



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS
INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

**Sistemas de recuperación de energía en la
red ferroviaria**

Autor: Jaime Mateos Rojas

Director: Agustín Martín Hermosilla

Madrid

Julio de 2026

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
Sistemas de recuperación de energía en la red ferroviaria
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2025/2026 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido
tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Jaime Mateos Rojas Fecha: 29 / 01 / 2026

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Agustín Martín Hermosilla Fecha: 29 / 01 / 2026

Declaración de originalidad

Declaro bajo mi responsabilidad que el Proyecto presentado con el título [**Sistemas de recuperación de energía en la red ferroviaria**] e la ETS de Ingeniería – ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico [2025-2026] es de mi autoría y no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Uso de Inteligencia Artificial¹

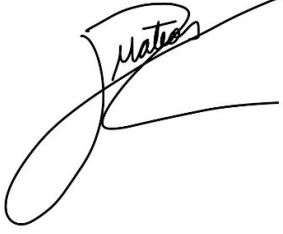
Declaro bajo mi responsabilidad que (indicar la opción correcta):


- No he utilizado Inteligencia Artificial en la elaboración del presente documento.
- ✓ He utilizado Inteligencia Artificial en la elaboración del presente documento y/o del Anexo B siempre en las condiciones permitidas por la Universidad Pontificia Comillas, es decir, aplicando el Nivel 2 de la [Escala de Evaluación de Perkins et al. \(2024\)](#): *“La IA puede utilizarse para actividades previas a la tarea, como la lluvia de ideas, la descripción y la investigación inicial. Este nivel se centra en el uso de la IA para la planificación, las síntesis y la generación de ideas, pero las evaluaciones deben hacer hincapié en la capacidad de desarrollar y refinar estas ideas de forma independiente”*. En concreto, las Inteligencia Artificial ha sido empleada para:

Investigación inicial del sector

¹ Esta declaración se refiere al uso de la Inteligencia Artificial generativa para realizar los documentos del Proyecto (Anexo B y Memoria). No aplica a Proyectos donde, por su naturaleza, deban emplear inteligencia artificial como parte de los mismos (aplicación de técnicas de aprendizaje automático, redes neuronales, análisis de datos...)

Autorización para la entrega del Proyecto


Firmado (alumno): Jaime Mateos Rojas
Fecha: 06/06/2026

El director del proyecto	El co-director del proyecto (si aplica)
	
Fdo: Agustín Martín Hermosilla	Fdo:
Fecha: 04/06/2026	Fecha:



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS
INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

**Sistemas de recuperación de energía en la
red ferroviaria**

Autor: Jaime Mateos Rojas

Director: Agustín Martín Hermosilla

Madrid

Agradecimientos

En primer lugar, deseo expresar mi más sincero agradecimiento a todo el cuerpo docente de la Universidad por los conocimientos, valores y herramientas que me han brindado a lo largo de estos años de formación académica y personal.

También, quiero manifestar mi profunda gratitud a mi director de trabajo de fin de grado, Agustín Martín Hermosilla, por su constante disposición, guía y valioso apoyo. Sus pautas e indicaciones, siempre precisas y pertinentes, han sido fundamentales para orientar el desarrollo de este trabajo y llevar a buen término el presente proyecto.

A Mencía Marzal Higuero, por su infinita paciencia y animo en momentos de estudio.

Finalmente, deseo dedicar un agradecimiento muy especial a mi familia. Su apoyo incondicional y su confianza constante a lo largo de todos estos años de formación han sido el pilar fundamental para hacer posible la culminación de este proyecto.

SISTEMAS DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA EN LA RED FERROVIARIA

Autor: Mateos Rojas, Jaime.

Director: Martín Hermosilla, Agustín.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

RESUMEN DEL PROYECTO

Diseño de un sistema de regeneración de energía en paralelo con una subestación ferroviaria unidireccional ya existente, integrando etapas de conversión, inversión y filtrado. Partiendo de un caso base, se deducen las ecuaciones del modelo y se desarrolla mediante simulación su funcionamiento, control y extrapolabilidad a otros contextos.

Palabras clave: frenado regenerativo, subestación reversible, inversor, convertidor.

1. Introducción

El sector del transporte ferroviario se enfrenta al reto continuo de mejorar su eficiencia energética y reducir su impacto medioambiental. En los sistemas de tracción tradicionales alimentados por corriente continua (CC), las subestaciones eléctricas son unidireccionales. Como consecuencia, cuando un tren realiza un frenado regenerativo y no hay otros trenes cercanos que puedan absorber esa energía, el exceso de tensión obliga a disipar dicha energía cinética en forma de calor a través de las resistencias reostáticas. Esto supone una pérdida significativa de energía útil. Por tanto, la modernización de la infraestructura mediante la implementación de subestaciones reversibles se presenta como una solución técnica y ecológica para recuperar energía y devolverla a la red de corriente alterna (CA).

2. Definición del Proyecto

El objetivo y alcance principal de este proyecto es el diseño, cálculo y simulado de un sistema de regeneración de energía capaz de operar en paralelo con una subestación ferroviaria unidireccional ya existente. Al optar por una topología en paralelo, se evita la necesidad de reemplazar los rectificadores de tracción originales, reduciendo los costes de instalación y garantizando que el suministro básico a los trenes no se vea interrumpido en caso de fallo del sistema regenerador. Asimismo, se partirá de un caso base, el cual cuenta con un tramo de línea con catenaria continua, que dará las condiciones de contorno necesarias para la realización del dimensionado.

3. Descripción del modelo/sistema/herramienta

La arquitectura del sistema de regeneración diseñado se compone de cuatro etapas fundamentales, encargadas de adecuar la energía desde la catenaria hasta la red eléctrica nacional [1], [2], [3].

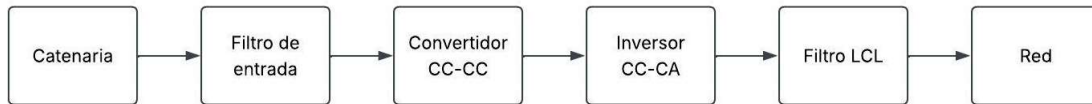


Ilustración 1. Arquitectura del sistema de recuperación de energía.

Filtro de entrada: se encarga de mitigar las perturbaciones provenientes de la catenaria.

Convertidor (CC-CC): proporciona aislamiento galvánico y permite regular el nivel de tensión proveniente de la catenaria de forma previa a la etapa de inversión.

Inversor (CC-CA): permitiendo sintetizar una señal trifásica de tensión alterna a partir del bus de continua. Además, se usará un seguidor de red por corriente para garantizar un acoplamiento seguro con la red eléctrica.

Filtro LCL: para mitigar la distorsión armónica generada por la conmutación de alta frecuencia (PWM) de los semiconductores, se ha diseñado un filtro pasivo LCL.

4. Resultados

Para demostrar el correcto dimensionamiento de los equipos, se han llevado a cabo diversas simulaciones. Los resultados obtenidos confirman el correcto funcionamiento de los algoritmos de control:

Estabilidad en continua: para el caso de diferencia de tensiones más desfavorable, la tensión del bus de salida del convertidor logra estabilizarse en su valor de referencia en dos segundos. Por otro lado, ante la conexión repentina de cargas, el sistema demostró gran robustez, recuperando el valor de consigna en apenas décimas de segundo sin presentar inestabilidad. Finalmente, el sistema muestra gran rapidez y estabilidad cuando se simulan escalones consecutivos en la referencia.

Sincronización en alterna: las formas de onda a la salida del inversor muestran un sistema trifásico perfectamente equilibrado, sin desfase entre tensión y corriente, cumpliendo así con los requisitos para la inyección de energía activa pura.

Calidad de onda: El filtro LCL ha demostrado ser capaz de atenuar drásticamente los armónicos de alta frecuencia, entregando una señal limpia y apta para la red de distribución.

Viabilidad económica: se han analizado diversos parámetros económicos, llegando a la conclusión de que este proyecto tiene una buena rentabilidad. Asimismo, se han realizado diversas gráficas 3D que permiten extrapolar la viabilidad financiera del modelo a otros tramos de la red ferroviaria en escenarios operativos y con volúmenes de tráfico distintos al caso base estudiado en este proyecto.

Viabilidad ecológica: esta aplicación supone una reducción en el consumo energético de la red ferroviaria, por ello ayuda a reducir el consumo de materias primas contaminantes para la generación de energía eléctrica.

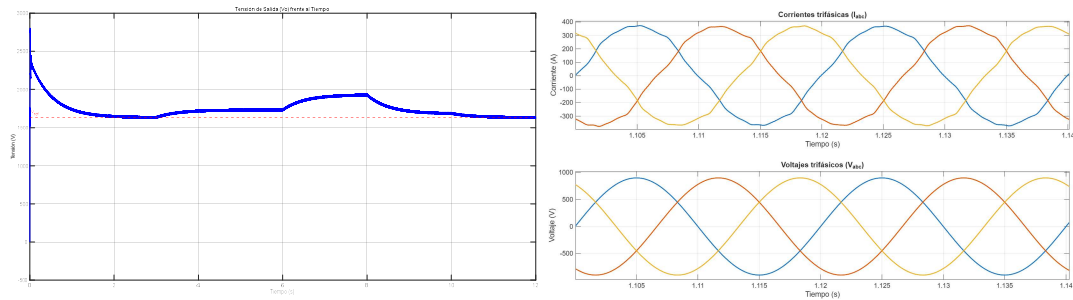


Ilustración 2. Resultado de las simulaciones del convertidor e inversor.

5. Conclusiones

El diseño propuesto en este trabajo de fin de grado demuestra que la implementación de subestaciones reversibles en paralelo constituye una solución altamente viable tanto desde el punto de vista técnico como económico. Desde la perspectiva técnica, el empleo de esta topología permite la integración del sistema de regeneración sin necesidad de modificar o sustituir los rectificadores de tracción preexistentes, lo que garantiza en todo momento la continuidad y fiabilidad del suministro eléctrico a la catenaria.

Por otro lado, la validación del modelo mediante simulación corrobora el robusto desempeño dinámico del equipo. El correcto funcionamiento conjunto de las etapas de conversión e inversión, gobernadas por sus respectivos lazos de control, asegura una recuperación de energía óptima frente a escenarios de tráfico variables. Concretamente, el regulador PI ha demostrado una respuesta ágil y estable para absorber los picos de potencia generados durante el frenado de los trenes, manteniendo regulado el bus de continua. Simultáneamente, el algoritmo de seguimiento de fase (PLL) garantiza una sincronización precisa con la red eléctrica nacional, permitiendo inyectar la energía recuperada con una frecuencia exacta de 50 Hz, un factor de potencia unitario y un bajo índice de distorsión armónica.

6. Referencias

- [1] R. W. Erickson y D. Maksimović, *Fundamentals of Power Electronics*. Cham: Springer International Publishing, 2020. doi: 10.1007/978-3-030-43881-4.
- [2] M. Zehendner y M. Ulmann, «Power Topologies Handbook», Texas Instruments, Dallas, TX, EE. UU., slyu036a. [En línea]. Disponible en: <https://www.ti.com/lit/eb/slyu036a/slyu036a.pdf>
- [3] R. Teodorescu, M. Liserre, y P. Rodríguez, *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*, 1.^a ed. Wiley, 2011. doi: 10.1002/9780470667057.

ENERGY RECOVERY SYSTEMS ON THE RAILWAY NETWORK

Author: Mateos Rojas, Jaime.

Supervisor: Martín Hermosilla, Agustín.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

ABSTRACT

Design of an energy regeneration system in parallel with an existing unidirectional railway substation, integrating conversion, inversion, and filtering stages. Starting from a base case, the model equations are deduced and the performance, control, and extrapolability to other contexts are developed through simulation.

Keywords: regenerative braking, reversible substation, inverter, converter.

1. Introduction

The railway transport sector faces the continuous challenge of improving its energy efficiency and reducing its environmental impact. In traditional traction systems powered by direct current (DC), electrical substations are unidirectional. Consequently, when a train performs regenerative braking and there are no other trains nearby that can absorb that energy, the excess voltage forces this kinetic energy to be dissipated as heat through the rheostatic resistors. This represents a significant loss of useful energy. Therefore, the modernization of the infrastructure through the implementation of reversible substations is presented as a technical and ecological solution to recover energy and return it to the alternating current (AC) grid.

2. Project definition

The main objective and scope of this project is the design, calculation, and simulation of an energy regeneration system capable of operating in parallel with an existing unidirectional railway substation. By opting for a parallel topology, the need to replace the original traction rectifiers is avoided, reducing installation costs and guaranteeing that the basic supply to the trains is not interrupted in the event of a regenerator system failure. Furthermore, it will start with a base case, which features a track section with a continuous voltage catenary, which will provide the boundary conditions necessary for the sizing.

3. Description of the model/system/tool

The architecture of the designed regeneration system is composed of four fundamental stages, responsible for adapting the energy from the catenary to the national electrical grid [1], [2], [3].

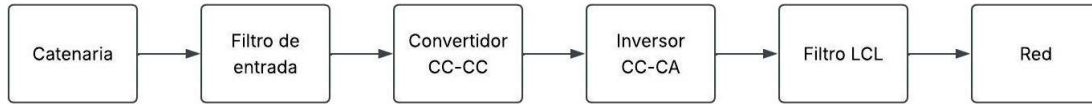


Illustration 3 - Architecture of the energy recovery system.

Input filter: responsible for mitigating the disturbances coming from the catenary.

Converter (DC-DC): provides galvanic isolation and allows regulation of the voltage level coming from the catenary prior to the inversion stage.

Inverter (DC-AC): allowing the synthesis of a three-phase alternating voltage signal from the DC bus. In addition, a grid-following current controller will be used to ensure a safe coupling with the electrical grid.

LCL filter: to mitigate the harmonic distortion generated by the high-frequency switching (PWM) of the semiconductors, a passive LCL filter has been designed.

4. Results

To demonstrate the correct sizing of the equipment, various simulations have been carried out. The results confirm the correct operation of the control algorithms:

DC stability: for the most unfavorable voltage difference case, the voltage of the converter's output bus manages to stabilize at its reference value in two seconds. On the other hand, faced with the sudden connection of loads, the system demonstrated great robustness, recovering the setpoint value in just tenths of a second without presenting instability. Finally, the system shows great speed and stability when consecutive steps in the reference are simulated.

AC synchronization: the waveforms at the output of the inverter show a perfectly balanced three-phase system, with no phase shift between voltage and current, thus meeting the requirements for the injection of pure active energy.

Wave quality: The LCL filter has proven to be capable of drastically attenuating high-frequency harmonics, delivering a clean signal suitable for the distribution grid.

Economic viability: various economic parameters have been analyzed, concluding that this project has good profitability. Likewise, various 3D graphs have been created that allow the financial viability of the model to be extrapolated to other sections of the railway network in operational scenarios and with traffic volumes different from the base case studied in this project.

Ecological viability: this application represents a reduction in the energy consumption of the railway network. Therefore, it helps to reduce the consumption of polluting raw materials for the generation of electrical energy.

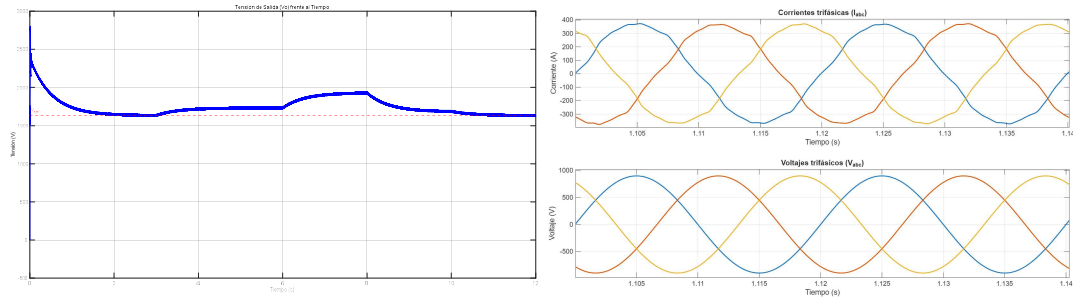


Illustration 4 - Result of the converter and inverter simulations.

5. Conclusions

The design proposed in this final degree project demonstrates that the implementation of parallel reversible substations constitutes a highly viable solution from both a technical and economic point of view. From a technical perspective, the use of this topology allows the integration of the regeneration system without the need to modify or replace the pre-existing traction rectifiers, which guarantees the continuity and reliability of the electrical supply to the catenary at all times.

On the other hand, the validation of the model through simulation corroborates the robust dynamic performance of the equipment. The correct joint operation of the conversion and inversion stages, governed by their respective control loops, ensures optimal energy recovery in the face of variable traffic scenarios. Specifically, the PI controller has demonstrated an agile and stable response to absorb the power peaks generated during train braking, keeping the DC bus regulated. Simultaneously, the Phase-Locked Loop (PLL) algorithm guarantees precise synchronization with the national electrical grid, allowing the recovered energy to be injected with an exact frequency of 50 Hz, a unity power factor, and a low harmonic distortion index.

6. References

- [1] R. W. Erickson y D. Maksimović, *Fundamentals of Power Electronics*. Cham: Springer International Publishing, 2020. doi: 10.1007/978-3-030-43881-4.
- [2] M. Zehendner y M. Ulmann, «Power Topologies Handbook», Texas Instruments, Dallas, TX, EE. UU., slyu036a. [En línea]. Available: <https://www.ti.com/lit/eb/slyu036a/slyu036a.pdf>
- [3] R. Teodorescu, M. Liserre, y P. Rodríguez, *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*, 1.^a ed. Wiley, 2011. doi: 10.1002/9780470667057.

Documento 1: Memoria

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	6
1.1 Motivación del proyecto	6
Capítulo 2. Estado de la Cuestión	7
2.1 Ejemplos de soluciones y propuestas industriales:	8
Capítulo 3. Definición del Trabajo	9
3.1 Justificación	9
3.2 Sistema modular y poco explotado	10
3.3 Inversión modular	10
3.4 Rentabilidad económica y monetización de pérdidas	10
3.5 Objetivos	11
3.6 Metodología y planificación	13
Capítulo 4. Diseño del sistema en paralelo	14
4.1 Datos Iniciales del Sistema	17
4.2 Diseño del sistema en paralelo	26
4.3 Convertidor CC-CC	30
4.4 Inversor CC-CA	50
4.5 Regeneración de energía	58
4.6 Protecciones y elementos de medida	64
4.7 Diseño de los componentes	67
4.8 Disipadores	74
4.9 Viabilidad económica	76
4.10 Impacto medioambiental	82
Capítulo 5. Análisis de Resultados	83
5.1 Simulaciones del convertidor	83
5.2 Simulación del inversor:	90
Conclusiones y Trabajos Futuros	93
5.3 Estudio previo	93
5.4 Convertidor	93

5.5	<i>Inversor</i>	94
5.6	<i>Rentabilidad</i>	94
5.7	<i>Impacto ecológico</i>	94
Capítulo 6.	<i>Bibliografía</i>	97
Capítulo 7.	<i>ANEXO I</i>	101

Índice de figuras

Figura 1. Objetivos de desarrollo sostenible.	11
Figura 2. Metodología y planificación del proyecto. (Anexo I).....	13
Figura 3. Representación del sistema en paralelo. [10].....	15
Figura 4. Etapas del sistema de recuperación.....	15
Figura 5. Mapa de alta y media tensión de Las Rozas de Madrid (Las Rozas). [11].....	17
Figura 6. Vista aérea del tramo a estudiar (Las Rozas).....	17
Figura 7. Mapa de alta y media tensión de Las Rozas de Madrid (Las Matas). [11].....	18
Figura 8. Vista aérea de la línea a estudiar (Las Matas).....	18
Figura 9. Armónicos en la corriente según la topología de rectificador trifásico. [12].....	20
Figura 10. Rectificador de dos puentes trifásicos de Graetz.	20
Figura 11. Grafica de numero de trenes (y) para cada hora (x).....	23
Figura 12. Clase de servicio del rectificador. [13].	25
Figura 13. Esquema de la disposición de los 12 módulos.....	26
Figura 14. Relación entre potencia y frecuencia de conmutación. [26].	28
Figura 15. Convertidor con topología center-tap. [28].....	31
Figura 16. Convertidor con topología puente de diodos. [28].....	31
Figura 17. Transformador con toma intermedia.....	32
Figura 18. Recorrido de la corriente en el primer t_1 del puente completo.	33
Figura 19. Recorrido de la corriente en el segundo t_1 del puente completo.....	33
Figura 20. Recorrido de la corriente en t_2 del puente completo.....	33
Figura 21. Forma de onda de tensión en los semiconductores del puente completo. [28].	34
Figura 22. Tensiones necesaria y resultante de la modulación PWM. [26].	36
Figura 23. Comportamiento de la corriente del condensador de salida [29].....	37
Figura 24. Comportamiento de la tensión y corriente del condensador de salida. [29]	39
Figura 25. Esquema del control del convertidor en Simulink. (Anexo I).	42
Figura 26. Onda resultante de la actuación del PWM en el control del convertidor.....	44
Figura 27. Análisis del pico de resonancia.....	45
Figura 28. Circuito equivalente del filtro de salida.	47

Figura 29. Inversor con filtro LCL.	50
Figura 30. Filtro de salida LCL y su pendiente de atenuación.	51
Figura 31. Circuito del inversor en Simulink. (Anexo I).	53
Figura 32. Control del inversor en Simulink. (Anexo I).	53
Figura 33. Circuitos equivalentes de los ejes d y q.	54
Figura 34. Control de corriente del inversor. (Anexo I).	56
Figura 35. Acción del SRF-PLL con respecto a los ejes de referencia.	56
Figura 36. Control PLL.	57
Figura 37. Gráficas de velocidad, potencia y corriente durante el frenado.	60
Figura 38. Perfiles de potencia instantánea y RMS de La comba. [10]	63
Figura 39. Plano del VAN acumulado en función del contexto de operación (Anexo I)...	80
Figura 40. Plano del payback en función del contexto de operación (Anexo I).....	81
Figura 41. Gráfica de tensión de salida del convertidor frente al tiempo en el caso 1.	84
Figura 42. Gráfica de tensión de salida del convertidor frente al tiempo en el caso 2.	85
Figura 43. Gráfica de tensión de salida del convertidor frente al tiempo en el caso 3.	86
Figura 44. Gráfica de la respuesta ante una serie de escalones en la referencia.	87
Figura 45. Esquema del control del convertidor con un breaker.	88
Figura 46. Gráfica de la respuesta del convertidor ante una subida repentina de la carga. .	88
Figura 47. Gráfica de la corriente y tensión del inversor.	90
Figura 48. Gráfica del ángulo del PLL con respecto al tiempo.	91
Figura 49. Gráfica de la corriente en la resistencia del filtro LCL.....	92

Índice de tablas

Tabla 1. Resultados de la simulación de densidad de tráfico.	22
Tabla 2. Corriente básica continua. [13].....	24
Tabla 3. Tipo de corriente y tensión eléctrica de alimentación. [22].	25
Tabla 4. Parámetros la serie de tren 446 de Renfe [39],[40]	58
Tabla 5. Clase de precisión de un TI de clase especial. [26].....	64
Tabla 6. Datos iniciales para el diseño de los componentes.....	67
Tabla 7. Lista final de los componentes.	71
Tabla 8. Estimaciones para los escenarios posibles.	78
Tabla 9. Evaluación financiera de los diferentes escenarios.	78

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

El sector ferroviario representa la convergencia interesante de las principales disciplinas de la ingeniería industrial: mecánica, eléctrica, electrónica y organización. Históricamente, este campo ha demostrado una inmensa capacidad de innovación y adaptación, en el contexto actual de transición energética, descarbonización y alta penetración de energías renovables, la red ferroviaria se enfrenta a rápido un proceso de modernización. Este fenómeno es análogo a la revolución que están experimentando las redes de transporte de corriente alterna con los sistemas FACTS (Flexible AC Transmission Systems).

La magnitud energética de esta infraestructura es extraordinaria. En 2024, el consumo de energía eléctrica destinado exclusivamente a usos de tracción en la red ferroviaria del administrador de infraestructuras ferroviarias (Adif) alcanzó los 2,76 TWh [1]. Si se contrasta con la demanda eléctrica total de España durante ese mismo año (249 TWh) [2], el ferrocarril representa por sí solo más del 1,1 % del consumo nacional, lo que equivale al consumo medio de 2 millones de personas. Sin embargo, una fracción muy significativa de este consumo no se utiliza en el desplazamiento, sino que, debido a la naturaleza de los trayectos en tren, se transforma en pérdidas durante los procesos de frenado de los trenes en forma de rozamiento o calor.

Este proyecto centra su atención en el enorme potencial energético, ecológico y económico que supone la recuperación de la energía liberada durante el frenado regenerativo. En las infraestructuras ferroviarias tradicionales, como se verá en el estado de la cuestión, si esta energía no es consumida por otro tren cercano, debe disiparse inevitablemente en forma de calor a través de resistencias a bordo, reduciendo drásticamente la eficiencia global del sistema. Evitar este derroche térmico y reincorporar esa energía al ciclo útil no es solo un reto de ingeniería, sino una obligación medioambiental para reducir la huella de carbono y el consumo neto del país.

Capítulo 2. ESTADO DE LA CUESTIÓN

Un aspecto crítico que considerar en la operativa ferroviaria es que, si un tren devuelve la energía regenerada directamente a la catenaria en ausencia de una demanda activa (ya sea otro tren en fase de tracción, un sistema de almacenamiento o la red eléctrica), la tensión de la línea experimentará un incremento drástico y peligroso. Este fenómeno de sobretensión puede provocar el disparo inmediato de las protecciones de la subestación, la formación de arcos eléctricos o daños severos en los equipos. Por ello, a lo largo de los años se han implementado diversas técnicas y tecnologías orientadas a mitigar este problema y aprovechar dicha energía.

1. Redes con alta densidad nudos: tradicionalmente, se intentaba asegurar que siempre hubiera un tren traccionando cuando otro esté frenando. Aunque es la solución más barata por no requerir equipos adicionales, es altamente ineficiente, ya que depende totalmente de la sincronización y puntualidad de los horarios y de las mallas comerciales.
2. Baterías [3]: acumuladores electroquímicos que permiten almacenar grandes cantidades de energía (alta densidad de energía) mediante reacciones químicas reversibles y pueden entregar la energía de forma sostenida en el tiempo. Sin embargo, los ciclos de carga rápidos y profundos que exige el frenado ferroviario aceleran enormemente la degradación de sus celdas, reduciendo su vida útil.
3. Supercondensadores [3]: elementos que almacenan la energía de forma electrostática, destacan por su elevadísima densidad de potencia y su capacidad para soportar cientos de miles de ciclos de carga y descarga sin degradación química. A diferencia de las baterías, esta tecnología almacena la energía durante corto periodo de tiempo, por lo que no es una solución viable si se quiere guardar la energía durante periodos prolongados.

4. Volantes de inercia (flywheel): mecanismo con una masa rodante, cuya función principal es almacenar energía cinética [3]. En el metro de Londres se hizo un estudio para implementarlos, pero resultó no ser rentable y no se llevó a cabo. Finalmente, la opción que se implementó fue la ya mencionada “red de muchos nudos” [4].

2.1 EJEMPLOS DE SOLUCIONES Y PROPUESTAS INDUSTRIALES:

1. Proyecto Ingeber, subestaciones eléctricas reversibles basada inversores [5]: desarrollado por Ingeteam, el sistema está dotado de un convertidor doble, conectado en paralelo a la catenaria con el rectificador de la subestación (unidireccional) ya existente. En caso de que exista energía a recuperar, se convierte de continua a alterna y se inyecta devuelta a la red.
2. Subestación de tracción de La Comba, Málaga [6]: en este caso, se ha logrado recuperar aproximadamente 1.000.000 kWh en su primer año de funcionamiento; esto es el 12% de la energía total consumida en dicha línea.
3. Ferrolinera [7]: una solución innovadora promovida por Adif que ofrece una vía de aprovechamiento alternativo. El sistema evita el vertido de energía a la red pública y opta por captar los excedentes de corriente continua originados en el frenado para suministrarlos, mediante equipos de inversión locales, a redes de recarga de vehículos eléctricos habilitadas en los aparcamientos de las propias estaciones.

Capítulo 3. DEFINICIÓN DEL TRABAJO

3.1 JUSTIFICACIÓN

A la vista de las tecnologías analizadas en el estado del arte y en la demanda energética mostrada en la motivación, resulta evidente que la recuperación de energía en entornos ferroviarios es una necesidad industrial, pero las soluciones de almacenamiento físico (baterías o supercondensadores) presentan limitaciones operativas que dificultan su implementación en ciertas aplicaciones ferroviarias.

A pesar de que existen algunos proyectos de subestaciones reversibles en el mercado, gran parte de la red ferroviaria alimentada en continua sigue operando con subestaciones unidireccionales de diodos. Los cuales bloquean el retorno de la energía a la red, obligando a disipar megavatios de potencia en resistencias de frenado.

La justificación técnica y comercial de este proyecto radica en la necesidad de ofrecer una solución de realimentación eficiente, modular y económicamente viable para estas infraestructuras existentes. En lugar de sustituir por completo las subestaciones actuales, se propone el diseño de un equipo de electrónica de potencia (convertidor CC-CC aislado más inversor CC-CA) que opere en paralelo a la instalación principal.

El valor añadido y el atractivo de este proyecto para una operadora ferroviaria o un inversor se fundamenta en varios pilares clave:

3.2 SISTEMA MODULAR Y POCO EXPLOTADO

La arquitectura modular de este sistema dota a la instalación de una alta escalabilidad. A medida que la línea ferroviaria crezca o aumente su tráfico, es posible incorporar nuevos módulos de potencia en paralelo. Por otra parte, este tipo de proyectos de recuperación energética se encuentran actualmente en auge en España. Dado el denso y continuo tráfico ferroviario diario, la implantación generalizada de esta tecnología permitiría transformar el frenado de miles de trenes en una fuente constante de ahorro e inyección de energía limpia para la red eléctrica nacional.

3.3 INVERSIÓN MODULAR

Gracias al aprovechamiento de las infraestructuras existentes, resulta en una optimización de la inversión. Durante la implantación inicial del sistema en paralelo, los costes y tiempos de obra civil son reducidos, ya que el proyecto se beneficia de los servicios generales preexistentes en la subestación principal (como los accesos, la red de tierras o el saneamiento). Posteriormente, si la línea requiere un aumento de capacidad, la adición de nuevos módulos de potencia supone un coste marginal mínimo, puesto que la infraestructura principal ya está preparada y la ampliación se limitaría a añadir equipos o extender ligeramente la caseta técnica que los alberga.

3.4 RENTABILIDAD ECONÓMICA Y MONETIZACIÓN DE PÉRDIDAS

Este proyecto no solo mejora la eficiencia global del sistema ferroviario, sino que constituye una nueva vía de ingresos dentro de un ámbito estratégico como el sector eléctrico. Esta aportación resulta especialmente relevante en el escenario actual de transición energética, donde la electrificación de la economía está impulsando una demanda creciente. De hecho, según las proyecciones del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC), se prevé que la demanda eléctrica en España experimente un crecimiento del 35 % respecto a los niveles registrados en 2019 [8].

3.5 OBJETIVOS

En este proyecto se analizará el diseño de un sistema conectado en paralelo a una subestación unidireccional ya existente, lo que habilitará la capacidad de recuperar la energía generada durante el frenado regenerativo de la flota ferroviaria en líneas de corriente continua. Para ello, y dada la magnitud de potencia manejada (en el rango de los megavatios), el diseño se fundamentará en el uso de electrónica de potencia. Se evaluarán diferentes topologías capaces de realizar la inversión de corriente continua a alterna, priorizando aquellas que garanticen la máxima estabilidad, la minimización de pérdidas, la seguridad operativa y un acoplamiento óptimo a la red eléctrica.

El dimensionamiento y análisis se aplicarán a un caso base práctico; no obstante, la metodología y las pautas establecidas permitirán la extrapolación de este diseño a cualquier infraestructura que cumpla con los requisitos iniciales. Finalmente, se llevará a cabo un estudio de viabilidad económica. Si los resultados demuestran la rentabilidad de la instalación, este sistema modular podría replicarse en otros nudos estratégicos, mejorando de forma sustancial la eficiencia energética global del sistema ferroviario.

ALINEACIÓN CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE



Figura 1. Objetivos de desarrollo sostenible.

Objetivo 7: Energía asequible y no contaminante [9].

