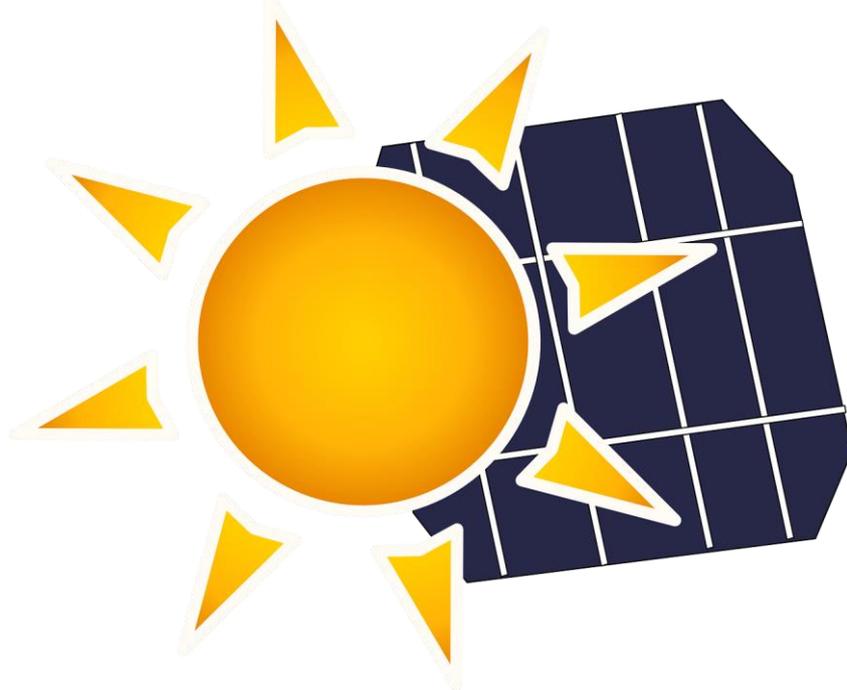


MÁSTER UNIVERSITARIO EN INVESTIGACIÓN EN EFICIENCIA ENERGÉTICA Y SOSTENIBILIDAD EN LA INDUSTRIA, TRANSPORTE, EDIFICACIÓN Y URBANISMO

TRABAJO FIN DE MASTER

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO TERMOMECAÑICOS PARA PLANTAS FOTOVOLTAICAS EN MEDIO RURAL



Estudiante: Buggedo Gonzalo, Unai

Director: Diarce Belloso, Gonzalo

Curso: 2022-2023

Fecha: Bilbao, 24, 09, 2023

INDICE

1.	INTRODUCCIÓN	9
2.	CONTEXTO	11
3.	Estado del arte.....	16
3.1	Almacenamiento térmico.....	16
3.1.1	Almacenamiento térmico sensible (STES).....	16
3.1.2	Almacenamiento térmico de calor latente (LHTES).....	18
3.1.3	Almacenamiento termoquímico	19
3.2	Materiales empleados en TES sensibles.....	20
3.3	Análisis del estado actual	21
4.	OBJETIVOS Y ALCANCE	28
5.	BENEFICIOS.....	29
6.	METODOLOGÍA.....	31
6.1	Pasos seguidos.....	31
6.2	Herramientas y software utilizado	32
6.3	Consideraciones climáticas y estacionales	32
6.4	Parámetros variables.....	33
6.4.1	Módulos	33
6.4.2	Capacidad TES	34
6.4.3	Potencia TES	35
7.	DESCRIPCION Y ANALISIS DE LOS RESULTADOS.....	36
7.1	Perfil producción y consumo	37
7.2	Carga y descarga del TES	45
7.3	Análisis energético y económico	64
7.3.1	Payback.....	67
7.3.2	VAN.....	75
7.3.2	TIR.....	78
8.	CONCLUSIONES	81
9.	BIBLIOGRAFÍA.....	83

