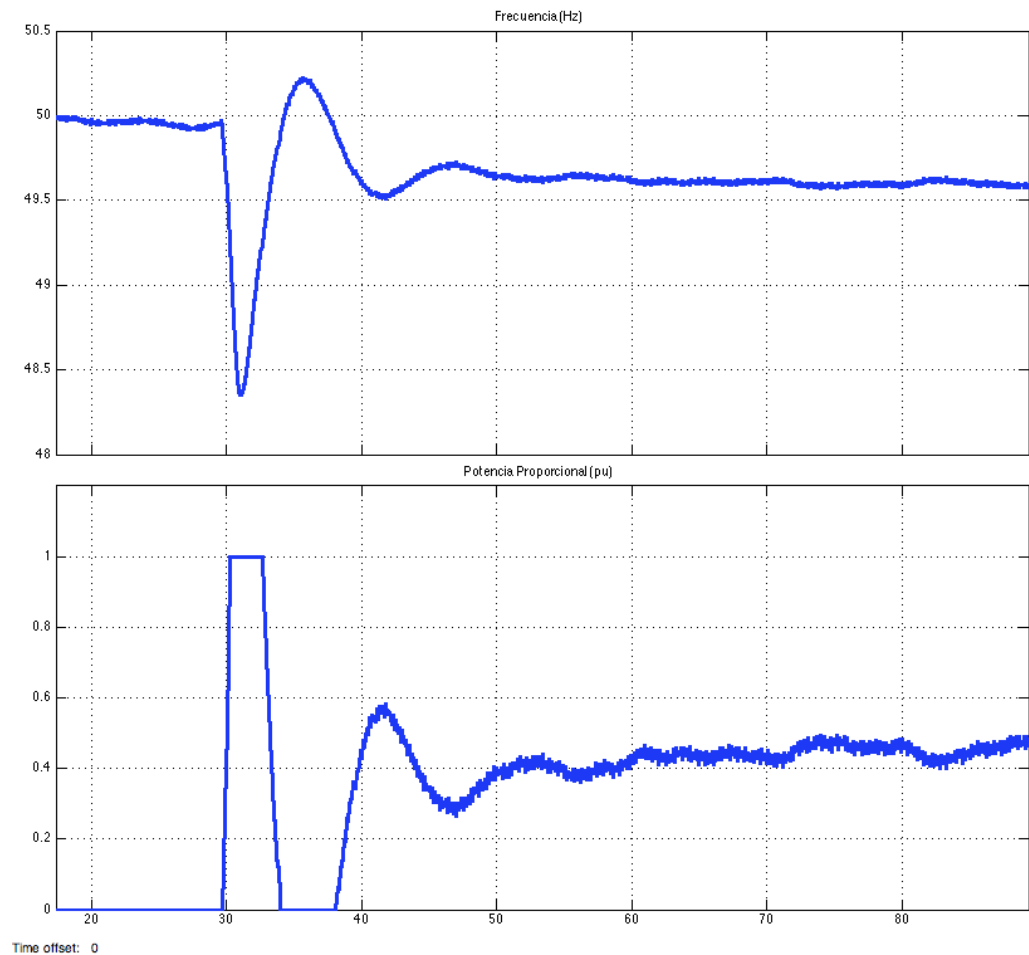
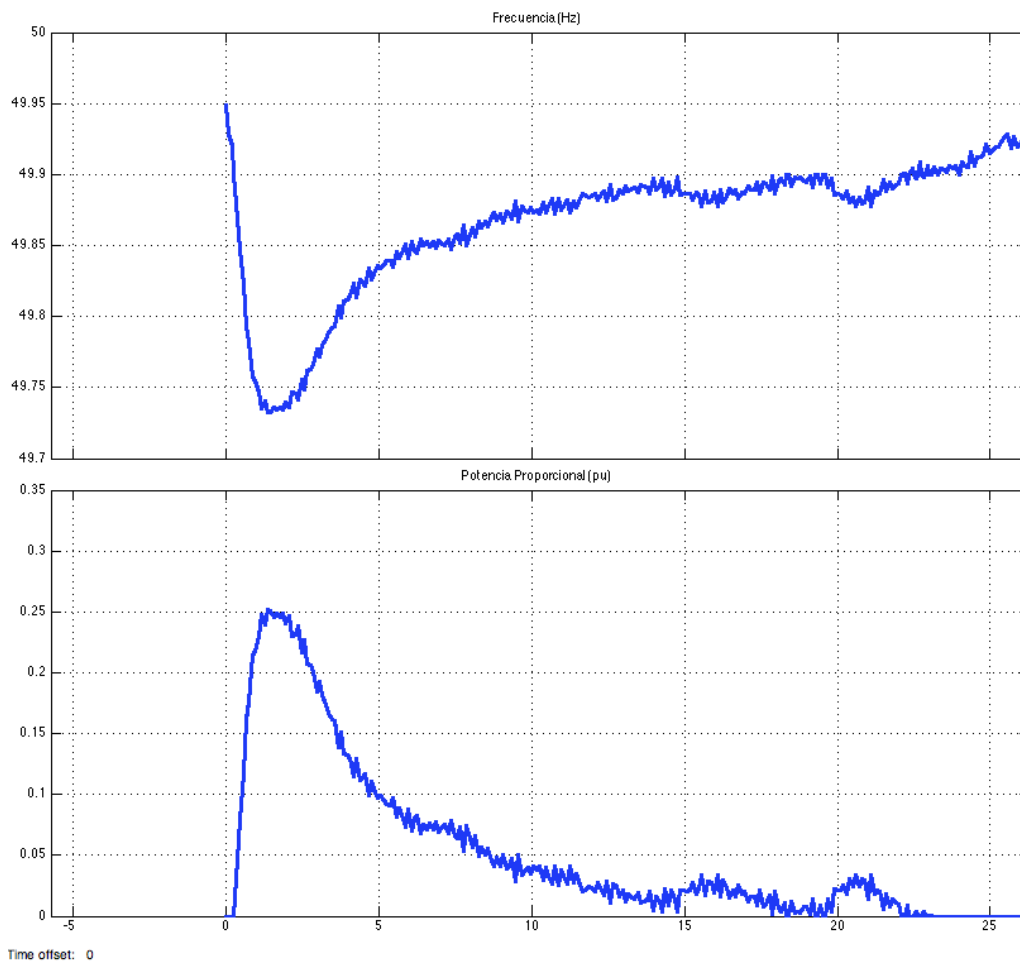


Figura 3.30: Inyección de potencia proporcional, $K_p=75$, perfil 1

Figura 3.31: Inyección de potencia proporcional, $K_p=75$, perfil 2

Se comprueba que ante estos perfiles se tiene una respuesta distinta. Esto se debe a que la desviación de frecuencia en el primer perfil es mucho mayor que en el segundo perfil. El primer perfil muestra un perfil de frecuencia muy oscilante, en el que ha habido una pérdida grande de potencia en el sistema y no ha habido ninguna inyección del ultracondensador real. En la segunda figura se puede ver un perfil de frecuencia en el cual si que hubo inyección por parte del ultracondensador. Este perfil es un perfil de la respuesta en frecuencia de una puesta en marcha (PEM). En la figura 3.30 se tiene una primera zona en la que se inyecta el máximo de potencia (1 p.u.), seguido de un valle muy importante que luego se continua por una inyección continuada. La figura 3.31 es una figura más realista y se debe comparar con la figura 3.32 que se muestra a continuación para ver si el perfil de

inyección es satisfactorio.

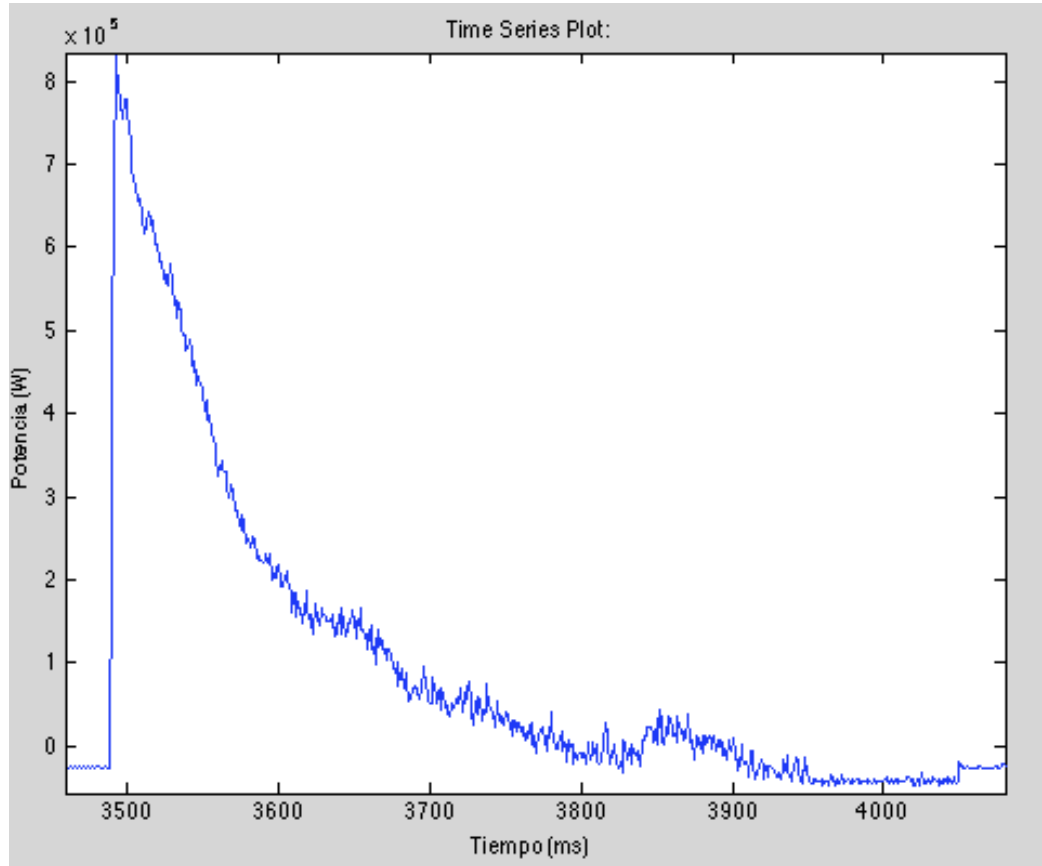


Figura 3.32: Inyección de potencia real (PEM), $K_p=50$, perfil 2

La forma de la respuesta de la simulación se asemeja pero no tiene el pico pronunciado de potencia inyectada que se muestra en la figura 3.32. Sin embargo, esta figura también tiene en cuenta la respuesta inercial por lo que no es concluyente.

3.4.2. Respuesta Inercial

El bloque que se describe en este apartado, el bloque de respuesta inercial, es un bloque sencillo que depende en gran medida de la derivada de la frecuencia. Aunque la derivada no se obtenga como en los apartados de la sección 3.2 para el *Trigger* (utilizando el bloque *Derivative* que se puede encontrar en Simulink), se utiliza una función de transferencia con la que directamente se obtiene la cantidad de potencia que se debe inyectar. Se intentará implementar en Simulink el bloque de Respuesta Inercial que se presenta en el Apéndice B mostrado en la siguiente figura:

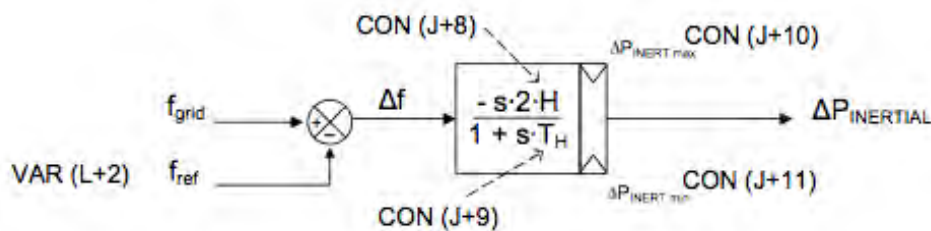


Figura 3.33: Bloque de respuesta inercial del control P-f del Apéndice B

Para implementar la figura 3.33 con Simulink sólo necesitamos aplicar la primera parte del bloque (la parte con la que obtenemos la desviación de frecuencia en p.u.) utilizado en el bloque de regulación primaria, figura 3.28. Además de dicha parte para la frecuencia, se tiene que añadir un bloque con la función de transferencia y un *Speed Response Limiter* para, como en el caso anterior, asegurarse de que no se inyecta potencia por encima de las posibilidades del ultracondensador. Teniendo en cuenta todo lo anterior se produce el siguiente esquema en Simulink:

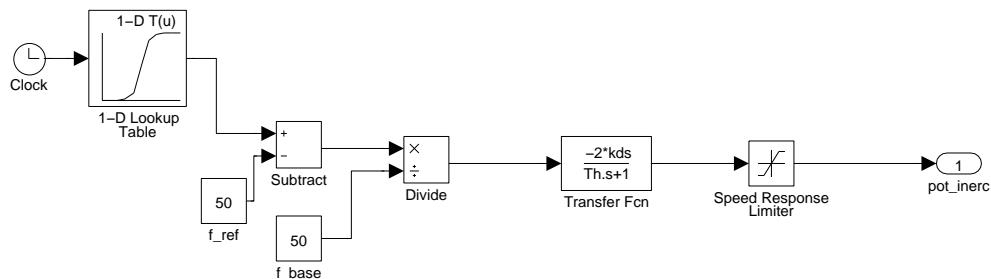


Figura 3.34: Bloque de respuesta inercial del control P-f creado en Simulink

Y su respectiva máscara:

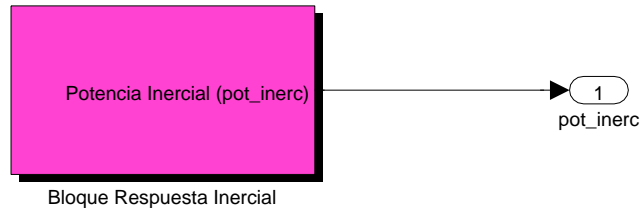


Figura 3.35: Máscara del bloque de respuesta inercial del control P-f creado en Simulink