La recuperación de la energía generada durante el frenado supone un avance clave hacia la sostenibilidad del sistema ferroviario, ya que permite aprovechar un recurso que, de otro modo, se perdería irremediabilmente. Desde un punto de vista físico, este sistema evita que el excedente de potencia deba ser disipado en forma de calor a través de las resistencias de los propios trenes. Asimismo, desde una perspectiva económica, la inyección y devolución de esta energía a la red general reduce de forma directa la demanda neta de la instalación, lo que supone una disminución significativa en el coste total del suministro eléctrico.

Objetivo 9: Industria, innovación e infraestructuras [9].

La propuesta plantea una modernización tecnológica fundamental para el sector. Mediante la integración en paralelo de electrónica de potencia en subestaciones unidireccionales tradicionales, se dota a la red ferroviaria de la bidireccionalidad y flexibilidad propias de las redes inteligentes (*Smart Grids*). Esto permite la innovación industrial y fortalecimiento de la infraestructura sin necesidad de desmantelarla.

Objetivo 11: Ciudades y comunidades sostenibles [9].

El transporte ferroviario de pasajeros, como puede ser redes de metro y cercanías, es un pilar fundamental de la movilidad urbana. Por lo tanto, evitar la disipación masiva de energía en forma de calor en túneles, andenes y entornos urbanos no solo mejora el confort térmico de los usuarios, sino que reduce significativamente la huella de carbono asociada al transporte público, impulsando el desarrollo de núcleos poblacionales genuinamente descarbonizados y sostenibles.

3.6 METODOLOGÍA Y PLANIFICACIÓN

El proyecto se llevó a cabo en un periodo de cinco meses. La planificación original de este proyecto se estructuró de manera secuencial y continuada para garantizar el correcto desarrollo de la investigación. En la fase inicial, el trabajo se centró en la búsqueda y caracterización de un sistema de referencia real sobre el cual poder apoyar y contrastar la validez de los cálculos analíticos realizados. Posteriormente, se procedió a la comprensión profunda de los conceptos teóricos que gobiernan el comportamiento de los convertidores de corriente continua y los inversores de corriente alterna.

Con esta base teórica consolidada, la siguiente etapa consistió en el modelado y simulación computacional de dichos convertidores, lo que permitió analizar de forma rigurosa su respuesta dinámica tanto en condiciones de operación nominales como ante escenarios críticos y casos extremos de carga.

Paralelamente, se realizó un estudio complementario de los sistemas auxiliares necesarios para la implementación de la solución, incluyendo la aparamenta de medida, los sistemas de protección eléctrica y el dimensionamiento de los elementos de disipación térmica.

Finalmente, se elaboró un estudio económico detallado, destinado a evaluar la rentabilidad financiera y el periodo de retorno de la inversión del sistema implementado.

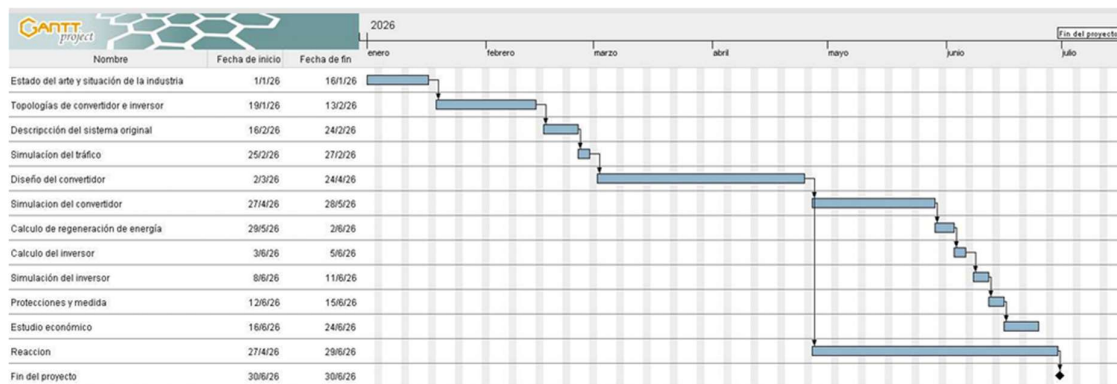


Figura 2. Metodología y planificación del proyecto. (Anexo I).

Capítulo 4. DISEÑO DEL SISTEMA EN PARALELO

En este apartado se aborda el diseño de un sistema de recuperación de energía, conectado en paralelo a una subestación de tracción ya existente. Debido a que estas instalaciones operan tradicionalmente de forma unidireccional (al estar basadas en rectificadores de diodos), la solución propuesta permite dotar a la subestación de bidireccionalidad, sin necesidad de alterar su infraestructura principal ni requerir un transformador elevador adicional.

Tal y como se muestra en el diagrama unifilar (figura 3), la instalación original está compuesta por un embarrado de media tensión en corriente alterna (CA), proveniente de la red eléctrica nacional, que alimenta a un transformador de tracción. Este transformador cuenta con dos devanados secundarios con configuraciones diferentes entre sí; dichas configuraciones son: en estrella (y) o en triángulo (d o Δ), cuyo propósito es alimentar un rectificador trifásico que opera a 12 pulsos. Esta configuración estándar suministra la energía a la catenaria en corriente continua (CC) reduciendo así el rizado y la inyección de armónicos en la red.

El nuevo sistema de recuperación (destacado en verde en la figura 3) se acoplará eléctricamente entre la catenaria de CC y los secundarios del transformador. La tensión alterna de línea (tensión entre dos fases) será definida como $V_{eftrafo2\phi}$. La justificación y el esquema detallado de esta conexión se abordarán en apartados posteriores.

El funcionamiento de este sistema no es continuo, es decir, no siempre se estará recuperando energía. El sistema de recuperación operará de forma intermitente, activándose exclusivamente durante los periodos en los que se produzca el frenado regenerativo de los trenes y cuando la energía no sea consumida por otros vehículos en la misma sección. Para realizar esto, se requerirá de un centro de maniobras que se encargará de operar los seccionadores y verificar el correcto funcionamiento de los aparatos de medida e interruptores.

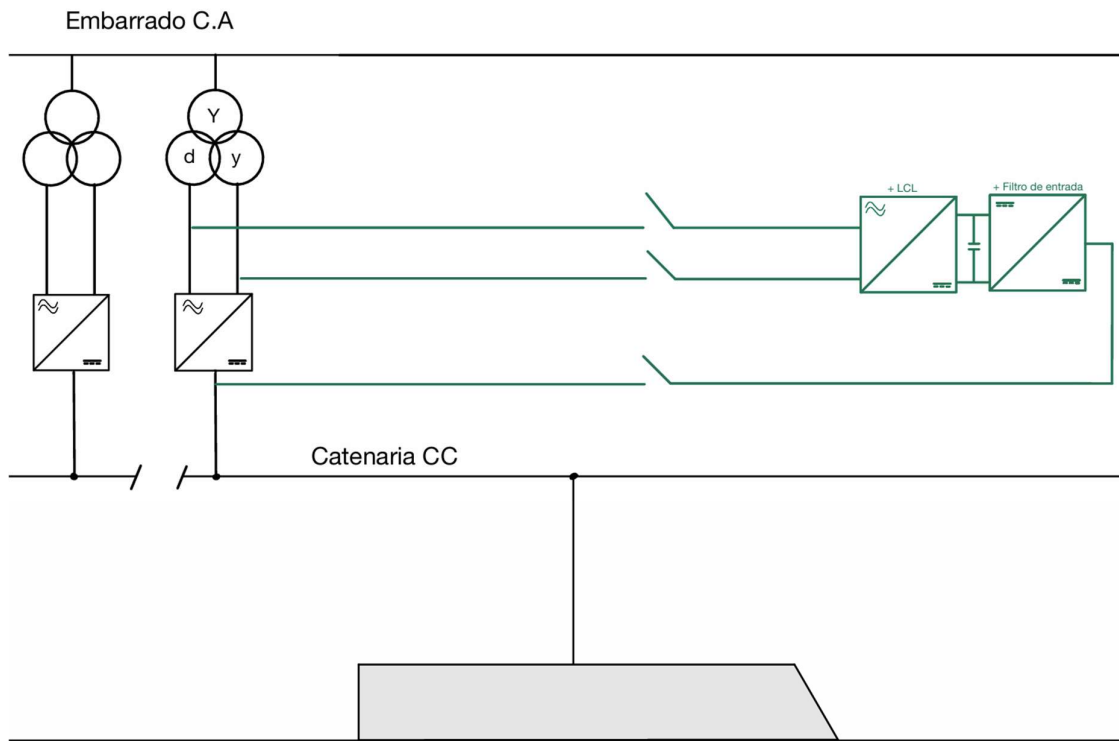


Figura 3. Representación del sistema en paralelo. [10].

La arquitectura del sistema propuesto estará compuesta por cuatro etapas: un filtro de entrada, un convertidor CC-CC (corriente continua a corriente continua), un inversor CC-CA (corriente continua a corriente alterna) y un filtro de salida LCL. Los principios de funcionamiento y los criterios de diseño de cada una de estas etapas se desarrollarán en los apartados siguientes.

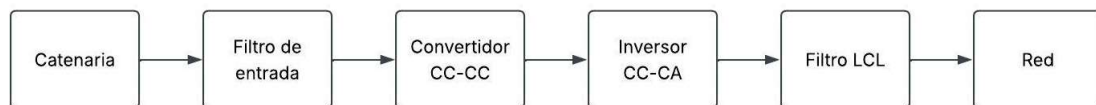


Figura 4. Etapas del sistema de recuperación.

Como paso previo al dimensionamiento del sistema de recuperación de energía, resulta imprescindible definir las condiciones de contorno y los límites de funcionamiento del sistema original. Esto se debe a el nuevo sistema está limitado por las tolerancias eléctricas de la infraestructura existente. En concreto, la electrónica de potencia a instalar deberá operar respetando los márgenes de tensión e intensidad máximos que pueden soportar componentes críticos como la catenaria, el pantógrafo y la propia aparamenta de la subestación.

Uno de los parámetros de partida necesarios para el dimensionamiento del sistema es la densidad de tráfico del tramo ferroviario, ya que una mayor frecuencia de paso de trenes incrementa la probabilidad de coincidencia entre eventos de tracción y frenado regenerativo. Este comportamiento condiciona la potencia máxima intercambiada y la energía que el sistema deberá ser capaz de procesar.

La estimación de estos parámetros se realizará a partir de información pública, complementada con las hipótesis de diseño necesarias para completar aquellos datos no disponibles.

Este proyecto tendrá como caso base la implementación del sistema en paralelo que recuperará la energía procedente del tramo de cercanías Las Rozas – Las Matas, con una tensión continua de 3000 V. La elección de este tramo no solo se debe a la necesidad de acotar la cantidad de parámetros a estudiar, sino también debido a el conocimiento previo de la orografía y operativa de este sector resultan ventajosos para fundamentar los cálculos posteriores.



Figura 7. Mapa de alta y media tensión de Las Rozas de Madrid (Las Matas). [11]

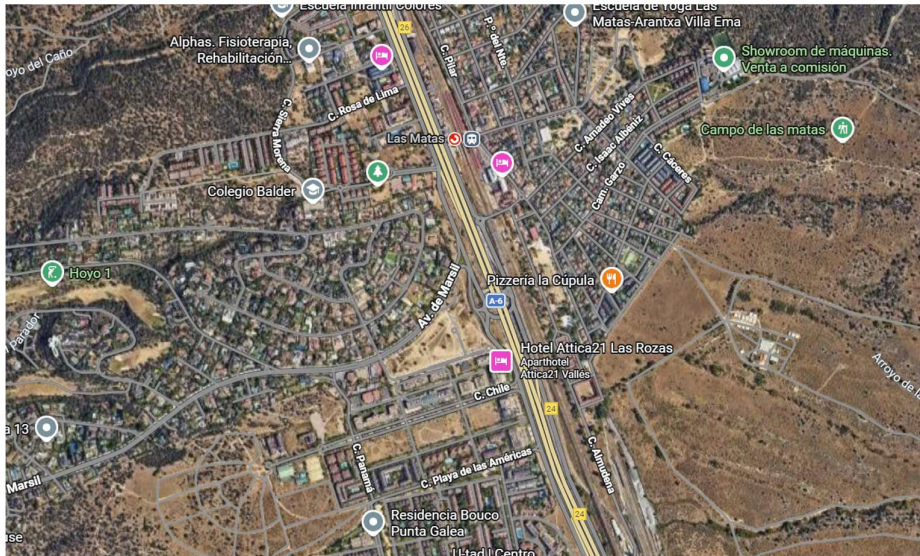


Figura 8. Vista aérea de la línea a estudiar (Las Matas).

A partir de las figuras 5 y 7, se determina que el embarrado de media tensión que alimenta la subestación de tracción opera a 45 kV. Asimismo, para caracterizar el entorno físico, se ha analizado el desnivel del trazado mediante herramientas de cartografía digital (Google Earth). El estudio de este segmento muestra un desnivel total de 34,31 m a lo largo de sus 7 km, situándose la cota de las estaciones de Las Rozas a 726,71 m y Las Matas a 761,02 m.

Sin embargo, de cara al modelado matemático de la energía disponible, es necesario establecer una hipótesis simplificadora respecto al terreno y la naturaleza de las líneas de metro o cercanías. Dado que la línea ferroviaria cuenta con tráfico bidireccional y se asume un volumen similar de circulaciones en ambos, el balance neto de variación de energía potencial entre los trenes que ascienden y los que descienden se considera nulo. Por consiguiente, el término correspondiente a la energía potencial gravitatoria se desprecia en el cálculo del potencial de la energía regenerada, que queda determinado únicamente por energía cinética.

4.1.2 Parámetros del sistema.

Posteriormente, para poder dimensionar la subestación reversible se deben conocer ciertos valores iniciales, tomando como referencia esta misma:

- Corrientes admisibles.
- Tensiones de salida: devanados secundarios del transformador.
- Tensión de entrada: catenaria.
- Potencia de funcionamiento continuo.
- La densidad del tráfico.

Para hallar el valor de la tensión de salida, antes se debe de conocer el tipo de rectificador trifásico que tiene la subestación ya existente. Dependiendo de la aplicación, estos rectificadores pueden estar constituidos por configuraciones de 6, 12 o 24 pulsos. Como se puede ver en la figura 9, cuantos más pulsos tenga, más limpia acaba siendo la onda resultante.

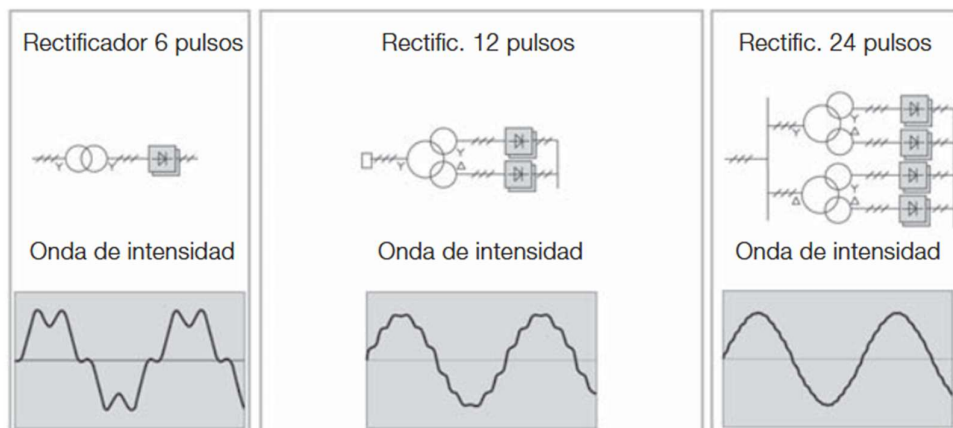


Figura 9. Armónicos en la corriente según la topología de rectificador trifásico. [12]

Adif, administrador de la subestación que se está estudiando, tiene una especificación que establece el tipo de rectificador que han de usar las subestaciones de tracción que pasan de CA a CC, esta especificación interna de Adif es la ET 03.359.104.1 (3ª Edición + M1) [13]. En ella se define la configuración técnica que corresponde a un rectificador de 12 pulsos, definida como “dos puentes trifásicos de Graetz dispuestos según el montaje N° 12 de la tabla 4 de la norma UNE-EN 50328” [14]. La norma UNE-EN 50328 también especifica el conexionado de cada devanado del transformador a cada puente, para así garantizar un desfase. Este conexionado se puede observar en la figura 10.

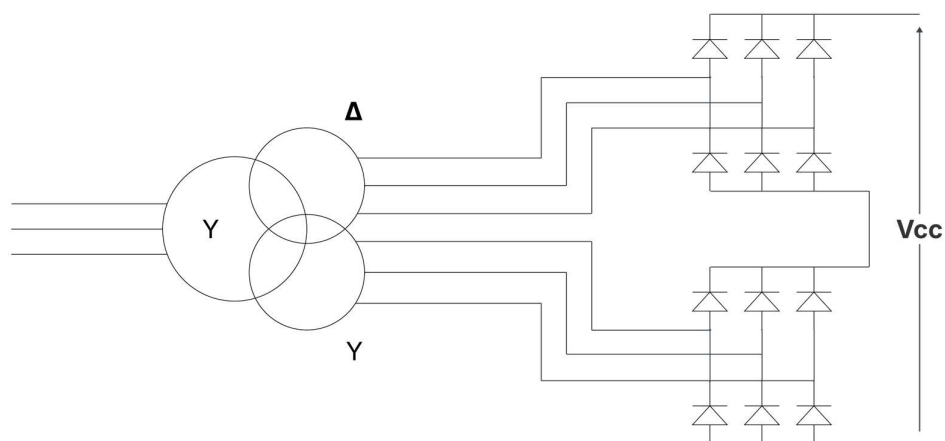


Figura 10. Rectificador de dos puentes trifásicos de Graetz.

4.1.2.1 Tensión de salida

Conocida esta configuración y considerando que la tensión nominal de la catenaria de continua es 3000 V ($V_{catenaria} = V_{cc}$), como ya se había mencionado en la introducción, se puede hallar la tensión de salida:

Tensión por cada puente $V_{2^{\circ}cc}$:

$$V_{2^{\circ}cc} = \frac{V_{cc}}{2} = \frac{3000}{2} = 1500 \text{ V} \quad (1)$$

Para un puente rectificador trifásico ideal (puente de Graetz), la relación matemática entre la tensión continua de salida $V_{2^{\circ}cc}$ y la tensión alterna de línea de entrada $V_{trafo2^{\circ}}$ es [14]:

$$V_{2^{\circ}cc} = \frac{3 \cdot \sqrt{2} \cdot V_{trafo2^{\circ}}}{\pi} \quad (2)$$

Despejado para $V_{trafo2^{\circ}}$:

$$V_{trafo2^{\circ}} = \frac{\pi \cdot 1500}{3 \cdot \sqrt{2}} = 1110,72 \text{ V} \quad (3)$$

Relación de transformación del transformador de la estación:

En condiciones nominales las tensiones son 45 kV y 1,11 kV por lo que la relación de transformación del transformador es:

$$\alpha = \frac{45 \text{ kV}}{1,11 \text{ kV}} = 40,5 \quad (4)$$

En España, la calidad del suministro y las variaciones admisibles de tensión están reguladas por el Real Decreto 1955/2000 [15] y se basan en la norma europea UNE-EN 50160 [16].

Teniendo en cuenta el reglamento, la tensión primaria máxima sugerida del transformador al tratarse de una red de 45 kV, es 52 kV [17]. Por lo que, la tensión secundaria máxima es:

$$V_{trafo2^{\circ}max} = \frac{52 \text{ kV}}{40,5} = 1,28 \text{ kV} \quad (5)$$

Asimismo, como el rango nominal es $\pm 7\%$ y el límite permitido $\pm 10\%$, la tensión primaria mínima del transformador es 40,5 kV [18]. Entonces, la tensión secundaria máxima es:

$$V_{trafo2^{\circ}min} = \frac{40,5 \text{ kV}}{40,5} = 1 \text{ kV} \quad (6)$$

4.1.2.2 Densidad de tráfico

A continuación, se simula el tránsito ferroviario a partir de los horarios proporcionados para las líneas C7, C8 y C10 [19], con el objetivo de evaluar la densidad de tráfico en el tramo.

Para ello, se ha implementado un algoritmo de línea de barrido (*sweep line*), ampliamente utilizado para el análisis eficiente de eventos temporales [20]. Este método descompone cada intervalo de tiempo en dos eventos discretos: un incremento unitario al inicio y un decremento al final. De este modo, partiendo de las condiciones iniciales, se evalúa la suma acumulada para identificar el número máximo de trenes simultáneos, además de la cantidad total de trenes que circulan diariamente por dicho tramo, esto último será útil a la hora de calcular la energía total recuperada diariamente.

Número total de salidas generadas: 275 (dirección ida)
Tiempo de tracción por salida: 3 min
Máxima concurrencia: 4 tren(es) traccionando a la vez
La máxima concurrencia sucede 5 vez/veces

Tabla 1. Resultados de la simulación de densidad de tráfico.

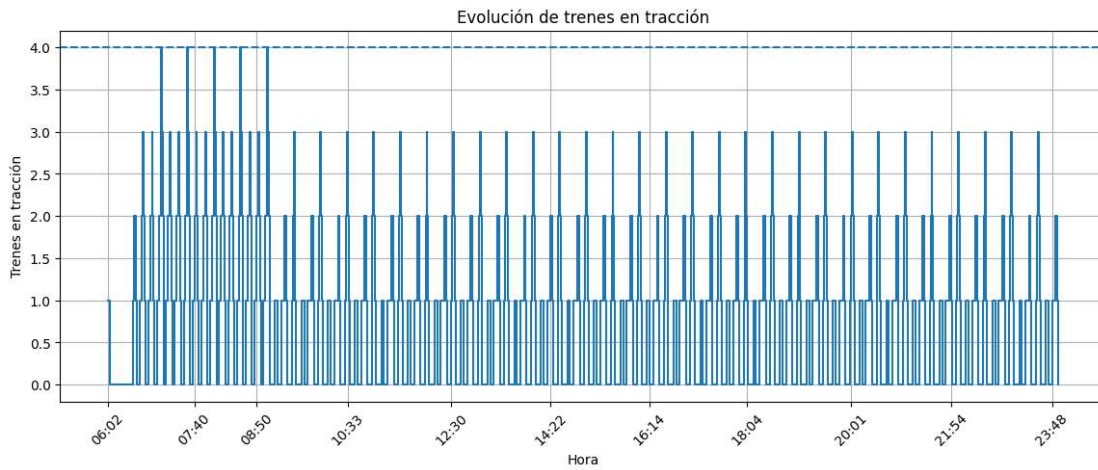


Figura 11. Grafica de numero de trenes (y) para cada hora (x).

En la figura 11, se puede observar la densidad de trenes en función de las horas:

- El eje X (Hora) es el tiempo desde aproximadamente 06:00 hasta casi 24:00.
- El eje Y (Trenes en tracción): número de trenes que están simultáneamente traccionado, dicho de otra forma, consumiendo energía.
- La curva es tipo “escalonada” porque el sistema funciona por eventos discretos (+1 inicio de tracción, -1 fin de la tracción).
- La línea discontinua en 4: marca la máxima concurrencia alcanzada, Se alcanza varias veces en la franja aprox. 07:00 – 09:00 y es el periodo más crítico del sistema.
- El intervalo de tiempo en el que 3 o 4 trenes traccionan a la vez es de 20 minutos aproximadamente, tiempo necesario para no ser considerado régimen permanente ni sobrepasar ningún límite como se verá más adelante. Además, cabe destacar que este tráfico sucede durante menos de un minuto.
- Lo más común y lo que se podría considerar régimen permanente son 2 trenes.

4.1.2.3 Potencia de funcionamiento continuo

A partir de los resultados obtenidos en la simulación y de la normativa vigente de Adif sobre tipologías de subestaciones de tracción (resumida en la tabla 2), se deduce que la potencia nominal del conjunto rectificador debe ser de 6000 kW (6 MW). Esta elección se justifica en que una subestación estándar de 3 MW resultaría insuficiente para alimentar de manera simultánea a cuatro trenes en fase de tracción. En consecuencia, bajo esta configuración de 6 MW, el sistema suministrará una corriente nominal de salida hacia la catenaria de aproximadamente 1818 A.

Potencia del rectificador	Corriente básica continua
3000 kW	909 A
6000 kW	1818 A

Tabla 2. Corriente básica continua. [13].

Luego, el sistema se modelará tomando como referencia la unidad de tren Serie 446 de Renfe, cuyas especificaciones técnicas se detallarán en apartados posteriores. Este análisis permite comprobar que las hipótesis operativas planteadas cumplen con la clase de servicio del rectificador (la cual se puede ver en la figura 12).

Dado que la corriente nominal de dicho tren es de 800 A, la tracción simultánea de tres o 4 trenes implica 2400 y 3200 A respectivamente. Cabe destacar que el valor más alto y desfavorable de corriente (3200 A), no solo se mantiene por debajo del límite máximo admisible de sobrecarga, sino que este pico de demanda tiene una duración inferior a los cinco minutos, cumpliendo así con los márgenes térmicos establecidos por la clase de servicio del rectificador.

- a) $I_a = I_{cc} = 1818$.
- b) $I_b = 1,5 \cdot I_{cc} = 2727$, durante 2 horas partiendo del régimen anterior (a).
- c) $I_c = 3 \cdot I_{cc} = 5454$, durante 5 minutos partiendo del régimen anterior (b)

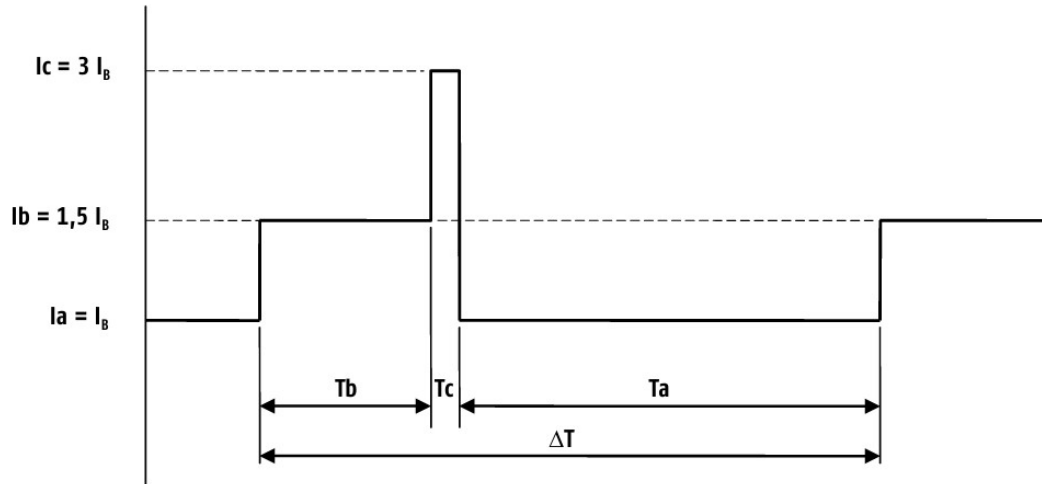


Figura 12. Clase de servicio del rectificador. [13].

4.1.2.4 Tensión de entrada

La tensión de entrada queda determinada por los límites de tensión de la catenaria según la norma UNE EN 50163 [21] y que aparece en el documento 023CA220_2016 [22] de Adif.

Valores de tensión en corriente continua	
Permanente mínima	2000 V
Nominal	3000 V
Permanente máxima	3600 V
No permanente máxima	3900 V

Tabla 3. Tipo de corriente y tensión eléctrica de alimentación. [22].

4.2 DISEÑO DEL SISTEMA EN PARALELO

Como ya se ha visto en el estudio del sistema ya existente, la potencia total es de 6 MW, la cual es demasiado grande para un único modelo, por ello, la subestación contará con 12 módulos de 500 kW cada uno ($P_N = P_{mod} = 500kW$), que se considerará el valor nominal. Con esto, cada competente sale de un tamaño más razonable, lo cual será más sencillo de transportar y de dimensionar.

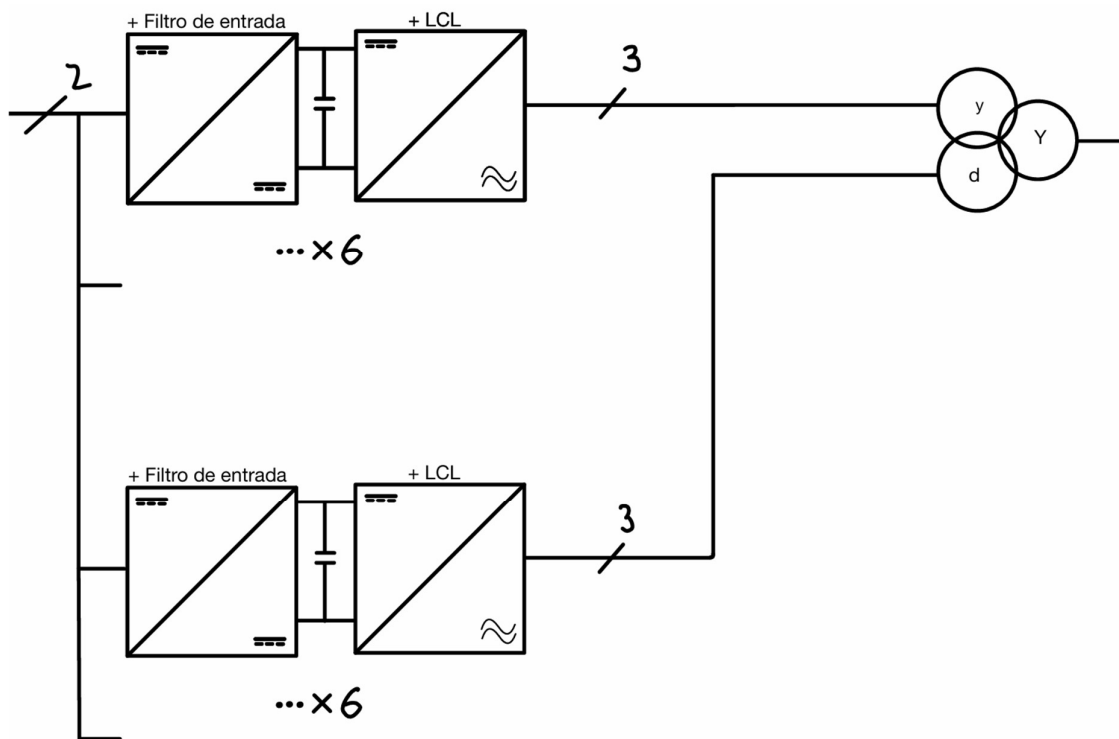


Figura 13. Esquema de la disposición de los 12 módulos.

De ahora en adelante todos los cálculos de dimensionamiento se harán un módulo individual.

Teniendo en cuenta que se aprovechará el transformador de tracción ya existente, la mitad de los módulos estarán conectados al devanado en estrella y la otra mitad al triángulo. Esto se hace debido a dos razones:

1. Equilibrio térmico y eléctrico: es indispensable distribuir la carga de manera simétrica entre ambos secundarios para evitar la sobrecarga térmica por efecto Joule en los devanados y prevenir asimetrías en las caídas de tensión de la máquina.
2. Calidad de la onda: el desfase inherente de 30° eléctricos entre los devanados en estrella y triángulo permite una cancelación natural de armónicos de bajo orden (como el 5° y el 7°) reflejados en el devanado primario. Esta configuración mitiga significativamente la inyección de distorsión en la red de distribución, garantizando el estricto cumplimiento de la norma UNE-EN IEC 61000-2-4:2025 [23] o IEEE 519-2022 [24], la cual limita la Distorsión Armónica Total (THD) a 5 %. [12], [25].

Por otro lado, para el dimensionamiento del sistema se denotará la potencia en las expresiones matemáticas genéricamente como P . Al tratarse de un equipo de regeneración, el análisis no puede limitarse únicamente a los valores nominales de la instalación. Aunque, el valor la corriente nominal I_n sigue siendo indispensable para verificar que el sistema opera dentro del rango establecido por la clase de servicio del rectificador original (figura 12).

Se ha de tener en cuenta que los picos de energía regenerada pueden superar la capacidad nominal de la subestación. Entonces, dependiendo de la criticidad del componente a dimensionar, se adoptará la potencia nominal por módulo (P_{mod}) o la potencia máxima transitoria ($P_{mododulomax}$). Tal y como se detalla en la sección 4.5, la magnitud de esta potencia (y consecuentemente, de la corriente inyectada) está estrictamente condicionada por el número de trenes que frenan de forma simultánea, asumiéndose como escenario para dimensionar el más desfavorable, que resulta ser la coincidencia de cuatro trenes a la vez.