ÍNDICE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1. Mix energético España (enero-junio) 2022.[19]</i>	12
<i>Ilustración 2. Mix energético anual España 2010.[21]</i>	12
<i>Ilustración 3. Mix energético anual España 2015.[20]</i>	12
<i>Ilustración 4. En la figura previa se muestra las instalaciones de almacenamiento acumulativo de energía de diferentes países desde el año 2018 hasta 2040. Fuente: BloombergNEF.</i>	15
<i>Ilustración 5. Configuraciones de funcionamiento del sistema TES basado en material granular. Referencia [9]</i>	22
<i>Ilustración 6. Sistema esquematizado de carga y descarga de un sistema termomecánico.[23]</i>	24
<i>Ilustración 7. Lecho empacado en construcción.[15]</i>	26
<i>Ilustración 8. A la izquierda una sola unidad de potencia y varios acumuladores de frío y calor. A la derecha se duplica cada componente.[23]</i>	27
<i>Ilustración 9. Perfil producción y consumo de agosto, cubriendo el 80% de la demanda.</i>	37
<i>Ilustración 10. Perfil producción y consumo de agosto, cubriendo el 60% de la demanda.</i>	37
<i>Ilustración 11. Perfil producción y consumo de agosto, cubriendo el 30% de la demanda.</i>	38
<i>Ilustración 12. Perfil consumo febrero.</i>	39
<i>Ilustración 13. Perfil consumo octubre.</i>	40
<i>Ilustración 14. Perfil producción y demanda mensual para un año completo con 69.595 módulos.</i>	41
<i>Ilustración 15. Perfil producción y demanda mensual para un año completo con 52.196 módulos.</i>	42
<i>Ilustración 16. Perfil producción y demanda mensual para un año completo con 26.098 módulos.</i>	43
<i>Ilustración 17. Carga y descarga TES con 69.595 módulos, 30MWh de capacidad de almacenamiento y 7500 kW de potencia.</i>	45
<i>Ilustración 18. Carga y descarga TES con 69.595 módulos, 30MWh de capacidad de almacenamiento y 5000 kW de potencia</i>	46
<i>Ilustración 19. Carga y descarga TES con 69.595 módulos, 30MWh de capacidad de almacenamiento y 2500 kW de potencia.</i>	46
<i>Ilustración 20. Carga y descarga TES con 69.595 módulos, 20MWh de capacidad de almacenamiento y 7500 kW de potencia.</i>	48
<i>Ilustración 21. Carga y descarga TES con 69.595 módulos, 20MWh de capacidad de almacenamiento y 5000 kW de potencia.</i>	48
<i>Ilustración 22. Carga y descarga TES con 69.595 módulos, 20MWh de capacidad de almacenamiento y 2500 kW de potencia.</i>	49
<i>Ilustración 23. Carga y descarga TES con 69.595 módulos, 10MWh de capacidad de almacenamiento y 7500 kW de potencia.</i>	50
<i>Ilustración 24. Carga y descarga TES con 69.595 módulos, 10MWh de capacidad de almacenamiento y 5000 kW de potencia.</i>	50
<i>Ilustración 25. Carga y descarga TES con 69.595 módulos, 10MWh de capacidad de almacenamiento y 2500 kW de potencia.</i>	51
<i>Ilustración 26. Carga y descarga TES con 52.196 módulos, 30MWh de capacidad de almacenamiento y 5000 kW de potencia.</i>	52
<i>Ilustración 27. Carga y descarga TES con 52.196 módulos, 30MWh de capacidad de almacenamiento y 7500 kW de potencia.</i>	52
<i>Ilustración 28. Carga y descarga TES con 52.196 módulos, 30MWh de capacidad de almacenamiento y 2500 kW de potencia.</i>	53
<i>Ilustración 29. Carga y descarga TES con 52.196 módulos, 20MWh de capacidad de almacenamiento y 7500 kW de potencia.</i>	54
<i>Ilustración 30. Carga y descarga TES con 52.196 módulos, 20MWh de capacidad de almacenamiento y 5000 kW de potencia.</i>	54
<i>Ilustración 31. Carga y descarga TES con 52.196 módulos, 20MWh de capacidad de almacenamiento y 2500 kW de potencia.</i>	55