Como se muestra en la figura 3.34, la función de transferencia es la siguiente:

$$F(s) = \frac{-2 \times Kd \times s}{Th \times s + 1} \quad (3.1)$$

La variable Kd es conocida como la constante de inercia (a veces representada como la inercia, H) y se mide en segundos. La segunda variable presente en la función de transferencia, Th , es conocida como la constante de tiempo de la respuesta inercial y también se mide en segundos. Como en el caso anterior, el Apéndice B indica valores admisibles de estas constantes, así como valores máximos y mínimos de potencia a inyectar (variables $\Delta P_{INERTmax}$ y $\Delta P_{INERTmin}$) en p.u. y se muestran en la siguiente tabla:

| Parámetro | Valor Mínimo | Valor Máximo |
|---------------------------------|-----------------|-----------------|
| Kp , Constante de inercia (s) | 0 | 20 |
| Th , Constante de tiempo (s) | 0,2 | 1 |
| $\Delta P_{INERTmax}$ (p.u.) | 0 | 1 |
| $\Delta P_{INERTmin}$ (p.u.) | -1 | 0 |

Tabla 3.4: Parámetros de la respuesta inercial del control P-f, valores máximos y mínimos

Los valores que se van a utilizar para la simulación son, en principio, los que ha utilizado Endesa. Estos datos han sido facilitados por Endesa Generación y son los siguientes:

| Parámetro | Valor Mínimo | Valor Máximo | Valor Utilizado |
|----------------------------------|-----------------|-----------------|--------------------|
| K_p , Constante de inercia (s) | 0 | 20 | 10 |
| T_h , Constante de tiempo (s) | 0,2 | 1 | 0,2 |
| $\Delta P_{INERTmax}$ (p.u.) | 0 | 1 | 1 |
| $\Delta P_{INERTmin}$ (p.u.) | -1 | 0 | 0 |

Tabla 3.5: Parámetros de la respuesta inercial del control P-f, incluyendo valores utilizados

Para comprobar como funciona el modelo creado, al igual que en el apartado 3.4.1, se comprobará como actúa dicho modelo ante perfiles reales de frecuencia observando las salidas de potencia que presenta. Para poder tener una idea de la cantidad de potencia que inyecta este bloque en comparación con el de regulación primaria, se utilizarán los mismo perfiles de frecuencia que en el apartado 3.4.1. Los distintos perfiles de frecuencia, de la derivada de la frecuencia y sus respectivas inyecciones proporcionales de potencia se muestran en las siguientes figuras:

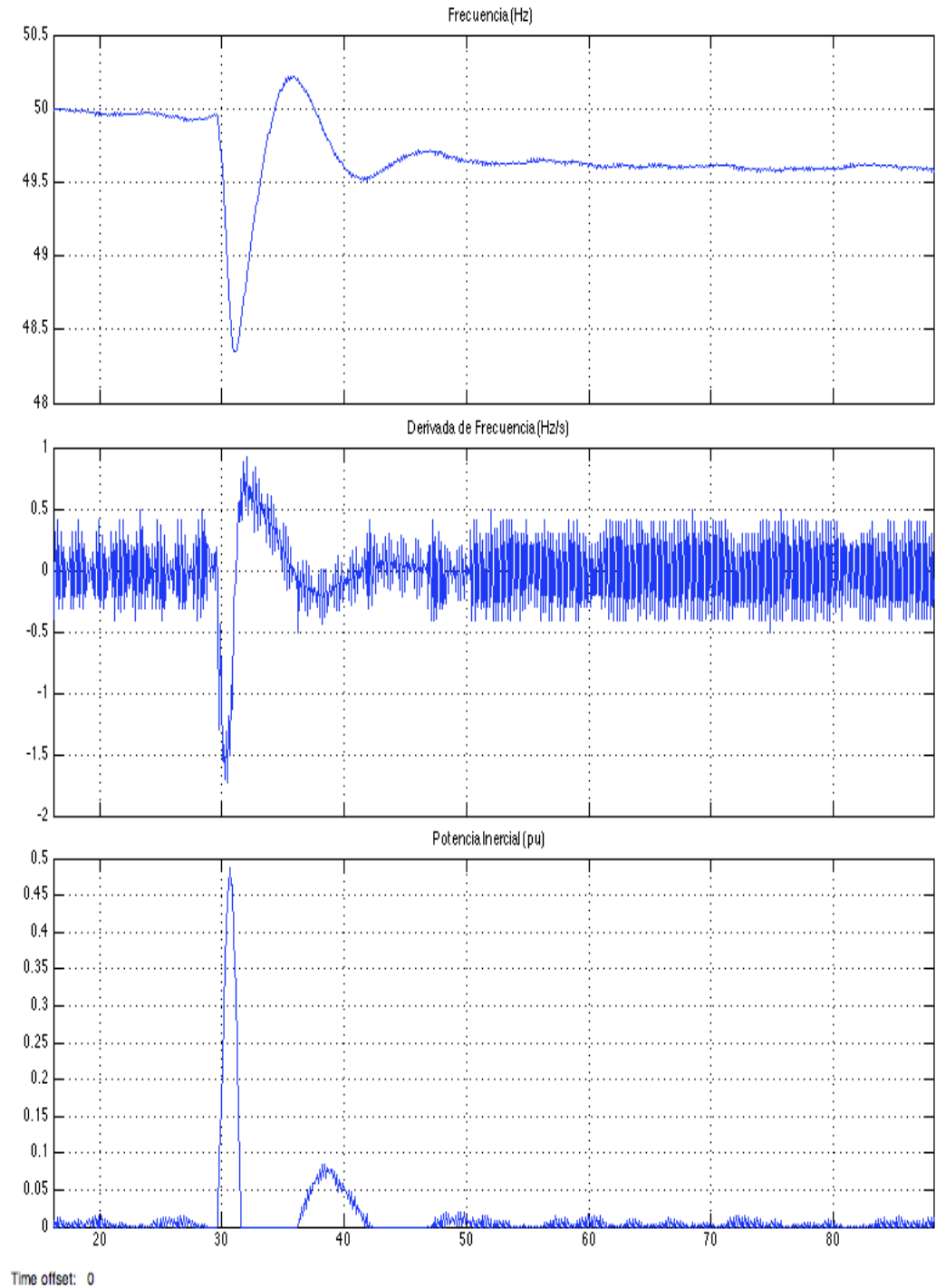
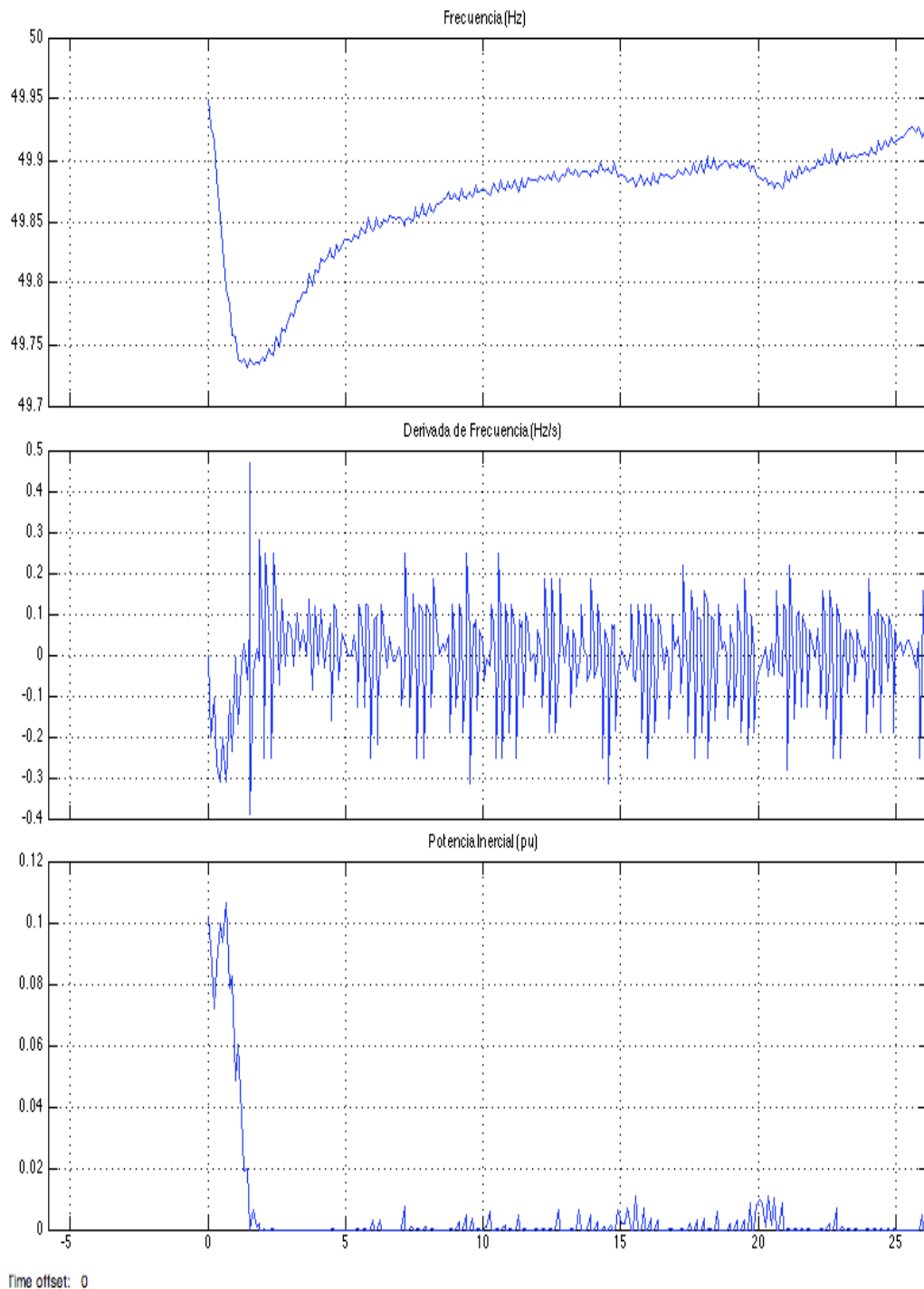


Figura 3.36: Inyección de potencia inercial, $K_d=10$, perfil 1

Figura 3.37: Inyección de potencia proporcional, $K_d=10$, perfil 2

En las gráficas anteriores se observa como la respuesta inercial depende mucho de la derivada de la frecuencia. Por eso, sea cual sea el valor de la frecuencia, si ese valor es más o menos estable la parte inercial del control de potencia inyecta valores muy pequeños de potencia. Este bloque inyecta casi la totalidad de su potencia durante los primeros segundos del incidente, ya que es el tiempo durante el cual la derivada tiene valores más elevados. Es el bloque que hace que el pico inicial de la inyección total sea más alto que el resto de la inyección. También se comprueba como esta parte del control P-f inyecta menos potencia que la regulación primaria (aunque se podía aumentar aumentando algunos de los valores mostrados en la tabla 3.5).

3.4.3. Conjunto del Bloque de Control de Potencia

Una vez obtenidos los bloques de regulación primaria (apartado 3.4.1) y de respuesta inercial (apartado 3.4.2) se deben combinar para producir la potencia total que debe inyectar el ultracondensador. Como se observó en la figura 3.25, se utiliza un sumador para los distintos bloques que inyectan potencia. En el apéndice B se encuentra de forma ampliada dicho sumador.

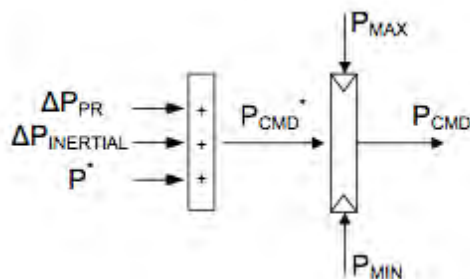


Figura 3.38: Bloque de sumador de potencia para control P-f según Apéndice B

La salida del sumador es una salida en p.u. (de ahí la * que se muestra junto al primer P_{CMD}) y se debe aplicar la base de potencia del ultracondensador para obtener la potencia real a inyectar (P_{CMD}). La potencia base del ultracondensador es su potencia nominal, con un valor de 4MW, por lo tanto se debe poner una ganancia de 4MW (bloque *Gain*). También se debe tener en cuenta que al sumar la potencia que inyecta cada uno de los bloques (el de regulación primaria y el de respuesta inercial) se puede obtener una potencia a inyectar por encima de 1 p.u., algo que sería imposible. Por lo tanto, la potencia de salida P_{CMD}^* (en p.u.) debe estar limitada de nuevo a 1 p.u. para que la salida no esté por encima del máximo.

Al aplicar todo lo anterior se obtiene el siguiente bloque en Simulink, utilizando las máscaras de las figuras 3.29 y 3.35:

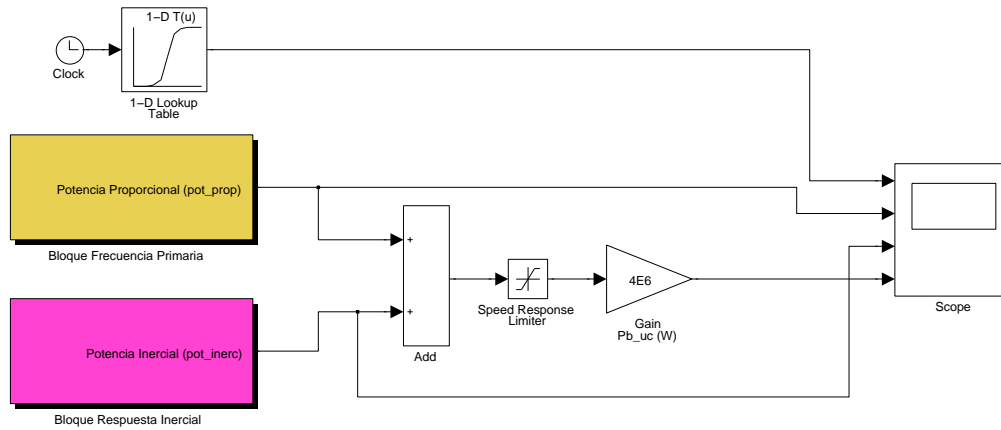


Figura 3.39: Conjunto de bloques de control P-f con sumador

Gracias al *Scope* conectado con cada una de las entradas al sumador (entradas en p.u.) y con la salida del sumador (salida en Vatios) se puede observar como funciona cada una de las partes del control P-f. También se incluye el perfil de frecuencia ante el cual está respondiendo el bloque de Simulink. Es importante vigilar el comportamiento de este modelo inicial para poder incluir alguna restricción que haga que el modelo sea más fiable y más cercano a la respuesta real del ultracondensador. Los perfiles de frecuencia utilizados son los mismos que los utilizados para simular los bloques constitutivos por separado.