Establecer este límite operativo resulta crítico para el diseño: por un lado, asegura que la capacidad térmica y eléctrica de los componentes soporte las sollicitaciones más severas de la red; y por otro, garantiza que el convertidor cumpla de forma estricta con los márgenes de sobrecarga dictados por la clase de servicio del rectificador principal.

4.2.1 Elementos de conmutación

La etapa de conversión de potencia estará basada en semiconductores de tipo IGBT (Transistor Bipolar de Puerta Aislada). Tras analizar los requisitos del sistema, se ha establecido una frecuencia de conmutación ($f_{conmutación}$) nominal a 6 kHz. Esta decisión responde a un compromiso de diseño basado en los siguientes criterios técnicos:

1. Rango de frecuencias y potencias: En inversores de tracción de media y alta potencia, la ventana operativa óptima para la tecnología IGBT suele situarse entre 1 y 20 kHz. Además, como se puede ver en la figura 14, también cumple los requisitos de potencia para cada módulo.
2. Perdidas por conmutación: al operar a 500 kW, un aumento excesivo de la frecuencia incrementaría mucho las pérdidas por conmutación de los semiconductores, mermando el rendimiento global del equipo.
3. Volumen de la etapa de filtrado: por el contrario, reducir en exceso la frecuencia obligaría a sobredimensionar los componentes pasivos (inductancias y condensadores) del filtro LCL para mantener la misma calidad de onda, encareciendo el sistema y aumentando su huella espacial.

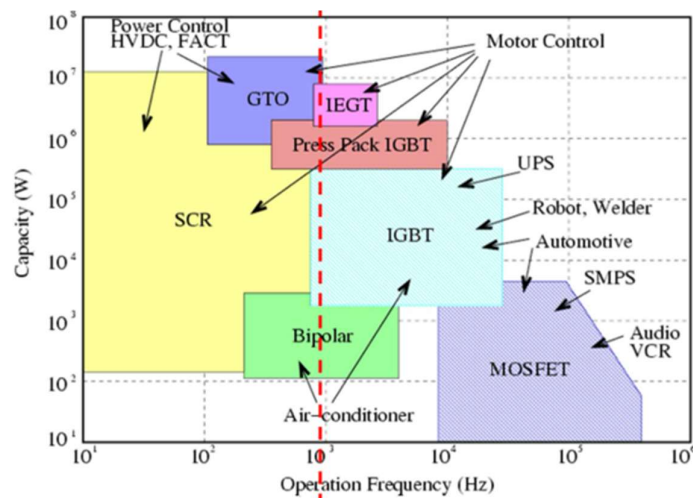


Figura 14. Relación entre potencia y frecuencia de conmutación. [26].

Como consecuencia de la operación de los módulos IGBT a alta potencia y a una frecuencia de 6 kHz, el sistema generará una considerable cantidad de calor residual. Este calentamiento proviene de pérdidas, siendo estas:

1. Las pérdidas por conmutación: derivadas de las transiciones de encendido y apagado de los semiconductores miles de veces por segundo.
2. Las pérdidas por conducción: causadas por la caída de tensión interna del dispositivo cuando la corriente circula a través de él.

Para garantizar la viabilidad del equipo, resulta obligatorio incorporar un sistema de disipación térmica. El dimensionamiento de este sistema de refrigeración será crítico para evacuar el flujo de calor hacia el exterior y asegurar que la temperatura interna del semiconductor no exceda los límites de seguridad marcados por el fabricante.

Como no se hará un cálculo de pérdidas, se supondrá que la subestación tiene un rendimiento del 96%, lo que implica que de la potencia total regenerada 4% acabará disipándose en forma de calor en el sistema, esto será imprescindible para dimensionar el sistema de refrigeración.

4.3 CONVERTIDOR CC-CC

La incorporación de una etapa de conversión CC-CC resulta indispensable para adaptar y regular el nivel de tensión proveniente de la catenaria de forma previa a la etapa de inversión y dar aislamiento galvánico. Adicionalmente, este bloque funcional permite controlar el flujo de potencia, estabilizar la tensión del bus intermedio de continua y optimizar la respuesta dinámica de todo el sistema de recuperación. Para esta etapa se ha seleccionado la topología de puente completo (*Full-Bridge*). Esta elección técnica se fundamenta en las siguientes razones [27]:

1. Capacidad de aislamiento: la integración de un transformador de media frecuencia en esta topología proporciona una barrera de aislamiento galvánico total entre la catenaria (sometida a fuertes transitorios y sobretensiones) y el resto del circuito de potencia y control.
2. Capacidad de potencia: Frente a topologías más simples, la arquitectura de puente completo distribuye los esfuerzos eléctricos (tensión y corriente) entre un mayor número de semiconductores, lo que conlleva a poder admitir más potencia. Adicionalmente, esta configuración presenta ventajas en el diseño magnético: al manejar niveles de corriente inferiores a los de un convertidor de medio puente (*Half-Bridge*) para una misma potencia, permite emplear un hilo de cobre de menor sección transversal en el devanado primario del transformador, evitando el uso de conductores más gruesos y voluminosos.
3. Eficiencia: en la arquitectura de puente completo, a pesar de que es posible añadirla, no se requiere una resistencia para disipar energía. Esto se debe a que esta configuración permite que la energía reactiva almacenada en la inductancia de dispersión del transformador se realimente de manera directa al bus de continua. Este fenómeno se analizará más adelante al estudiar el comportamiento y las formas de onda del convertidor, específicamente durante el intervalo de tiempo t_2 , que representa el periodo en el que se descargan las bobinas del circuito. Al no disipar esta energía residual en forma de calor, se maximiza el rendimiento global del equipo y se mejora significativamente su eficiencia energética

4.3.1.1 Elección de topología

A continuación, se discutirá cual de estas dos topologías es la más adecuada:

Convertidor con *center-tap* o toma intermedia

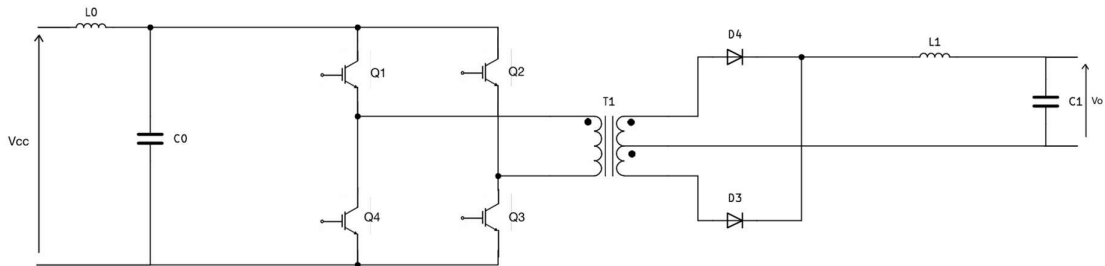


Figura 15. Convertidor con topología *center-tap*. [28].

Convertidor con puente de diodos

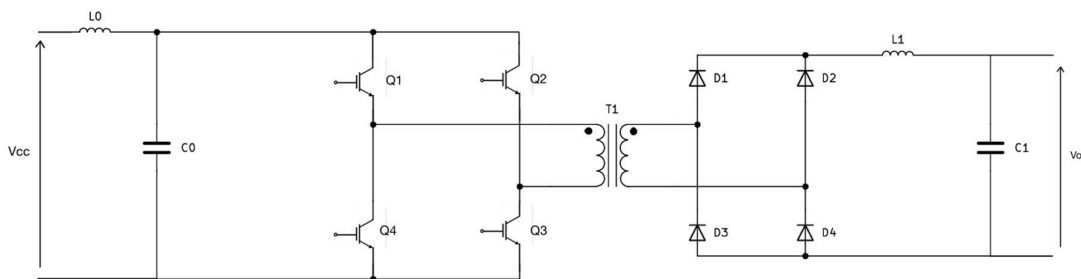


Figura 16. Convertidor con topología puente de diodos. [28].

El uso de un transformador con toma intermedia (*center-tap*) presenta un problema importante cuando se trabaja con altas tensiones. Como muestra la figura 17, el diseño de este circuito hace que, cuando uno de los semiconductores se apaga, reciba de golpe el voltaje de todo el transformador entero, y no solo el de su mitad. Esto significa que el componente debe ser capaz de soportar el doble de la tensión con la que realmente está trabajando. Por ejemplo: asumiendo una relación de transformación $n = 1$ y la tensión de entrada resulta ser $V_1 = V_2$, la tensión de salida será $2V_2$. Esto resultaría en el sobredimensionamiento de los semiconductores, lo que conlleva usar componentes mucho más grandes, caros y resistentes de lo estrictamente necesario para evitar que se rompan

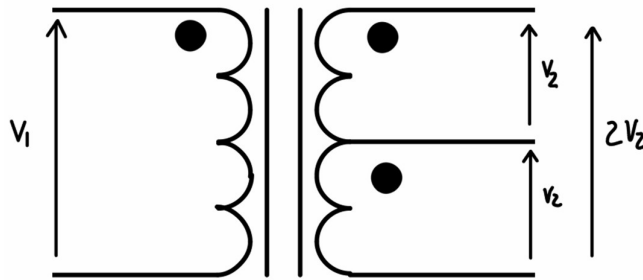


Figura 17. Transformador con toma intermedia.

Debido a los elevados niveles de tensión inversa que se generarían con una toma intermedia, se optará por rectificar la salida del transformador de alta frecuencia mediante una topología de puente completo de diodos.

4.3.1.2 Dimensionamiento y comportamiento del convertidor

A continuación, se procederá al dimensionamiento y al análisis del comportamiento de los componentes del convertidor. Para llevar a cabo este estudio, se aplicarán los principios físicos y metodologías de diseño expuestos en *Power Topologies Handbook* [28] y *Fundamentals of Power Electronics* [29]:

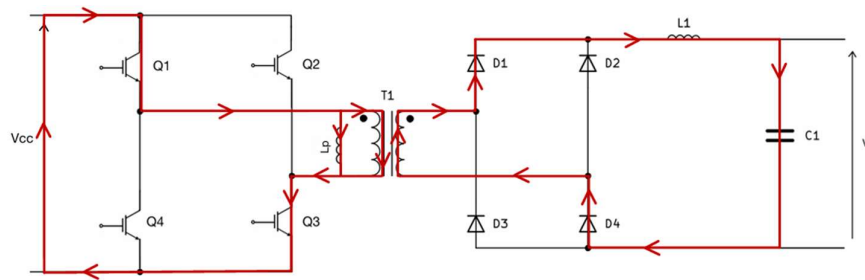


Figura 18. Recorrido de la corriente en el primer t_1 del puente completo.

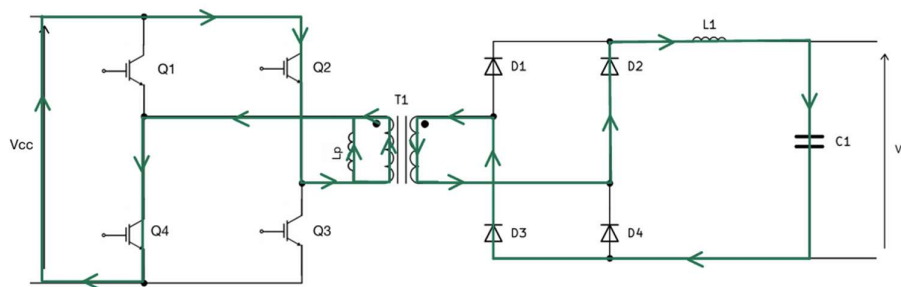


Figura 19. Recorrido de la corriente en el segundo t_1 del puente completo.

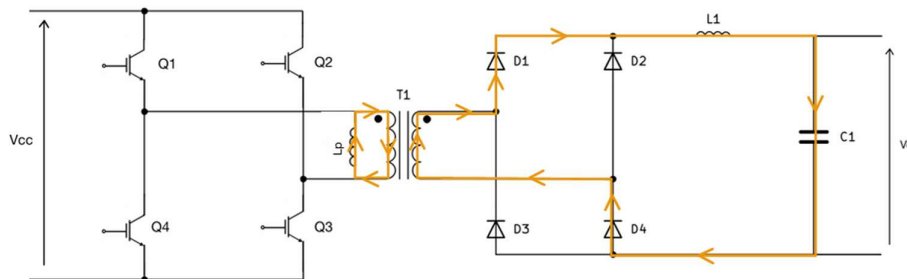


Figura 20. Recorrido de la corriente en t_2 del puente completo.

La dinámica de conmutación del puente completo se fundamenta en la división del periodo de trabajo (T) en dos, por lo que resulta en dos semiperiodos de operación simétrica. A nivel de control, el cada semiperiodo atraviesa dos estados: un intervalo de transferencia de energía (t_1), en el que se activa simultáneamente un par diagonal de semiconductores IGBT; y otro intervalo de rueda libre o desmagnetización (t_2), donde todos los IGBTs pasan a estado de bloqueo (abiertos) y la energía remanente fluye a través de los diodos de libre circulación. Dada esta alternancia, cada pareja diagonal de semiconductores asume la carga de potencia de forma alterna, limitando su ventana máxima de operación a la mitad del periodo de conmutación, todo este proceso se puede apreciar en las figuras 18, 19 y 20.

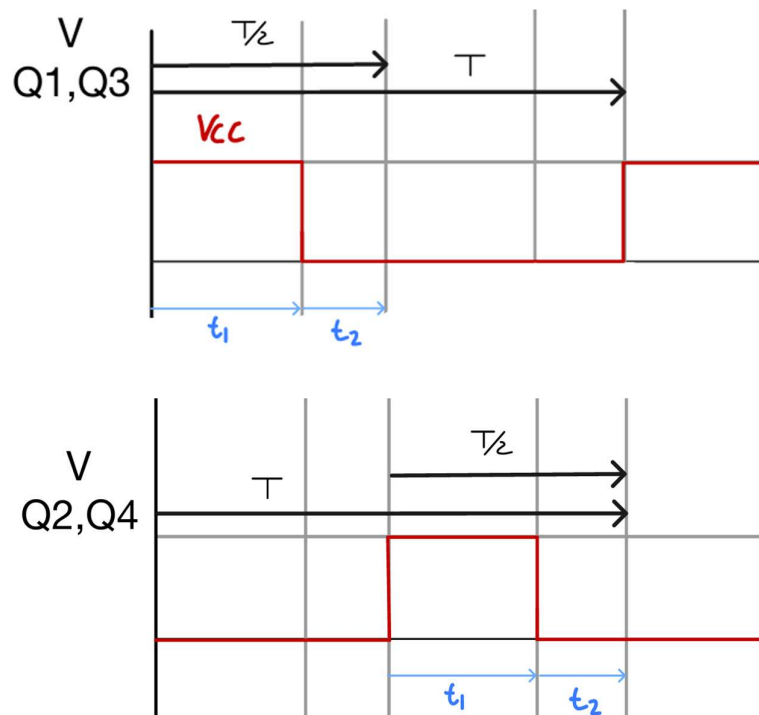


Figura 21. Forma de onda de tensión en los semiconductores del puente completo. [28].

$$\frac{T}{2} = t_1 + t_2 \quad (7)$$

$$f_{conmutación} = \frac{1}{T} \quad (8)$$

El tiempo t_2 (tiempo muerto o de desmagnetización antes mencionado) está determinado por la dinámica del transformador de alta frecuencia. Tras la apertura de un par de semiconductores es necesario introducir este tiempo de espera, durante el cual todos los interruptores activos permanecen en estado de bloqueo como se puede ver en la figura 21. Su función no es disipar energía en forma de calor, tal y como se justificó en el apartado de eficiencia, sino permitir que la energía reactiva almacenada en los elementos inductivos (L_p) retorne al bus de continua y el núcleo se desmagnetice. Este retardo es crítico para evitar la conducción cruzada (cortocircuito de rama) antes de comandar el cierre del par de semiconductores complementario.

Respecto al ciclo de trabajo (D), este parámetro define la fracción del periodo total durante la cual cada par de semiconductores IGBTs permanece en estado de conducción.

$$2D = \frac{t_1}{t_1 + t_2} \quad (9)$$

$$2D = \frac{V_o + V_d}{\left(V_{cc} \cdot \frac{N_s}{N_p}\right)} \quad (10)$$

Siendo V_o la tensión de salida del convertidor y $\frac{N_s}{N_p}$ la relación de transformación.

Nota: El límite teórico máximo de D que se puede dar es de 0,5. En segundo lugar, para simplificar el análisis de la etapa de conversión, se asume un comportamiento ideal de los diodos, despreciando su caída de tensión en estado de conducción ($V_d = 0$).

Con las ecuaciones (7) y (8) obtenemos:

$$f_{conmutación} = \frac{1}{2 \cdot (t_1 + t_2)} \quad (11)$$

Con las ecuaciones (9), (10), (11) obtenemos:

$$t_1 = \frac{1}{2 \cdot f_{conmutación}} \cdot \frac{V_o}{\left(V_{cc} \cdot \frac{N_s}{N_p}\right)} \quad (12)$$

$$t_2 = \frac{1}{2 \cdot f_{conmutación}} - t_1 \quad (13)$$

Para posteriores cálculos hará falta definir la tensión justo después del transformador V_s :

$$V_s = V_{cc} \cdot \frac{N_s}{N_p} \quad (14)$$

El nivel de tensión de salida vendrá determinado por los requerimientos de la etapa posterior al convertidor CC-CC. Esta etapa corresponde al inversor CC-CA, el cual opera mediante una técnica de Modulación por Ancho de Pulso (PWM), tal y como se aprecia en la figura 22 [26]. La onda resultante del PWM tiene un valor de pico (V_p) tal que:

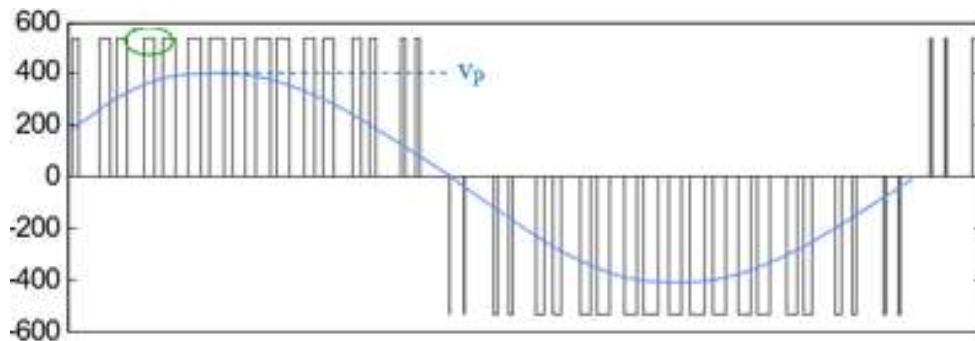


Figura 22. Tensiones necesaria y resultante de la modulación PWM. [26].

$$V_p = V_{eftrafo2^{\circ}} \cdot \sqrt{2} \quad (15)$$

$$V_p = V_o \cdot 0,8666 \cdot m \quad (16)$$

Entonces, con las ecuaciones (14) y (15) se obtiene:

$$V_o = \frac{V_{eftrafo2^{\circ}} \cdot \sqrt{2}}{0,8666 \cdot m} \quad (17)$$

Luego, con (10) y (15) se consigue la ecuación con la que se obtendrá la relación de transformación del transformador de alta frecuencia.

$$N = \frac{N_s}{N_p} = \frac{V_o}{2D \cdot V_{cc}} = \frac{V_{eftrafo2^{\circ}} \cdot \sqrt{2}}{2D \cdot V_{cc}} \quad (18)$$

El valor de la inductancia L_1 se determina a partir de su ecuación de diseño característica. Esta bobina será la encargada de mitigar el rizado de la corriente (ΔI_L), ya que, por su naturaleza, esta se opone a cambios bruscos en la corriente. Cabe destacar que este cálculo se puede abordar de dos maneras distintas: evaluando el intervalo de conducción (t_1) o el de bloqueo (t_2). En este caso, el dimensionamiento se calculará a partir del tiempo t_1 .

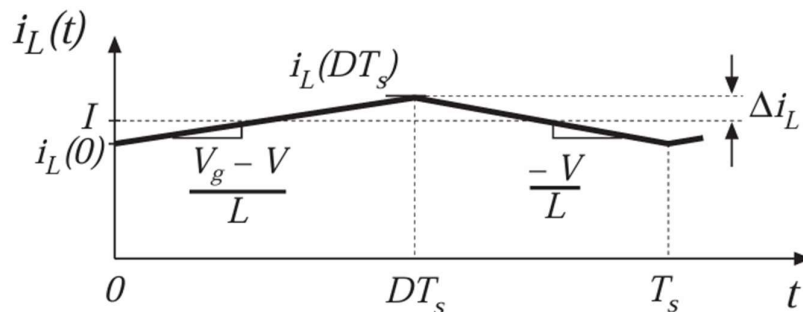


Figura 23. Comportamiento de la corriente del condensador de salida [29]

Ecuación característica de una bobina con su tensión (V_L) :

$$V_L = L \cdot \frac{di}{dt} \approx L \cdot \frac{\Delta i}{\Delta t} \quad (19)$$

$$V_L = V_s - V_o \quad (20)$$

$$\Delta t_1 = DT \quad (21)$$

$$I_L = \frac{P}{V_o} \quad (22)$$

Con (14), (17), (19), (20), (21)

$$L = \frac{V_L \cdot \Delta t}{\Delta I_L} = \frac{\left(V_{cc} \cdot \frac{Ns}{Np} - V_o\right) \cdot DT}{\Delta I_L} = \frac{\left(V_{cc} \cdot \frac{Ns}{Np} - V_o\right) \cdot D}{\Delta I_L \cdot f_{conmutación}} \quad (23)$$

Nota: $\Delta I_L = 2 \cdot \Delta i_L \rightarrow$ Se usará el valor pico-pico del rizado en los cálculos

El dimensionamiento del condensador se fundamenta en la necesidad de limitar el rizado de tensión en el bus a un valor máximo admisible, debido a que, por su naturaleza, este se opone a cambios bruscos en la tensión.

Como se observa en el análisis de las formas de onda, la carga eléctrica (q) almacenada en el condensador se corresponde con el área del triángulo de la corriente (i_c).

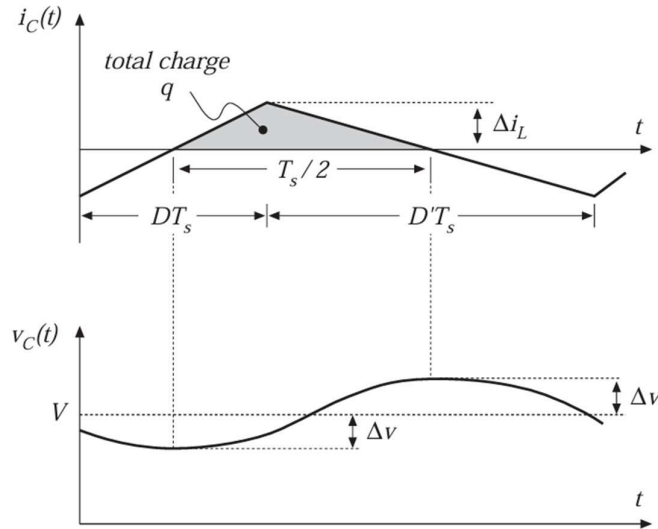


Figura 24. Comportamiento de la tensión y corriente del condensador de salida. [29]

$$q = C \cdot (\Delta V_{opp}) = \frac{T_s}{2} \cdot (1 - 2D) \quad (24)$$

Este caso que se está planteando difiere en algunos aspectos con el planteado en Fundamentals of power electronics.

1. $2 \cdot (\Delta v_o) = (\Delta V_{opp}) \rightarrow$ Se usará el valor pico-pico del rizado en los cálculos
2. $T \neq T_s$

$$\frac{T_s}{2} = \frac{t_1}{2} + \frac{t_2}{2} \Rightarrow T_s = t_1 + t_2 = \frac{1}{f_s} = \frac{1}{2 \cdot f_{conmutación}} \quad (25)$$

3. $f_s = 2 \cdot f_{conmutación}$

En consecuencia, la expresión analítica definitiva para el cálculo de la capacitancia requerida se define como:

$$C = \frac{\Delta I_L}{16 \cdot \Delta V_{opp} \cdot f_{conmutación}} \quad (26)$$

Por último, el cálculo de la inductancia paralelo del modelo ideal (L_p) que debe tener el transformador:

$$I_{mag} = \frac{V_{cc} \cdot t_1}{L_p} = \frac{V_{cc} \cdot D}{L_p \cdot f_{conmutación}} \quad (27)$$

$$I_{mag} = I_{cc} \cdot \% \Delta I_{mag} \quad (28)$$

Para el dimensionamiento se suelen usar los siguientes rangos de valores:

$$\% \Delta I_L \rightarrow [10 - 30]\%$$

$$\% \Delta V_{opp} \rightarrow [1 - 5]\%$$

$$\% \Delta I_{mag} \rightarrow [3 - 8]\%$$

4.3.1.3 Filtro de entrada

Se procederá al diseño matemático del filtro pasivo de entrada. El objetivo de esta etapa es atenuar las perturbaciones provenientes de la catenaria, tales como transitorios bruscos de tensión y armónicos inyectados por los accionamientos de los motores de tracción. Dentro de este espectro, el filtro debe mitigar componentes de baja frecuencia procedentes de la red (como posibles desequilibrios a 50 Hz y sus armónicos), así como el rizado característico de la subestación rectificadora. Respecto al condensador de entrada, su función prioritaria es definir la frecuencia de corte del filtro paso bajo y ofrecer un camino de baja impedancia para el ruido. Aunque en equipos de baja potencia este elemento puede aportar energía ante cortes de suministro momentáneos, dada la alta demanda de potencia de esta aplicación (6 MW), su función se limitará estrictamente al filtrado dinámico de tensión.

El filtro se dimensionará sabiendo que el convertidor está funcionando con Modulación por Ancho de Pulso o PWM, con intervalos de conducción y bloqueo, por lo que sus fórmulas no son las de un filtro estándar. Entonces el cálculo de dichos componentes vienen dados por las siguientes expresiones [30]:

$$I_{cc} = \frac{P}{V_{cc}} \quad (29)$$

$$C_{en} = \frac{I_{cc} \cdot D \cdot (1 - D)}{f_{conmutación} \cdot \Delta V} \quad (30)$$

Luego, la L se obtiene a partir de la ecuación que dicta la frecuencia de corte del filtro:

$$f_{cen} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_{en}C_{en}}} \Rightarrow L_{en} = \left(\frac{1}{f_c \cdot 2\pi}\right)^2 \cdot \frac{1}{C} \quad (31)$$

4.3.1.4 Control del convertidor

Para el control del convertidor se ha implementado una estrategia de regulación de tensión en lazo cerrado. Tal y como se observa en el diagrama de la figura 25, este esquema emplea un controlador Proporcional-Integral (PI) para anular el error de la señal, cuya salida define la referencia para la técnica de PWM encargada de disparar los semiconductores.

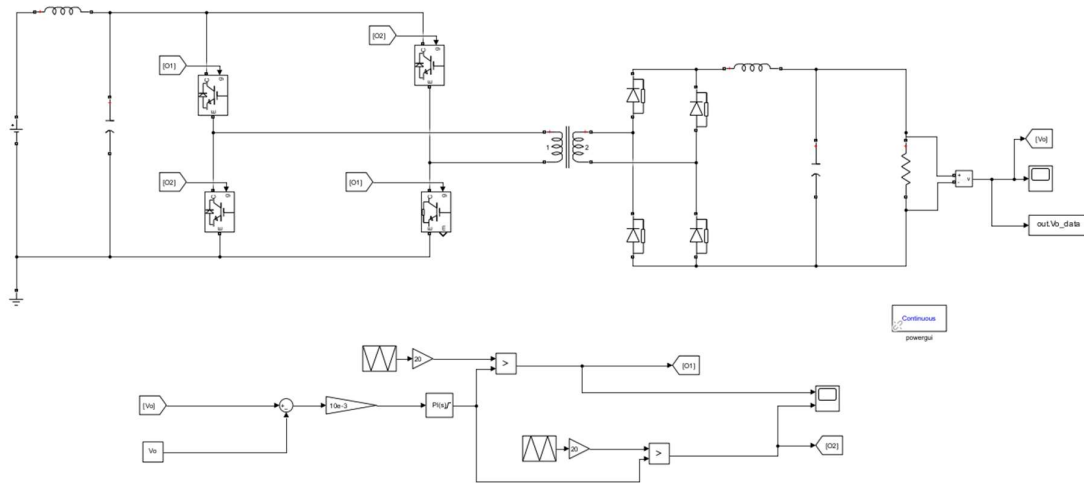


Figura 25. Esquema del control del convertidor en Simulink. (Anexo I).

A continuación, se explicarán las distintas etapas analíticas y consideraciones operativas que conforman el esquema de control implementado en el modelo de simulación:

- Cálculo del Error:

El control propuesto se basa en la monitorización constante de la tensión de salida (V_o). Esta señal se realimenta y se compara con la tensión de referencia deseada (V_{ref}). La diferencia entre ambas señales genera la señal de error: $e = V_{ref} - V_o$, la cual se multiplica por una ganancia 10^{-3} para normalizar la magnitud de la señal (que opera en el rango de los kilovoltios) a una escala unitaria manejable por el regulador PI, garantizando además su compatibilidad y proporcionalidad con la amplitud de la portadora triangular en la etapa de modulación.

- Acción del Controlador PI [31]:

Para anular el error en régimen permanente y garantizar una respuesta dinámica rápida frente a transitorios de carga o variaciones en el bus de continua, se ha implementado un controlador Proporcional-Integral (PI). La estructura del controlador se divide en dos acciones complementarias que procesan la señal de error:

Acción proporcional (P): proporciona la inmediatez necesaria frente a los regímenes transitorios. Esta acción sirve ante las variaciones bruscas en el bus de continua (como el pico de tensión generado por el frenado simultáneo de hasta cuatro trenes), la ganancia proporcional reacciona de forma instantánea al error, modificando rápidamente la señal de control para que el inversor comience a absorber energía sin retardo.

Acción integral (I): su función es acumular el error a lo largo del tiempo. Esta acción es indispensable para anular el error en régimen permanente, esto garantiza que una vez finalizado el transitorio, la variable controlada alcance exactamente el valor de referencia, evitando que el sistema se estabilice con un desfase.

En esta aplicación no se ha añadido acción diferencial (D) debido a que, en aplicaciones mecánicas y de electrónica de potencia, las señales medidas de corriente y tensión tienen un rizado, cuya frecuencia es la de conmutación del convertidor, que, sumado al ruido generado por el resto de los componentes, resultaría en una salida de control errática y saturada, lo que provocaría inestabilidad, desgaste y pérdida de eficiencia.

Por tanto, en este sector se suele usar controladores PI para la regulación de variables eléctricas en convertidores conmutados conectados a red.

- Generación de Pulsos con PWM:

La señal de salida del controlador PI se introduce a la etapa de modulación. Para gobernar el convertidor puente completo, se utiliza una estrategia de modulación PWM basada en portadoras triangulares a la frecuencia de conmutación (6000 Hz). La señal de control (proveniente del error y el PI) se compara mediante operadores con las portadoras triangulares para generar los pulsos de disparo independientes [O1] y [O2], los cuales activan las diagonales opuestas del puente de IGBTs para así conseguir el ciclo de trabajo deseado. Según vayan fluctuando las tensiones, ya sea la de entrada o la de salida, la señal del control irá cambiando y con ello el error y en consecuencia ciclo de trabajo. En la figura 26 se puede observar las ondas cuadradas resultantes, que coincide con el resultado esperado según se vio en la sección 4.3.1.2.