<i>Ilustración 32. Carga y descarga TES con 52.196 módulos, 10MWh de capacidad de almacenamiento y 7500 kW de potencia.</i>	56
<i>Ilustración 33. Carga y descarga TES con 52.196 módulos, 10MWh de capacidad de almacenamiento y 5000 kW de potencia.</i>	56
<i>Ilustración 34. Carga y descarga TES con 52.196 módulos, 10MWh de capacidad de almacenamiento y 2500 kW de potencia.</i>	57
<i>Ilustración 35. Carga y descarga TES con 26.098 módulos, 30MWh de capacidad de almacenamiento y 7500 kW de potencia.</i>	58
<i>Ilustración 36. Carga y descarga TES con 26.098 módulos, 30MWh de capacidad de almacenamiento y 5000 kW de potencia.</i>	58
<i>Ilustración 37. Carga y descarga TES con 26.098 módulos, 30MWh de capacidad de almacenamiento y 2500 kW de potencia.</i>	59
<i>Ilustración 38. Carga y descarga TES con 26.098 módulos, 20MWh de capacidad de almacenamiento y 7500 kW de potencia.</i>	60
<i>Ilustración 39. Carga y descarga TES con 26.098 módulos, 20MWh de capacidad de almacenamiento y 5000 kW de potencia.</i>	60
<i>Ilustración 40. Carga y descarga TES con 26.098 módulos, 20MWh de capacidad de almacenamiento y 2500 kW de potencia.</i>	61
<i>Ilustración 41. Carga y descarga TES con 26.098 módulos, 10MWh de capacidad de almacenamiento y 7500 kW de potencia.</i>	62
<i>Ilustración 42. Carga y descarga TES con 26.098 módulos, 10MWh de capacidad de almacenamiento y 5000 kW de potencia.</i>	62
<i>Ilustración 43. Carga y descarga TES con 26.098 módulos, 10MWh de capacidad de almacenamiento y 2500 kW de potencia.</i>	63
<i>Ilustración 44. Ejemplo de retribuciones menos pagos anual, en el caso de 52.196 módulos, 30 MWh y 7500kW.</i>	64

ÍNDICE TABLAS

<i>Tablas 1. Ahorro energético 69595 paneles.</i>	65
<i>Tablas 2. Ahorro energético 52196 paneles.</i>	66
<i>Tablas 3. Ahorro energético de la red 26098 paneles</i>	66
<i>Tablas 4. Retribución anual y desembolso inicial con 69595 módulos, variando la capacidad de almacenamiento y la potencia.</i>	67
<i>Tablas 5. Retribución anual y desembolso inicial con 52196 módulos, variando la capacidad de almacenamiento y la potencia.</i>	68
<i>Tablas 6. Retribución anual y desembolso inicial con 26098 módulos, variando la capacidad de almacenamiento y la potencia</i>	68
<i>Tablas 7. Retribución anual y desembolso inicial con 69595, variando la capacidad de almacenamiento y la potencia (solamente TES)</i>	69
<i>Tablas 8. Retribución anual y desembolso inicial con 52196, variando la capacidad de almacenamiento y la potencia (solamente TES)</i>	69
<i>Tablas 9. Retribución anual y desembolso inicial con 26098, variando la capacidad de almacenamiento y la potencia (solamente TES)</i>	70
<i>Tablas 10. Retribución anual y desembolso inicial de solo paneles.</i>	70
<i>Tablas 11. Paybacks en años de los prototipos con 69595 módulos solares (paneles más TES).</i>	71
<i>Tablas 12. Paybacks en años de los prototipos con 52196 módulos solares (paneles más TES).</i>	71
<i>Tablas 13. Paybacks en años de los prototipos con 26098 módulos solares (paneles más TES).</i>	71
<i>Tablas 14. Paybacks en años de los prototipos con 69595 módulos solares (solamente TES).</i>	72
<i>Tablas 15. Paybacks en años de los prototipos con 52196 módulos solares (solamente TES).</i>	73
<i>Tablas 16. Paybacks en años de los prototipos con 26098 módulos solares (solamente TES).</i>	73
<i>Tablas 17. Paybacks en años de los prototipos, con diferente número de módulos solares (solamente paneles).</i>	74
<i>Tablas 18. VAN (TES más paneles)</i>	75
<i>Tablas 19. VAN (solamente TES)</i>	76
<i>Tablas 20. VAN (solo paneles).</i>	77
<i>Tablas 21. TIR (TES más paneles).</i>	78
<i>Tablas 22. TIR (solamente TES).</i>	79
<i>Tablas 23. TIR (solamente paneles).</i>	80