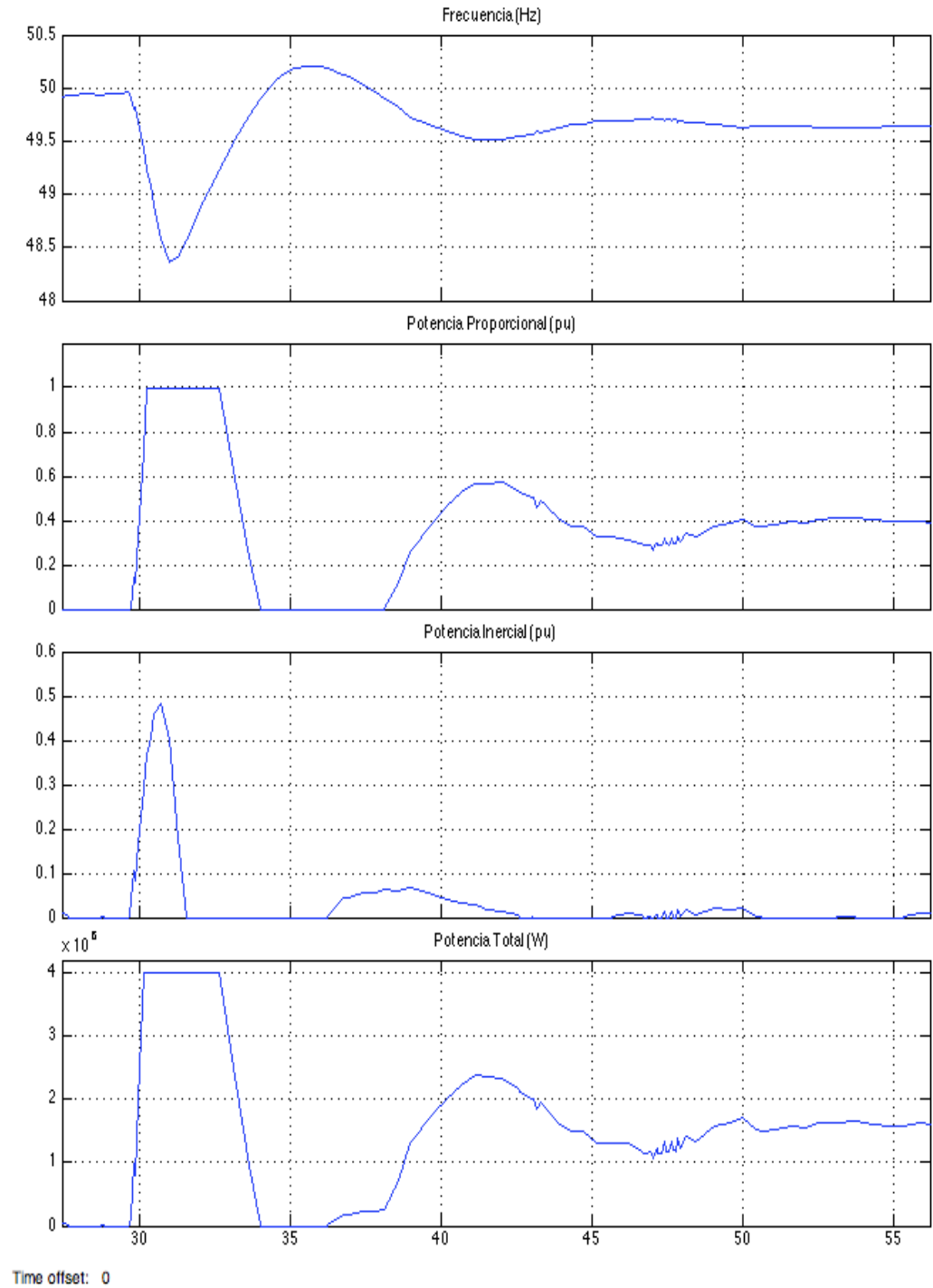
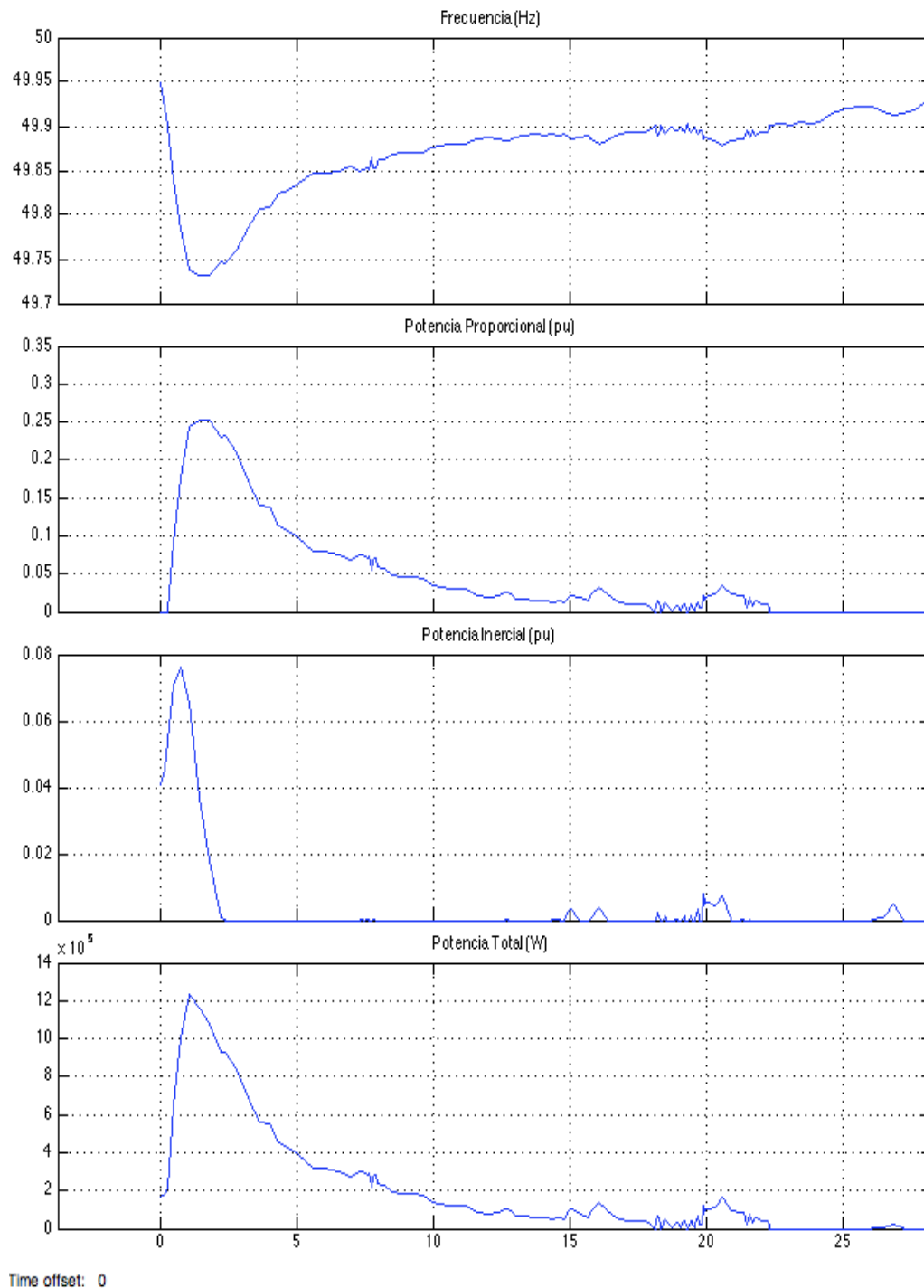


Figura 3.40: Inyección de potencia total, $K_p=75$, $K_d=10$, perfil 1

Figura 3.41: Inyección de potencia total, $K_p=75$, $K_d=10$, perfil 2

La figura 3.40 muestra una respuesta más drástica ante la bajada de frecuencia, inyectando 1 p.u. al inicio del incidente (debido a la gran desviación de frecuencia) y luego teniendo un importante valle en la inyección para luego recuperarla a un nivel medio. En este caso la enorme cantidad de potencia inyectada al principio puede hacer que el ultracondensador utilice toda su energía demasiado rápido. Sin embargo, la figura 3.40 muestra una respuesta ante un incidente con menor pérdida de potencia y mucho más parecida a la figura 3.32, por lo que se valida lo hecho hasta el momento. En la siguiente sección se realizará la optimización del bloque de control P-f.

3.5. Optimización del Bloque de Control de Potencia

Para optimizar el modelo propuesto en la figura 3.39, se debe tener en cuenta una restricción muy importante, la cantidad de energía que puede almacenar el ultracondensador. Esta mejora se comentó en el apartado 3.3.3.1 como una entrada en el bloque *OR* de la lógica del *Reset*. Sabemos que la característica del ultracondensador es que puede inyectar 4MW de potencia durante un tiempo de 6 segundos, por lo tanto:

$$E = P \times \Delta t = 4 \times 10^6 W \times 6 s = 24 \times 10^6 J \quad (3.2)$$

Con la ecuación 3.2 se obtiene el límite superior de la energía eléctrica total que puede almacenar el ultracondensador. Cuando se inyecta potencia, se debe tener en cuenta que en ningún momento se puede descargar energía por encima de este valor ya que esa energía no estaría almacenada en el ultracondensador. Para saber la cantidad de energía que descarga el ultracondensador se puede usar un integrador (bloque disponible en Simulink) que proporcione continuamente la cantidad de energía que va suministrando o inyectando el ultracondensador al sistema. De esta forma se podrá comparar la energía que se va suministrando con un máximo. Este máximo se va a imponer que sea entre el 80 % y el 90 % de los 24 MJ calculados en la ecuación 3.2. Para comparar la energía máxima con la energía inyectada se utilizará un comparador. En principio se va a utilizar un valor de 85 % de la energía máxima como valor con el que comparar la energía inyectada por el modelo. El siguiente modelo de Simulink implementa lo anterior:

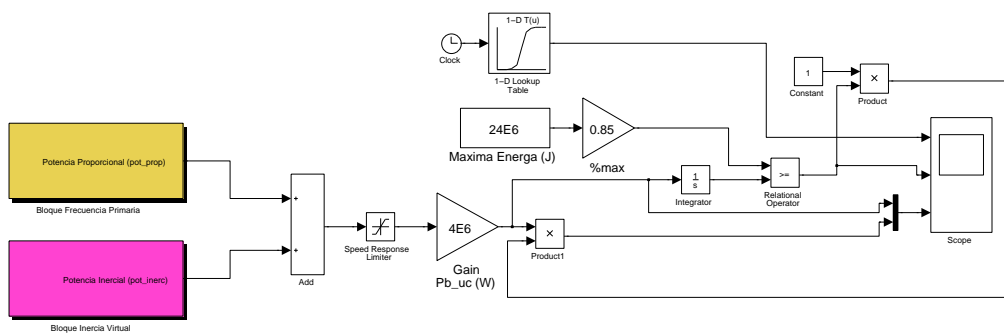


Figura 3.42: Conjunto de bloques de control P-f con sumador limitado por energía máxima

En la figura 3.42 se muestra la comparación de la energía inyectada (obtenida

mediante el uso del integrador) con el porcentaje seleccionado de energía máxima. Se ha decidido incluirlo directamente en este bloque en vez de en el bloque *trigger* y de ahí la razón de utilizar el multiplicador mostrado después del bloque *Gain* con la potencia nominal del ultracondensador. Se ha comparado de tal forma que siempre que la energía inyectada esté por debajo del límite máximo, la salida tenga valor 1. En el momento en el que ese límite se vea igualado o superado, la salida del comparador será 0. En ese momento la salida del bloque también será de valor 0. Para hacerse una idea de como cambiaría la potencia inyectada en el caso de que la condición de máxima energía se cumpliera instantáneamente, se utiliza el modelo siguiente con su respectiva respuesta de potencia ideal y potencia limitada. Para mostrar sobre el mismo eje la potencia ideal y la potencia limitada se ha utilizado un multiplexor:

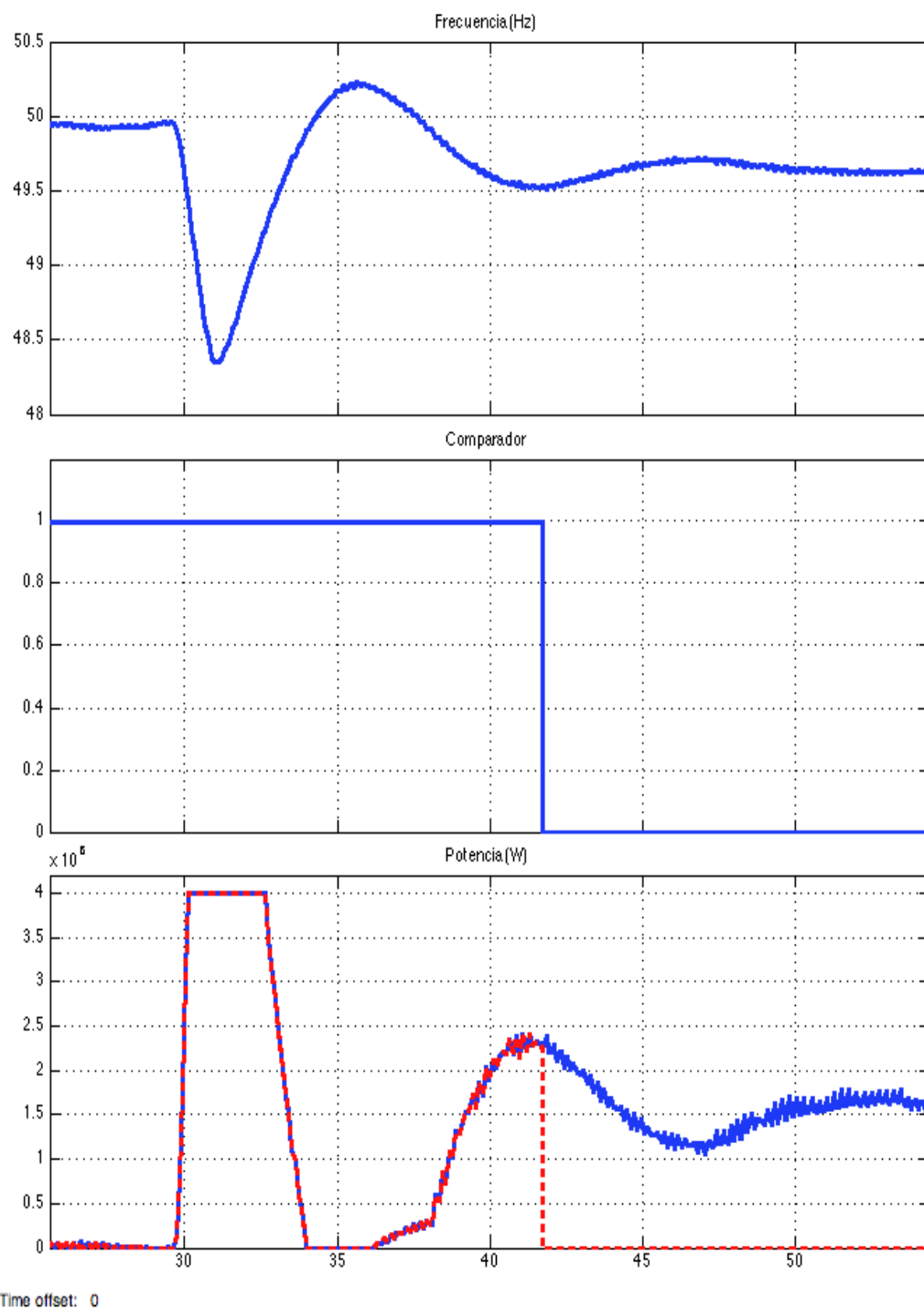


Figura 3.43: Inyección de potencia ideal (azul) y limitada (rojo), $K_p=75$, $K_d=10$, perfil 1