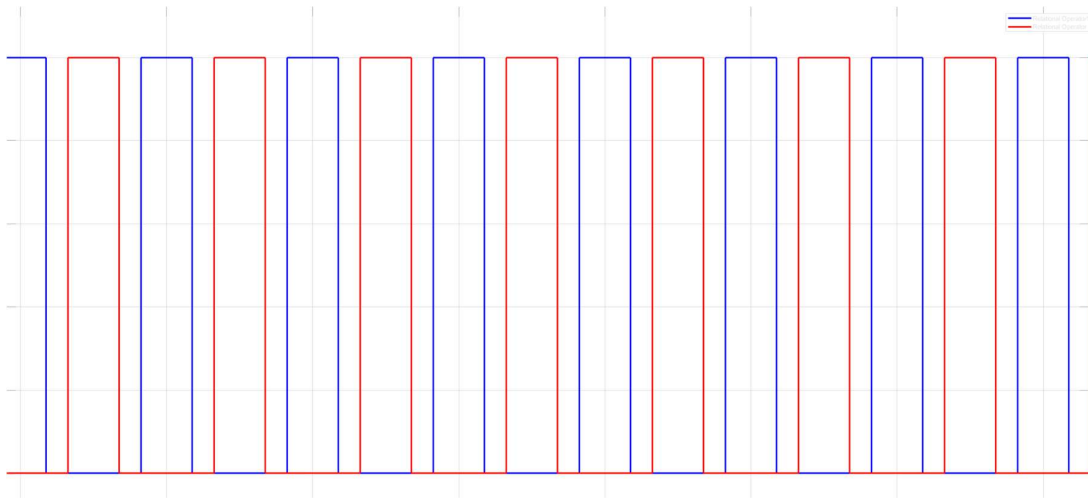


Figura 26. Onda resultante de la actuación del PWM en el control del convertidor.

Para el cálculo del PI se ha usado las ecuaciones proporcionadas por Fundamental of power electronics [29] y regulación automática [31].

La ganancia del controlador queda determinada por la siguiente formula:

$$C_{PI1} = K_{p1} \cdot \left(\frac{1 + I_1}{I_1 s} \right) = K_{p1} + \frac{K_{p1}}{I_1 s} \quad (32)$$

Conocidos los parámetros físicos de la inductancia (L) y la capacitancia (C) que conforman el filtro pasivo de salida, se puede obtener la frecuencia de resonancia natural (f_o). Este importantísimo parámetro define la frecuencia en la cual las reactancias inductiva y capacitiva se igualan en magnitud y se anulan mutuamente. A nivel dinámico, esta coincidencia en frecuencia provoca que el intercambio de energía entre los campos magnéticos del inductor y los campos eléctricos del condensador entre en resonancia, generando un pico de ganancia en la función de transferencia de la planta que, de no tenerse en cuenta en la sintonización del control, podría provocar inestabilidad en el sistema.

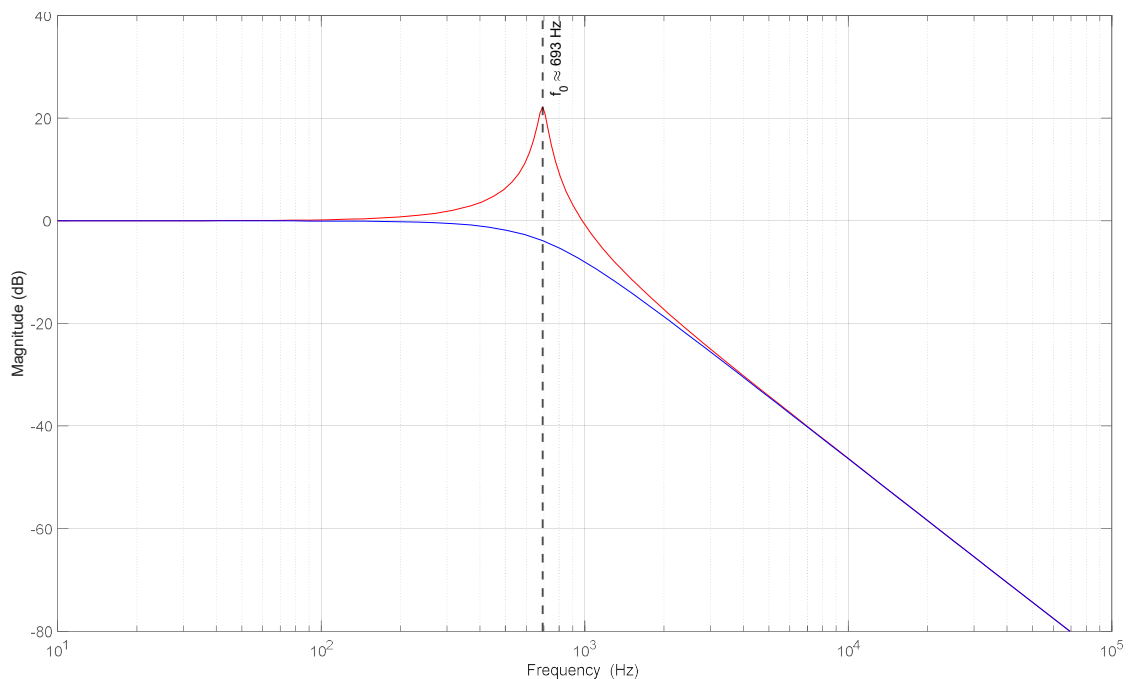


Figura 27. Análisis del pico de resonancia

El riesgo principal de inestabilidad se manifiesta claramente durante la operación con baja carga (curva roja en la figura 27), donde la ausencia de amortiguamiento resistivo eleva drásticamente el factor de calidad (Q) del circuito.

El factor de calidad es un parámetro que caracteriza el nivel de subamortiguamiento de un sistema oscilatorio de segundo orden, como es el filtro pasivo paso bajo (LC) de salida del convertidor. Desde el punto de vista energético, representa la relación entre la energía reactiva almacenada y la energía activa disipada en cada ciclo de oscilación y la fórmula del factor de calidad es [29], [32]:

$$Q = R \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (33)$$

Aunque no sea necesario para los cálculos, comprender el comportamiento del sistema en función de Q si es necesario para poner en contexto la necesidad de evitar este pico de resonancia. De forma resumida:

- Con plena carga → Q es bajo y resulta en un sistema amortiguado.
- En vacío → Q es alto y se genera un pico crítico.

Para evitar esto se debe cumplir que y garantizar estabilidad frente a ruido:

$$f_o < f_c < f_{conmutación}$$

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}} \quad (34)$$

Luego, una manera para obtener K_{p1} e I_1 es fijando la f_c , la cual, para cumplir la regla antes establecida se obtendrá dividiendo la frecuencia de conmutación entre un valor que se detallará más adelante:

Luego, para obtener los valores del control es necesario conocer la ganancia de la planta, la cual, se puede obtener resolviendo el filtro de salida del convertidor transformado el circuito al dominio de Laplace ($s = j\omega$) con las leyes de ohm, Kirchhoff y aquellas que describen el comportamiento de la bobina y condensador [33]:

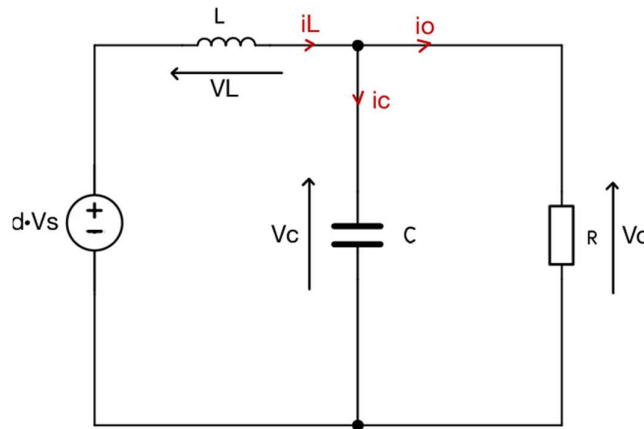


Figura 28. Circuito equivalente del filtro de salida.

Impedancia de la bobina y el condensador en el dominio de Laplace:

$$v(t) = L \cdot \frac{di(t)}{dt} \rightarrow Ls \quad (35)$$

$$i(t) = C \cdot \frac{dv(t)}{dt} \rightarrow \frac{1}{Cs} \quad (36)$$

$$V_o = V_c \quad (37)$$

$$i_L = i_c + i_o = V_o \cdot \left(\frac{1}{Cs} + \frac{1}{R} \right) = V_o \cdot \left(Cs + \frac{1}{R} \right) \quad (38)$$

$$D \cdot V_s = V_L + V_c = Ls \cdot i_L + V_c = Ls \cdot V_o \cdot \left(Cs + \frac{1}{R} \right) + V_o = V_o \cdot \left(Cs^2 + \frac{Ls}{R} + 1 \right) \quad (39)$$

Despejado obtenemos:

$$P_{vd}(s) = \frac{V_o}{D} = \frac{V_s}{CLs^2 + \frac{L}{R}s + 1} = \frac{V_s}{-CL\omega^2 + \frac{\omega L}{R}j + 1} \quad (40)$$

$$R = \frac{V_o^2}{P} \quad (41)$$

$$|P_{vd}(j\omega)| = \frac{V_s}{\sqrt{(1 - LC\omega^2)^2 + \left(\frac{L \cdot \omega}{R}\right)^2}} \quad (42)$$

$$Den = a + jb = (1 - LC\omega^2) + \frac{\omega L}{R}j \quad (43)$$

$$\angle P_{vd}(j\omega) = \angle Num - \angle Den = -\angle Den = -\tan^{-1}\left(\frac{b}{a}\right) = -\tan^{-1}\left(\frac{\frac{\omega L}{R}}{1 - LC\omega^2}\right) \quad (44)$$

La estabilidad del sistema en lazo cerrado se verificará mediante el análisis del margen de fase (Φ_m). Este parámetro garantiza una respuesta transitoria amortiguada frente a perturbaciones. La expresión para su cálculo es la siguiente:

$$\Phi_m = 180 + \varphi_c + \angle P_{vd}(j\omega) \quad (45)$$

Para asegurar un comportamiento correcto y estable, se han establecido los siguientes criterios de diseño en la ω_c :

1. Para asegurar la estabilidad del sistema se requiere un margen de fase de al menos 45° , garantizando un sobre impulso limitado y una estabilidad aceptable ante variaciones de carga.
2. Como el criterio se va a establecer a partir del margen de fase, el margen de ganancia será unitario $A_m = 1$.
3. Se fijará la fase aportada por el control a $\varphi_c = -5^\circ$ para maximizar la rapidez asumiendo un pequeño retraso de fase.

Cabe destacar que las siguientes ecuaciones solo se pueden usar cuando se fija la pulsación, en este caso se usará debido a la condición: $f_o < f_c < f_{conmutación}$

$$A_c = \frac{1}{|P_{vd}(s)|} \quad (46)$$

$$I_1 = \frac{-1}{\omega_c \cdot \tan(\varphi_c)} \quad (47)$$

$$K_{p1} = A_c \cdot \cos(\varphi_c) \quad (48)$$

La nomenclatura usada en Matlab es diferente a la usada en regulación automática, por ello se ha de realizar un último calculo antes de introducirlo en Matlab.

$$C_{PI_{matl}} = P + \frac{I_{matla}}{s} \quad (49)$$

Por lo que uniendo las 2 ecuaciones: ... y ... resulta:

$$K_{p1} + \frac{K_{p1}}{I_1 s} = P + \frac{I_{matlab1}}{s} \rightarrow \frac{K_{p1}}{I_1 s} = \frac{I_{matlab}}{s} \rightarrow I_{matla} = \frac{K_{p1}}{I_1} \quad (50)$$

4.4 INVERSOR CC-CA

El inversor CC-CA diseñado consiste en un inversor trifásico de dos niveles basado en semiconductores IGBT. Cada fase está formada por un brazo compuesto por dos interruptores electrónicos controlados mediante modulación por ancho de pulso (PWM), permitiendo sintetizar una señal trifásica de tensión alterna a partir del bus de continua.

El método de control que se implementara es el control de corriente de red o seguidor de red por corriente [34] (Grid current control). Esta técnica en lazo cerrado resulta imprescindible para garantizar un acoplamiento seguro con la red eléctrica. Su funcionamiento se basa en la sincronización continua con la tensión de la red y en la transformación de las variables trifásicas a un marco de referencia rotativo síncrono (dq). Esta vectorización permite el desacoplo matemático de las corrientes, otorgando la capacidad de fijar referencias independientes para control la potencia activa P y la reactiva Q.

A la salida del inversor se incorpora un filtro LCL con el objetivo de reducir el contenido armónico generado por la conmutación y mejorar la calidad de la energía inyectada a la red eléctrica.

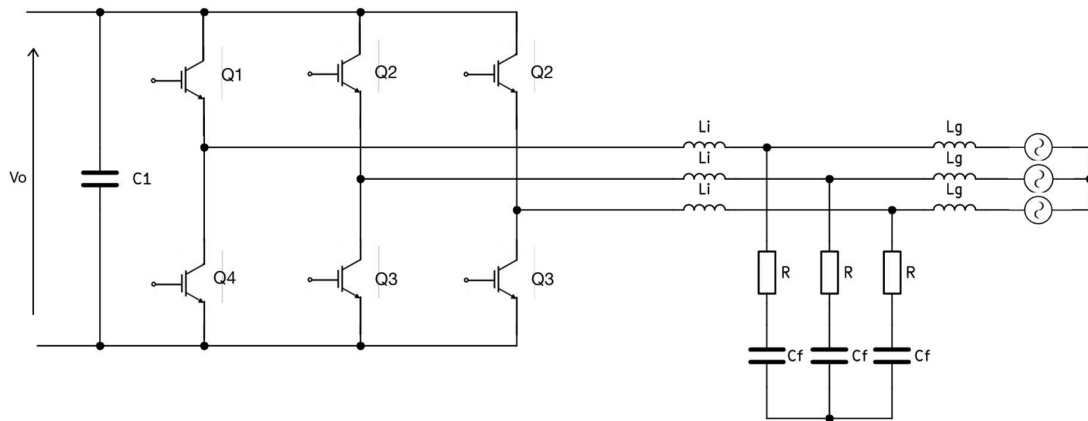


Figura 29. Inversor con filtro LCL.

4.4.1.1 Filtro de salida

En la etapa final del sistema, antes de la conexión con la red eléctrica, es necesario implementar un filtro que atenúe los armónicos generados por la conmutación PWM y sus bandas laterales ($f_{\text{conmutación}} \pm n \cdot f$). Estos armónicos producen componentes de voltaje de alta frecuencia que pueden generar ruido hacia la red, ocasionando interferencias en equipos sensibles y un incremento de pérdidas eléctricas si no se emplean filtros adecuados para limitar su propagación. Además, el filtro permite cumplir con las normativas de calidad de energía vistas anteriormente, la UNE-EN IEC 61000-2-4:2025 [23] y la IEEE 519 [24], que establece que la Tasa de Distorsión Armónica Total (THD) de la corriente inyectada debe mantenerse por debajo del 5 %.

Frente a la simplicidad de diseño que caracteriza al filtro L clásico, en este proyecto se ha seleccionado la topología de filtro LCL [35]. La principal desventaja del filtro L radica en el excesivo volumen y peso requeridos para asegurar un filtrado óptimo. El filtro LCL, por su estructura de tercer orden, supera esta barrera al presentar una pendiente de atenuación de -60 dB/década (figura 30), optimizando el rendimiento de filtrado y reduciendo drásticamente el tamaño de los componentes magnéticos.

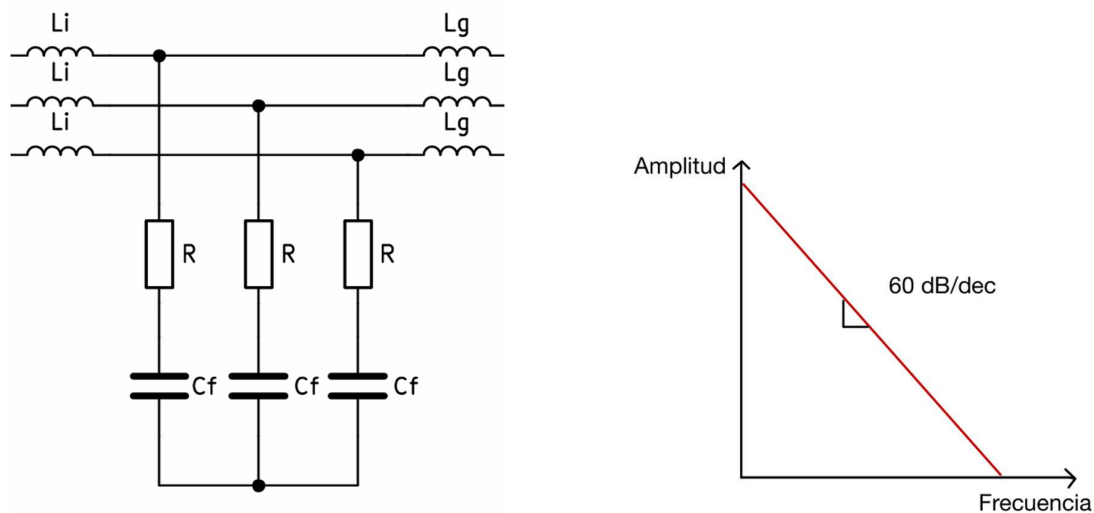


Figura 30. Filtro de salida LCL y su pendiente de atenuación.

Cálculos [34], [36], [37].

$$Z_{base} = \frac{(V_{eftrafo2^\circ})^2}{P_n} \quad (51)$$

$$C_{base} = \frac{1}{2\pi \cdot f_{red} \cdot Z_{base}} \quad (52)$$

El valor del condensador se selecciona de modo que la reducción del factor de potencia a plena carga no supere el 5%.

$$C_f = 5 \% \cdot C_{base} \quad (53)$$

$$I_{max} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V_{eftrafo2^\circ}} \quad (54)$$

$$\Delta I_{max} = \% \Delta I \cdot I_{max} \quad (55)$$

$$L_i = \frac{V_o}{n \cdot f_{conmutación} \cdot \Delta I_{max}} \quad (56)$$

Donde n es un coeficiente que aumenta con el número de niveles de la forma de onda de voltaje y el número de conmutadores. En este caso, como se tratan de 3 pares de conmutadores n = 6.

$$L_g = r \cdot L_i \quad (57)$$

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{L_i + L_g}{L_i \cdot L_g \cdot C_f}} \quad (58)$$

Es estable si: $10 \cdot f_{red} < f_{res} < 0.5 \cdot f_{conmutación}$

Se pone adicionalmente una resistencia para amortiguar el pico de resonancia (R_d), ya que un filtro LCL no amortiguado llevaría al inversor a una inestabilidad oscilatoria.

$$R_d = \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{2\pi \cdot f_{res} \cdot C_f} \quad (59)$$

4.4.1.2 Control del inversor

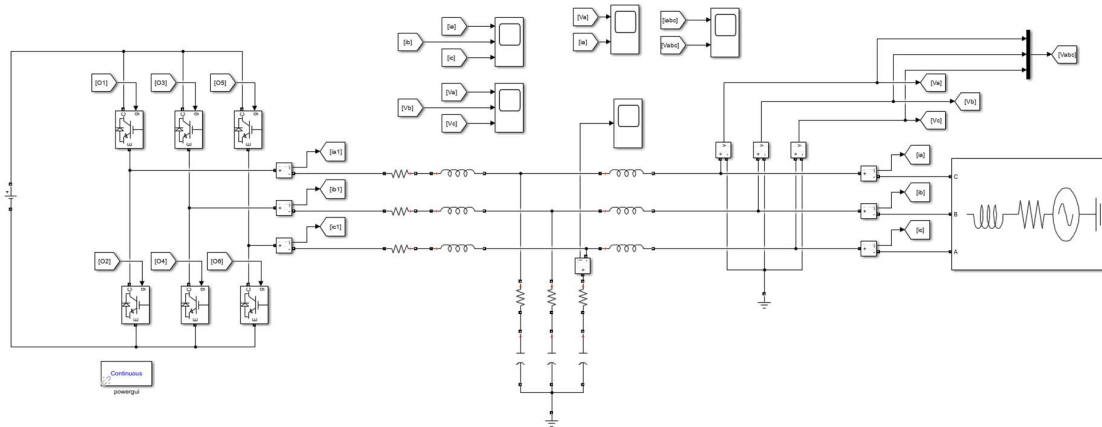


Figura 31. Circuito del inversor en Simulink. (Anexo I).

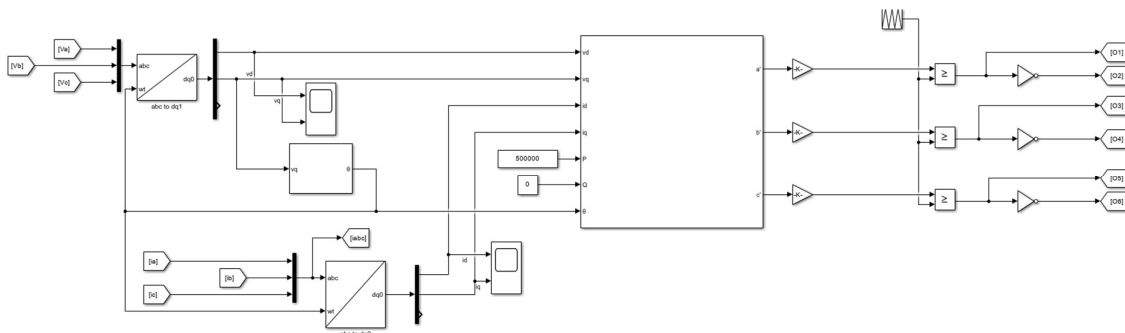


Figura 32. Control del inversor en Simulink. (Anexo I).

Para el cálculo de las ecuaciones de transferencia de la corriente se supondrán las ecuaciones ya desacopladas, además la siguiente ecuación se puede hallar tanto desde el eje q como el d, en este caso se mostrará el procedimiento con el eje d:

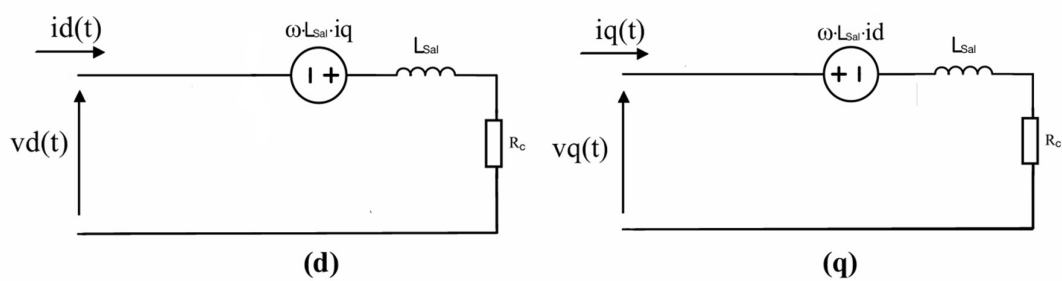


Figura 33. Circuitos equivalentes de los ejes d y q.

$$L_{sal} = L_i + L_g \quad (60)$$

$$R_c = \frac{V_{eftrafo2}^2}{P} \quad (61)$$

$$v_d(t) = L_{sal} \cdot \frac{di_q(t)}{dt} + R_c \cdot i_d \quad (62)$$

$$v_d(s) = L_{sal} \cdot s + R_c \cdot i_d = i_d (L_{sal} \cdot s + R_c) \quad (63)$$

$$G_{planta} = \frac{i_d}{v_d} = \frac{1}{L_{sal} \cdot s + R_c} \quad (64)$$

$$G_{PI} = K_{p2} + \frac{K_{i2}}{s} = \frac{K_{p2} \cdot s + K_{i2}}{s} \quad (65)$$

$$G_D = G_{PI} \cdot G_{planta} = \frac{K_{p2} \cdot s + K_{i2}}{s} \cdot \frac{1}{L_{sal} \cdot s + R_c} \quad (66)$$

En este caso se desea cancelar el polo de la planta

$$G_D = \frac{K_{p2} \cdot s + K_{i2}}{s} \cdot \frac{1}{L_{sal} \cdot s + R_c} \cdot \frac{K_{p2}}{K_{p2}} \cdot \frac{L_{sal}}{L_{sal}} \quad (67)$$

$$G_D = \frac{K_{p2}}{L_{sal} \cdot s} \cdot \frac{\left(s + \frac{K_{i2}}{K_{p2}}\right)}{\left(s + \frac{R_c}{L_{sal}}\right)} \quad (68)$$

Con estas premisas se pueden determinar todos los parámetros del controlador. Adicionalmente, al aplicar la técnica de cancelación de polos, donde el cero del regulador anula el polo de la planta, la función de transferencia en lazo cerrado se reduce a un sistema de primer orden. Resolviendo sobre esta expresión resultante, es posible deducir la constante de tiempo del lazo de regulación:

$$\frac{K_{i2}}{K_{p2}} = \frac{R_c}{L_{sal}} \rightarrow G'_D = \frac{K_{p2}}{L_{sal} \cdot s} \quad (69)$$

$$G''_D = \frac{G'_D}{1 + G'_D} = \frac{\frac{K_{p2}}{L_{sal} \cdot s}}{1 + \frac{K_{p2}}{L_{sal} \cdot s}} = \frac{1}{1 + \frac{L_{sal} \cdot s}{K_{p2}}} = \frac{1}{1 + \tau_d \cdot s} \quad (70)$$

Los parámetros resultantes son:

$$\tau_d = \frac{L_{sal}}{K_{p2}} = \frac{10}{f_{conmutación}} \quad (71)$$

$$K_{p2} = \frac{L_{sal}}{\tau_d} \quad (72)$$

$$K_{i2} = \frac{R_c}{\tau_d} \quad (73)$$

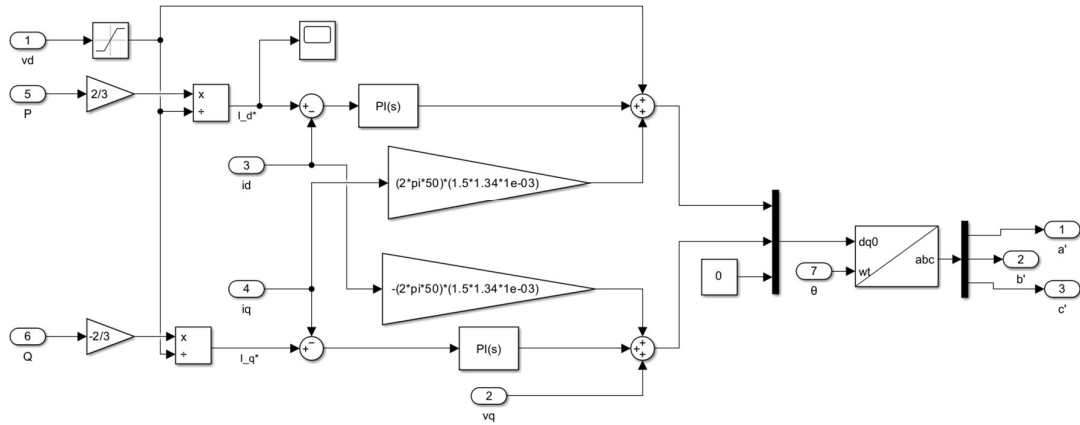


Figura 34. Control de corriente del inversor. (Anexo I).

Luego el control del PLL SRF [38], La correcta ejecución del control vectorial (dq) exige una sincronización estricta y en tiempo real con el fasor de tensión de la red eléctrica. Con este fin, la arquitectura de control integra un algoritmo de lazo de seguimiento de fase basado en marco de referencia síncrono (SRF-PLL).

La dinámica del SRF-PLL se fundamenta en proyectar el vector espacial de las tensiones trifásicas sobre un marco de coordenadas rotativo (dq). Esta vectorización se ejecuta concatenando las transformadas de Clarke y Park. La condición matemática de sincronismo se alcanza cuando el eje d del sistema rotativo se alinea perfectamente con el vector de tensión de la red. En esta situación, la proyección de la tensión sobre el eje de cuadratura se anula ($v_q = 0$), como se puede apreciar en la figura 35.

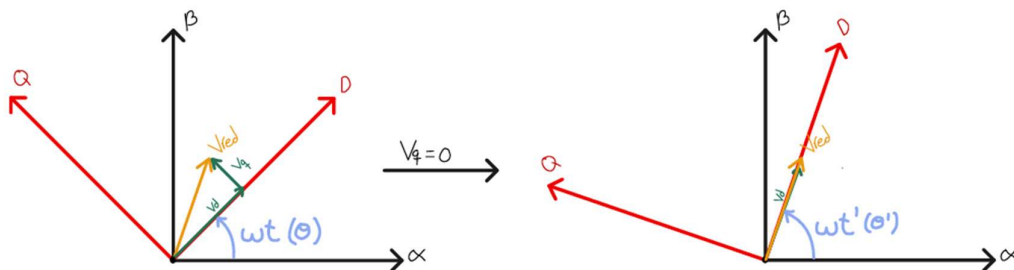


Figura 35. Acción del SRF-PLL con respecto a los ejes de referencia.

Aprovechando esta propiedad geométrica, el algoritmo emplea un compensador PI que procesa como señal de error frente a una consigna nula. La acción de control resultante se suma a la frecuencia nominal de prealimentación ($\omega^* = 2\pi 50$), generando la frecuencia angular real de la red (ω'). Finalmente, la integración ($\frac{1}{s}$) temporal de esta magnitud proporciona la estimación instantánea del ángulo de fase (θ), variable crítica que realimenta las transformadas de Park del lazo de corriente principal, asegurando el desacoplo absoluto entre las potencias activa y reactiva.

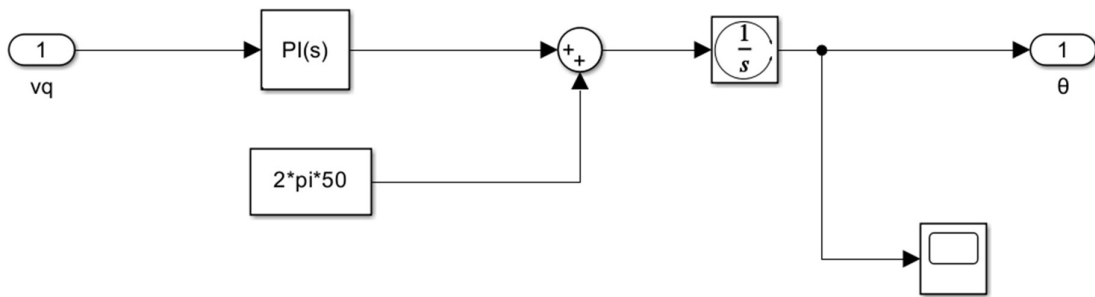


Figura 36. Control PLL.

$$K_{p-PLL} = \frac{\xi}{\omega_n} \quad (74)$$

$$K_{i-PLL} = \xi \cdot \omega_n \quad (75)$$

4.5 REGENERACIÓN DE ENERGÍA

De la flota de trenes que pasa por este tramo, se supondrá que todos son de la Serie 446 de Renfe, cuyos parámetros se presentan en la tabla 4.

Serie 446 de Renfe	
Modelo	GEE 326 A2
Tipo motor	1500 Vcc con escobillas
Numero	8 (4 por coche motor)
Potencia continua por tren	2400 kW
Tipo de freno dinámico	Regenerativo y Reostático
Peso	166,6 t
Peso máximo	219,6 t
V_{max}	100 km/h o 27,78 m/s
Aceleración 0-100	0,55 m/s ²
Deceleración con sólo freno eléctrico	0,7 m/s ² .
Deceleración de servicio	1 m/s ²

Tabla 4. Parámetros la serie de tren 446 de Renfe [39],[40].