PALABRAS CLAVE

Almacenamiento energía térmica (TES), Almacenamiento energía térmica sensible (STES),
almacenamiento térmico en grava, viabilidad financiera.

RESUMEN

En la actualidad, la creciente demanda energética global y la urgente necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero han puesto de manifiesto la creciente necesidad de avanzar hacia una matriz energética más sostenible y respetuosa con el medio ambiente. La implementación y expansión de sistemas de energía renovable se ha convertido en un factor determinante para el progreso de la sociedad actual y la lucha contra el cambio climático.

Las fuentes de energía renovable, como la solar, la eólica, la hidroeléctrica y la geotérmica, presentan una serie de ventajas innegables en comparación con las fuentes de energía convencionales. No solo son más limpias y respetuosas con el medio ambiente, sino que también se obtienen de fuerzas de la naturaleza inagotables, lo que garantiza un suministro de energía a largo plazo. Sin embargo, su implementación a gran escala enfrenta desafíos significativos, especialmente en el sector residencial.

En el ámbito de la vivienda, el consumo de combustibles fósiles para satisfacer las necesidades térmicas y energéticas es considerable. Lograr una mayor eficiencia energética en los hogares es fundamental para reducir la huella de carbono de la sociedad. Aquí es donde entran en juego las energías renovables. La instalación de paneles solares en techos, la utilización de sistemas de calefacción geotérmica y la adopción de tecnologías de energía eólica a pequeña escala son ejemplos de soluciones que pueden transformar la forma en que los hogares obtienen y utilizan la energía.

Sin embargo, un desafío clave en la integración de energías renovables en el sector residencial radica en la intermitencia de la generación. La energía solar no está disponible durante la noche, y la energía eólica depende del viento. Para abordar este problema, es esencial desarrollar sistemas de almacenamiento térmico y eléctrico efectivos que puedan almacenar el exceso de energía generada durante los momentos de máxima producción y liberarla cuando la demanda sea alta y la generación insuficiente.

Con este propósito en el presente trabajo se ha desarrollado un sistema de almacenamiento térmico en lecho de roca. Este sistema está formado por un tanque de almacenaje el cual será rellenado con grava, la cual será la encargada de realizar el almacenamiento de energía termomecánica. En el presente proyecto se evaluará la viabilidad económica y el comportamiento del sistema de almacenaje.

Este estudio se enfocó en evaluar la viabilidad económica de sistemas fotovoltaicos con almacenamiento térmico (TES) considerando múltiples variables. Se analizaron indicadores clave como el Payback, el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR) para diferentes configuraciones. Se encontró que, en términos generales, la inversión en estos sistemas es rentable, con Paybacks de 3 a 6 años y VAN y TIR positivos. En resumen, se respalda la viabilidad financiera de los sistemas fotovoltaicos con TES, con variaciones en la rentabilidad según la escala y las características específicas de cada configuración.

ABSTRACT

Currently, the growing global energy demand and the urgent need to reduce greenhouse gas emissions have underscored the imperative to transition towards a more sustainable and environmentally friendly energy matrix. The implementation and expansion of renewable energy systems have become a crucial factor in the progress of today's society and the fight against climate change.