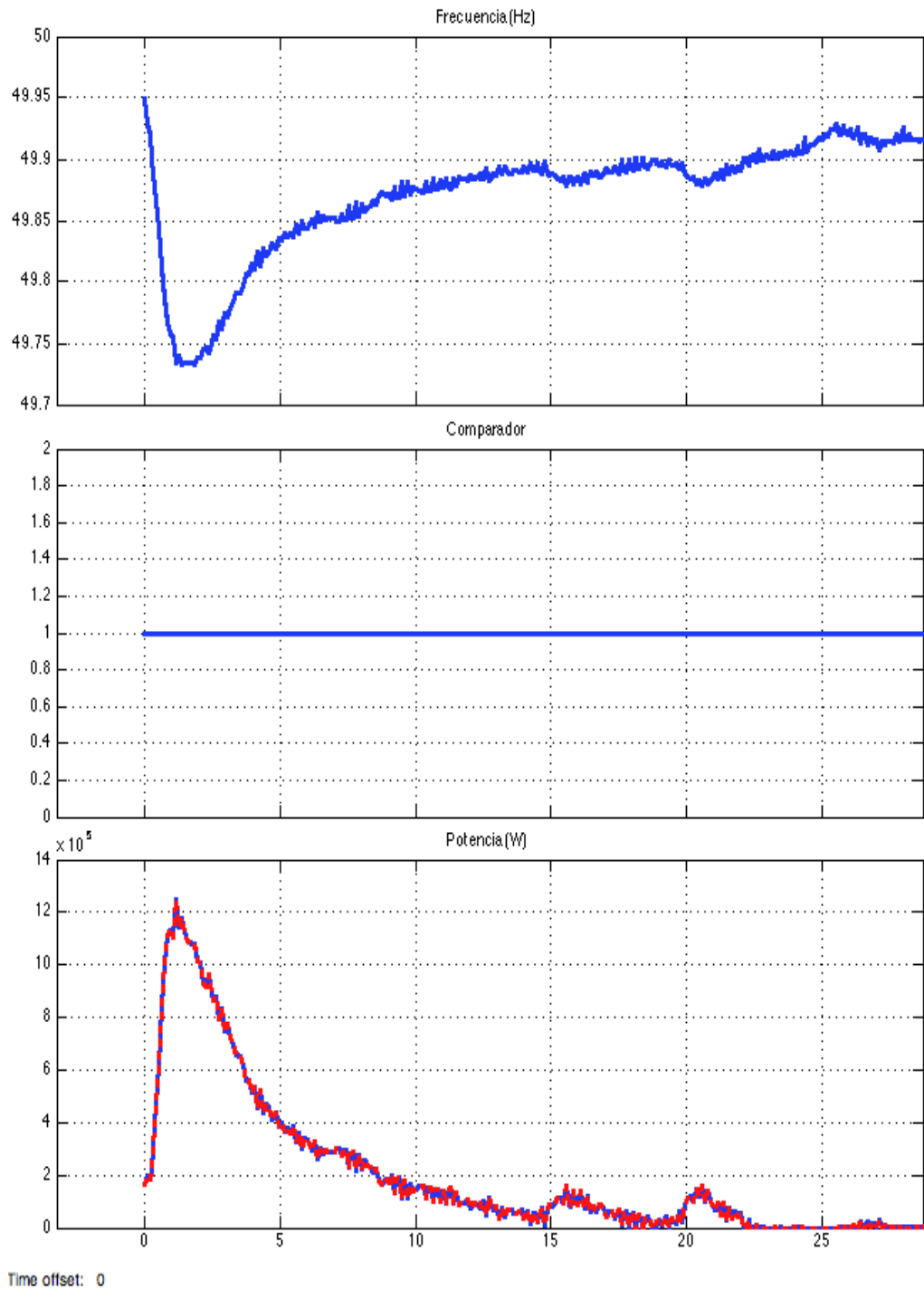


Figura 3.44: Inyección de potencia ideal (azul) y limitada (rojo), $K_p=75$, $K_d=10$, perfil 2

Se observa en los perfiles anteriores como en incidentes con variaciones de frecuencia muy altas y grandes oscilaciones, la limitación de potencia juega un papel crucial inyectando potencia durante los momentos iniciales hasta que se "agota" la energía almacenada en el ultracondensador (3.43). Para perfiles de frecuencia con menos oscilaciones y menor caída esta limitación no suele tener gran impacto, aunque también se puede utilizar para comprobar cuanta energía se ha utilizado y cuanta energía restante contiene el ultracondensador.

Endesa ha cedido los datos de las pruebas de PEM que se realizaron a finales del 2013. Para validar el sistema de control de P-f obtenido en este proyecto se va a proceder a utilizar los datos de la frecuencia de dichas pruebas y se comprobará como la salida del modelo se aproxima enormemente a la salida real (de la cual también se disponen datos). Para realizar esta comparación se debe utilizar una constante proporcional K_p de 50 p.u. ya que fue la que se utilizó durante la PEM.

Para estos ejemplos se ha impuesto que el ultracondensador deje de inyectar potencia al llegar al 85 % de energía consumida. En vez de pasar directamente a inyección de valor 0 (para eso se dejaría que inyectara al 100 %), se podría imponer una rampa de bajada de potencia que consuma el resto de energía que queda en el ultracondensador. Teniendo el valor P_{final} del instante en que se llega al 85 % de energía consumida se puede realizar el siguiente cálculo para obtener la pendiente de bajada:

$$\text{Energía Restante} : E_{restante} = 0,15 \times 24MJ = 3,6MJ \quad (3.3)$$

Se impone que esta energía restante sea el área de un triángulo rectángulo de altura P_{final} . Con estos datos se puede obtener la base del triángulo que será el tiempo de bajada:

$$E_{restante} = \text{Área} = 3,6MJ \quad (3.4)$$

$$3,6MJ = \frac{P_{final} \times \Delta t}{2} \quad (3.5)$$

$$\Delta t = \frac{2 \times 3,6 \times 10^6}{P_{final}} \quad (3.6)$$

Esta mejora vendría bien para los casos como los de la figura 3.43. Sin embargo, para casos mas realistas como los de la figura 3.44 no haría falta. Esto se podría considerar un futuro desarrollo si se necesitara en condiciones normales.

3.6. Conjunto de Bloques del Ultracondensador

En esta sección se va a proceder a juntar los dos bloques calculados por separado en las secciones anteriores. Para que trabajen conjuntamente, el *Trigger* debe funcionar como un *enable* que habilite la inyección de la potencia del control P-f. El bloque de control P-f estará calculando continuamente la potencia que necesita inyectar al sistema debido a las desviaciones de frecuencia y a la derivada de la frecuencia en cada instante. Sin embargo, hasta que el bloque *Trigger* no permita que se inyecte potencia, la salida de potencia será nula. Para conseguir esta característica se utiliza el siguiente modelo:

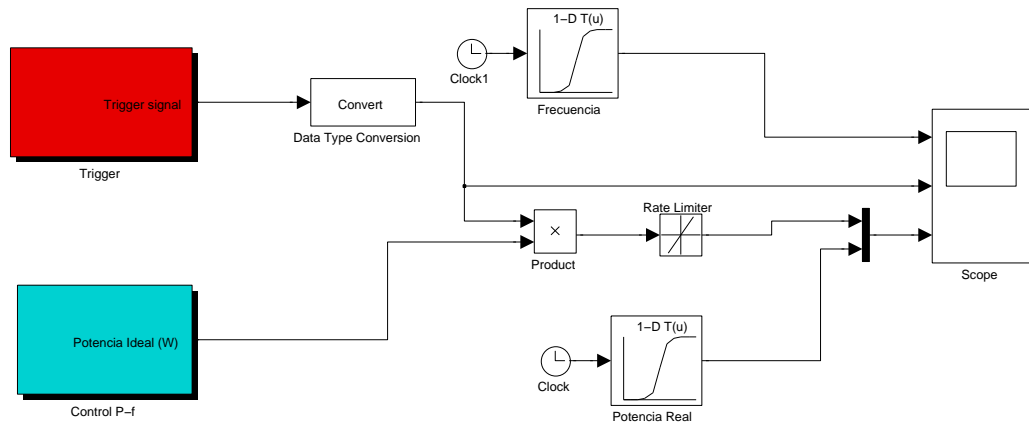


Figura 3.45: Ultracondensador completo, modelo Simulink

El bloque *Trigger* incluye el subsistema que se presenta en la figura 3.21 mientras que el bloque Control P-f incluye el subsistema que se presenta en la figura 3.42. También se incluyen, mediante dos *Lookup Tables* el perfil de frecuencia con el que se esté simulando y la potencia real inyectada por el ultracondensador de La Palma.

En las siguientes figuras (3.46, 3.47 y 3.48) se compara la salida de potencia que produce el modelo de Simulink con la salida real de potencia de los ultracondensadores en las pruebas de puesta en marcha (PEM). Las salidas del modelo se muestran en azul mientras que se muestra en rojo la potencia real inyectada.

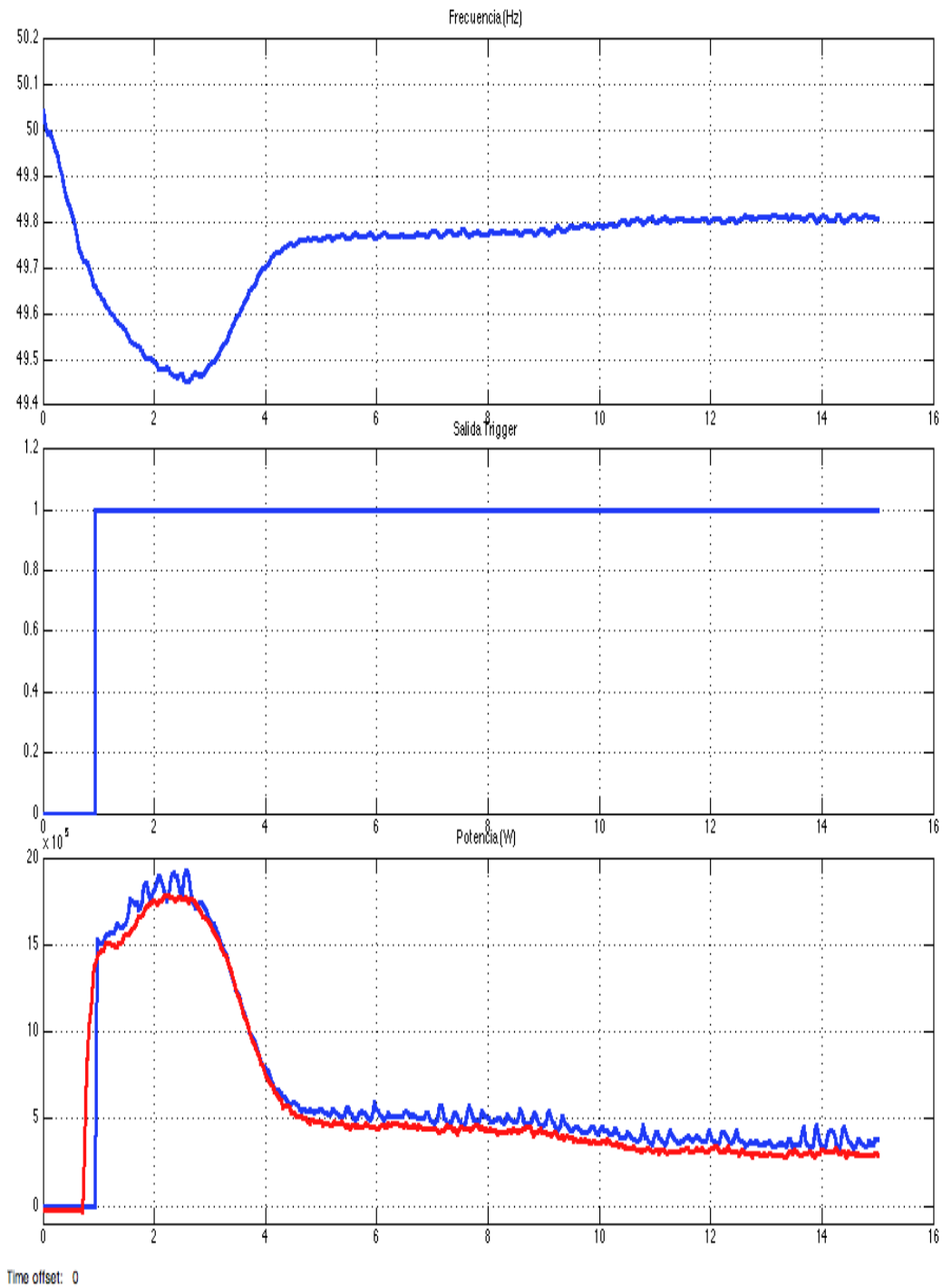


Figura 3.46: Inyección de potencia simulada (azul) y real (rojo), $K_p=50$, $K_d=10$, $P_n=4\text{MW}$, PEM 1