Además, se han estimado los rendimientos del proceso como los siguientes:

$$\text{Reductora: } \eta_{\text{red}} = 0,95$$

$$\text{Recuperador: } \eta_{\text{rec}} = 0,96$$

$$\text{Línea: } \eta_{\text{Línea}} = 0,99$$

Valores nominales del motor GEE 326 A2 (lote 6), [41]:

$$P_{sal} = P_N = 300 \text{ kW}; V_N = 1500 \text{ V}; I_N = 218 \text{ A}; I_N = 1500 \text{ rpm}$$

$$P_{entrada} = V_N \cdot I_N = 1500 \cdot 218 = 327 \text{ kW} \quad (76)$$

$$\eta_{mot} = \frac{P_{sal}}{P_{entrada}} = 0.917 \quad (77)$$

$$\eta_{total} = 0,917 \cdot 0,95 \cdot 0,96 \cdot 0,98 = 0,82 \quad (78)$$

Se calculará la energía regenera:

$$M_{eq} = \frac{M_{vacio} + M_{max}}{2} = 193,1 \text{ t} \quad (79)$$

$$F_{eq} = M_{eq} \cdot a_{elec} = 193100 \text{ kg} \cdot 0,7 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 135170 \text{ N} \quad (80)$$

$$P_{pico} = F_{eq} \cdot V_{max} = 3,75 \text{ MW} \quad (81)$$

$$P_{elec_pico} = P_{pico} \cdot \eta_{mot} \cdot \eta_{red} = 3,75 \text{ MW} \cdot 0,917 \cdot 0,95 = 3.26 \text{ MW} \quad (82)$$

Se observa que la potencia eléctrica pico que experimenta el motor es mayor que la potencia nominal del motor ($2,4 \text{ MW} < 3,26 \text{ MW}$), esto puede llegar a causar problemas si sucede durante mucho tiempo, se procederá a calcular cuando acaba el régimen dinámico:

$$P_{elec_pico} = F_{eq} \cdot V \cdot \eta_{mot} \cdot \eta_{red} = 2,4 \text{ MW} \rightarrow V = 20,38 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (83)$$

$$t_{dinamico(0,7)} = \frac{(27,78 - 19,36) \text{ m/s}}{0,7 \text{ m/s}^2} = 10,57 \text{ s} \quad (84)$$

$$t_{dinamico(0,7)} = \frac{(27,78 - 19,36) \text{ m/s}}{1 \text{ m/s}^2} = 7,40 \text{ s} \quad (85)$$

Ahora se procederá al cálculo de la energía regenerada, para ello se usará el área bajo la curva en la gráfica de potencia entre tiempo, que como se puede apreciar acaba siendo la fórmula de la energía cinética.

$$P = F_{eq} \cdot V_t = F_{eq} \cdot (V_{max} - a_{total} \cdot t) \quad (86)$$

$$E = \int_0^{t_{frenada(0,7)}} P \cdot dt = F_{eq} \cdot \frac{V_{max}^2}{2a_{total}} \quad (87)$$

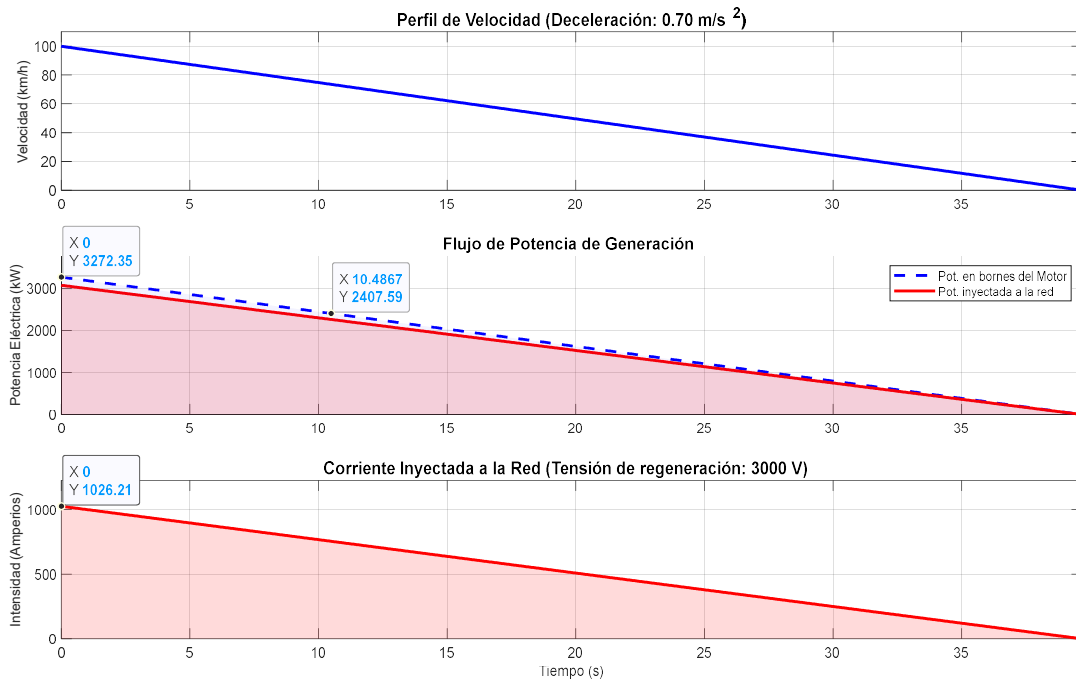


Figura 37. Gráficas de velocidad, potencia y corriente durante el frenado.

Como se aprecia en la figura 37 de simulación, el flujo de potencia de generación instantánea presenta una rampa triangular. Esto obedece a la naturaleza mecánica del frenado bajo deceleración constante, donde la potencia ($P = F \cdot V$) decrece linealmente con la velocidad.

Para $a_{total} = 0,7 \text{ m/s}^2$ (Nota: 3600 J = 1Wh)

$$t_{frenada(0,7)} = \frac{V_{max}}{a_{total}} = \frac{27,78 \text{ m/s}}{0,7 \text{ m/s}^2} = 39,69 \text{ s} \quad (88)$$

$$E_{0,7} = F_{eq} \cdot \frac{V_{max}^2}{2 \cdot a_{total}} = 135170 \text{ N} \cdot \frac{\left(27,78 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 \cdot 0,7 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 75 \text{ MJ} = 20,69 \text{ kWh} \quad (89)$$

$$E_{reg_{0,7}} = E_{0,7} \cdot \eta_{total} = 20,69 \text{ kWh} \cdot 0,82 = 16,97 \text{ kWh} \quad (90)$$

Para $a_{total} = 1 \text{ m/s}^2$ (Nota: 3600 J = 1Wh)

$$t_{frenada(1)} = \frac{V_{max}}{a_{total}} = \frac{27,78 \text{ m/s}}{1 \text{ m/s}^2} = 27,78 \text{ s} \quad (91)$$

$$E_{0,7} = F_{eq} \cdot \frac{V_{max}^2}{2 \cdot a_{total}} = 135170 \text{ N} \cdot \frac{\left(27,78 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 \cdot 1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 52,16 \text{ MJ} = 14,48 \text{ kWh} \quad (92)$$

$$E_{reg_{0,7}} = E_{0,7} \cdot \eta_{total} = 14,48 \text{ kWh} \cdot 0,82 = 11,87 \text{ kWh} \quad (93)$$

Por la naturaleza del frenado regenerativo, la tensión de la catenaria se elevará si la corriente no encuentra una carga la cual absorba esa energía. Aunque el valor mínimo de tensión de la catenaria sean 2000 Vcc (como se puede ver en la tabla 3), se podrá la condición al sistema de regeneración de solo actuar cuando la tensión alcance 3000 V. Con ello se evitan valores de corriente excesivamente altos.

Por otra parte, la potencia de regeneración máxima depende del número de trenes traccionado. Este escenario es crítico, ya que establece las solicitaciones de pico que deberán de soportar los componentes. Asumiendo el caso más desfavorable de cuatro trenes inyectando energía a la vez, se obtiene la siguiente potencia total:

$$P_{regeneradamax} = P_{pico} \cdot n^{\circ}trenes = 4 \cdot 3,26 \text{ MW} = 13 \text{ MW} \quad (94)$$

Para gestionar este flujo de energía, el sistema se apoya en su arquitectura en paralelo. La potencia máxima exigida a cada módulo individual se calcula dividiendo la potencia total entre los doce módulos previstos en el diseño:

$$P_{modulomax} = \frac{P_{regeneradamax}}{n^{\circ}modulos} = \frac{13 \text{ MW}}{12} = 1,08 \text{ MW} \quad (95)$$

Como se mencionó en la introducción de la sección 4.2, en todas las fórmulas de dimensionamiento se usará $P_{modulomax}$ en vez de la nominal P_{mod} (excepto para C_f del filtro LCL) debido a que los componentes deben ser capaces de soportar las corrientes máximas, y de dimensionar con la nominal los componentes no podría soportar las corrientes más altas.

Además, en términos de corriente cumple perfectamente la normativa establecida por Adif en la figura 12 de la clase de servicio del rectificador, recordando que $I_n = 1818 \text{ A}$:

$$I_{regeneradamax} = \frac{P_{regeneradatotalmax}}{V_{ccmin}} = \frac{13 \text{ MW}}{3000 \text{ V}} = 4333,33 \text{ A} \quad (96)$$

$$3 \cdot I_n = 5454 \text{ A} > 4333,33 \quad (97)$$

Por otro lado, en proyectos de referencia en operación como la subestación reversible de La Comba, se obtienen los perfiles de potencia ilustrados en la figura 38. En ellas se refleja la potencia neta que alcanza la subestación y cómo el ciclo de carga variable del inversor se simplifica matemáticamente a pulsos de potencia eficaz (RMS). Esta conversión resulta fundamental, ya que permite transformar la rampa teórica de la figura 37 en escalones rectangulares térmicamente equivalentes, facilitando así tanto su modelado como el dimensionamiento de los semiconductores frente a las exigencias normativas.

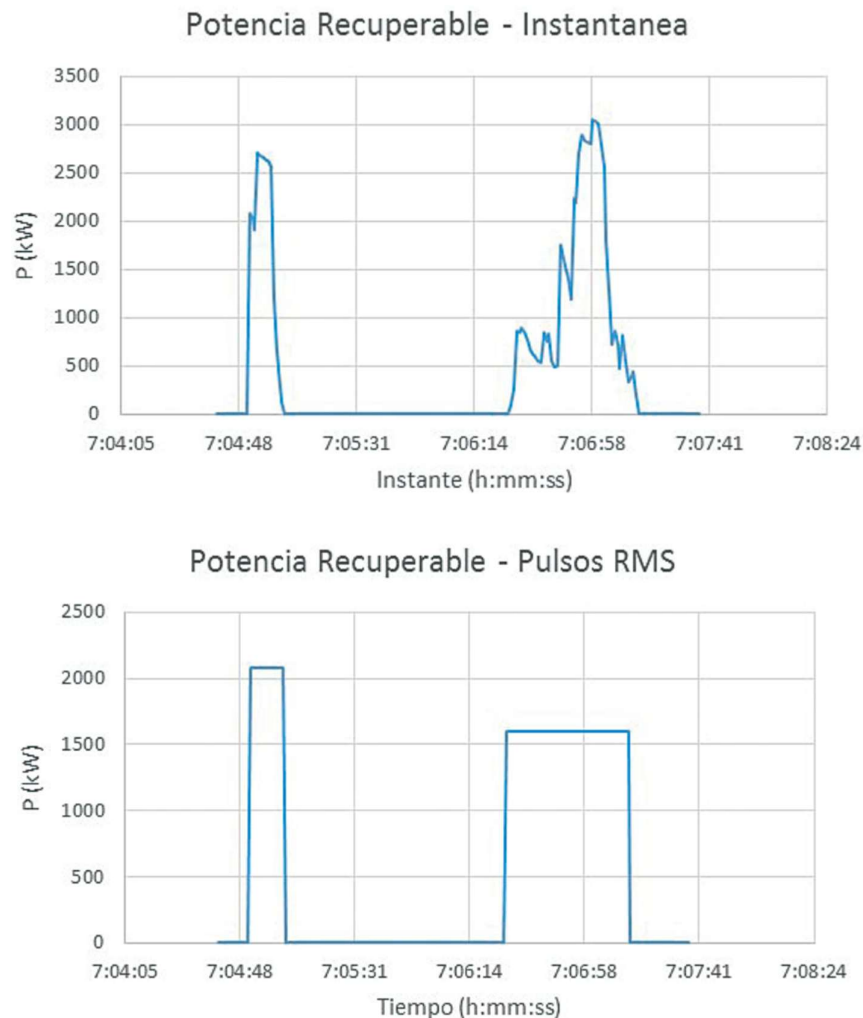


Figura 38. Perfiles de potencia instantánea y RMS de La comba. [10]

4.6 PROTECCIONES Y ELEMENTOS DE MEDIDA

4.6.1 Corriente alterna, aparatos de medida:

Para viabilizar la comercialización de la energía eléctrica regenerada, resulta imprescindible la instalación de un equipo de medida fiscal en la etapa final de la subestación. Dado que el sistema opera manejando altos niveles de potencia, la lectura directa por parte del contador de facturación no es tecnológicamente viable. Por consiguiente, es necesario reducir proporcionalmente los valores de tensión y corriente mediante aparata de medida inductiva. Para ello, se instalarán tres Transformadores de Tensión (TT) y tres Transformadores de Intensidad (TI), garantizando así la monitorización independiente de cada una de las fases del sistema trifásico.

Este conjunto de medición se ubicará a la salida de cada módulo inversor. Esto es debido a la condición de operación del TI. La alta variabilidad de la corriente de la carga (oscila entre 0 y 630 A por rama aproximadamente) provoca que los transformadores de intensidad trabajen fuera de condiciones nominales continuas. Por ello una solución es usar un transformador de clase especial 0.2s

Clases de precisión	Error de intensidad en \pm %, para valores de intensidad en % de la intensidad asignada					Desfase en \pm para los valores de intensidad en % de la intensidad asignada									
						Minutos					Centirradiaes				
	1	5	20	100	120	1	5	20	100	120	1	5	20	100	120
0,2S	0,75	0,35	0,2	0,2	0,2	30	15	10	10	10	0,9	0,45	0,3	0,3	0,3
0,5S	1,5	0,75	0,5	0,5	0,5	90	45	15	30	30	2,7	1,35	0,9	0,9	0,9

Tabla 5. Clase de precisión de un TI de clase especial. [26].

Atendiendo a los valores normalizados por normativa (10, 12.5, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 75 y sus múltiplos), para que el TI seleccionado cubra el caso máximo tendrá una relación de 750/5 A. Gracias a la designación "s", cuando la regeneración ferroviaria caiga a valores extremos del 1% de la corriente nominal (apenas 7,5 A), el equipo mantendrá un error máximo garantizado de tan solo el 0,75% (lo que se traduce en una desviación de corriente insignificante de $\pm 0,06$ A). Asimismo, el equipo contará con una potencia de precisión normalizada de 10 VA, valor óptimo para alimentar la carga de los contadores.

Por su parte, para la lectura del voltaje, se instalarán transformadores de tensión con una relación de transformación de 1100 V / 110 V (medida fase-fase).

4.6.2 Corriente alterna, protecciones:

Para salvaguardar la integridad de la subestación y de la red de distribución ante posibles perturbaciones, a la salida de la etapa de alterna se implementará un esquema de protecciones robusto, coordinado en base a la normativa ANSI. Cabe destacar que un ajuste riguroso y la coordinación de selectividad de estas protecciones requeriría el cálculo analítico de las corrientes de cortocircuito en el punto de conexión (faltas trifásicas, bifásicas y a tierra). La evaluación de estos escenarios exige conocer parámetros externos a la planta, tales como la impedancia equivalente de la red de distribución (Z_{red}) y la tensión de cortocircuito del transformador principal (X_{cc}), entre otros. Dado que no se conocen las características específicas de la red eléctrica externa y su cálculo queda fuera del alcance analítico de este proyecto, a continuación, se enumeran a nivel conceptual las protecciones que de igual modo resultaría oportuno incluir:

1. Protección de Sobreintensidad Instantánea (ANSI 50): actuaría como protección principal frente a cortocircuitos francos. La corriente de arranque (I_{arr}) se determinaría a partir del valor de una falta trifásica en el punto de protección. Al alcanzar este valor límite, el relé ordenaría la apertura inmediata del interruptor automático para aislar la falta sin retardo intencionado.

2. Protección de Sobreintensidad de Tiempo Inverso (ANSI 51): protegerá el sistema frente a sobrecargas sostenidas en la línea. Su curva de actuación parametrizada permite que el equipo soporte corrientes elevadas durante un tiempo limitado, operando más rápidamente cuanto mayor sea la magnitud de la sobrecarga. El límite inferior de esta protección se calcula a partir de la corriente de una falta bifásica para asegurar la sensibilidad del disparo.
3. Pararrayos: son dispositivos de protección contra sobretensiones (DPS) basados en varistores de óxido metálico ZnO. Estos elementos limitarían los picos de tensión transitorios, derivando la energía de la perturbación a tierra y protegiendo el aislamiento dieléctrico de los equipos. Por otro lado, esta implementación es de gran utilidad técnica para mitigar las sobretensiones debidas al funcionamiento de los convertidores en condiciones de baja carga.

4.6.3 Corriente continua

En las etapas que operan en corriente continua, como no hay variación en el flujo magnético con respecto al tiempo, se imposibilita por completo el empleo de transformadores de medida inductivos convencionales, tales como los transformadores de intensidad y de tensión basados en núcleos ferromagnéticos ordinarios.

Para solucionar esta limitación física y garantizar una adquisición precisa de la corriente del sistema, la tecnología de elección se basa en el efecto hall, que a diferencia de una resistencia *shunt* tradicional, proporcionan un aislamiento galvánico absoluto frente a la alta tensión. La medida se obtiene a partir de un campo eléctrico debido a la separación de cargas dentro de un material conductor que transporta una corriente, cuando este se somete a un campo magnético perpendicular al desplazamiento de dichas cargas [42]. Por consiguiente, para la lectura de corriente se utilizará un transductor de intensidad (efecto hall), y para la tensión, un transductor de voltaje (divisor de tensión con amplificador).

Algunas protecciones de corriente continua son [43]: Interruptores automáticos, fusibles y descargadores de sobretensiones entre otros.

4.7 DISEÑO DE LOS COMPONENTES

<i>Pot</i>	$P_{mododulomax}$	1080 kW		P_{mod}	500 kW	
<i>Tensión</i>	V_{ccmax}	3900 V	V_{ccmin}	3000	V_d	0
-	$V_{eftrafo2^{\circ}max}$	1280 V	$V_{eftrafo2^{\circ}min}$	1000 V	$V_{eftrafo2^{\circ}n}$	1100
<i>Tiempo</i>	$f_{conmutación}$	6000 Hz	D_{max}	0,49	f_{red}	50 Hz
Δ	$\% \Delta I_L$	[10 - 30]	$\% \Delta V_{opp}$	[1 - 5]	$\% \Delta I_{mag}$	[3 - 8]
<i>Const.</i>	r	0,5	n	6	m	1
<i>PI</i>	φ_c	-5°				

Tabla 6. Datos iniciales para el diseño de los componentes.

El dimensionamiento se realizará con el peor escenario posible, el cual se enunciará antes de realizar dicho calculo. Si la corriente que resulta del cálculo de potencia entre tensión resulta ser menor que la corriente de entrada esperada en a la regeneración, se usará esta última.

Componentes del convertor DCDC:

Filtro de entrada, para una frecuencia de corte de inferior a 50 Hz (C_{en} e L_{en}):

El peor escenario se encuentra en: D_{max} y V_{ccmin} y siendo $\% \Delta V = 1\%$.

$$I_{cc} = \frac{P_{mododulomax}}{V_{ccmin}} = 360 \text{ A} \quad (98)$$

$$\Delta V = V_{ccmin} \cdot \% \Delta V = 3000 \cdot 0,01 = 30 \text{ V} \quad (99)$$

$$C_{en} = \frac{I_{en} \cdot D_{max} \cdot (1 - D_{max})}{f_{conmutación} \cdot \Delta V} = \frac{360 \cdot 0,49 \cdot (1 - 0,49)}{6000 \cdot 30} = 500 \mu F \quad (100)$$

$$L_{en} = \left(\frac{1}{f_c \cdot 2\pi} \right)^2 \cdot \frac{1}{C} = \left(\frac{1}{50 \cdot 2\pi} \right)^2 \cdot \frac{1}{500 \mu F} = 20 \text{ mH} \quad (101)$$

Parámetros del transformador de alta frecuencia (N y L_p):

El peor escenario se da en: V_{ccmin} , D_{max} , $V_{eftrafo2^{\circ}max}$ y siendo $\% \Delta I_{mag} = 8\%$

$$N = \frac{N_s}{N_p} = \frac{\frac{V_{eftrafo2^{\circ}max} \cdot \sqrt{2}}{0,8666 \cdot m}}{2D_{max} \cdot V_{ccmin}} = \frac{\frac{1280 \cdot \sqrt{2}}{0,8666 \cdot 1}}{2 \cdot 0,49 \cdot 3000} = 0,71 \quad (102)$$

$$I_{mag} = I_{cc} \cdot \% \Delta I_{mag} = 360 \cdot 0,08 = 28,80 \text{ A} \quad (103)$$

$$L_p = \frac{V_{ccmin} \cdot D_{max}}{I_{mag} \cdot f_{conmutación}} = \frac{3000 \cdot 0,49}{28,8 \cdot 6000} = 8,50 \text{ mH} \quad (104)$$

En este caso la relación de transformación del transformador se puede dejar en $N = 1$. Debido a que, la tensión de entrada siempre va a ser más alta que la de salida, por lo que, en el caso de requerir menor tensión en salida solo hace falta reducir el ciclo de trabajo D .

Inductancia del filtro de salida (L):

El peor escenario se da en: V_{ccmax} , $V_{eftrafo2^{\circ}min}$ y siendo $\% \Delta I_L = 10\%$

$$V_{omin} = \frac{V_{eftrafo2^{\circ}min} \cdot \sqrt{2}}{0,8666 \cdot m} = \frac{1000 \cdot \sqrt{2}}{0,8666 \cdot 1} = 1631,91 \text{ V} \quad (105)$$

$$I_L = \frac{P_{mododulomax}}{V_{omin}} = 661,80 \text{ A} \quad (106)$$

$$\Delta I_L = \% \Delta I_L \cdot I_L = 0,1 \cdot 661,80 = 66,18 \text{ A} \quad (107)$$

$$D_a = \frac{V_{omin}}{\left(2 \cdot V_{ccmax} \cdot \frac{N_s}{N_p}\right)} = \frac{1631,91}{2 \cdot 3900 \cdot 1} = 0,21 \quad (108)$$

$$L = \frac{\left(V_{ccmax} \cdot \frac{N_s}{N_p} - V_{omin}\right) \cdot D_a}{\Delta I_L \cdot f_{conmutación}} = \frac{(3900 \cdot 1 - 1631,91) \cdot 0,21}{66,18 \cdot 6000} \approx 1,2 \text{ mH} \quad (109)$$

Capacitancia del filtro de salida (C):

El peor escenario se da en: V_{omin} y Siendo $\% \Delta V_{opp} = 1\%$

$$\Delta V_{opp} = V_{omin} \cdot \% \Delta V_{opp} = 1631,91 \cdot 0,01 = 16,32 \text{ V} \quad (110)$$

$$C = \frac{\Delta I_L}{16 \cdot \Delta V_{opp} \cdot f_{conmutación}} = \frac{66,18}{16 \cdot 16,32 \cdot 6000} = 42,25 \mu\text{F} \quad (111)$$

Cálculo del filtro de salida LCL:

Capacitancia del filtro LCL (C_f):

Para este cálculo no hay peor escenario, el valor del componente se haya a partir de ellos valores nominales.

$$Z_{base} = \frac{(V_{eftrafo2^n})^2}{P_{mod}} = 2,42 \Omega \quad (112)$$

$$C_{base} = \frac{1}{2\pi \cdot f_{red} \cdot Z_{base}} = 1315,33 \mu\text{F} \quad (113)$$

$$C_f = 5\% \cdot C_{base} = 65,77 \mu\text{F} \quad (114)$$

Cuando se adquiriera este componente, su diseño térmico y constructivo deberá soportar los periodos transitorios donde el sistema opere a $P_{modulomax}$, Específicamente, el componente debe ser capaz de disipar la máxima corriente de rizado y soportar los picos de tensión máxima asociados a ese escenario de regeneración intensiva.

Inductancias del filtro LCL (L_i e L_g):

El peor escenario se da en: $V_{eftrafo2^{\circ}min}$, V_{omax} y siendo $\% \Delta I = 10\%$

$$I_{max} = \frac{P_{mododulomax}}{\sqrt{3} \cdot V_{eftrafo2^{\circ}min}} = 623,54 \text{ A} \quad (115)$$

$$\Delta I_{max} = \% \Delta I \cdot I_{max} = 62,35 \text{ A} \quad (116)$$

$$V_{omax} = \frac{V_{eftrafo2^{\circ}max} \cdot \sqrt{2}}{0,8666 \cdot m} = \frac{1280 \cdot \sqrt{2}}{0,8666 \cdot 1} = 2088,85 \text{ V} \quad (117)$$

$$L_i = \frac{V_{omax}}{n \cdot f_{conmutación} \cdot \Delta I_{max}} = \frac{2088,85}{6 \cdot 6000 \cdot 62,35} \approx 1 \text{ mH} \quad (118)$$

$$L_g = r \cdot L = 0,5 \cdot 1 = 0,5 \text{ mH} \quad (119)$$

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{L_i + L_g}{L_i \cdot L_g \cdot C_f}} = 1075 \text{ Hz} \quad (120)$$

$$10 \cdot f_{red} < f_{res} < 0,5 \cdot f_{conmutación} \rightarrow 500 \text{ Hz} < 1075 < 3000$$

$$R_d = \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{2\pi \cdot f_{res} \cdot C_f} = 0,75 \Omega \quad (121)$$

Lista final de componentes:

Equipo	Componente	Símbolo	Valor	I	V
Filtro de entrada	Capacitancia de entrada	C_{en}	500 μF	360	3900
-	Inductancia de entrada	L_{en}	20 mH	360	3900
Convertidor CC-CC	Relación de transformación	N	1	360	3900
-	Inductancia del transformador	L_p	8,5 mH		
-	Inductancia del filtro de salida	L	1.2 mH	727,2	2270
-	Capacitancia del filtro de salida	C	42,25 μF	727,2	2088
	Puente de diodos	D	-	727,2	3900
Inversor CC-AC	Capacitancia LCL	C_f	65,77 μF	685,89	1280
-	Inductancia lado convertido	L_i	1 mH	685,89	1280
-	Inductancia lado red	L_g	0.5 mH	685,89	1280
-	Resistencia de amortiguamiento	R_d	0,75 Ω	685,89	1280

Tabla 7. Lista final de los componentes.

4.7.1 Cálculo del control PI del convertidor CC-CC

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{1,2 \cdot 42,25 \cdot 10^{-9}}} = 706,83 \text{ Hz} \quad (122)$$

$$f_c = \frac{f_{\text{conmutación}}}{6} = 1000 \text{ Hz} \quad (123)$$

Se debe cumplir que: $f_o < f_c < f_{\text{conmutación}} \rightarrow$ Luego: $106,83 < 1500 < 6000$.

Se calculo el caso más desfavorable dentro de los valores nominales:

Con: V_{omin} , V_{ccmin} y P_{mod}

$$R = \frac{V_{omin}^2}{P_{mod}} = 5,33 \Omega \quad (124)$$

$$|P_{vd}(s)| = \frac{V_{ccmin}}{\sqrt{(1 - LC \cdot \omega_c^2)^2 + \left(\frac{L \cdot \omega_c}{R}\right)^2}} = 1650 \quad (125)$$

$$\angle P_{vd}(s) = -\tan^{-1}\left(\frac{\frac{\omega_c L}{R}}{1 - LC \omega_c^2}\right) = -\tan^{-1}\left(\frac{4,52}{-3,50}\right) = -125,3^\circ \quad (126)$$

$$\Phi_m = 180 - 5 - 127,75 = 49,70 > 45^\circ \quad (127)$$

$$A_c = \frac{1}{|P_{vd}(s)|} \approx 6,06 \cdot 10^{-4} \quad (128)$$

$$I_1 = \frac{-1}{\omega_c \cdot \tan(\varphi_c)} = 1,8 \cdot 10^{-3} \rightarrow \omega I = 11,43 \quad (129)$$

$$K_{p1} = A_c \cdot \text{Cos}(\varphi_c) = 6 \cdot 10^{-4} \quad (130)$$

$$I_{matlab1} = \frac{K_{p1}}{I_1} = 0,33 \quad (131)$$

4.7.2 Cálculo del control PI del Inversor CA-CC

$$L_{sal} = L_i + L_g = 1,5 \text{ mH} \quad (132)$$

Se calculo el caso más desfavorable dentro de los valores nominales y más tarde se ajustará en la simulación:

$$R_c = \frac{(V_{eftrafo2^n})^2}{P_{mod}} = 2,42 \Omega \quad (133)$$

$$\tau_d = \frac{L_{sal}}{K_{p-invers}} = \frac{10}{f_{conmutación}} = 0,00167s \quad (134)$$

$$K_{p-invers} = \frac{L_{sal}}{\tau_d} = 0,9 \quad (135)$$

$$K_{i-invers} = \frac{R_c}{\tau_d} = 1450 \quad (136)$$

Luego el control del PLL SRF [38]:

$$K_{p-PLL} = \xi \cdot \omega_n = 444,29 \quad (137)$$

$$K_{i-PLL} = \frac{\xi}{\omega_n} = 0.0011 \quad (138)$$

Donde $\xi = \frac{1}{\sqrt{2}}$ y $\omega_n = 4\pi f_{red}$

4.8 DISIPADORES

La gestión térmica es un aspecto crítico en el diseño de convertidores, ya que garantiza la fiabilidad operativa y la vida útil de los semiconductores. Para seleccionar la tecnología de disipación adecuada, es necesario realizar una estimación de las pérdidas energéticas y evaluar el circuito térmico equivalente.

Se ha establecido como premisa de diseño que el rendimiento global de la subestación es del 96%. Por consiguiente, el 4 % de la energía se perderá en forma de calor. Para un sistema que opera a una potencia nominal de 500 kW, las pérdidas totales ascienden a:

$$Q_{disipada} = 500 \text{ kW} \cdot 0,04 = 20 \text{ kW} \quad (139)$$

Dado que la arquitectura del sistema (convertidor + inversor) está compuesta por 10 IGBT (se usará el modelo FZ600R65KE3 como ejemplo), se asume un reparto equitativo de la carga térmica. Esto resulta en una potencia disipada por cada módulo $Q_{disipada}$ de 2 kW.

Para calcular la resistencia térmica máxima que debe proporcionar el disipador, se plantea la ecuación del circuito térmico equivalente desde la primera unión del semiconductor hasta el ambiente [44]:

$$T_j = T_A + Q_{disipada} (R_{jc} + R_{CS} + R_{SA}) \quad (140)$$

Para los distintos valores de este cálculo hay que mirar la ficha técnica del semiconductor elegido y estimar un valor del ambiente. Por ello, se fija un valor objetivo de 105 °C como temperatura de funcionamiento continuo. Esto garantiza un margen de seguridad amplio respecto a la temperatura máxima permitida por el fabricante. Por otro lado, se supondrá que el aire o líquido circulante está a 40°C suponiendo así su funcionamiento en condiciones de mucho calor.

$$T_j = 105^\circ\text{C} \rightarrow \text{temperatura de funcionamiento} < T_{j\text{maxigbts}} = 125^\circ\text{C}$$

$$T_A \text{ (temperatura del aire o liquido circulante)} = 40^\circ$$

$$R_{jc} \text{ (Resistencia Térmica Unión – Carcasa)} = 10,2 \text{ K/KW}$$

$$R_{cs} \text{ (Resistencia Térmica Carcasa – Disipador)} = 9,2 \text{ K/KW}$$

$$R_{SA} \text{ (disipador)}$$

$$R_{SA} = \frac{T_j - T_A}{Q_{disipada}} - (R_{jc} + R_{cs}) = 13,1 \frac{\text{K}}{\text{kW}} \rightarrow 0,0131 \text{ }^\circ\text{C/W} \quad (141)$$

Para mantener los semiconductores dentro de la zona segura de operación bajo plena carga, será estrictamente necesario integrar un sistema de refrigeración cuyo disipador presente una resistencia térmica inferior a $0,0131 \text{ }^\circ\text{C/W}$ por módulo. Debido a lo sumamente bajo de este valor, las tecnologías que permiten estos valores son de refrigeración líquida activa frente a la disipación tradicional por aire forzado.

Tras evaluar el mercado de soluciones térmicas para electrónica de potencia, se ha seleccionado la tecnología de placas frías soldadas por fricción. En concreto, el modelo comercial 131568 de Wakefield Thermal cumple con los estrictos requerimientos del sistema. Este equipo es capaz de proporcionar una resistencia térmica de $0,0121 \text{ }^\circ\text{C/W}$ operando a un caudal de refrigerante de 1 GPM (3,8 L/min). La implementación de esta tecnología garantiza la extracción eficiente de los 2 kW de pérdidas generadas por cada módulo, manteniendo la temperatura de unión sólidamente por debajo del límite de seguridad del fabricante.

4.9 VIABILIDAD ECONÓMICA

Una vez analizada la viabilidad técnica de la subestación reversible se procede a la viabilidad económica de la misma. Esto radica en la capacidad para generar un retorno de inversión atractivo mediante el ahorro energético. A continuación, se detalla el estudio económico del proyecto, estructurado en base a los costes de capital, los costes operativos y la evaluación de la rentabilidad bajo diferentes escenarios de operación.