Renewable energy sources such as solar, wind, hydroelectric, and geothermal offer undeniable advantages compared to conventional energy sources. Not only are they cleaner and more environmentally friendly, but they are also inexhaustible, ensuring a long-term energy supply. However, their large-scale implementation faces significant challenges, particularly in the residential sector.

In the realm of housing, the substantial use of fossil fuels to meet thermal and energy needs is evident. Achieving greater energy efficiency in homes is fundamental to reducing society's carbon footprint. This is where renewable energies come into play. The installation of solar panels on rooftops, the utilization of geothermal heating systems, and the adoption of small-scale wind energy technologies are examples of solutions that can transform how households acquire and utilize energy.

Nonetheless, a key challenge in integrating renewable energies into the residential sector lies in the intermittency of generation. Solar energy is unavailable at night, and wind energy depends on the wind's strength. To address this issue, it is essential to develop effective thermal and electrical storage systems capable of storing excess energy generated during peak production times and releasing it when demand is high and generation is insufficient.

With this purpose in mind, the present work has developed a thermal storage system using a rock bed. This system consists of a storage tank that will be filled with gravel, which will be responsible for storing thermal energy. In this project, an evaluation of the economic feasibility and performance of the storage system will be conducted.

This study aimed to assess the economic viability of photovoltaic systems with thermal energy storage (TES) while considering multiple variables. Key financial indicators such as Payback, Net Present Value (NPV), and Internal Rate of Return (IRR) were analyzed for various configurations. It was found that, in general terms, investments in these systems are profitable, with Payback periods ranging from 3 to 6 years and positive NPV and IRR values. In summary, the financial feasibility of photovoltaic systems with TES is supported, with variations in profitability depending on the scale and specific characteristics of each configuration.

LABURPENA

Egungoan, energia behar handiko hazkundera eta gas efektua izoztuzko emisioak murrizteko beharra agertu du ingurumenarekiko jasangarriago eta errespetuzkoa den energia matrize baterantz egin beharra. Energi berriztagarrien sistema erabilera eta hedapena gizarte modernoaren aurrera egiteko eta klima aldaketa aurkako borrokan faktore garrantzitsua bihurtu da.

Energia berriztagarriak, hala nola eguzki, haize, hidroelektrikoa eta geotermikoa, aurkako energia iturrien aldean argiak eta ingurumenarekiko errespetagarriak diren abantaila ezin ikargatuak eskaintzen dituzte. Ez soilik garbiagoak eta ingurumenarekiko errespetu handiagoa dutenez, baina baita agortasunik gabeak ere, energi hornikuntza luzeko ziurtatzen dute. Hala ere, beren erabilera zabala izateak erronka handiak dakar, batez ere etxebizitza sektorean.

Etxebizitzaren inguruan, beroa eta energia beharrak asetzeko fosil erretiluak erabilera nabarmena dute. Etxeetan energia eraginkortasun handiagoa lortzea oso garrantzitsua da gizartearen karbono hondarrak murrizteko. Hemen energia berriztagarriak sartzen dira. Hondarrizko teilak egokitzea, geotermiko bero-sistemak erabiltea eta haize-energiaren teknologiak txikitasun mailan adopzioa diren adibideak dira, etxebizitzak energia lortzen eta erabiltzen dituzten modua aldatu dezaketen irudiak.

Hala ere, energia berriztagarrien etxebizitza sektorean integrazioan erronka nagusi bat aurkitzen da energia sortuaren tartekotasunean dagoena. Eguzki energia gaua zehar erabilgarri ez da eta haize-energiak haizearen indarretik mendekatzen du. Herritarrek energia gutxien eskuratzen eta erabiltzen duten unean energia gehiago gordetzeko eta eskatzen den batean gehiegizko beharra dagoenean eta sortzea gutxi den unean aski den energia gordetzeko sistema termiko eta elektriko eraginkorra garatzeko oso garrantzitsua da.