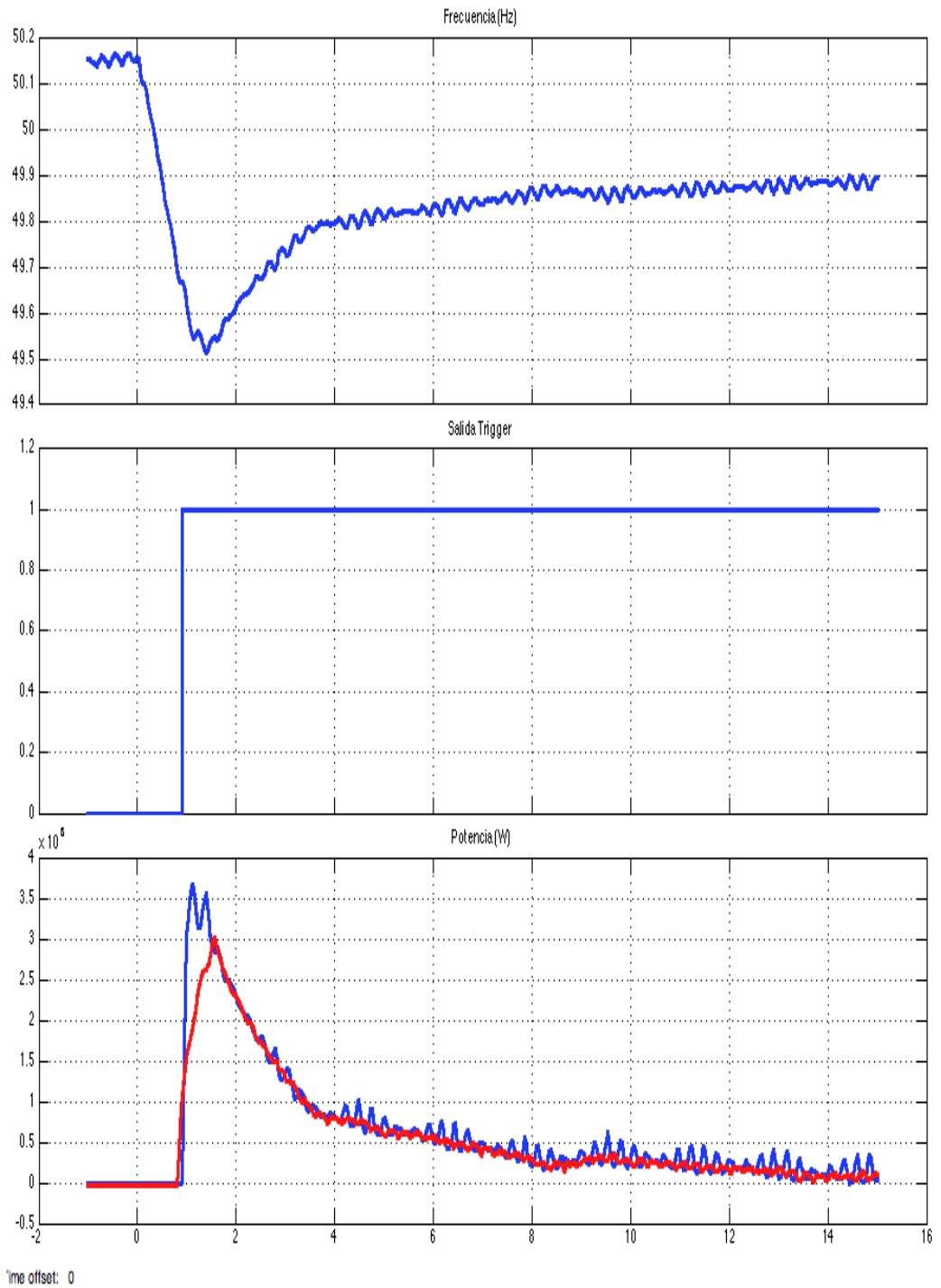


Figura 3.47: Inyección de potencia simulada (azul) y real (rojo), $K_p=100$, $K_d=10$, $P_n=4\text{MW}$, PEM 2

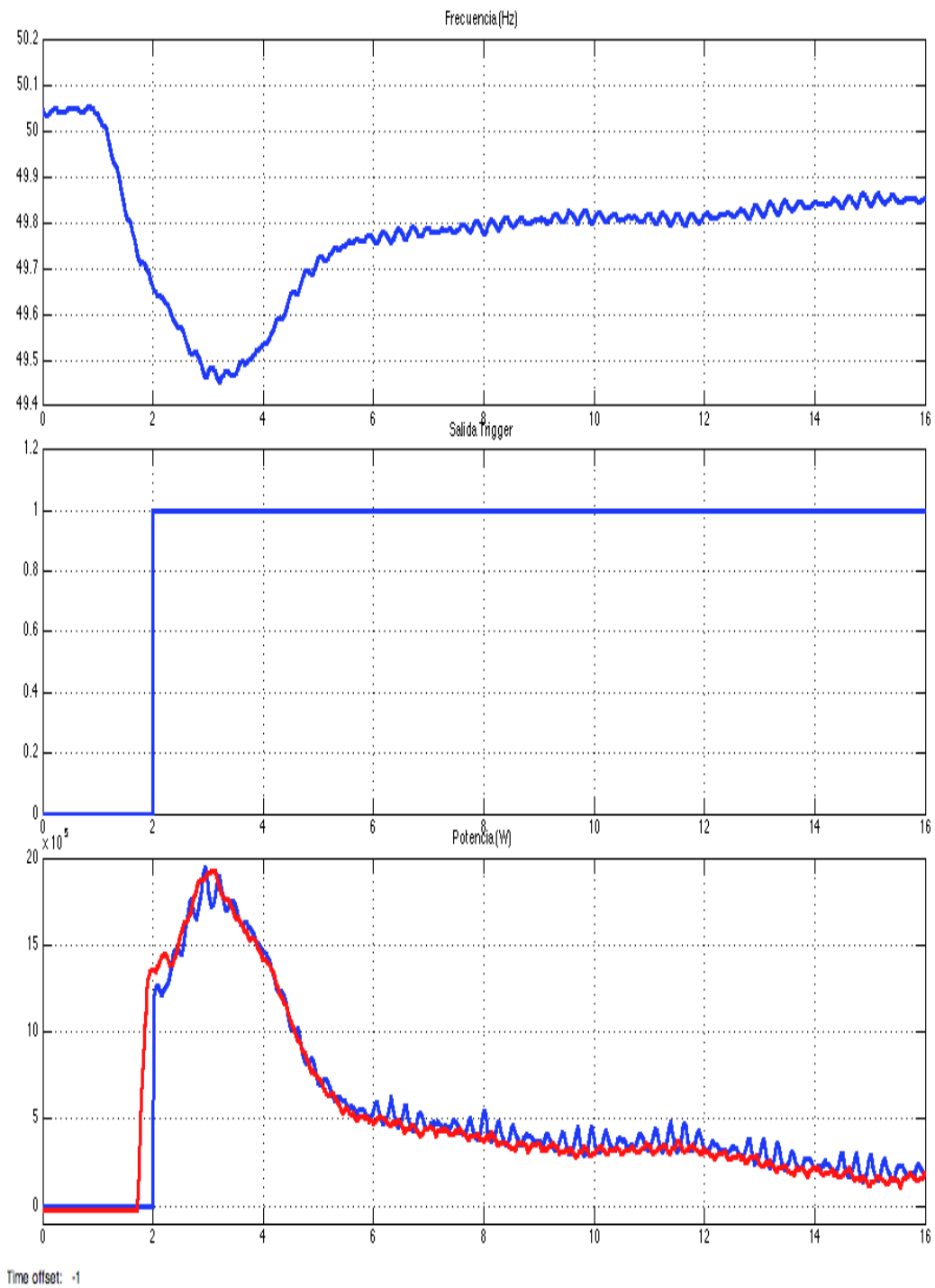


Figura 3.48: Inyección de potencia simulada (azul) y real (rojo), $K_p=100$, $K_d=10$, $P_n=2\text{MW}$, PEM 3

Las figuras anteriores muestran como la respuesta del modelo del ultracondensador creado en Simulink es muy próximo a la inyección real del ultracondensador. El modelo tiene un perfil general que coincide con el de la potencia real casi en su totalidad. Se observa como llega a valores de pico parecidos (menos en la figura 3.47 donde la inyección real es menor a la simulada) y una forma casi idéntica a la real. Sin embargo, la respuesta no ocurre exactamente al mismo tiempo, el modelo inyecta potencia entre 200ms y 400ms más tarde que el ultracondensador real, además de sufrir pequeñas oscilaciones en vez de tener un perfil más filtrado.

Las simulaciones del modelo mostradas en las figuras 3.46, 3.47 y 3.48 se han realizado con distintos valores para la constante proporcional (K_p). Al haber tenido en todos los casos inyecciones de potencia muy parecidas (casi iguales) a las reales, se muestra como el modelo está calibrado correctamente y la variación de las constantes se podría estudiar con el modelo antes de implantarlas en la realidad.

Capítulo 4

Conclusiones y Futuros Desarrollos

En este capítulo se expondrán las conclusiones finales de este proyecto, empezando por las conclusiones que se obtienen de cada uno de los modelos de simulink por separado. A continuación, se resumirán las conclusiones que se obtienen de la validez del modelo completo. Una vez acabadas las conclusiones se propondrán futuros desarrollos a los que da lugar este proyecto.

4.1. Conclusiones

Al comienzo de este proyecto se definió el problema que se debía tratar a lo largo del mismo. Se necesita un sistema o una fórmula que haga que los sistemas eléctricos aislados sean más fiables y no necesiten (salvo en casos de extrema necesidad) deslastres de carga para mantener el equilibrio generación/demanda. Es un problema de ardua actualidad y por eso el trabajo realizado en este proyecto puede servir enormemente a que se estudien posibles implantaciones de sistemas de almacenamiento de energía para resolverlo.

En primer lugar, se presentarán las conclusiones que se obtienen del capítulo 3. A lo largo de dicho capítulo se han ido construyendo bloques en Simulink que se comportaran como el ultracondensador real que se encuentra instalado en la isla de La Palma. Al final del capítulo 3 se presentan las figuras 3.46, 3.47 y 3.48. Estas tres figuras muestran una comparación directa entre el comportamiento del ultracondensador real y el comportamiento del ultracondensador creado en Simulink. A grandes rasgos se puede decir que las respuestas son casi idénticas.

Se debe tener en cuenta que al tratarse de un sistema físico, el ultracondensador real tendrá una pequeña cantidad de pérdidas, lo que puede resultar en una curva real de salida un poco inferior a la ideal deseada por el sistema de inyección. Esto ayuda a explicar la pequeña diferencia entre el valor de potencia real y el valor de potencia simulado. Esta pequeña diferencia es de un 2% aproximadamente, lo que puede representar fácilmente esas pérdidas o potencia activa absorbida por el ultracondensador. Se observa como la tendencia de los perfiles es casi idéntica y como en dos de los tres casos el máximo de potencia se obtiene en el mismo punto tanto para el caso real como para el caso simulado. el tiempo de respuesta también es muy parecido, la diferencia de respuesta entre real y simulado no supera en ningún caso los 350-400ms. Para modificar el tiempo de salida siempre se puede poner un sistema de *Trigger* más sensible, con límites más restrictivos. Por todo lo anterior se puede concluir que el modelo de ultracondensador obtenido es de gran utilidad y replica con gran exactitud el funcionamiento de un ultracondensador real.

Una diferencia que se observa en las figuras 3.46, 3.47 y 3.48, son las pequeñas oscilaciones que se aprecian a lo largo del perfil de potencia simulado. Estas oscilaciones son la amplificación de las pequeñas oscilaciones que sufre la frecuencia. En el caso real estas oscilaciones existen en los cálculos que realiza el sistema de control potencia-frecuencia del ultracondensador. Sin embargo, el ultracondensador no varía potencias tan pequeñas en periodos tan cortos de tiempo. igualmente, estas pequeñas oscilaciones no variarían en absoluto el efecto que tendría el ultracondensador. En el caso de que fuera necesario solucionarlo, se podría incluir un filtro en el modelo que disminuyera esta ampliación de ruido.

El modelo de ultracondensador obtenido permite la fácil modificación de las características clave para el funcionamiento del ultracondensador. Esto le da más valor añadido al modelo ya que se puede utilizar en muchos escenarios para ver como sería su funcionamiento en cualquier sistema eléctrico, teniendo como única entrada la frecuencia del sistema. También permite que se estudie de una forma fácil como funcionaría un sistema de ultracondensadores con mayor potencia nominal con la simplicidad de cambiar una constante del modelo. De esta forma se puede estudiar la potencia necesaria para poder "rescatar" a un sistema que sufre desconexiones o pérdidas de generadores con alta potencia nominal.

Por todo lo descrito en este apartado, así como los comentarios incluidos en el capítulo anterior, se puede concluir que este proyecto cumple con éxito los objetivos propuestos. El modelo replica el funcionamiento del ultracondensador real con gran

exactitud y explica las diferentes características con las que cuenta esta tecnología. Por lo tanto, este proyecto presenta un modelo validado y optimizado de un sistema de ultracondensadores para su uso en sistemas eléctricos aislados.

4.2. Futuros Desarrollos

Este proyecto abre la puerta al estudio de sistemas de almacenamiento de energía en diversos ámbitos. En este proyecto se estudia si son sistemas válidos para estabilizar sistemas eléctricos aislados, sin embargo, hay muchas otras aplicaciones para las cuales se podría utilizar este modelo.

Para el modelo en sí, un desarrollo que podría hacer que fuera más realista de lo que se ha conseguido en este proyecto, sería incluir un bloque de carga. En dicho bloque se debería tener en cuenta en qué momentos se debería hacer la carga y con qué perfil. Con este bloque se cerraría el círculo para el funcionamiento del ultracondensador.

Otro posible desarrollo sería el uso de manera continua del sistema de ultracondensadores para el filtrado de la frecuencia. Esto se haría asignando parte de la energía de los ultracondensadores (entre el 10 % y el 15 %) para que se inyectara potencia de forma permanente para mantener un nivel más constante de frecuencia.

Por otro lado, el modelo conseguido en este proyecto funciona en lazo abierto, un modelo estático. Se debería implementar en una simulación que incluya el sistema eléctrico de la isla de la Palma para así poder observar la variación a tiempo real de la frecuencia.

Finalmente, la tecnología propuesta tiene otro uso más común como sistema de control de tensión mediante el uso de potencia reactiva. Se le podría incluir al modelo los bloques para inyectar o absorber potencia reactiva ante huecos de tensión.