4.9.1 Hipótesis

Para modelar financieramente la instalación a lo largo de su ciclo de vida útil inicial evaluado (11 años, periodo 2026-2036 que se podría extender a 21 años), se ha establecido un conjunto de premisas operativas y de explotación. Como se ha mencionado antes, se considerará un volumen de tráfico diario de 275 trenes que, operando en ambos sentidos (ida y vuelta) y parando en las 3 estaciones dentro de la zona de alcance de la subestación, generan un total de 1.650 frenadas regenerativas a diario. Más adelante se mostrarán graficas que muestran la rentabilidad del proyecto dependiendo del número de frenadas diarias.

El precio de venta de la energía se ha proyectado utilizando las estimaciones del Mercado Ibérico de la Energía (OMIP) [45], comenzando en 63,0 €/MWh en 2026 y estabilizándose en torno a los 50,0 €/MWh hacia 2036. Cabe destacar que estos precios a futuro ya llevan implícita la corrección por inflación. Como tasa de descuento para actualizar los flujos de caja, se ha optado por elegir el WACC oficial de Renfe, 6,88 %, o el oficial del Administrador de Infraestructuras Ferroviarias (Adif), 7,33 % [46]. Finalmente se ha usado el de Adif al ser más conservador.

Finalmente, Para dotar al estudio de rigor analítico ante la variabilidad del tráfico, se evaluarán cuatro escenarios distintos resultantes de cruzar dos variables: la cantidad de la energía regenerada que acaba yendo a la red (70 % y 80 % de regeneración) y el perfil dinámico del tren (frenadas rápidas con menor energía disponible frente a frenadas lentas de mayor duración).

4.9.2 CAPEX del proyecto

El Coste de Capital engloba la adquisición de toda la aparamenta eléctrica, la electrónica de potencia, el sistema de refrigeración, la instrumentación y obra civil entre otros. Es preciso señalar que en el sector de la alta potencia industrial no existen tarifas públicas estandarizadas para los equipos. Por consiguiente, los costes unitarios de los semiconductores y componentes se han estimado de forma orientativa mediante consultas a catálogos de distribuidores especializados y fabricantes del sector, tales como Mouser Electronics, Poweralia, Infineon Technologies e RS.

Debido a la volatilidad de estos precios, se han calculado dos escenarios de inversión: una estimación baja (1.409.644 €) y una estimación alta (1.729.509 €). Para el cálculo de los indicadores financieros, se adoptará un enfoque conservador utilizando la media aritmética de ambas estimaciones, fijando el CAPEX del proyecto en 1.569.576 €.

4.9.3 OPEX

El Coste Operativo contempla las labores de mantenimiento preventivo, la sustitución de elementos y las inspecciones de la aparamenta. Para este estudio, el OPEX base se ha fijado en un 2 % del CAPEX [47], lo que supone un coste de partida de 31.392 € para el primer año de operación. A este valor se le ha aplicado una tasa de inflación anual constante del 3 % a lo largo de todo el periodo de estudio, asegurando así que los flujos de caja reflejen la pérdida de poder adquisitivo y el encarecimiento de la mano de obra futura.

4.9.4 Coste del Ciclo de Vida (Life Cycle Costing - LCC)

Añadiendo los costos totales del ciclo de vida del proyecto se estima en 2 millones de euros.

4.9.5 Estudio de diferentes escenarios

Los cuatro escenarios mencionados aparecen de las posibles combinaciones de estos parámetros:

Parámetros	Estimaciones bajas	estimaciones altas
% regenerado	0,7	0,8
Energía regenerada kWh	11,9	17,0

Tabla 8. Estimaciones para los escenarios posibles.

A partir de los flujos de caja generados por la energía recuperada frente a los costes de inversión y mantenimiento, se han calculado los indicadores clave de rendimiento financiero: el valor actual neto (VAN), la tasa interna de retorno (TIR), el coste nivelado de la energía (LCOX), el periodo de recuperación de la inversión (*payback*) y el retorno sobre la inversión (ROI).

Estimaciones financieras	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
Energía regenerada anual Mwh	5.017	5.733	7.167	8.191
LCOX (€/Mwh)	49,76	43,54	34,83	30,48
VAN (€ acumulados)	320.763	631.304	1.252.384	1.696.013
TIR (%)	3,93	7,50	14,17	18,70
PAYBACK (años)	8.13	6.53	4.66	3.87
ROI (%)	20	40	80	108

Tabla 9. Evaluación financiera de los diferentes escenarios.

4.9.6 Rentabilidad final del proyecto

Como se puede observar, el proyecto resulta económicamente viable ($VAN > 0$) en la totalidad de los escenarios evaluados.

Resulta fundamental señalar que los escenarios 1 y 4 representan los límites superior e inferior del funcionamiento del sistema. Mientras que el escenario 1 asume una convergencia de factores negativos poco probable de forma sostenida (frenadas rápidas y baja recuperación a red), el escenario 4 plantea unas condiciones ideales y de máxima eficiencia que difícilmente se mantendrán inalterables los 365 días del año.

Por consiguiente, a efectos de planificación financiera y evaluación del riesgo real, los escenarios cruzados (escenario 2 y escenario 3) se proponen como los modelos predictivos más representativos y rigurosos. Estos casos centrales, que promedian las condiciones de funcionamiento del tráfico ferroviario, proporcionan un periodo de recuperación de la inversión situado entre los 4 y 6 años, con una TIR que oscila entre el 7,50 % y el 14,17 %.

Estas cifras se alinean de manera precisa y realista con los retornos de inversión y plazos de amortización reportados en instalaciones análogas reales operadas por el administrador de infraestructuras.

4.9.6.1 Estudio de rentabilidad en diferentes contextos de operación

Para hacer un estudio más en profundidad, en caso de instalar el recuperador en otra subestación que no sea la del caso base, se ha realizado una gráfica tridimensional que muestra la rentabilidad final de la inversión en función del escenario y el número de frenadas diarias en dicho tramo.

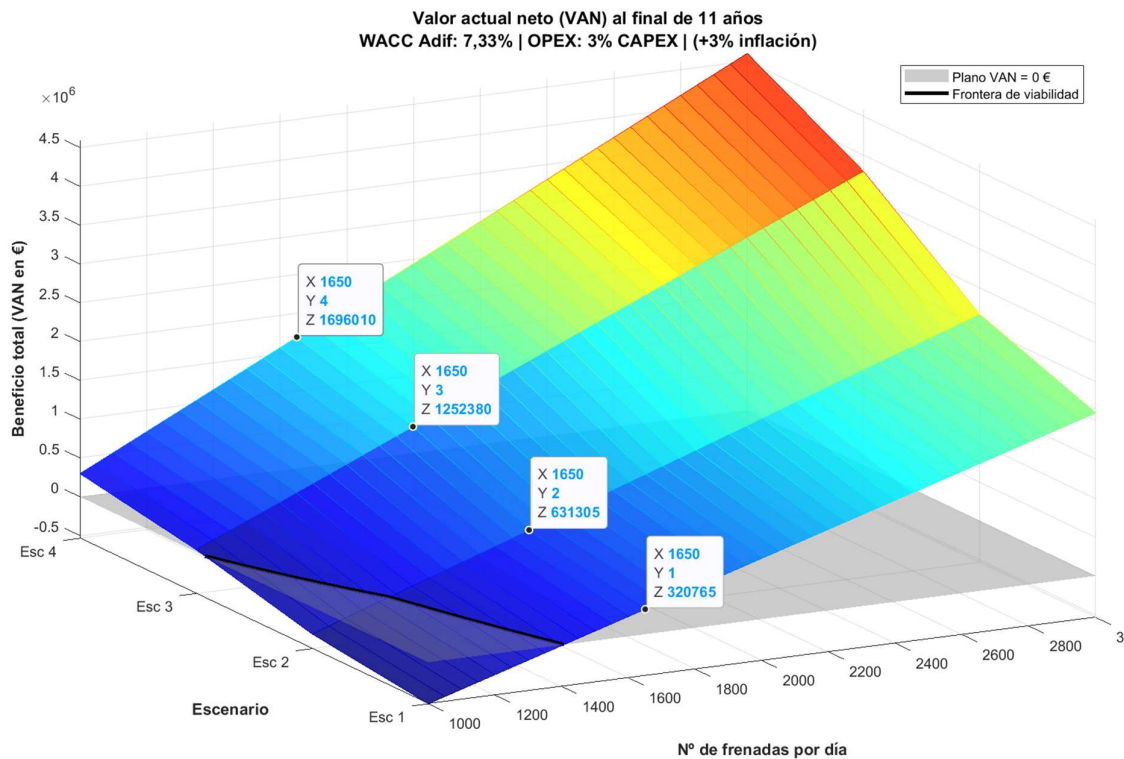


Figura 39. Plano del VAN acumulado en función del contexto de operación (Anexo I).

Los puntos marcados en la figura 39 representan los resultados calculados para el caso base. Al observar la gráfica, resulta evidente la enorme diferencia de rentabilidad que existe entre los casos extremos (el escenario 1 y el 4). Por este motivo, tal y como se había mencionado anteriormente, lo más realista y seguro es utilizar una estimación media basada en los escenarios centrales (el 2 y el 3).

Además, en esta gráfica se puede visualizar de forma muy clara la frontera de viabilidad. Es decir, sirve para analizar fácilmente a partir de qué volumen de tráfico resulta verdaderamente rentable instalar el convertidor, cumpliendo en todo momento con los criterios económicos exigidos por Adif. Por otro lado, se ha realizado un estudio para el tiempo de retorno de la inversión:

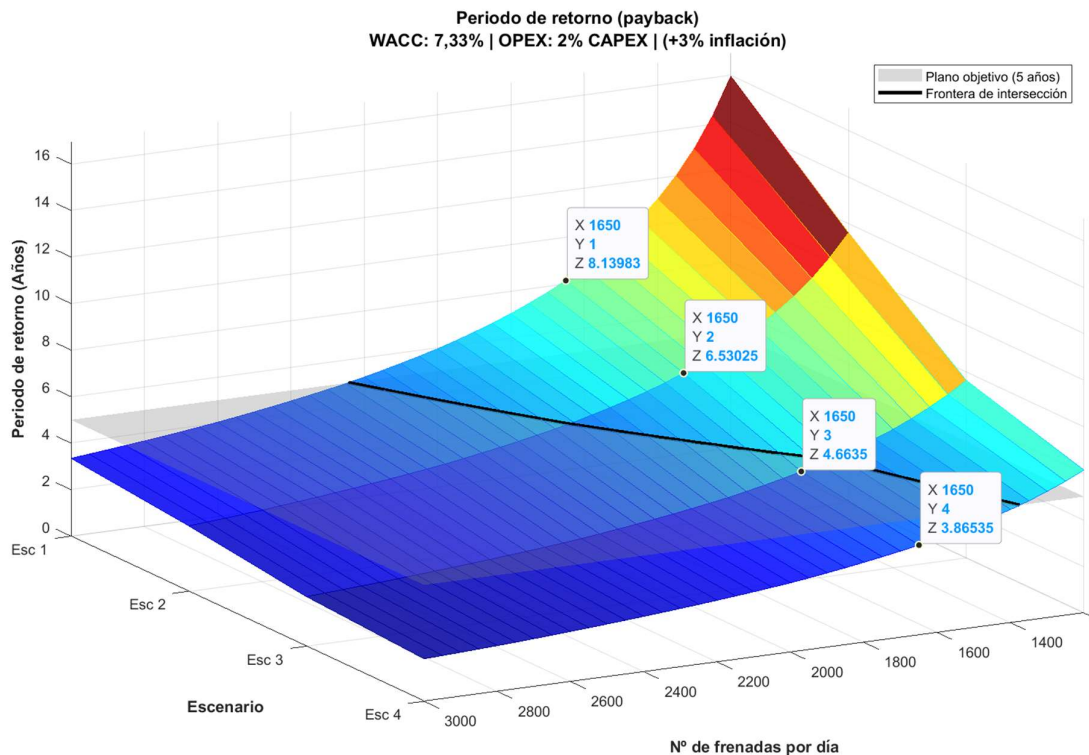


Figura 40. Plano del payback en función del contexto de operación (Anexo I).

En esta representación se ha establecido un plano objetivo horizontal situado en los 5 años, dado que constituye un indicador de muy representativo para aprobar la viabilidad de un proyecto. De este modo, cualquier contexto que quede por encima, garantiza una amortización excelente. Asimismo, un aspecto que resalta es el crecimiento exponencial del tiempo de retorno en el escenario 1.

4.10 IMPACTO MEDIOAMBIENTAL

La implementación de la subestación reversible trasciende el mero beneficio económico derivado del ahorro en la factura eléctrica, erigiéndose como una infraestructura clave para la descarbonización del transporte ferroviario. El impacto ecológico del presente proyecto se fundamenta en tres pilares principales:

1. Emisiones evitadas: Toda la energía cinética recuperada durante el frenado de los convoyes sustituye a una cantidad equivalente de energía que, de otro modo, tendría que ser generada por el mix eléctrico nacional, el cual aún contiene una cuota significativa de generación mediante combustibles fósiles [48]. Tomando como referencia las fuentes del operador del mercado, se establece un factor de emisión medio aproximado de 0,2 tCO₂/MWh saliendo aproximadamente. Esto supone que si se regenera anualmente 5000 Mwh de energía se mitigan 1000 tCO₂ al año.
2. Menor uso del freno mecánico: El funcionamiento óptimo de la subestación reversible permite a los trenes maximizar el uso del freno electrodinámico (donde los motores de tracción actúan como generadores), reduciendo drásticamente la dependencia de los frenos neumáticos de fricción. Desde una perspectiva medioambiental, esta disminución del desgaste mecánico tiene un doble impacto positivo: por un lado, reduce el consumo industrial de materias primas y la huella de carbono asociada a la fabricación y sustitución de zapatas y discos de freno; por otro lado, elimina en gran medida la emisión al aire de micropartículas suspendidas derivadas de la abrasión metálica, mejorando sustancialmente la calidad del aire en las estaciones y el entorno metropolitano.

Capítulo 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 SIMULACIONES DEL CONVERTIDOR

Es pertinente realizar una aclaración técnica respecto a los transitorios de arranque observados en las gráficas de simulación. En los escenarios modelados computacionalmente, la tensión de entrada se ha aplicado mediante una función escalón puro. Esta excitación teórica provoca la aparición de marcados picos iniciales de tensión y oscilaciones, consecuencia directa de la carga abrupta y sin amortiguamiento del condensador de entrada.

Sin embargo, en las instalaciones de tracción reales, los equipos de potencia nunca se energizan de forma instantánea. El encendido del sistema se ejecuta siempre empleando lógicas de arranque en rampa (*soft-start*) o mediante circuitos de precarga resistivos que mantienen la maniobra fuertemente amortiguada, limitando la derivada de la tensión y de la corriente. Por consiguiente, los picos de tensión observados en el instante inicial de las gráficas constituyen una respuesta transitoria inherente a la configuración matemática del simulador, y no representan un fenómeno físico que se materialice o ponga en riesgo la instalación en la realidad.

Caso 1: $V_{cc} = 3900\text{ V}$; $V_o = 1632\text{ V}$; $I_1 = 0,33$; $K_{p1} = 0,0006$; $R_{nom} = 5,32\ \Omega$

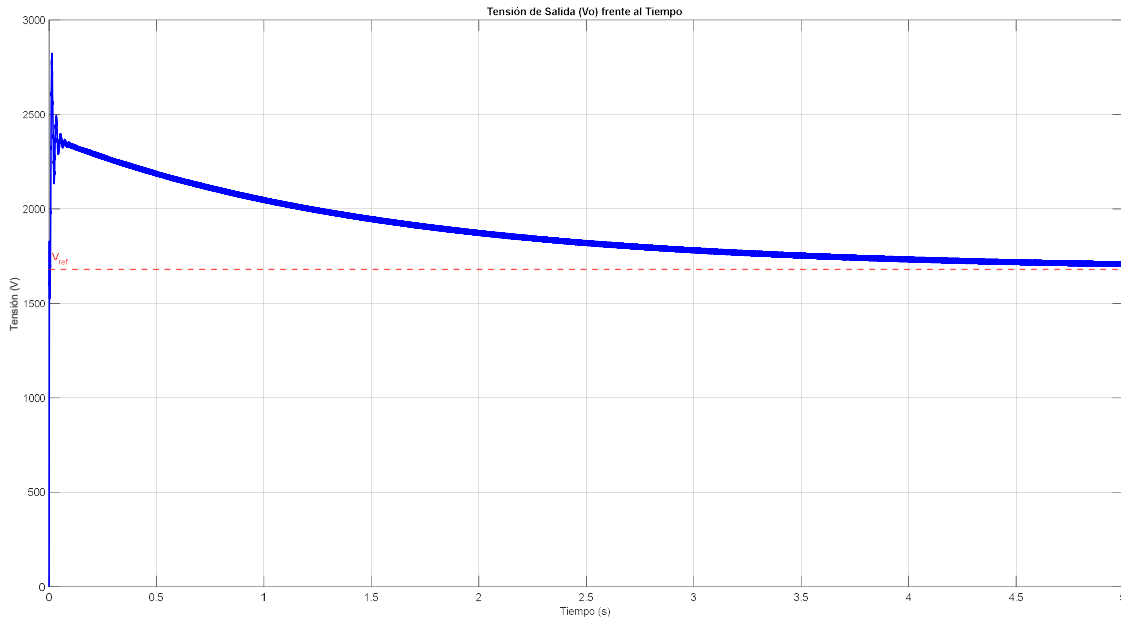


Figura 41. Gráfica de tensión de salida del convertidor frente al tiempo en el caso 1.

En la figura 41 se muestra la respuesta de la tensión de salida del convertidor en el caso 1. Se puede observar que, tras el pico inicial del arranque, la curva va descendiendo de manera constante hasta llegar a su valor de referencia (1632 V). Sin embargo, la gráfica evidencia que el sistema es bastante lento, ya que tarda 5 segundos en estabilizarse por completo (momento en el que alcanza el 99 % del valor final). Este retraso en la estabilización se debe a los parámetros elegidos para el regulador PI. Al utilizar una ganancia proporcional tan pequeña, el sistema no tiene fuerza suficiente para corregir el error de forma rápida al principio. Por tanto, el trabajo de bajar la tensión recae casi enteramente sobre la parte integral, que es la encargada de ir ajustando el valor poco a poco con el paso del tiempo.

En conclusión, aunque esta configuración consigue que la tensión baje de forma suave y sin crear nuevas oscilaciones, es una respuesta demasiado lenta para la realidad. En la operación ferroviaria, las frenadas duran apenas unos segundos, por lo que resulta imprescindible utilizar un ajuste de control que actúe con mucha más velocidad.

Caso 2: $V_{cc} = 3900\text{ V}$; $V_o = 1632\text{ V}$; $I_1 = 1$; $K_{p1} = 0,0012$; $R_{nom} = 5,32\ \Omega$

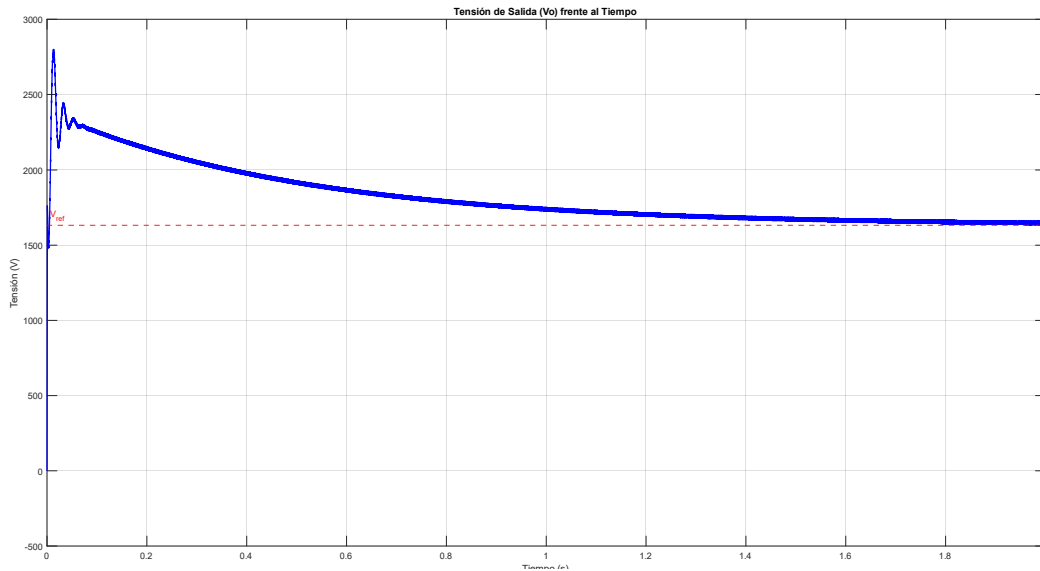


Figura 42. Grafica de tensión de salida del convertidor frente al tiempo en el caso 2.

Como se mencionó en el cálculo, en este segundo caso se han reajustado los parámetros del regulador PI para solucionar el problema de lentitud del sistema.

En la figura 42 se puede observar cómo el convertidor reacciona ahora de forma más ágil. Gracias a este nuevo ajuste, la tensión logra descender y estabilizarse en su valor de referencia (1632 V) en apenas 2 segundos. Esto supone una mejora muy significativa frente a los 5 segundos que tardaba el caso anterior, consiguiendo un tiempo de respuesta mucho más adecuado para la rapidez que exige una frenada ferroviaria real.

Caso 3: $V_{cc} = 3900\text{ V}$; $V_o = 1632\text{ V}$; $I_1 = 1$; $K_{p1} = 0,0012$; $R = 0,1\ \Omega$

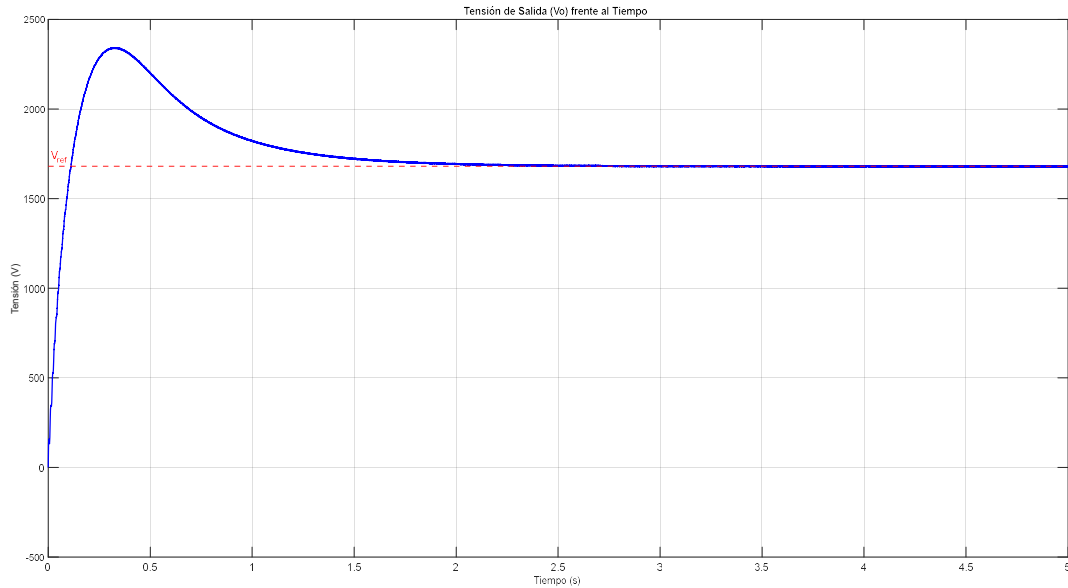


Figura 43. Grafica de tensión de salida del convertidor frente al tiempo en el caso 3.

En la figura 43 se presenta el comportamiento del sistema ante una situación de alta carga. Para simular este escenario de gran exigencia, se ha utilizado un valor de resistencia muy bajo ($R = 0,1\ \Omega$), el cual representa la impedancia interna de los componentes cuando el convertidor tiene que manejar corrientes muy elevadas. Para esta prueba se han mantenido los mismos parámetros del regulador PI optimizado que se definieron en el caso anterior.

El controlador logra ajustar la respuesta sin generar oscilaciones inestables. Finalmente, la tensión desciende de manera progresiva y consigue estabilizarse con total precisión en su valor de referencia (1632 V) en aproximadamente 2,5 segundos.

Con este resultado se comprueba que el ajuste elegido para el regulador es adecuado y seguro, ya que garantiza que el convertidor sea capaz de recuperar su nivel de tensión ideal incluso cuando se somete a condiciones de trabajo mucho más severas de lo habitual.

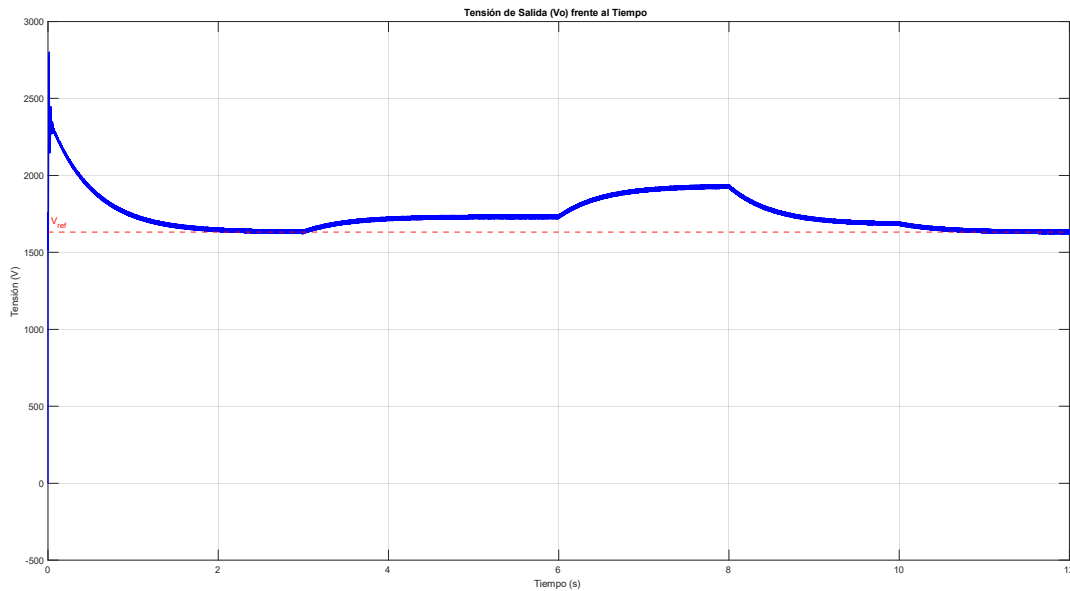


Figura 44. Gráfica de la respuesta ante una serie de escalones en la referencia.

En la figura 44 se presenta una prueba de seguimiento dinámico para comprobar la robustez del sistema de control. En esta simulación, en lugar de mantener un valor fijo, se han introducido varios cambios bruscos (en forma de escalón) en la tensión de referencia a medida que avanzaba el tiempo.

Como se puede observar en la gráfica, tras superar el transitorio de arranque inicial y estabilizarse, se aplican dos escalonados positivos en los tiempos $t = 3 \text{ s}$ y $t = 6 \text{ s}$. El regulador PI responde de manera esperada, consiguiendo adaptar la tensión de salida a los nuevos valores exigidos de forma suave, sin generar picos peligrosos ni oscilaciones que puedan causar inestabilidad.

Finalmente, en los tiempos $t = 8 \text{ s}$ y $t = 10 \text{ s}$, se aplican dos escalonados positivos y se vuelve al valor de referencia establecido al inicio. El resultado de esta simulación confirma que el control diseñado funciona exactamente como se esperaba, demostrando ser un sistema estable y capaz de adaptarse ágilmente a variaciones repentinas en las condiciones de operación.

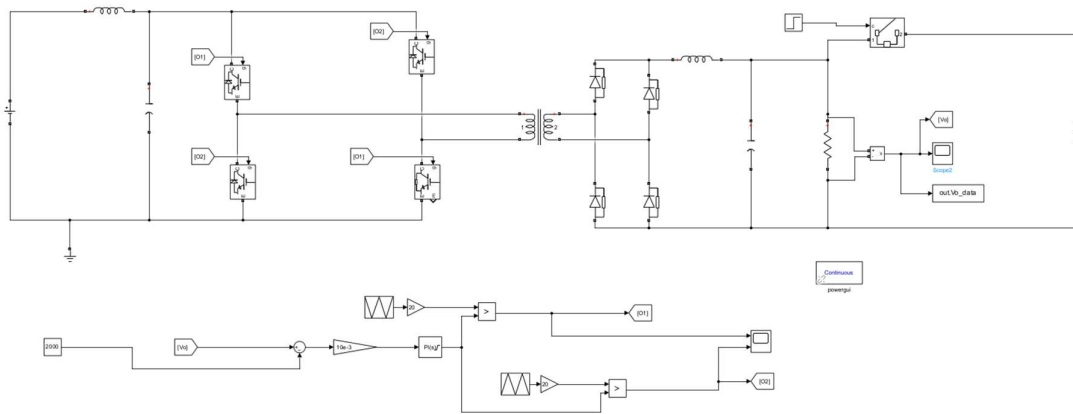


Figura 45. Esquema del control del convertidor con un breaker.

- ¿Qué sucederá si se demanda más? ¿Pierde estabilidad?

Como se puede observar en el esquema de la figura 45, se ha añadido un interruptor controlado (*breaker*) conectado en paralelo a la salida. La función de este elemento es acoplar una resistencia extra en un instante específico de la simulación, emulando así una exigencia de potencia mucho mayor de forma instantánea.

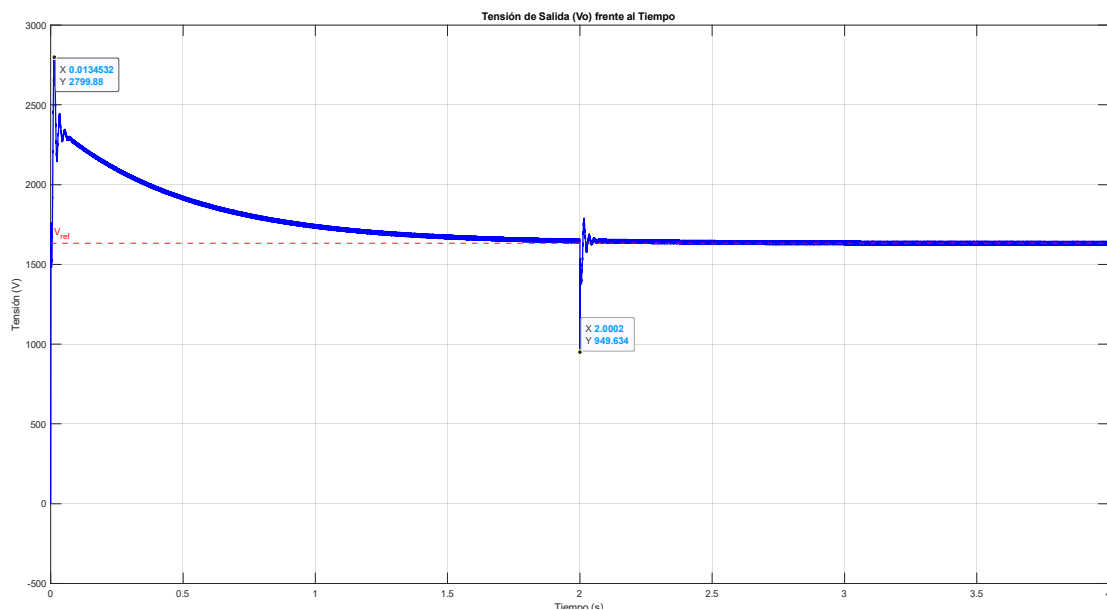


Figura 46. Gráfica de la respuesta del convertidor ante una subida repentina de la carga.

Los resultados de esta simulación se muestran en la figura 46. Durante la primera fase, el sistema realiza su arranque habitual y consigue estabilizarse en la tensión de referencia. Sin embargo, en el tiempo $t = 2$ s, el interruptor se cierra y conecta la carga adicional.

Al demandar más energía de golpe, se produce una caída de tensión muy pronunciada y casi instantánea. A pesar de la brusca que es de esta perturbación, se comprueba que el sistema no oscila y se vuelve inestable. El regulador PI detecta el error y actúa con rapidez, logrando compensar la caída y devolviendo la tensión de salida a su valor de referencia (1632 V) en apenas unas décimas de segundo. Una estrategia efectiva para mitigar esta brusca caída de tensión consiste en sobredimensionar la capacitancia del filtro de salida. Por lo que, cuanto mayor sea la capacidad, mejor será ante variaciones repentinas de tensión.