Helburu horrekin, lan hau gaur egungoan gurutzatu da, leho bat erabiliz energia gordetzeko sistema garatu da. Sistema honek beroa gordetzeko erabiliko den grava batekin beteko den biltegia du, eta horrek energia termikoa gordetzeko ardua izango du. Lan honetan energia gordetzeko sistemaaren garapeneko eta ekonomiagintzako ebaluazioa egingo da.

Azterketa hori biltegiratze termikoa (TE) duten sistema fotovoltaikeen bideragarritasun ekonomikoa ebaluatzea bideratu zen, aldagai ugari kontuan hartuta. Funtsezko adierazleak aztertu ziren, hala nola Payback, Egungo Balio Garbia (VAN) eta Barne Itzulera Tasa (TIR) konfigurazio desberdinetarako. Aurkitu zen, oro har, sistema horietan egindako inbertsioa errentagarria dela, 3-6 urteko Paybacks eta VAN eta TIR positiboekin. Laburbilduz, TES duten sistema fotovoltaikeen finantza-bideragarritasuna babesten da, konfigurazio bakoitzaren eskalaren eta ezaugarri espezifikoaren arabera errentagarritasunean aldaketak eginez.

1. INTRODUCCIÓN

El almacenamiento de energía ha experimentado avances significativos en tiempos recientes, consolidándose como uno de los elementos preeminentes que ejercen un profundo impacto en la tecnología contemporánea. En particular, el almacenamiento de energía adquiere una trascendental importancia al habilitar que cualquier fuente de energía de naturaleza intermitente pueda responder efectivamente a las demandas energéticas fluctuantes. Un ejemplo elocuente de esta necesidad se encuentra en la energía solar, cuya viabilidad se ve significativamente potenciada a través del almacenamiento, especialmente durante los periodos de menor disponibilidad solar, como el crudo invierno.

Con el noble propósito de impulsar la mayor adopción de las energías renovables en el seno de nuestro sistema energético, el almacenamiento de energía se alza como uno de los pilares fundamentales a desarrollar. A través de esta ágil estrategia, se logra armonizar la producción energética con la demanda, gestando así una eficiencia energética superior, elemento principal para el progresivo desenvolvimiento de las fuentes de energía alternativa.

La demanda energética se desglosa en dos vertientes: la demanda eléctrica y la demanda térmica. La energía eléctrica, piedra angular de nuestra sociedad moderna, enfatiza la imperante necesidad de perfeccionar sistemas de almacenamiento capaces de conferir flexibilidad a la generación de energía renovable, asegurando así su integración en el sistema con total fiabilidad. Para alcanzar este fin, diversas tecnologías de almacenamiento de energía eléctrica han sido concebidas y refinadas con el propósito de satisfacer la demanda en momentos de mayor exigencia. Entre tales innovaciones, destacan las centrales de bombeo hidráulico, los sistemas de almacenamiento de aire comprimido y las baterías de litio, estas últimas, en particular, han emergido como una opción sobresaliente en el ámbito del almacenamiento de energía eléctrica.

Por otro lado, la demanda térmica, que abarca aplicaciones como sistemas de refrigeración, calefacción, aire acondicionado y agua caliente sanitaria, por mencionar algunas, suele depender en su mayoría de fuentes de energía convencionales debido a su arraigada practicidad. Sin embargo, un mayor perfeccionamiento en el campo del almacenamiento de energía térmica podría propiciar una transición fluida hacia el suministro de energía renovable, especialmente en lo que concierne a la energía solar térmica.

En las últimas décadas, a medida que las naciones industrializadas han emprendido la electrificación como parte integral de su desarrollo, han emergido diversas técnicas de almacenamiento de energía térmica, las cuales atesoran un potencial sobresaliente para optimizar la eficiencia de los dispositivos y sistemas de conversión de energía térmica. En términos generales, es preciso coordinar una serie de acciones en varios frentes del sistema energético a fin de materializar plenamente los beneficios latentes que ofrece el almacenamiento térmico.