Bibliografía

- [1] Ong, Chee-Mun, *Dynamic Simulation of Electrical Machinery using MatLab/Simulink*, Prentice Hall PTR, Nueva Jersey, 1998.
- [2] P. Kundur, *Power System Stability and Control* Mc Graw Hill Inc, 1994. 14
- [3] Elices A., L. Rouco, *Análisis Fundamental del Impacto de la Reserva Primaria en Sistemas Eléctricos Aislados*, 7^{as} Jornadas hispano-lusas de ingeniería eléctrica. Vol. II, pp335-340. Madrid, España, 4-6 Julio 2001. 14
- [4] Rodríguez J., M. González, J.R. Diago Ruíz, C. Domingo, I. Egido, P. Centeno, F. Fernández-Bernal, L. Rouco, *Un esquema centralizado de deslastre de cargas para pequeños sistemas aislado*, 9^{as} Jornadas Hispano-lusas de Ingeniería Eléctrica. Marbella, Málaga, España, 30 Junio-2-Julio 2005. 15
- [5] Grigsby, Leonard L., *Power System Stability and Control*, CRC Press, Segunda Edición, 2006.
- [6] Red Eléctrica de España, <http://www.ree.es>
- [7] Islas Canarias, <http://www.islas-canarias.es>
- [8] Tecmovia, <http://www.tecmovia.com>

Apéndice A

Avance del Informe del Sistema
Eléctrico Español 2013

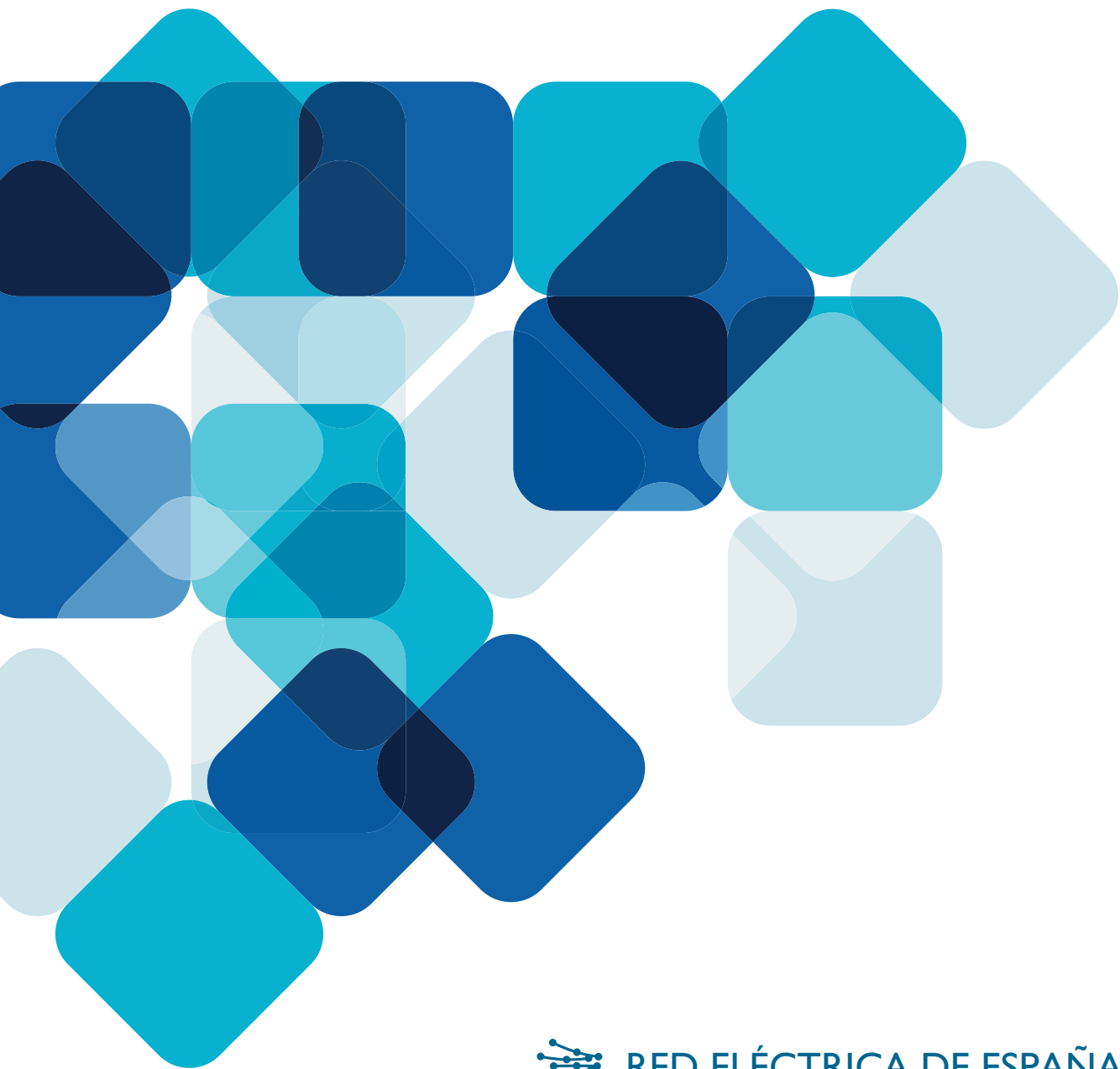
Extracto páginas 19-26

Fuente: Red Eléctrica de España

el sistema eléctrico español

AVANCE DEL INFORME

2013



RED ELÉCTRICA DE ESPAÑA

Fecha de redacción:

19 de diciembre del 2013

Datos provisionales:

Cierre de año con datos estimados a 17 de diciembre

Sistemas extrapeninsulares

3.1 Demanda

3

Balance eléctrico anual

| | Islas Baleares | | Islas Canarias | | Ceuta | | Melilla | |
|--|----------------|--------------|----------------|-------------|------------|-------------|------------|--------------|
| | GWh | % 13/12 | GWh | % 13/12 | GWh | % 13/12 | GWh | % 13/12 |
| Hidráulica | - | - | 0 | - | - | - | - | - |
| Carbón | 2.591 | -11,9 | - | - | - | - | - | - |
| Fuel/gas | 1.296 | -1,4 | 5.243 | -8,9 | 220 | -5,4 | 216 | -6,1 |
| Motores de combustión interna ⁽¹⁾ | 769 | -20,4 | 2.182 | -2,3 | 220 | -5,3 | 216 | -6,0 |
| Turbina de gas | 527 | 51,5 | 382 | -36,4 | 0,2 | -57,3 | 0,1 | -45,1 |
| Turbina de vapor | - | - | 2.679 | -8,4 | - | - | - | - |
| Ciclo combinado | 427 | -54,7 | 3.147 | 5,8 | - | - | - | - |
| Generación auxiliar ⁽²⁾ | 7 | -14,9 | 0 | - | - | - | - | - |
| Régimen ordinario | 4.322 | -17,0 | 8.390 | -3,9 | 220 | -5,4 | 216 | -6,1 |
| Consumos en generación | -302 | -13,4 | -437 | -6,3 | -18 | -11,7 | -14 | -4,5 |
| Hidráulica | - | - | 3 | 67,4 | - | - | - | - |
| Eólica | 6 | -4,5 | 369 | 2,0 | - | - | - | - |
| Solar fotovoltaica | 127 | 12,6 | 288 | 12,6 | - | - | 0,04 | -50,0 |
| Térmica renovable | 1 | 14,1 | 9 | 11,2 | - | - | - | - |
| Térmica no renovable | 252 | -7,3 | 0 | - | - | - | 8 | 258,2 |
| Régimen especial | 386 | -1,5 | 668 | 6,6 | - | - | 8 | 247,4 |
| Generación neta | 4.405 | -16,1 | 8.621 | -3,0 | 202 | -4,8 | 210 | -3,4 |
| Enlace Penín.-Baleares ⁽³⁾ | 1.266 | - | - | - | - | - | - | - |
| Demanda (b.c.) | 5.671 | -2,5 | 8.621 | -3,0 | 202 | -4,8 | 210 | -3,4 |

(1) Incluye generadores cuyo combustible principal es el fueloil, gasoil y gas natural. (2) Grupos de emergencia que se instalan de forma transitoria en determinadas zonas para cubrir un déficit de generación. (3) Enlace Península-Baleares funcionando al mínimo técnico de seguridad hasta el 13/08/2012. Valor positivo: saldo importador; Valor negativo: saldo exportador.

Potencia instalada a 31 de diciembre

| | Islas Baleares | | Islas Canarias | | Ceuta | | Melilla | |
|--|----------------|------------|----------------|------------|-----------|------------|-----------|------------|
| | MW | % 13/12 | MW | % 13/12 | MW | % 13/12 | MW | % 13/12 |
| Hidráulica | - | - | 1 | 0,0 | - | - | - | - |
| Carbón | 510 | 0,0 | - | - | - | - | - | - |
| Fuel/gas | 877 | 6,0 | 1.918 | 1,0 | 99 | 0,0 | 85 | 0,0 |
| Motores de combustión interna ⁽¹⁾ | 199 | 0,0 | 566 | 3,6 | 83 | 0,0 | 70 | 0,0 |
| Turbina de gas | 678 | 8,0 | 639 | 0,0 | 16 | 0,0 | 15 | 0,0 |
| Turbina de vapor | - | - | 713 | 0,0 | - | - | - | - |
| Ciclo combinado | 934 | 0,0 | 920 | 0,0 | - | - | - | - |
| Generación auxiliar | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Régimen ordinario | 2.321 | 2,2 | 2.839 | 0,7 | 99 | 0,0 | 85 | 0,0 |
| Hidráulica | - | - | 0,5 | 0,0 | - | - | - | - |
| Eólica | 4 | 0,0 | 150 | 3,2 | - | - | - | - |
| Solar fotovoltaica | 78 | 0,3 | 166 | 2,2 | - | - | 0,1 | 0,0 |
| Térmica renovable | 2 | 0,0 | 3 | 164,8 | - | - | - | - |
| Térmica no renovable | 86 | 0,0 | 33 | 0,0 | - | - | 2 | 0,0 |
| Régimen especial | 169 | 0,1 | 353 | 3,0 | - | - | 2 | 0,0 |
| Total | 2.490 | 2,1 | 3.192 | 0,9 | 99 | 0,0 | 87 | 0,0 |

(1) Incluye generadores cuyo combustible principal es el fueloil, gasoil y gas natural.

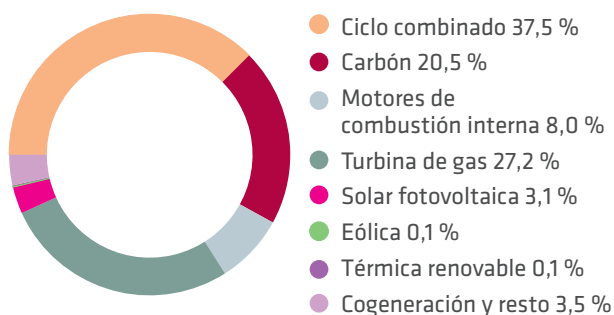
3

Sistemas extrapeninsulares

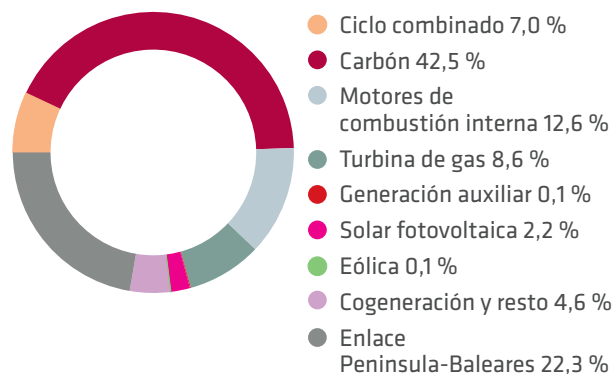
3.1 Demanda

Islas Baleares

Potencia instalada a 31 de diciembre del 2013 (2.490 MW)

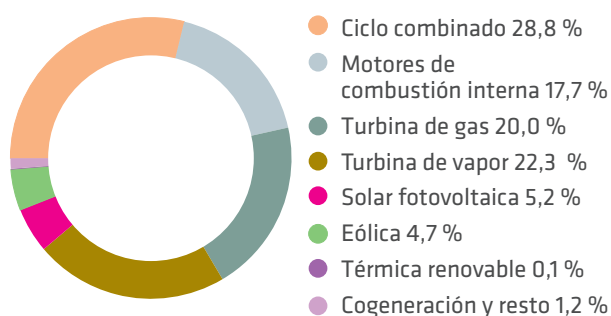


Cobertura de la demanda

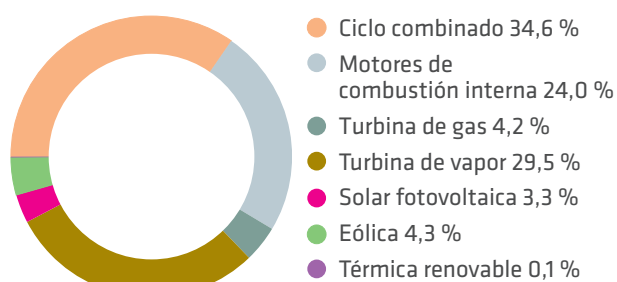


Islas Canarias

Potencia instalada a 31 de diciembre del 2013 (3.192 MW)



Cobertura de la demanda



Sistemas extrapeninsulares

3.1 Demanda



Crecimiento mensual de la demanda (%)

| | E | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D |
|----------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|
| Islas Baleares | -2,8 | -16,0 | -2,3 | -0,8 | -0,8 | -10,0 | 1,7 | -6,3 | 0,1 | 2,5 | 6,7 | 2,8 |
| Islas Canarias | -3,5 | -6,8 | -4,0 | 1,1 | -2,4 | -5,6 | -2,5 | -3,2 | -5,2 | -2,2 | -2,3 | 0,5 |
| Ceuta | -3,3 | -13,8 | -12,6 | -12,6 | -10,3 | -9,9 | 0,6 | 2,1 | 1,2 | -4,2 | 2,4 | 2,2 |
| Melilla | -5,7 | -12,3 | -6,7 | -1,3 | -2,4 | -9,5 | -5,4 | -3,0 | 0,5 | 1,1 | 6,1 | -0,2 |

Variación respecto al mismo mes del año anterior.