Esta prueba demuestra que el diseño del control es lo suficientemente robusto como para soportar variaciones repentinas de carga sin desestabilizarse, algo fundamental en el impredecible entorno de la tracción ferroviaria.

5.2 SIMULACIÓN DEL INVERSOR:

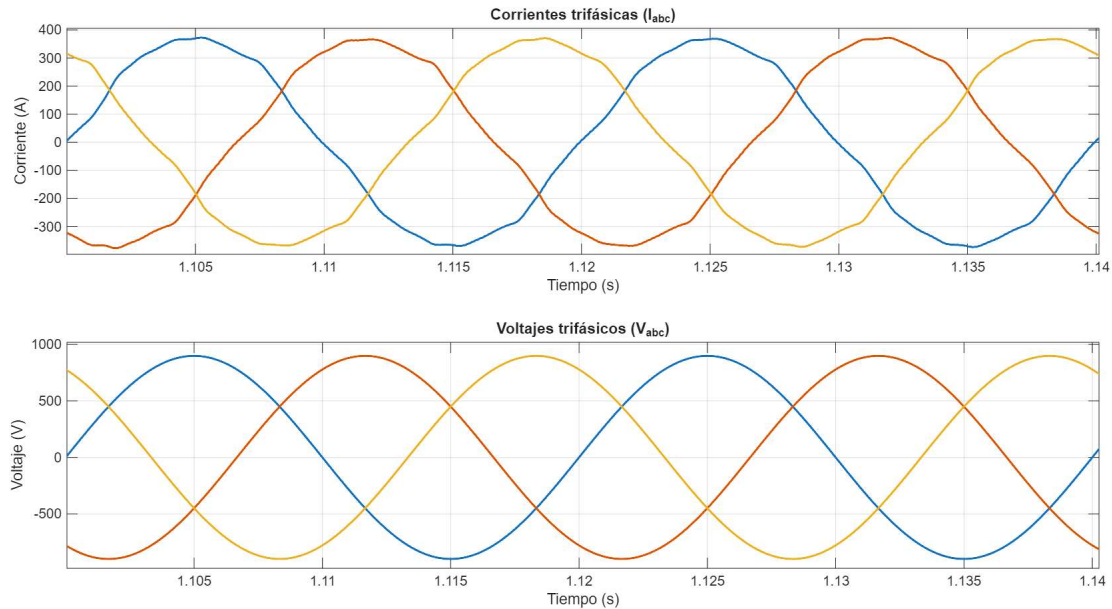


Figura 47. Gráfica de la corriente y tensión del inversor.

Como se puede observar en ambas gráficas, el equipo logra generar un sistema trifásico perfectamente equilibrado. Las tres fases presentan una onda senoidal clara y mantienen un desfase simétrico exacto de 120° eléctricos entre sí. Del análisis del eje temporal se consigue un dato fundamental para la viabilidad del proyecto: un ciclo completo de la onda transcurre en exactamente 0,02 segundos. Este valor confirma que la frecuencia de salida del inversor es de 50 Hz, cumpliendo así con el requisito indispensable para poder sincronizarse y verter energía a la red eléctrica nacional.

Por otro lado, en la figura se puede comprobar la sincronización perfecta que existe entre las gráficas de tensión y corriente. Dado que el objetivo del control es inyectar la energía a la red con una potencia reactiva nula $Q = 0$, ambas señales se encuentran totalmente en fase, sin presentar ningún desfase entre ellas. Asimismo, se aprecia una distorsión armónica muy baja en la onda de corriente, lo cual demuestra el correcto funcionamiento conjunto del lazo de control PI, la modulación de los pulsos (PWM) y la eficacia del filtro LCL para limpiar la señal final.

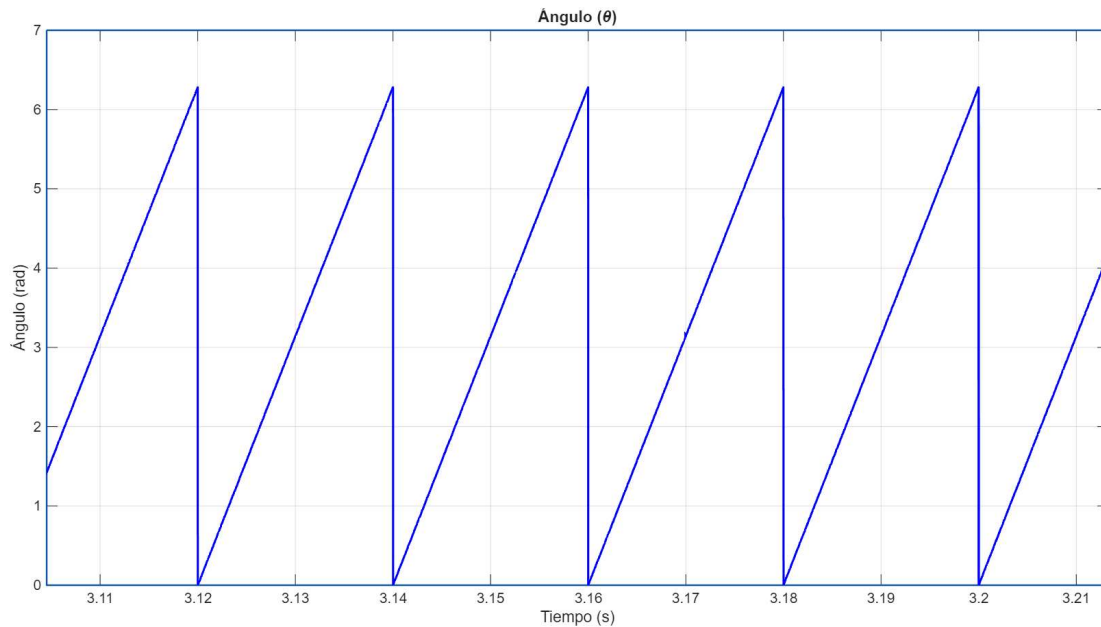


Figura 48. Gráfica del ángulo del PLL con respecto al tiempo.

En la figura 48 se observa la evolución del ángulo de fase (θ) que el sistema de control debe seguir (ejes dq) para realizar un correcto seguimiento de la referencia. El algoritmo rastrea continuamente el ángulo de la tensión de red, ascendiendo de forma lineal desde 0 hasta alcanzar el valor de $2\pi \approx 6,28$ radianes. Una vez alcanzado este límite, que equivale a un ciclo eléctrico completo, el valor se reinicia a cero de manera instantánea para comenzar a medir la siguiente onda. Este comportamiento constante y preciso confirma el correcto funcionamiento del algoritmo, obteniéndose exactamente el resultado de sincronización que se requería para el inversor.

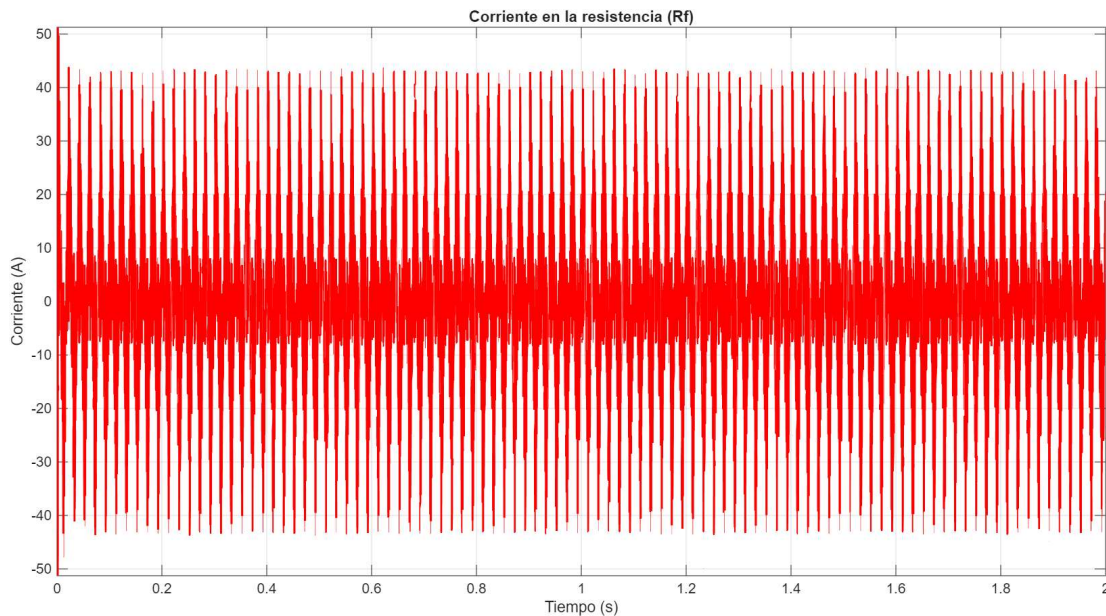


Figura 49. Gráfica de la corriente en la resistencia del filtro LCL

En la figura 49 se representa la corriente instantánea que circula a través de la resistencia de amortiguamiento (R_d) perteneciente al filtro LCL. Como se puede observar, se trata de una señal alterna y altamente oscilante. Este comportamiento transitorio continuo se debe a que la función principal de esta rama del filtro es absorber las componentes armónicas de alta frecuencia, evitando así la aparición de resonancias inestables.

Dado que la corriente varía continuamente en el tiempo, no es posible determinar el calor generado de forma directa mediante la simple observación de sus picos. Por ello, para cuantificar con exactitud las pérdidas de potencia reales en esta resistencia, resulta necesario calcular primero el valor eficaz o RMS de dicha señal. Posteriormente con la educación del efecto Joule $P = I_{RMS}^2 \cdot R_d$ se obtiene las pérdidas reales. Tras la simulación se obtiene un valor $I_{RMS} = 17,32 A$ por lo que $P = 17,32^2 \cdot 0,75 = 225 W$ por fase.

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

El desarrollo del presente trabajo de fin de grado ha permitido asentar el conocimiento necesario para realizar el diseño, operación y viabilidad de las subestaciones eléctricas reversibles en el ámbito de la tracción ferroviaria. A lo largo del proyecto se han cumplido con éxito todos los objetivos planteados inicialmente, logrando diseñar y comprobar mediante simulación, un sistema completo capaz de recuperar la energía de frenado de los trenes para inyectarla de vuelta a la red eléctrica. Las aportaciones más destacadas del proyecto se estructuran en las siguientes conclusiones específicas:

5.3 ESTUDIO PREVIO

El análisis inicial del estado del arte ha servido para asentar los fundamentos teóricos sobre las infraestructuras ferroviarias. Se ha evidenciado la ineficiencia del sistema tradicional, donde la falta de receptividad del sistema obliga a los trenes a disipar su energía cinética en forma de calor a través de las resistencias de frenado. Este estudio ha justificado la necesidad técnica y medioambiental de modernizar la red mediante convertidores bidireccionales, estableciendo los parámetros base para el diseño posterior. Asimismo, se ha detallado el procedimiento para obtener las condiciones de contorno de un caso base, permitiendo así determinar los parámetros nominales necesarios para el cálculo y dimensionamiento de los componentes del sistema de regeneración.

5.4 CONVERTIDOR

En la etapa de corriente continua, se ha logrado diseñar y simular un convertidor robusto capaz de estabilizar la tensión ante condiciones de tráfico variables. Destaca la sintonización precisa del controlador PI, el cual demostró, frente a perturbaciones y cambios bruscos de carga, una respuesta ágil y estable.

5.5 INVERSOR

El diseño de la etapa de inversión ha garantizado una conexión segura y eficiente con la red eléctrica nacional. Las simulaciones han confirmado que el algoritmo de sincronización (PLL) rastrea el ángulo de la red con total precisión, permitiendo generar un sistema trifásico equilibrado a una frecuencia exacta de 50 Hz. Además, se ha demostrado que la energía se inyecta con un factor de potencia unitario ($Q = 0$), mientras que el filtro LCL diseñado se encarga de mitigar eficazmente los armónicos de alta frecuencia, asegurando una alta calidad en la onda de corriente entregada.

5.6 RENTABILIDAD

El estudio económico ha constatado que la subestación reversible no solo es técnicamente viable, sino que representa una inversión bastante rentable. Mediante un análisis de sensibilidad basado en el volumen de tráfico y los perfiles de frenado, se ha delimitado la frontera de viabilidad del proyecto. Utilizando el coste de capital ponderado (WACC) oficial de Adif (7,33%), los escenarios centrales más realistas arrojan un periodo de recuperación de la inversión (payback) de entre 4 y 6 años.

5.7 IMPACTO ECOLÓGICO

Paralelamente, se ha demostrado el gran impacto ecológico positivo de la instalación, cuantificando la reducción de la huella de carbono, la disminución de la contaminación térmica y la prevención de emisiones de micropartículas por desgaste mecánico.

A partir de las conclusiones obtenidas y considerando los límites de alcance establecidos para este proyecto, se proponen las siguientes líneas de trabajo y estudios complementarios para futuros desarrollos:

1. Control en cascada / control modo corriente del convertidor: para el alcance de este trabajo de fin de grado, se ha implementado un control en modo tensión de un solo lazo para validar la transferencia de potencia y el dimensionamiento de los componentes. En una futura implementación industrial, sería oportuno incorporar un lazo interno de corriente para un control más preciso.
2. Elección precisa de protecciones: se requeriría un estudio aparte de las protecciones tanto de corriente continua como de alterna. Esto incluye el estudio de la coordinación de las curvas de disparo para garantizar la selectividad y la seguridad de la instalación, cumpliendo con la exigente normativa ferroviaria.
3. Cálculo de disipadores de cada componente: relacionado directamente con el comportamiento térmico de los componentes, se propone el dimensionamiento físico de los sistemas de refrigeración. Esto consistiría en calcular la resistencia térmica necesaria para los disipadores, asegurando que la temperatura de trabajo se mantenga estrictamente dentro de los márgenes operativos.
4. Análisis de pérdidas: se plantea la realización de un estudio matemático detallado sobre la eficiencia energética global del sistema. Este análisis requeriría cuantificar con precisión las pérdidas de potencia del convertidor, inversor y filtros. Desglosando tanto las pérdidas por conducción como las pérdidas dinámicas derivadas de la conmutación a alta frecuencia (PWM).
5. Elección de semiconductores: como base para los cálculos térmicos y de pérdidas mencionados anteriormente, resultaría necesario profundizar en la selección de referencias comerciales exactas para los módulos de potencia. Lo que implicaría evaluar las hojas de características técnicas de los fabricantes para elegir los dispositivos reales que mejor se adapten a las exigencias de tensión, corriente y frecuencia de la topología diseñada.

6. Simulación conjunta del sistema completo (convertidor e inversor): en este proyecto, las etapas se han analizado de manera separada para asegurar el buen funcionamiento individual de cada bloque. Un paso natural para dar continuidad al estudio consistiría en realizar una simulación integral acoplando el convertidor CC-CC y el inversor CC-CA de forma simultánea. Esto permitiría evaluar la dinámica acoplada del equipo, comprobar la estabilidad del bus de continuo intermedio frente a perturbaciones reales y afinar la interacción entre todos los lazos de control.
7. Diseño constructivo de los componentes magnéticos: como paso previo a una eventual fabricación, resultaría de conveniente abordar el diseño físico y el cálculo electromagnético de las inductancias de filtrado y los transformadores. Esto implicaría definir parámetros constructivos reales como el material del núcleo, la sección del hilo conductor, el número de espiras y el entrehierro, asegurando teóricamente que los componentes no alcancen la saturación en condiciones de carga.
8. Diseño de la electrónica de control y cableados: otra línea de desarrollo complementaria consistiría en el diseño de las placas de circuito impreso (PCB). Esta fase abarcaría la integración de los circuitos de las señales, los microcontroladores y los drivers de disparo de los semiconductores, así como la especificación técnica del cableado de potencia necesarios para interconectar los equipos de forma segura.
9. Delineación de planos mecánicos y eléctricos: finalmente, con el objetivo de acercar el modelo teórico validado hacia la fase de prototipado industrial, se sugiere desarrollar la ingeniería mecánica del proyecto. Esta etapa contemplaría el modelado en 3D de las carcasas y recubrimientos de los equipos, detallando la distribución espacial de todos los componentes. Asimismo, se requeriría el diseño de un esquema unifilar completo de la posición de cada componente y su respectivo número.

Capítulo 6. BIBLIOGRAFÍA

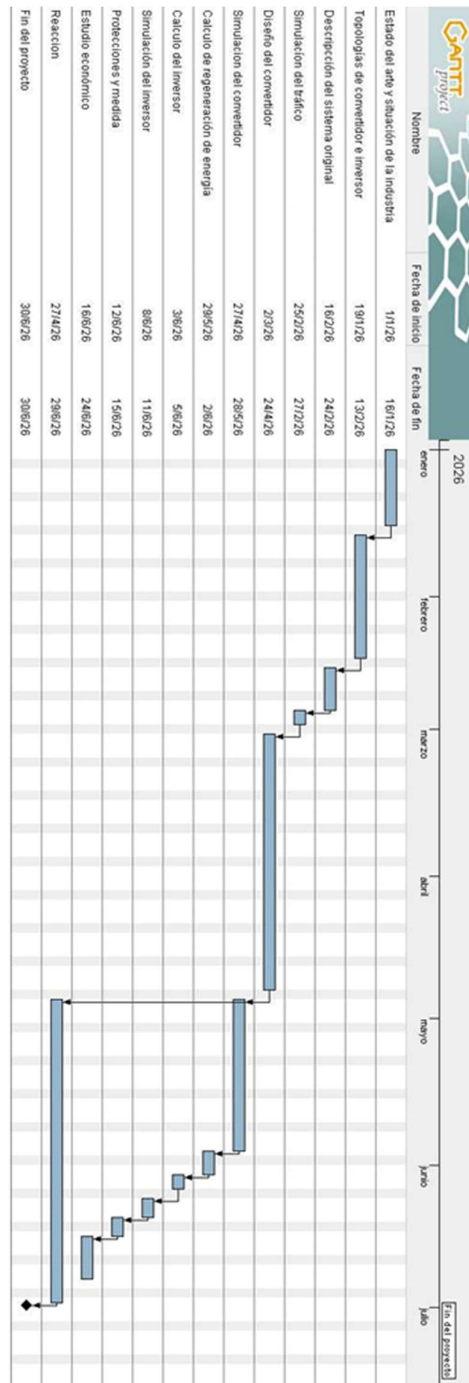
- [1] Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible, «Transportes adjudica por 1.685 millones de euros el suministro de energía eléctrica verde para el sistema ferroviario.» Accedido: 5 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.transportes.gob.es/ministerio/comunicacion/sala-prensa/lun-03112025-1311>
- [2] Red eléctrica de España, «Informe del sistema eléctrico 2024», Informes del sistema. 2024. Accedido: 5 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.sistemaelectrico-ree.es/es/2024/informe-del-sistema-electrico>
- [3] P. Estévez Irizar, M. Varela Cuadrado, y E. Iturriza Zubiri, *Sistemas de almacenamiento de energía eléctrica embarcados en los trenes*. Madrid: Fundación de los Ferrocarriles Españoles, 2012.
- [4] E. Hextall, «FOI request detail», Transport for London. Accedido: 5 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://tfl.gov.uk/corporate/transparency/freedom-of-information/foi-request-detail?referenceId=FOI-3010-2223>
- [5] Ingeteam, «Proyecto Ingeber», Página principal. Accedido: 5 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.ingeteam.com/es>
- [6] Fempa, «Primera subestación eléctrica de corriente continua reversible». Accedido: 5 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.fempa.es/noticias/actualidad/tecnico-industrial/primera-subestacion-electrica-de-corriente-continua-reversible>
- [7] Adif, «Innovación». Accedido: 5 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.adif.es/sobre-adif/innovacion>
- [8] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, «El Gobierno aprueba la actualización del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2023-2030, eje de la oportunidad económica, social y ambiental de España, por su contribución a la modernización y transformación del modelo productivo». Accedido: 23 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/prensa/ultimas-noticias/2024/septiembre/el-gobierno-aprueba-la-actualizacion-del-plan-nacional-integrado.html>
- [9] J. Miluska, «Objetivos y metas de desarrollo sostenible», Naciones Unidas. Accedido: 5 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals/>
- [10] ITRANSPORTE, «Energía de ida y vuelta |». Accedido: 20 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.revistaitransporte.es/index.html@p=3464.html>
- [11] Ayuntamiento de Las Rozas, «Revisión del Plan General de Ordenación Urbana (RPGOU). Volumen 4: Planos de Infraestructuras. PINF-03: Energía Eléctrica Alta y Media Tensión». Ayuntamiento de Las Rozas de Madrid, s.f. [En línea]. Disponible en: [www.lasrozas.es/sites/RPGOU/BLOQUE III/VOLUMEN 4 PLANOS DE INFRAESTRUCTURAS/PINF-03_ENERGIA ELECTRICA ALTA Y MEDIA TENSION.pdf](http://www.lasrozas.es/sites/RPGOU/BLOQUE_III/VOLUMEN_4_PLANOS_DE_INFRAESTRUCTURAS/PINF-03_ENERGIA_ELECTRICA_ALTA_Y_MEDIA_TENSION.pdf)

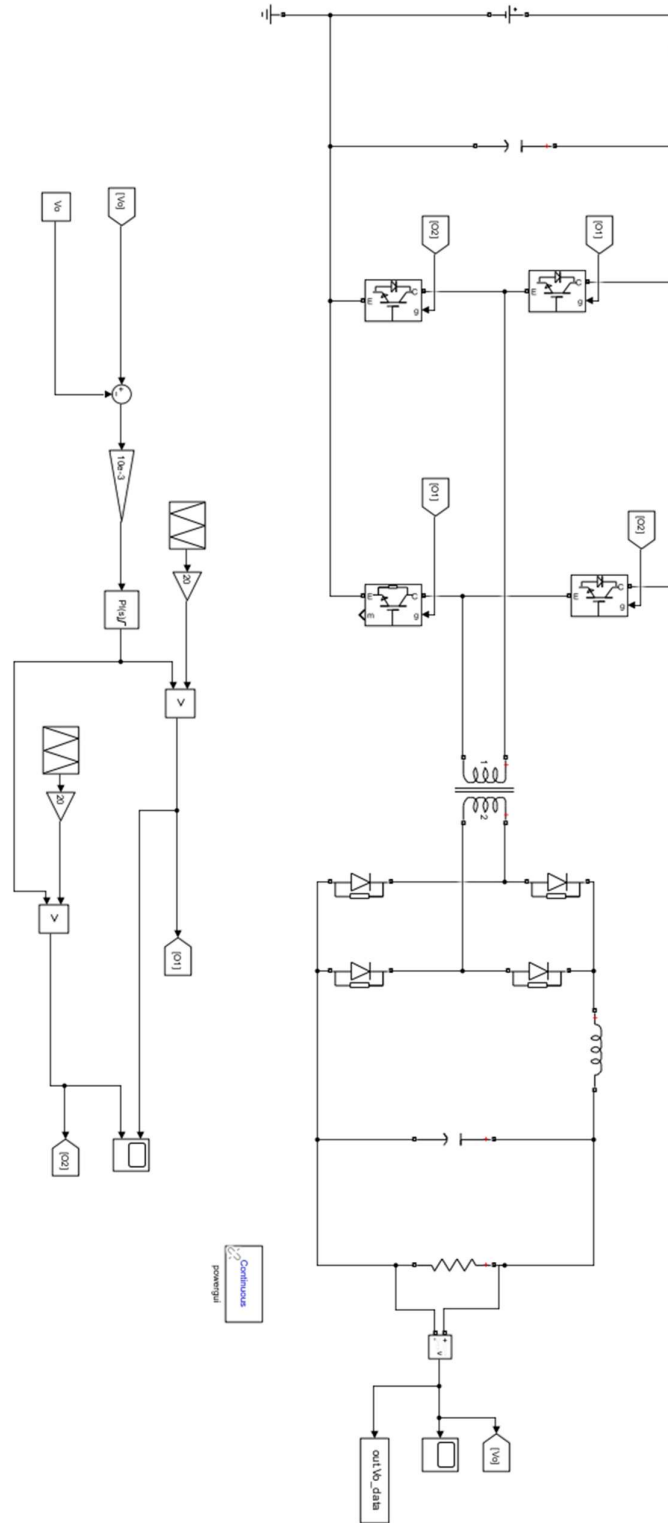
- [12] ABB, «Guía técnica n.º 6: Guía sobre armónicos para convertidores de CA». s.f. Accedido: 5 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: https://library.e.abb.com/public/2e8ed9b75294496cb6600918962858dd/Technical_Guide_No_6_ES.pdf
- [13] Adif, «ET 03.359.104.1: Rectificadores de potencia para subestaciones de tracción de 3,3 kV de corriente continua», Administrador de Infraestructuras Ferroviarias, Madrid, España, Edición 3 (M1), ene. 2020.
- [14] AENOR, «UNE-EN 50328: Aplicaciones ferroviarias. Instalaciones fijas. Convertidores electrónicos de potencia para subestaciones», Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid, España, UNE-EN 50328:2015, 2015.
- [15] Ministerio de Economía, *Real Decreto 1955/2000, de 1 de diciembre, por el que se regulan las actividades de transporte, distribución, comercialización, suministro y procedimientos de autorización de instalaciones de energía eléctrica*. 2000, pp. 45978-46092.
- [16] AENOR, «UNE-EN 50160: Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución», Asociación Española de Normalización, Madrid, España, UNE-EN 50160:2020, 2011.
- [17] «BOE-A-2014-6084 Real Decreto 337/2014, de 9 de mayo, por el que se aprueban el Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en instalaciones eléctricas de alta tensión y sus Instrucciones Técnicas Complementarias ITC-RAT 01 a 23.» Accedido: 6 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2014-6084>
- [18] «BOE-A-2000-24019 Real Decreto 1955/2000, de 1 de diciembre, por el que se regulan las actividades de transporte, distribución, comercialización, suministro y procedimientos de autorización de instalaciones de energía eléctrica.» Accedido: 6 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2000-24019>
- [19] RedTransporte, «Movilidad y transporte público en la provincia de Madrid». Accedido: 4 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.redtransporte.com/madrid/>
- [20] Datta driven, «Merge Intervals: Intermediate». Accedido: 4 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: https://datadriven.io/learn/py_pattern_merge_intervals_intermediate
- [21] AENOR, «UNE-EN 50163: Aplicaciones ferroviarias. Tensiones de alimentación de los sistemas de tracción», Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid, España, UNE-EN 50163:2005 / A1:2008, 2008.
- [22] Adif, «MEMORIA DESCRIPTIVA DE LA LÍNEA AÉREA DE CONTACTO TIPO CA 220/3KV», Administrador de Infraestructuras Ferroviarias (Adif), Madrid, España, 023CA220_2016, jun. 2016. [En línea]. Disponible en: https://www.seguridadferroviaria.es/recursos_aesf/592CE715-7AC5-49DE-9088-4E9FBE22FC5F/144043/023CA220_
- [23] AENOR, «UNE-EN IEC 61000-2-4:2025». Accedido: 20 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://tienda.aenor.com/p/norma-une-en-iec-61000-2-4-2025-n0074354>

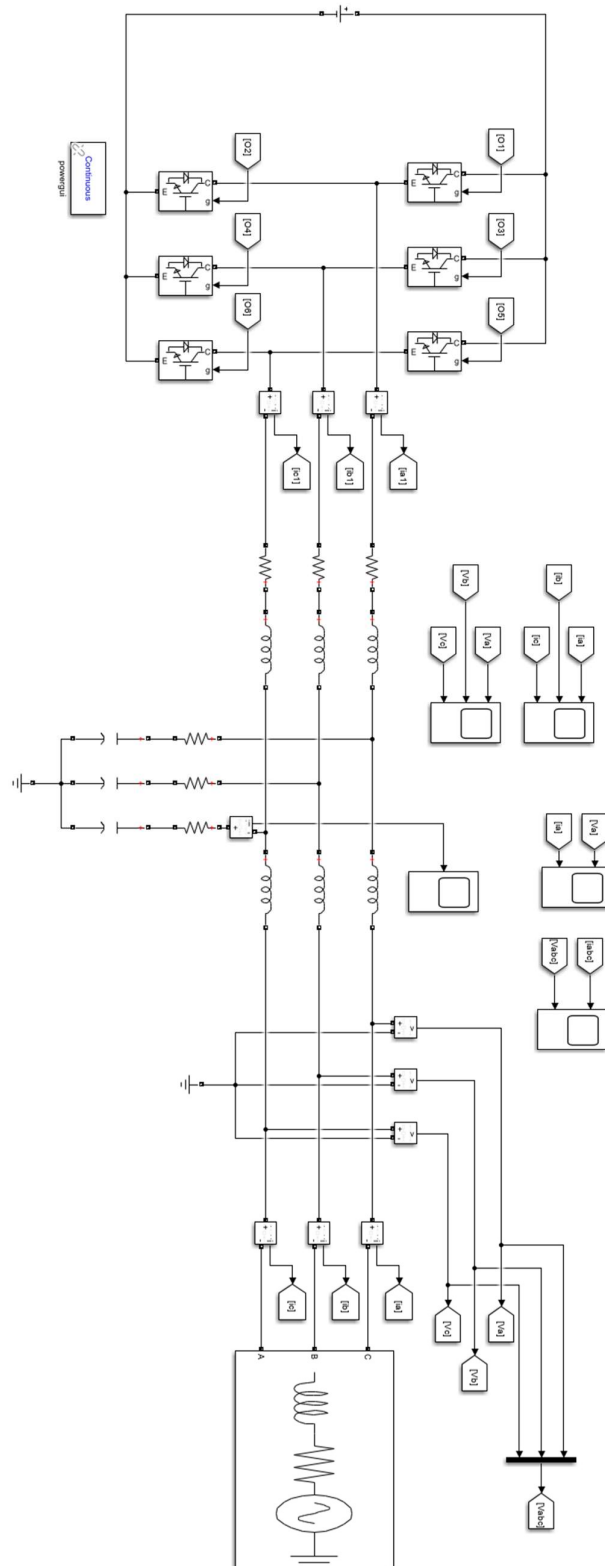
- [24] IEEE Standards Association, «IEEE 519-2022». Accedido: 27 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://standards.ieee.org/ieee/519/10677/>
- [25] J. IP, «Why Use Dual Secondary Transformers with 12-Pulse VFD Rectifiers», Industrial Monitor Direct. Accedido: 21 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://industrialmonitordirect.com/es/blogs/knowledgebase/12-pulse-rectifier-dual-secondary-transformer-vfd-configuration>
- [26] ICAI, «Centrales y subestaciones», Universidad Pontificia Comillas, Madrid, España.
- [27] EverExceed, «Comparación de ventajas y desventajas entre el circuito de medio puente y el circuito de puente completo». Accedido: 21 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: https://es.everexceed.com/blog/comparison-of-advantages-and-disadvantages-between-half-bridge-circuit-and-full-bridge-circuit_b491
- [28] M. Zehendner y M. Ulmann, «Power Topologies Handbook», Texas Instruments, Dallas, TX, EE. UU., slyu036a. [En línea]. Disponible en: <https://www.ti.com/lit/eb/slyu036a/slyu036a.pdf>
- [29] R. W. Erickson y D. Maksimović, *Fundamentals of Power Electronics*. Cham: Springer International Publishing, 2020. doi: 10.1007/978-3-030-43881-4.
- [30] A. Jason, «Input and Output Capacitor Selection». Texas Instruments, Dallas, TX, EE. UU, febrero de 2006. [En línea]. Disponible en: <https://www.ti.com/lit/an/slta055/slta055.pdf>
- [31] ICAI, «Regulación automática», Universidad Pontificia Comillas, Madrid, España.
- [32] Electronics Notes, «Quality Factor: Q Factor Formula». Accedido: 21 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.electronics-notes.com/articles/basic_concepts/q-quality-factor/basics-tutorial-formula.php
- [33] A. F. Roger y R. A. Orosa, «Diseño de convertidor DC/DC con control remoto para SmartGrids», [En línea]. Disponible en: https://oa.upm.es/55985/1/TFG_ALBERTO_JIMENEZ_DE_LA_PENA.pdf
- [34] R. Teodorescu, M. Liserre, y P. Rodríguez, *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*, 1.^a ed. Wiley, 2011. doi: 10.1002/9780470667057.
- [35] Z. Ni, M. Narimani, y N. R. Zargari, «Optimal LCL Filter Design for a Regenerative Cascaded H-Bridge (CHB) Motor Drive», en *2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, oct. 2020, pp. 3038-3043. doi: 10.1109/ECCE44975.2020.9235427.
- [36] L. Zhou, Z. Liu, Y. Ji, D. Ma, J. Wang, y L. Li, «A Improved Parameter Design Method of LCL APF Interface Filter», en *2020 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Computer Applications (ICAICA)*, jun. 2020, pp. 948-952. doi: 10.1109/ICAICA50127.2020.9182457.
- [37] M. Liserre, F. Blaabjerg, y S. Hansen, «Design and control of an LCL-filter-based three-phase active rectifier», *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 41, n.º 5, pp. 1281-1291, sep. 2005, doi: 10.1109/TIA.2005.853373.
- [38] A. S. Ançay Jessy, «Synchronous reference frame (SRF) PLL», imperix. Accedido: 19 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://imperix.com/doc/implementation/synchronous-reference-frame-pll>
- [39] Vía libre, «Unidades eléctricas series 445, 446 y 447», Wayback Machine. Accedido: 5 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en:

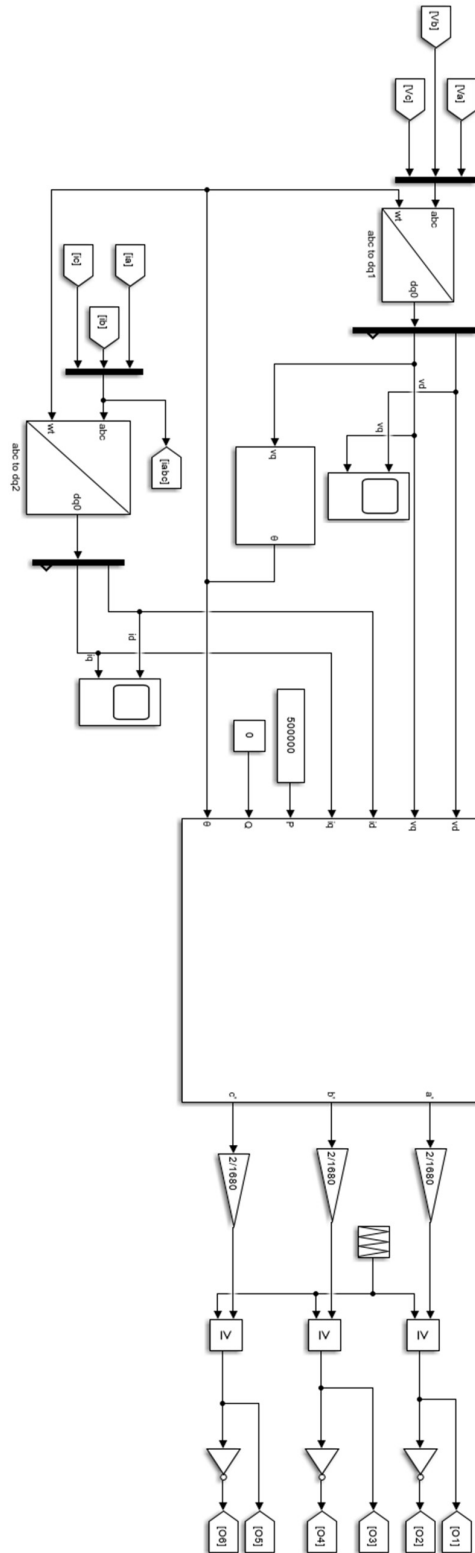
- <https://web.archive.org/web/20061025070146/http://www.vialibreffe.com/material/pdf/493-ene06.pdf>
- [40] Renfe, «Automotor eléctrico S-446». Accedido: 11 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://grupo.renfe.com/es/es/conoce-renfe/nuestros-trenes/r446>
- [41] «BOE-B-2007-45040 Anuncio de Renfe Operadora, por el que se comunica la licitación del expediente número 2.6/6116.0180/5-00000 para: Reparación de motores de tracción y grupos motores generadores.» Accedido: 11 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-B-2007-45040
- [42] DigiKey, «Conceptos básicos del sensor de efecto Hall». Accedido: 26 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.digikey.es/es/blog/hall-effect-sensor-basics>
- [43] Montaje Solar, «Guía de Protecciones de Corriente Continua en Fotovoltaica: Componentes Clave». Accedido: 26 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://montajesolar.com/protecciones-corriente-continua/>
- [44] DigiKey, «Dimensionamiento de disipadores térmicos». Accedido: 24 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.digikey.com.mx/es/blog/the-hidden-trick-to-size-heat-sinks-for-modern-technology>
- [45] OMIP, «Mercado hoy». Accedido: 25 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.omip.pt/es/plazo-hoy>
- [46] CNMC, «La CNMC somete a consulta pública el cálculo del beneficio razonable de las instalaciones de servicio ferroviarias». Accedido: 29 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.cnmc.es/prensa/consulta-publica-wacc-ferroviario-20241001>
- [47] «O&M Solar: Costes Reales de Mantenimiento de una Planta Fotovoltaica por MW 2026». Accedido: 29 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://pv-maps.com/blog/costes-om-fotovoltaica-mw>
- [48] Redeia, «No renovables detalle emisiones CO2», Red Eléctrica. Accedido: 26 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.ree.es/es/datos/generacion/no-renovables-detalle-emisiones-CO2>

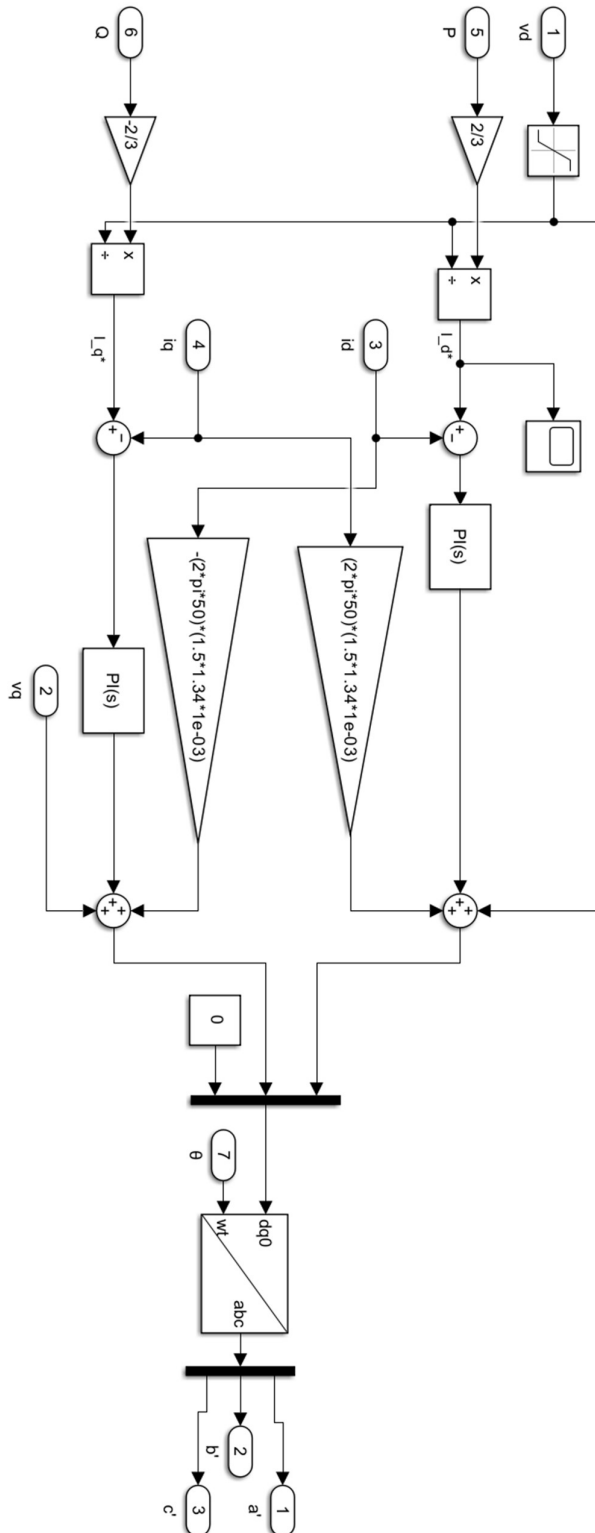
Capítulo 7. ANEXO I

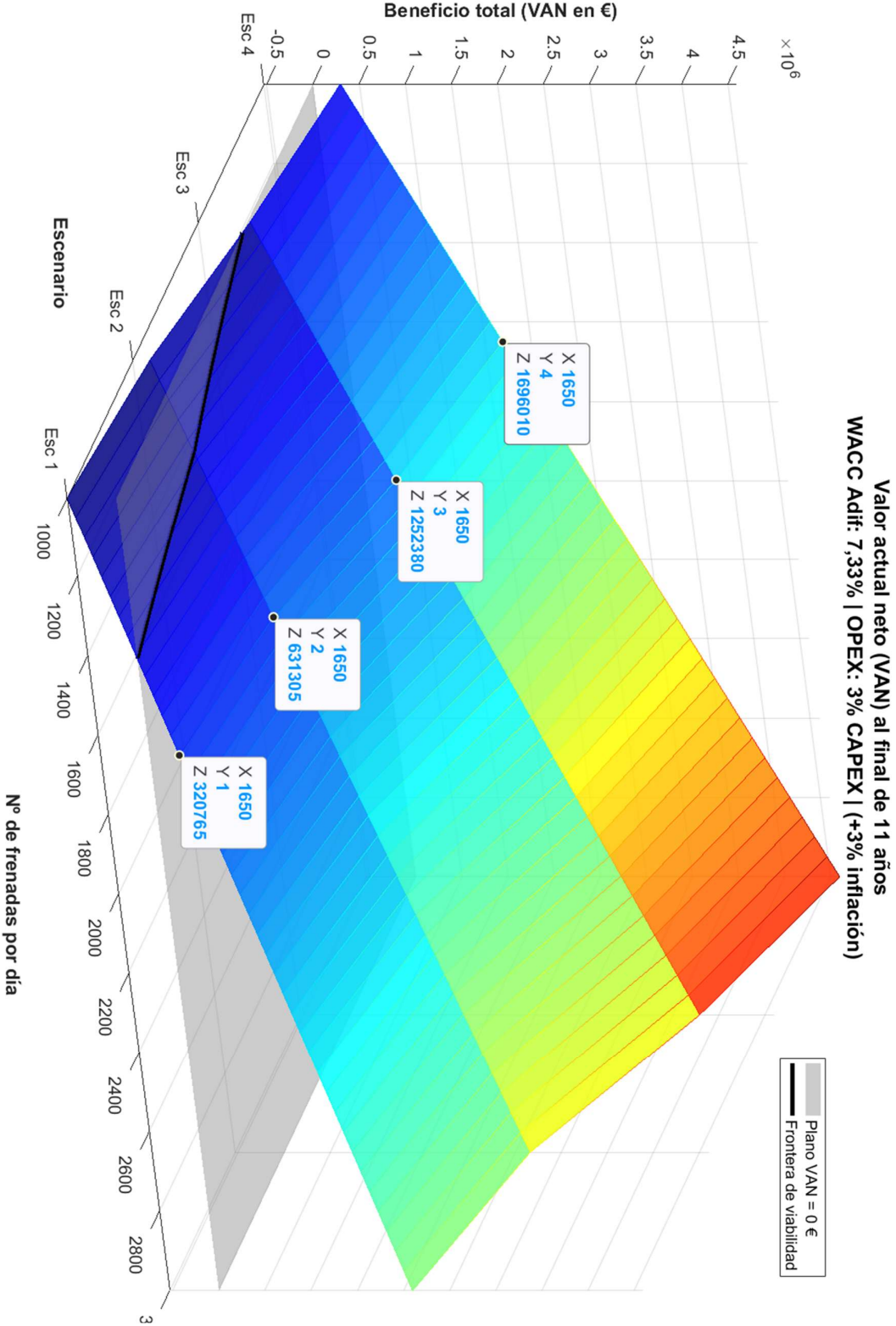


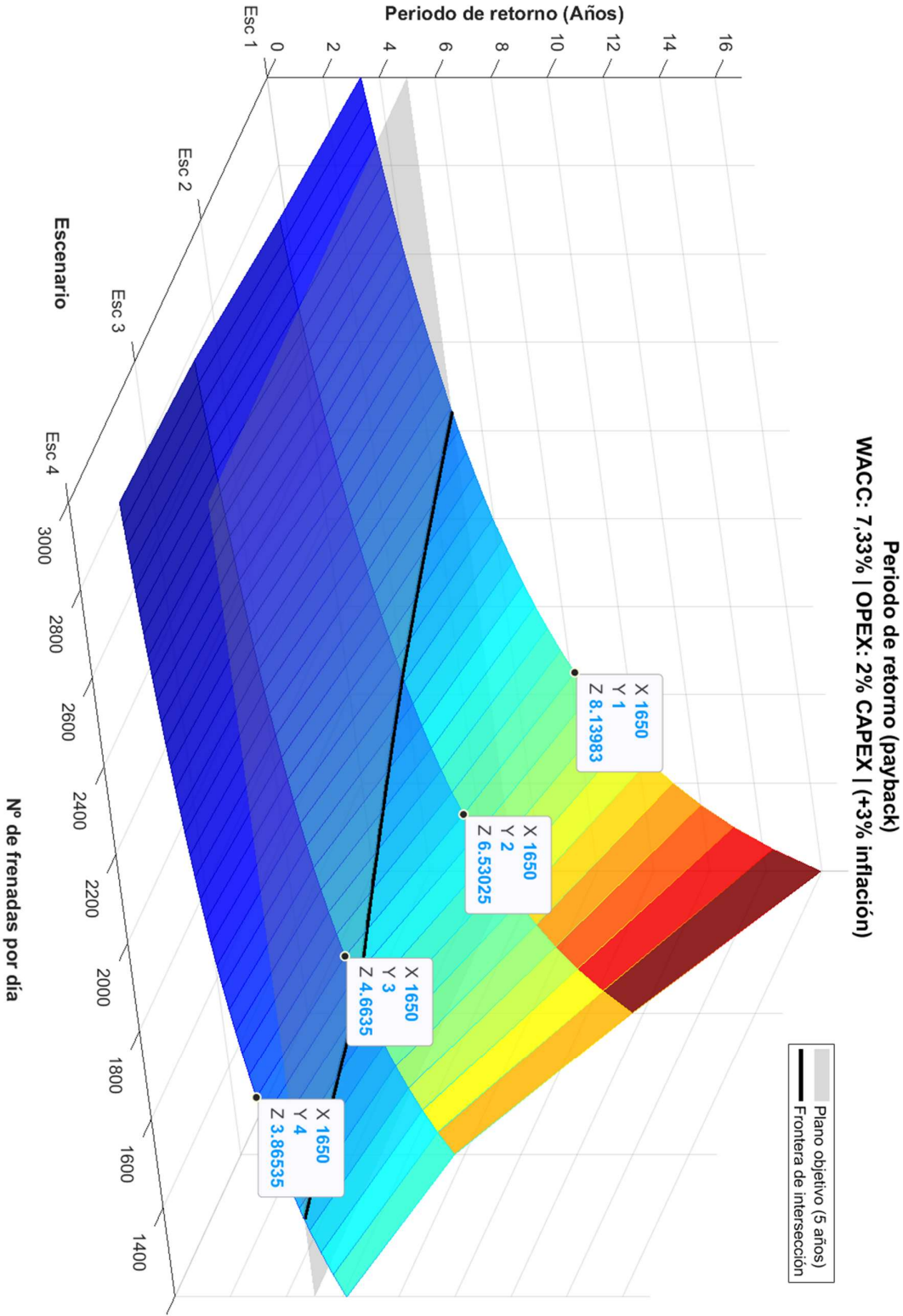




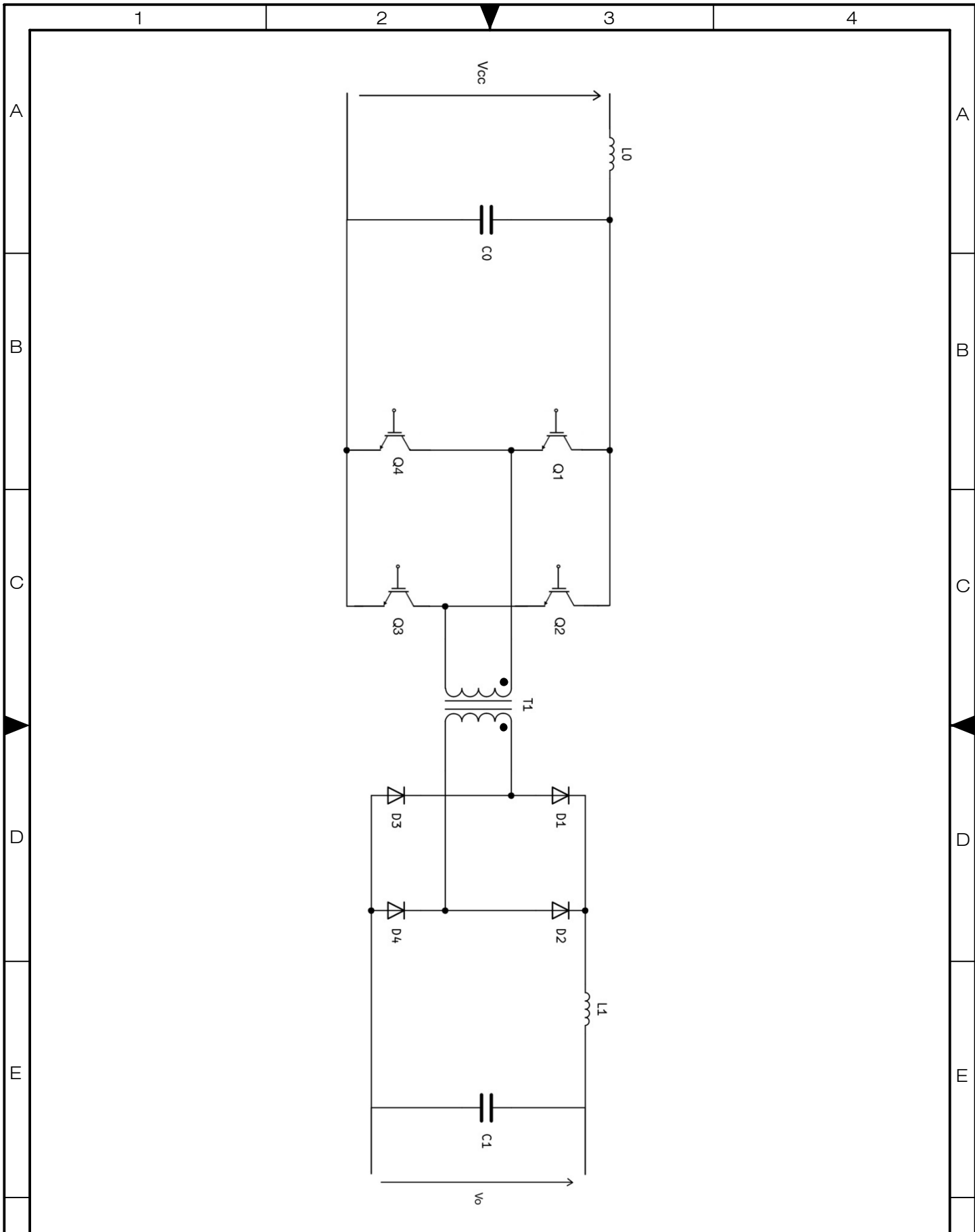








Documento 2: Planos



TÍTULO SUPLEMENTARIO

Componente del sistema de recuperación de energía

FORMATO

A4

NOMBRE		TÍTULO	
DIBUJADO	Jaime Mateos Rojas	Convertidor CC-CC	
COMPROBADO	Agustín Martín Hermosilla		
ESCALA:	FIRMA		CÓDIGO
S/E			Plano1

1

2

3

4

Documento 3: Presupuesto

Ref	Descripción	Uds.	Cantidad	Precio unitario alta	Precio unitario baja	Precio Total alta	Precio total baja
1	Convertidor CC-CC		12	34.455 €	25.880 €	413.460 €	310.560 €
1.1	Filtro de entrada					4.435 €	3.320 €
1.1.1	Condensador	ud	1	1.310 €	820 €	1.310 €	820 €
1.1.2	bobina	ud	1	3.125 €	2.500 €	3.125 €	2.500 €
1.2	Conmutación					9.600 €	7.600 €
1.2.1	IGBTS	ud	4	1.600 €	1.300 €	6.400 €	5.200 €
1.2.2	Drivers	ud	4	800 €	600 €	3.200 €	2.400 €
1.3	Etapa rectificadora					11.800 €	8.000 €
1.3.1	Diodos	ud	4	700 €	500 €	2.800 €	2.000 €
1.3.2	Transformador	ud	1	9.000 €	6.000 €	9.000 €	6.000 €
1.4	Filtro de salida (LC)					1.020 €	640 €
1.4.1	Condesador	ud	1	510 €	320 €	510 €	320 €
1.4.2	Bobina	ud	1	510 €	320 €	510 €	320 €
1.5	Protecciones y medida					5.040 €	4.200 €
1.5.1	Protecciones y medida del convertidor	ud	1	5.040 €	4.200 €	5.040 €	4.200 €
1.6	Disipadores					2.560 €	2.120 €
1.6.1	Disipadores de calor para los semiconductores	ud	4	640 €	530 €	2.560 €	2.120 €

Ref	Descripción	Uds.	Cantidad	Precio unitario alta	Precio unitario baja	Precio total alta	Precio total baja
2	Convertidor CC-CA		12	65.670 €	55.530 €	788.040 €	666.360 €
2.1	Conmutación		1			16.200 €	13.800 €
2.1.1	IGBTS	ud	6	1.900 €	1.700 €	11.400 €	10.200 €
2.1.2	Drivers	ud	6	800 €	600 €	4.800 €	3.600 €
2.2	Filtro de salida (LCL)		1			22.950 €	19.650 €
2.2.1	Banco de condensadores	ud	3	1.200 €	1.050 €	3.600 €	3.150 €
2.2.2	Bobina i	ud	3	3.500 €	3.250 €	10.500 €	9.750 €
2.2.3	Bobina g	ud	3	2.250 €	1.800 €	6.750 €	5.400 €
2.2.4	Resistecia	ud	3	700 €	450 €	2.100 €	1.350 €
2.3	Protecciones y medida					22.680 €	18.900 €
2.3.1	Protecciones y medida del inversor	ud	3	7.560 €	6.300 €	22.680 €	18.900 €
2.4	Disipadores					3.840 €	3.180 €
2.4.1	Disipadores para semiconductores	ud	6	640 €	530 €	3.840 €	3.180 €

Ref	Descripción	Uds.	Cantidad	Precio unitario alta	Precio unitario baja	Precio total alta	Precio total baja
3	Obra civil					528.009 €	432.725 €
3.1	Movimiento de tierras					15.321 €	13.682 €
3.1.1	Desbroce y limpieza superficial del terreno por medios mecánicos	m2	150	1,50 €	1,11 €	225 €	167 €
3.1.2	Excavación en desmonte y vaciado a cielo abierto	m3	75	14 €	17 €	1.050 €	1.275 €
3.1.3	Refino, nivelación y compactación del fondo de la excavación (hasta 95% del Proctor Modificado)	m2	150	5,00 €	3,50 €	750 €	525 €
3.1.4	Relleno, extendido y compactación con zahorra artificial (o grava de cantera)	m3	75	68 €	54 €	5.070 €	4.035 €
3.1.5	Estudio geotécnico del terreno (incluye sondeos, ensayos de penetración SPT y toma de muestras)	ud	1	8.226 €	7.680 €	8.226 €	7.680 €
3.2	Urbanización					25.818 €	24.789 €
3.2.1	Losa de cimentación / Solera de hormigón armado	m2	75	180 €	200 €	13.500 €	15.000 €
3.2.2	Vallado provisional de obra	ud	1	2.132 €	1.698 €	2.132 €	1.698 €
3.2.3	Cerramiento perimetral definitivo (malla electrosoldada y postes metálicos)	m	50	121 €	97 €	6.050 €	4.850 €
3.2.4	Encachado de grava	m2	60	8,63 €	6,87 €	518 €	412 €
3.2.5	Pavimentación de acera con mezcla bituminosa en caliente (asfalto)	m2	40	69 €	55 €	2.760 €	2.200 €
3.2.6	Pavimentación de viales y accesos con hormigón	m2	15	20 €	20 €	300 €	300 €
3.2.7	Puerta metálica para el exterior del recinto	ud	1	557 €	329 €	557 €	329 €
3.3	Edificación					49.119 €	35.330 €
3.3.1	Suministro e instalación de caseta prefabricada de hormigón para subestación eléctrica	ud	1	48.700 €	35.000 €	48.700 €	35.000 €
3.4.1	Puertas exteriores	ud	1	419 €	330 €	419 €	330 €
3.5	Logística y transporte	-				276 €	339 €
3.5.1	Transporte de maquinaria y equipamiento	km	150	0,63 €	2,26 €	95 €	339 €
3.6.1	Transporte de materiales especiales a pie de obra	m3	150	1,21 €	2,21 €	182 €	332 €
3.6	Materiales de seguridad					3.595 €	1.745 €
3.6.1	Suministro e instalación de detectores de temperatura y humo	ud	1	3.595 €	1.745 €	3.595 €	1.745 €
3.7	Mano de obra					415.200 €	337.600 €
3.7.1	Personal de obra Ingeniería	horas	1120	63 €	50 €	352.800 €	280.000 €
3.7.2	Personal de obra civil	horas	160	33 €	30 €	62.400 €	57.600 €
3.8	Drenaje y saneamiento					18.680 €	19.240 €
3.8.1	Colocacion y montaje de tuberías y suministro	m	30	533 €	568 €	18.680 €	19.240 €

Datos recinto	valores
Larcho	15
Ancho	10
Superficie	150
Profundidad	75
cimentación	75
camino	15
Grava	60
acera	40
Personal I	5
Personal O	12

Condición / estimaciones	Bajas	Altas
% regenerado	0,7	0,8
Energía regenerada kwh	11,9	17,0

Ref	num
Año	365
Trenes al día (ida)	275
nº de estaciones	3
Total frenadas (ida y vuelta)	1.650
Inflación (i)	0,03
N	11
OPEX (x% del CAPEX)	31.392 €
x%	0,02
Coste de combustible	0
WACC de adif	0,0733

f Σ ,OM	8,66
k_OM	0,96
fa	0,14
fa(1)	0,16
fa(2)	1,18

A Capex anualizado	212.768 €
Opex anualizadp	36.872 €
Coste total anualizado	249.640 €

Mwh medios	6.527
tC02/Mwh	0,21

CAPEX	1.729.509 €	1.409.645 €
Media CAPEX	1.569.577 €	

Año	OPEX (inflacion)
2026	31.392 €
2027	32.333 €
2028	33.303 €
2029	34.302 €
2030	35.331 €
2031	36.391 €
2032	37.483 €
2033	38.608 €
2034	39.766 €
2035	40.959 €
2036	42.188 €
Total	402.056 €

LCC	1.971.633 €
-----	-------------

Escenario 1: 70% de regeneracion con frenadas rapidas					
Energía anual regenerada MWh:			5.017	LCOX €/Mwh	49,76
Año	€/MWh anual	€/año	VAN	VAN acumulado	Payback
2026	63,0 €	284.663 €	284.663 €	284.663 €	-1.284.914 €
2027	60,0 €	268.671 €	250.323 €	534.986 €	-1.034.591 €
2028	56,5 €	250.143 €	217.143 €	752.129 €	-817.448 €
2029	53,8 €	235.598 €	190.550 €	942.679 €	-626.898 €
2030	53,0 €	230.556 €	173.737 €	1.116.415 €	-453.162 €
2031	52,0 €	224.479 €	157.605 €	1.274.021 €	-295.556 €
2032	51,4 €	220.377 €	144.159 €	1.418.179 €	-151.398 €
2033	51,6 €	220.256 €	134.240 €	1.552.419 €	-17.158 €
2034	51,0 €	216.088 €	122.705 €	1.675.123 €	105.546 €
2035	50,5 €	212.387 €	112.367 €	1.787.490 €	217.913 €
2036	50,0 €	208.650 €	102.850 €	1.890.340 €	320.763 €
Total	---	2.571.869 €	1.890.340 €	TIR	ROI
Amortizacion al final de la vida util:			320.763 €	3,93%	20%

Escenario 2: 80% de regeneracion con frenadas rapidas					
Energía anual regenerada MWh :			5.733	LCOX €/Mwh	43,54
Año	€/MWh anual	€/año	VAN	VAN acumulado	Payback
2026	63,0 €	329.814 €	329.814 €	329.814 €	-1.239.763 €
2027	60,0 €	311.672 €	290.387 €	620.200 €	-949.376 €
2028	56,5 €	290.635 €	252.293 €	872.494 €	-697.083 €
2029	53,8 €	274.156 €	221.735 €	1.094.228 €	-475.349 €
2030	53,0 €	268.540 €	202.360 €	1.296.588 €	-272.989 €
2031	52,0 €	261.746 €	183.770 €	1.480.358 €	-89.219 €
2032	51,4 €	257.215 €	168.255 €	1.648.614 €	79.037 €
2033	51,6 €	257.237 €	156.778 €	1.805.392 €	235.815 €
2034	51,0 €	252.639 €	143.460 €	1.948.852 €	379.275 €
2035	50,5 €	248.579 €	131.515 €	2.080.366 €	510.789 €
2036	50,0 €	244.483 €	120.514 €	2.200.881 €	631.304 €
Total	---	2.996.715 €	2.200.881 €	TIR	ROI
Amortizacion al final de la vida util			631.304 €	7,50%	40%

Escenario 3: 70% de regeneracion con frenadas lentas					
Energía anual regenerada MWh :			7.167	LCOX €/Mwh	34,83
Año	€/MWh anual	€/año	VAN	VAN acumulado	Payback
2026	63,0 €	420.115 €	420.115 €	420.115 €	-1.149.462 €
2027	60,0 €	397.673 €	370.515 €	790.630 €	-778.947 €
2028	56,5 €	371.620 €	322.594 €	1.113.224 €	-456.353 €
2029	53,8 €	351.270 €	284.104 €	1.397.328 €	-172.249 €
2030	53,0 €	344.508 €	259.606 €	1.656.934 €	87.357 €
2031	52,0 €	336.281 €	236.100 €	1.893.034 €	323.457 €
2032	51,4 €	330.889 €	216.449 €	2.109.483 €	539.906 €
2033	51,6 €	331.198 €	201.855 €	2.311.338 €	741.761 €
2034	51,0 €	325.740 €	184.970 €	2.496.308 €	926.731 €
2035	50,5 €	320.963 €	169.811 €	2.666.119 €	1.096.542 €
2036	50,0 €	316.151 €	155.842 €	2.821.961 €	1.252.384 €
Total	---	3.846.408 €	2.821.961 €	TIR	ROI
Amortizacion al final de la vida util			1.252.384 €	14,17%	80%

Escenario 4: 80% de regeneracion con frenadas lentas					
Energía anual regenerada MWh :			8.191	LCOX €/Mwh	30,48
Año	€/MWh anual	€/año	VAN	VAN acumulado	Payback
2026	63,0 €	484.616 €	484.616 €	484.616 €	-1.084.961 €
2027	60,0 €	459.103 €	427.749 €	912.365 €	-657.212 €
2028	56,5 €	429.466 €	372.809 €	1.285.174 €	-284.403 €
2029	53,8 €	406.352 €	328.654 €	1.613.828 €	44.251 €
2030	53,0 €	398.770 €	300.496 €	1.914.324 €	344.747 €
2031	52,0 €	389.520 €	273.479 €	2.187.802 €	618.225 €
2032	51,4 €	383.514 €	250.873 €	2.438.676 €	869.099 €
2033	51,6 €	384.027 €	234.053 €	2.672.729 €	1.103.152 €
2034	51,0 €	377.955 €	214.620 €	2.887.349 €	1.317.772 €
2035	50,5 €	372.666 €	197.165 €	3.084.514 €	1.514.937 €
2036	50,0 €	367.342 €	181.076 €	3.265.590 €	1.696.013 €
Total	---	4.453.331 €	3.265.590 €	TIR	ROI
Amortizacion al final de la vida util			1.696.013 €	18,70%	108%