La implementación de estas perspicaces soluciones podría deparar beneficios notorios en el ámbito residencial, en el cual la demanda de energía térmica ostenta una relevancia innegable. Estos sistemas pueden contribuir significativamente a la obtención de una mayor eficiencia energética y, simultáneamente, a la reducción de la dependencia de las fuentes de energía convencionales en estas aplicaciones residenciales. No obstante, cabe destacar que la implementación de sistemas de almacenamiento térmico en este contexto puede conllevar

desafíos logísticos, dada la limitada disponibilidad de espacio que comúnmente caracteriza al entorno residencial, y la tendencia de los sistemas de almacenamiento térmico convencionales a requerir áreas sustanciales de superficie.

En el contexto de este proyecto, se llevará a cabo un minucioso análisis de un sistema de almacenamiento de calor latente que emplea grava como medio para la acumulación y liberación de energía. Los sistemas de almacenamiento de calor sensible, también denominados TES (siglas en inglés de Thermal Energy Storage), se fundamentan en la modificación de la energía interna de un material mediante la alteración de su temperatura. En este proceso, se aplica calor para elevar la temperatura de un sólido o fluido que se retiene a la temperatura máxima de operación hasta el momento de su liberación. Este tipo de sistema ha alcanzado un alto grado de madurez tecnológica en la actualidad y se erige como el método más ampliamente adoptado a gran escala dentro de los TES. Los materiales comúnmente empleados en este enfoque son sales fundidas, debido a sus propiedades favorables para la transferencia de calor. Sin embargo, presentan limitaciones, principalmente su temperatura máxima de funcionamiento, que se encuentra restringida debido a la descomposición de las sales fundidas a elevadas temperaturas. Entre las diversas alternativas disponibles, los materiales granulares, como la arena o las rocas, gozan de una amplia utilización gracias a su costo relativamente bajo.

Para llevar a cabo esta investigación, se ha concebido un sistema que se sustenta en un tanque de almacenamiento repleto de grava, aprovechando el calor sensible contenido en el material granular. En este proceso, se hará uso de paneles solares; en los momentos en que la producción exceda la demanda, se utilizará el excedente para calentar el lecho de grava mediante una corriente de aire caliente. Por otro lado, cuando la producción de energía solar fotovoltaica sea insuficiente para cubrir la demanda, se recurrirá al calor sensible almacenado en el tanque para su conversión en energía eléctrica.

Es relevante destacar que este trabajo guarda una estrecha relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible establecidos por las Naciones Unidas, en particular, el Objetivo número 7, titulado "Garantizar el acceso a una energía asequible, fiable, sostenible y moderna para todos"[1]. Este objetivo resalta la necesidad de fortalecer la cooperación internacional para facilitar el acceso a la investigación y la tecnología en el ámbito de la energía limpia. Asimismo, hace hincapié en la importancia de lograr una mayor eficiencia energética, incluyendo el fomento de las energías renovables.

2. CONTEXTO

El desafío primordial de reducir el cambio climático y sus repercusiones se perfila como uno de los imperativos más apremiantes para la humanidad en las décadas venideras. La Comisión Europea, en consonancia con la preocupación global, ha formulado directrices estratégicas para abordar este reto, dado que los sectores energéticos desempeñan un papel trascendental en este contexto, siendo responsables de aproximadamente el 60% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero [2].

Estas directrices persiguen, impulsar el ahorro energético y la reducción del consumo de combustibles fósiles, a fin de contribuir a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) adoptados por las Naciones Unidas en septiembre de 2015 [1]. Es importante destacar que estos ODS representan una hoja de ruta global que abarca un amplio espectro de desafíos, incluyendo la sostenibilidad energética y la mitigación del cambio climático.