Máxima demanda horaria y diaria

| Demanda horaria (MWh) | | | Demanda diaria (MWh) | |
|-----------------------|-------------------------|----------------|----------------------|--------|
| 976 | 26 febrero (20-21 h) | Islas Baleares | 4 octubre | 18.279 |
| 1.187 | 7 agosto (21-22 h) | | 7 agosto | 23.373 |
| 1.352 | 2 octubre (20-21 h) | Islas Canarias | 1 octubre | 25.567 |
| 1.336 | 30 septiembre (20-21 h) | | 23 agosto | 26.853 |
| 36 | 28 febrero (20-21 h) | Ceuta | 24 enero | 642 |
| 35 | 5 septiembre (13-14 h) | | 21 agosto | 657 |
| 36 | 12 febrero (20-21 h) | Melilla | 3 octubre | 644 |
| 37 | 26 agosto (13-14 h) | | 6 agosto | 714 |

■ Invierno (enero-mayo/octubre-diciembre) ■ Verano (junio-septiembre)

Evolución de la demanda

| | Islas Baleares | | Islas Canarias | | Ceuta | | Melilla | |
|-------------|----------------|-------------|----------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|
| | GWh | Δ anual (%) | GWh | Δ anual (%) | GWh | Δ anual (%) | GWh | Δ anual (%) |
| 2009 | 5.993 | -2,1 | 9.107 | -2,4 | 212 | 0,9 | 206 | 2,4 |
| 2010 | 5.840 | -2,5 | 8.895 | -2,3 | 218 | 2,8 | 213 | 3,6 |
| 2011 | 5.743 | -1,7 | 8.870 | -0,3 | 203 | -6,7 | 215 | 0,7 |
| 2012 | 5.820 | 1,3 | 8.891 | 0,2 | 212 | 4,5 | 217 | 1,1 |
| 2013 | 5.671 | -2,5 | 8.621 | -3,0 | 202 | -4,8 | 210 | -3,4 |

3

Sistemas extrapeninsulares

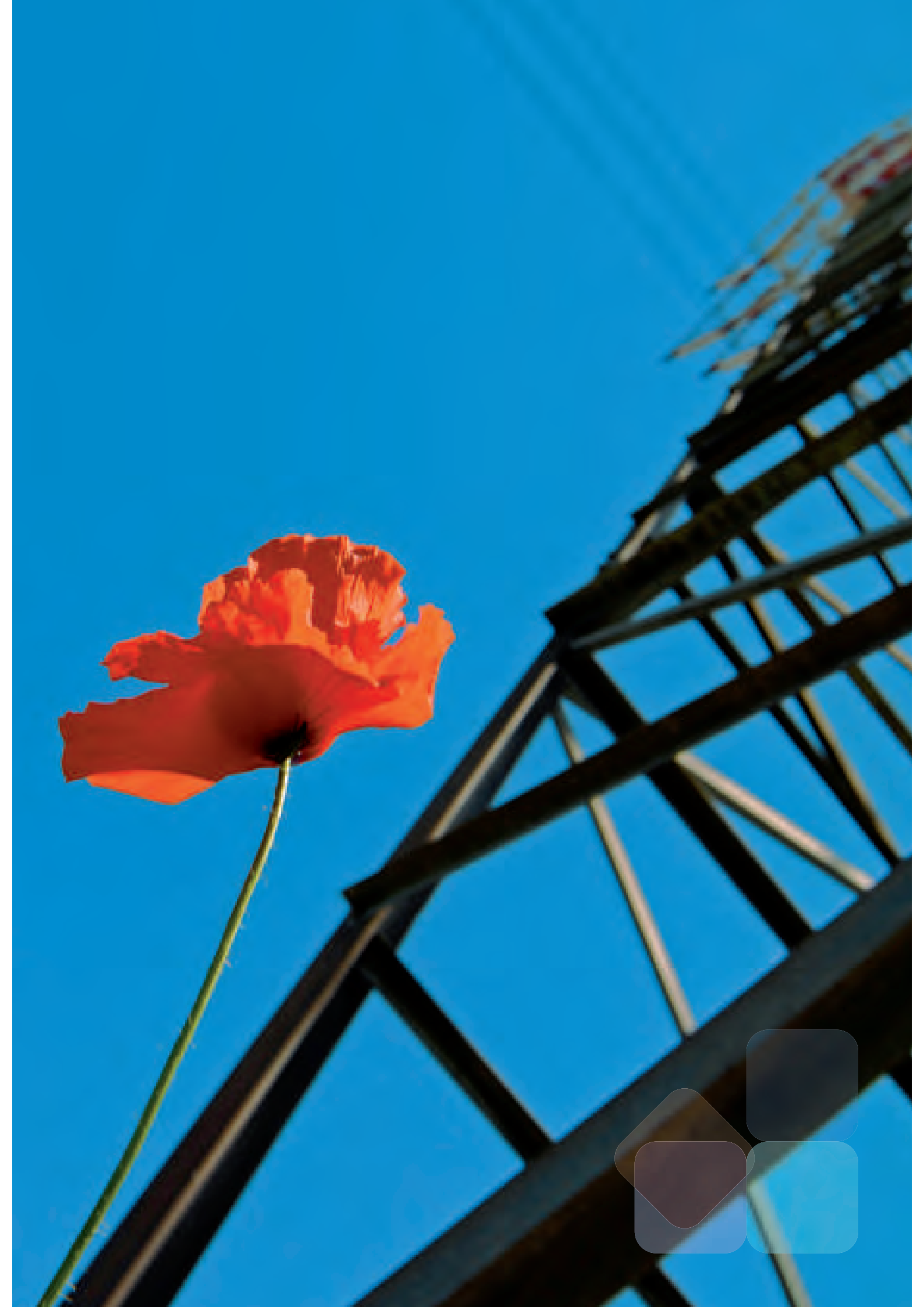
3.2 Instalaciones. Generación y transporte

Variaciones del equipo generador del régimen ordinario

| | Altas | | Bajas | |
|-------------------------|-------------------------------|-----------|---------------------|-----------|
| | Tipo | MW | Tipo | MW |
| Islas Baleares | | | | |
| Formentera AUX | Grupos electrógenos | 10 | Grupos electrógenos | 10 |
| Ibiza TG7 (A y B) | Turbina de gas | 50 | | |
| Islas Canarias | | | | |
| Llanos Blancos grupo 16 | Motores de combustión interna | 2 | | |
| Punta Grande grupo 11 | Motores de combustión interna | 18 | | |
| Total | | 80 | | 10 |

Evolución del sistema de transporte y transformación

| | | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 |
|-----------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Circuito 220 kV (km) | Baleares | 185 | 185 | 430 | 430 | 430 |
| | Canarias | 163 | 163 | 163 | 163 | 163 |
| | Total | 348 | 348 | 594 | 594 | 594 |
| Circuito 132 kV (km) | Baleares | 199 | 206 | 220 | 220 | 220 |
| | Canarias | - | - | - | - | - |
| | Total | 199 | 206 | 220 | 220 | 220 |
| Circuito < 132 kV (km) | Baleares | 884 | 890 | 890 | 893 | 893 |
| | Canarias | 1.127 | 1.129 | 1.129 | 1.129 | 1.129 |
| | Total | 2.011 | 2.018 | 2.019 | 2.022 | 2.022 |
| Capacidad de transformación (MVA) | Baleares | 1.998 | 1.998 | 2.248 | 2.498 | 2.748 |
| | Canarias | 1.375 | 1.625 | 1.625 | 1.625 | 1.625 |
| | Total | 3.373 | 3.623 | 3.873 | 4.123 | 4.373 |





Glosario

Ciclo combinado. Tecnología de generación de energía eléctrica en la que coexisten dos ciclos termodinámicos en un sistema: uno, cuyo fluido de trabajo es el vapor de agua, y otro, cuyo fluido de trabajo es un gas. En una central eléctrica el ciclo de gas genera energía eléctrica mediante una turbina de gas y el ciclo de vapor de agua lo hace mediante una o varias turbinas de vapor. El calor generado en la combustión de la turbina de gas se lleva a una caldera convencional o a un elemento recuperador del calor y se emplea para mover una o varias turbinas de vapor, incrementando el rendimiento del proceso. A ambas turbinas, de gas y vapor, van acoplados generadores eléctricos.

Consumos de bombeo. Energía empleada en las centrales hidráulicas de bombeo para elevar el agua desde el vaso inferior hasta el superior para su posterior turbinación.

Consumos de generación. Energía utilizada por los elementos auxiliares de las centrales, necesaria para el funcionamiento de las instalaciones de producción.

Energía producible. Cantidad máxima de energía eléctrica que teóricamente se podría producir considerando las aportaciones hidráulicas registradas durante un determinado periodo de tiempo y una vez deducidas las detracciones de agua realizadas para riego o para otros usos distintos de la producción de energía eléctrica.

Índice de producible hidráulico. Cociente entre la energía producible y la energía producible media, referidas ambas a un mismo periodo y a un mismo equipo hidroeléctrico.

Intercambios internacionales físicos. Comprende todos los movimientos de energía que se han realizado a través de las líneas de interconexión internacional durante un periodo determinado de tiempo. Incluye las circulaciones en bucle de la energía consecuencia del propio diseño de la red.

Régimen especial. Producción de energía eléctrica realizada en instalaciones cuya potencia instalada no supera los 50 MW, a partir de cogeneración u otras formas de producción de electricidad asociadas a actividades no eléctricas, siempre que supongan un alto rendimiento energético, o en grupos donde se utilicen como fuente de energía primaria alguna de las energías renovables no consumibles, biomasa o cualquier tipo de biocarburante, o residuos no renovables o procedentes de los sectores agrícola, ganadero y de servicios, con una potencia instalada igual o inferior a 25 MW, cuando supongan un alto rendimiento energético. La producción en régimen especial está acogida a un régimen económico singular.

Régimen ordinario. Producción de energía eléctrica procedente de todas aquellas instalaciones no acogidas al régimen especial.

Reservas hidroeléctricas de un embalse. Cantidad de energía eléctrica que se produciría en su propia central y en todas las centrales situadas aguas abajo, con el vaciado completo de su reserva útil de agua en dicho momento, en el supuesto de que este vaciado se realice sin aportaciones naturales. Los embalses de régimen anual son aquellos en los que, supuesto el embalse a su capacidad máxima, el vaciado del mismo se realizaría en un período inferior a un año. Los de régimen hiperanual, son aquellos en los que el tiempo de vaciado es superior al año.

Edita

Red Eléctrica de España, S.A.U.

Coordinación de la edición

Departamento de Comunicación e Imagen Corporativa

Coordinación técnica

Departamento de Estadística e Información

Impresión

EPES Industrias Gráficas, S.L.

Depósito legal

M-35950-2013



Red Eléctrica trabaja en la selección de las fuentes tipográficas más legibles en sus publicaciones.

Los textos y gráficos de este libro se han compuesto con la fuente tipográfica Klavika.



Papel proveniente de bosques gestionados de forma sostenible y responsable.



RED ELÉCTRICA
DE ESPAÑA

www.ree.es

Síguenos en:



Paseo del Conde de los Gaitanes, 177
28109 Alcobendas (Madrid)

Apéndice B

Battery Storage System PSS/E

Dynamic Model Specification

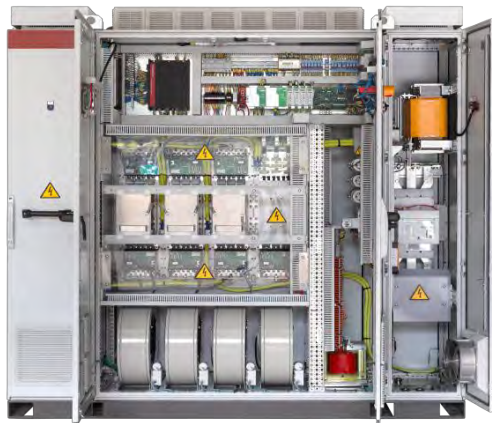
Extracto páginas 6-9

Fuente: SAFT Baterías S.L.

**Power Conversion System (PCS)
1MW / 400V AC
For SAFT Baterías S.L.
Corresponding to our Offer nº 1220500841 Rev B**

Internal Reference AT0213

**Battery Storage System PSS/E Dynamic Model
Specification**



5 Electrical Control Module

The electrical control module calculates the active and reactive power commands when the plant operates in normal grid conditions.

Figure 4 shows the complete structure of the module. The following subsections describe in detail the block diagrams of the different active and reactive control functions.

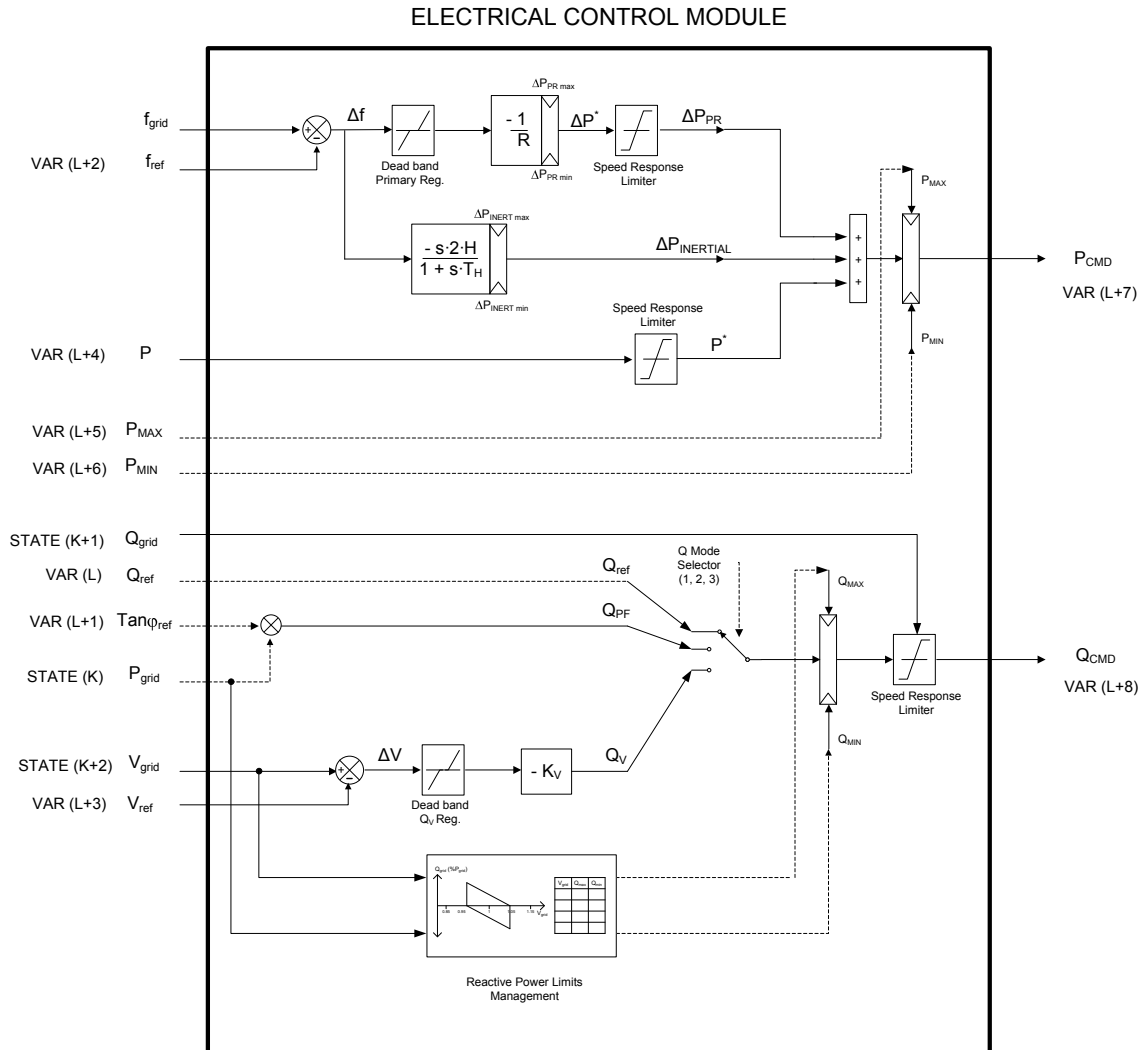


Figure 4 - Block diagram of the electrical control module

The block inputs are:

- Active and reactive power measurement (P_{grid} , Q_{grid}), voltage RMS value (V_{grid}) and grid frequency (f_{grid}) provided by the block MEASUREMENTS. STATE (K) to STATE (K+2).
- Reactive power reference (Q_{ref}), power factor reference ($\tan\phi_{ref}$), voltage reference (V_{ref}) and frequency reference (f_{ref}). VAR (L) to VAR (L+3).
- Active power (P) and maximum and minimum limit values (P_{MAX} , P_{MIN}) provided by the block BATTERY ENERGY MODULE. VAR (L+4) to VAR (L+6).

The block outputs are:

- Active power command (P_{CMD}). VAR (L+7).
- Reactive power command (Q_{CMD}). VAR (L+8).

5.1 Active power control

The active power control, shown in Figure 5, provides the active power setting P_{CMD} as the combination of the primary regulation response, the inertial response and the active power value supplied by the battery energy unit. The change of this value is limited by a ramp.

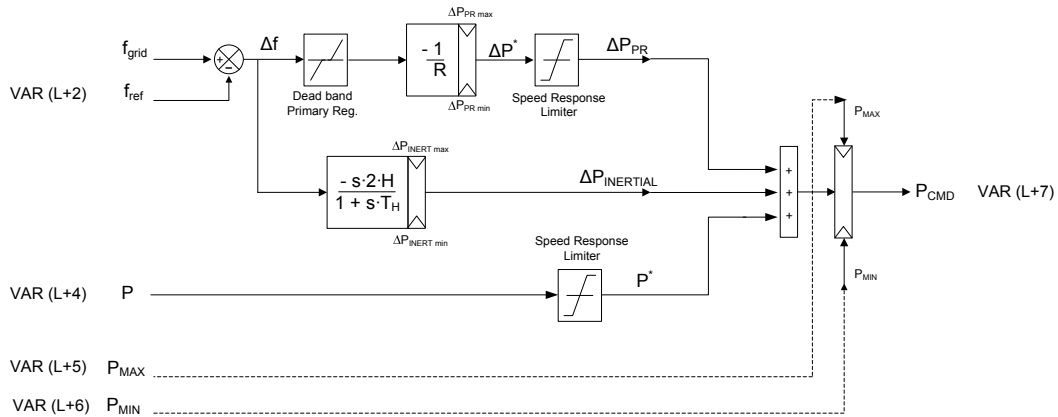


Figure 5 - Block diagram of P-f control

5.1.1 Primary frequency control

The primary frequency control provides the plant response based on a droop characteristic with a dead band, as shown in Figures 6 and 7. The parameters of the block are detailed in Table 2.

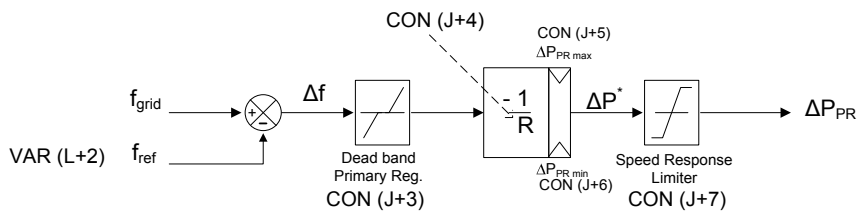


Figure 6 - Block diagram of the primary frequency control

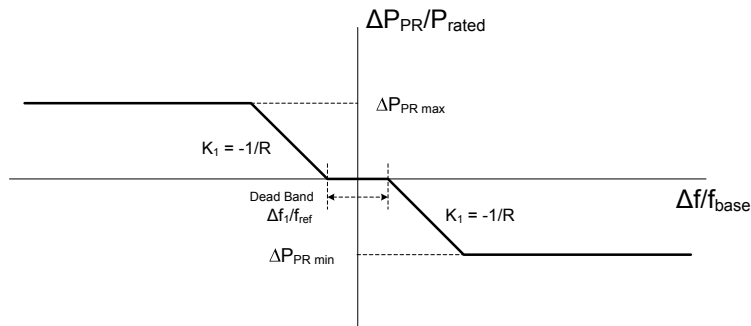


Figure 7 - Droop characteristic of the primary frequency control

| Parameter | CON | Minimum value | Maximum value | Setting Value |
|---|-----|---------------|---------------|---------------|
| $\Delta f_1/f_{base}$, Primary response dead band (pu) | J+3 | 0.0006 | 0.004 | * |
| R, Droop (Hz p.u./MW p.u.) | J+4 | 1/50 | 1/15 | * |
| $\Delta P_{PR\ max}$, Max. limit for primary response (pu) | J+5 | 0 | 1 | 1 |
| $\Delta P_{PR\ min}$, Min. limit for primary response (pu) | J+6 | -1 | 0 | -1 |
| $\Delta P/\Delta t$, Primary regulation response ramp (pu/s) | J+7 | 0 | 0.2 | 0.2 |

Table 2 - Range of variation and settings of parameters for primary frequency control

5.1.2 Virtual inertia

The emulation of the inertial response is represented in Figure 8, and the parameters of the function in Table 3.

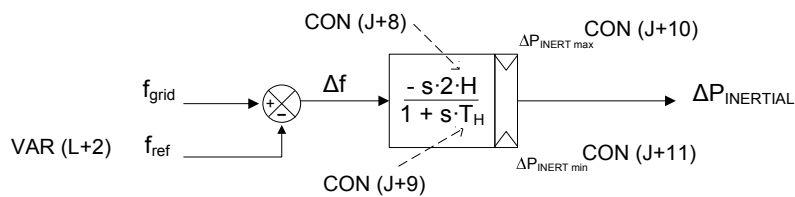


Figure 8 - Block diagram for the emulation of the inertial response

A value of 0 in the inertia constant H cancels the inertial response.

| Parameter | CON | Minimum value | Maximum value | Setting value |
|---|------|---------------|---------------|---------------|
| H, Inertia constant (s) | J+8 | 0 | 20 | * |
| T_H , Inertial response time constant (s) | J+9 | 0.2 | 1 | 0.2 |
| $\Delta P_{INERT\ max}$, Max. limit for inertial response (pu) | J+10 | 0 | 1 | 1 |
| $\Delta P_{INERT\ min}$, Min. limit for inertial response (pu) | J+11 | -1 | 0 | -1 |

Table 3 - Range of variation and settings for the emulation of the inertial response

5.1.3 Ramp limit

The change in the output of the Battery energy system is limited by a ramp that fixes a maximum rate of change of active power per time unit. This is the only configurable parameter of this block.

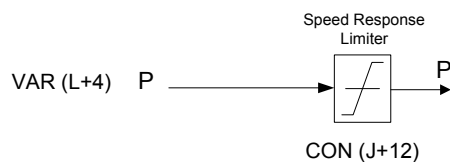


Figure 9 - Block diagram for power ramp limit

| Parameter | CON | Minimum value | Maximum value | Setting Value |
|--|------|---------------|---------------|---------------|
| $\Delta P/\Delta t$, Active power ramp limit (pu/s) | J+12 | 0 | 10 | 0.2 |

Table 4 - Range of variation and settings for power reduction and ramp limit

5.1.4 Limitation of the response of the active power control

The total active power setting is obtained as the sum of the power input plus the terms corresponding to primary, inertial and power reduction responses. This value is finally limited according to the battery power output limits, as shown in Figure 10.

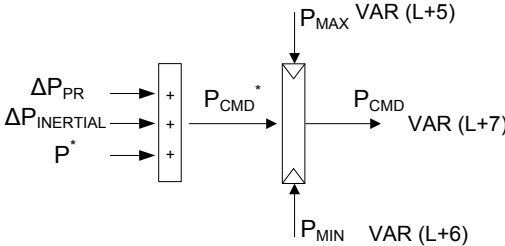


Figure 10 - Block diagram of the limitation of the response of the active power control

5.2 Reactive power control

The reactive power control system provides the reactive power setting value Q_CMD (Figure 11). The value of reactive power supplied to the grid can be controlled by:

- Mode 1 (ICON (M+2) = 1): fixed reactive power output (Q_ref)
- Mode 2 (ICON (M+2) = 2): fixed power factor (Q_PF)
- Mode 3 (ICON (M+2) = 3): voltage control (Q_V)

The control mode can be selected by specifying the appropriate value of the parameter Q Mode Selector (ICON (M+2)).

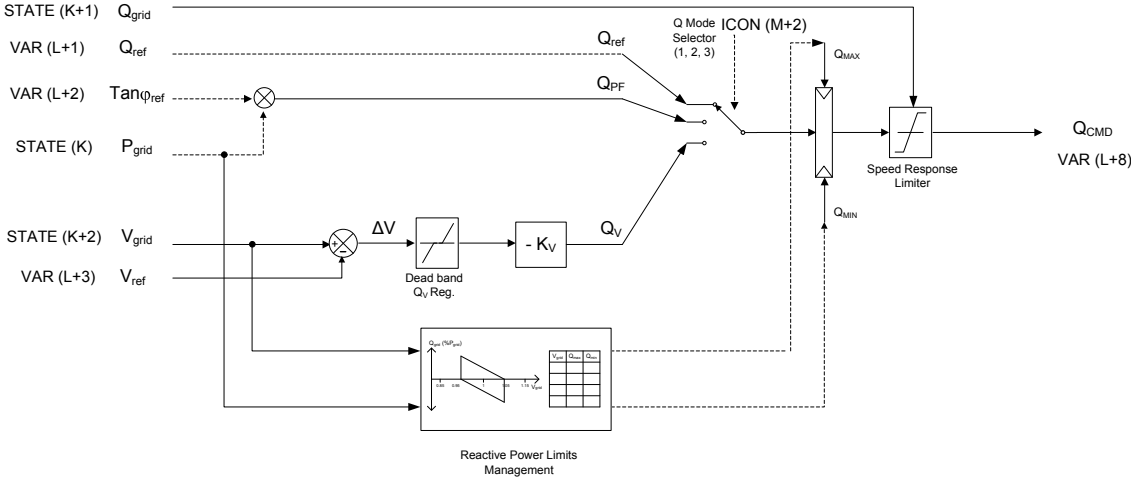


Figure 11 - Block diagram of the reactive power control

ESTUDIO ECONÓMICO

Esta parte del proyecto está dedicada al estudio económico del mismo. Al ser un proyecto de investigación se va a dar información superficial de los impactos económicos que puede tener.

En este proyecto se ha desarrollado un modelo de un sistema de ultracondensadores que se puede utilizar como parte del control potencia-frecuencia de una instalación. En primer lugar, se puede utilizar dicho modelo para realizar pruebas con distintos perfiles de frecuencia, como se muestra a lo largo de la memoria. Esto supondría un ahorro en cuanto a que no se tendrían que realizar dichas prueba en planta desconectando grupos generadores.

En segundo lugar, la viabilidad que muestra el modelo presentado puede hacer que se utilicen este tipo de sistemas de almacenamiento de energía en los sistemas eléctricos aislados. El uso de estos sistemas haría que la fiabilidad del suministro eléctrico fuese mayor. Esto contribuiría, en parte, a que las empresas que suministran energía no corrieran tanto riesgo de ser multadas por los Consejos de Gobierno. Las multas a las que ya se han tenido que enfrentar estas empresas son de hasta 6 millones de Euros¹. Por lo tanto supondría un ahorro considerable.

Al no poder acceder a los datos de los costes de las actividades mencionadas, no se propondrá un valor económico de ahorro. Aunque no se cuente con un valor numérico, se puede valorar de forma positiva desde el punto de vista económico el uso de este proyecto y de la tecnología que emplea.

¹www.europapress.es

Documento II

PRESUPUESTO

En este documento se muestran los distintos costes de la realización de este proyecto así como la forma en la que se han calculado. El documento cuenta con cuatro apartados. En el primer apartado se precisan los costes de la mano de obra. En el segundo apartado se cualifican los costes del software utilizado y en el tercer apartado los costes del hardware utilizado. Con todo lo anterior, se obtiene en el último apartado el coste total del proyecto.

Coste de la Mano de Obra

El tiempo total invertido en la realización de este proyecto ha sido de 300 horas aproximadamente. Un ingeniero cobra alrededor de 55€ por hora. Por lo tanto:

$$C_{MdO} = tiempo(horas) \times Precio/hora(€/h) = 300 \times 55 = 16500€$$

Coste del Software

Este proyecto se ha llevado a cabo utilizando los siguientes programas, a los que se les debe tener en cuenta el coste de la licencia:

- MatLab versión 7.14/Simulink: se tienen dos opciones:
 - MatLab para uso académico: 500€
 - MatLab para uso en empresa: 2000€

Se utilizará el coste de la versión académica al ser un proyecto fin de carrera.

- \LaTeX : Programa que se puede descargar e instalar de forma gratuita desde internet, no representa ningún coste.
- Microsoft Office Excel: 135€

Por lo tanto el coste total del software es el siguientes: $C_{software} = 635€$.

Coste del Hardware

Para realizar el proyecto se ha utilizado un ordenador portátil MacBook Pro del año 2010, utilizando sistema operativo OS X 10.9.2. El valor aproximado de este hardware es de $C_{hardware} = 1000€$.

Coste Total

Para obtener el coste total del proyecto se utilizan los datos anteriores y se calcula de la siguiente forma:

$$C_{Total} = C_{MdO} + C_{software} + C_{hardware} = 16500 + 635 + 1000 = 18135\text{€}$$

ESTE PROYECTO ESTÁ COMPUESTO POR LOS SIGUIENTES DOCUMENTOS:

DOCUMENTO 1, MEMORIA

| | | |
|------------------------------|------------------|------------|
| Parte I: Memoria Descriptiva | Páginas 11 a 106 | 95 Páginas |
| Parte II: Estudio Económico | Páginas 109 | 1 Página |

DOCUMENTO 2, PRESUPUESTO

| | | |
|-------------|---------------|-----------|
| Presupuesto | Páginas 3 a 4 | 2 Páginas |
|-------------|---------------|-----------|