En el empeño por asegurar un futuro sostenible, se ha establecido como una meta imperativa limitar el aumento de la temperatura global a 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales, tal como se acordó en el marco del Acuerdo de París [3]. Dentro de esta ambiciosa meta, el ahorro energético adquiere una trascendental relevancia. Este ahorro debe ser aplicado de manera transversal en diversos sectores, desde la industria hasta el transporte, y uno de los sectores que merece una atención particular es el de la construcción. En 2018, el sector de la construcción representó el 31,93% del consumo total de energía en España, convirtiéndose en un punto focal en la búsqueda de soluciones sostenibles [4]. Dentro de esto, resulta notable que el 68,02% de ese consumo global corresponde a la demanda térmica, y un 55,17% de esta demanda se satisface mediante el uso de combustibles fósiles [5]. Estos datos subrayan la importancia de examinar con meticulosidad la demanda térmica en el ámbito residencial, ya que esta es una fuente significativa de consumo energético y emisiones de gases de efecto invernadero. Una evaluación rigurosa de esta demanda térmica puede proporcionar valiosas oportunidades para impulsar la eficiencia energética y contribuir de manera concreta a la consecución de los objetivos de sostenibilidad a nivel local y global.

La tendencia actual es ir aumentando el porcentaje de energías renovables que se emplean para la generación y satisfacción de la demanda eléctrica. Para ello, es necesaria la incorporación de sistemas de almacenamiento, debido a la intermitencia de las energías renovables. Este almacenamiento eléctrico resulta caro, interviniendo en este punto la oportunidad de los sistemas de almacenamiento termomecánicos.

A continuación, se mostrará el mix energético de los años 2022 (Ilustración 1), 2019 (Ilustración 2) y 2010 (Ilustración 3) para observar de una manera más clara qué tanto por ciento de energías verdes aumenta a cada año que pasa.

Estructura de la generación de enero a junio de 2022

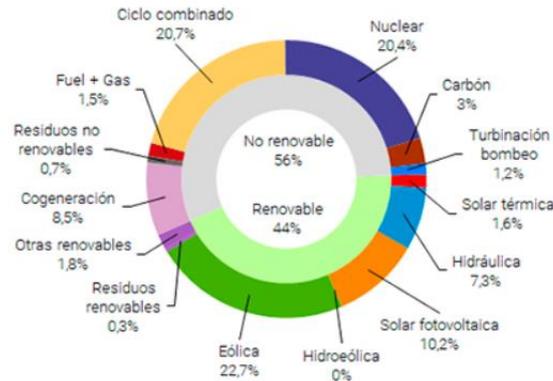


Ilustración 1. Mix energético España (enero-junio) 2022.[19]

COBERTURA DE LA DEMANDA ANUAL



Ilustración 3. Mix energético anual España 2015.[20]

2010

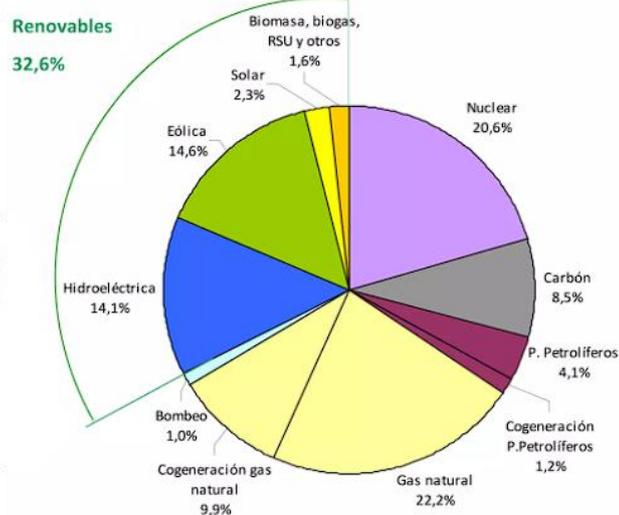


Ilustración 2. Mix energético anual España 2010.[21]

Se puede apreciar como en 2010, la energía renovable consumida era del 32.6%, mientras que en 2015 se incrementó hasta un 39.5%. Este último año (2022), el porcentaje de energías renovables empleado desde enero hasta junio ha supuesto un 44% del total de la energía producida.

Son datos claros de como estas energías limpias van ganando un papel cada vez más protagonista en la sociedad actual, y como en los próximos años se va a continuar con esta tendencia.

Europa es consciente de ello, y debido a esto, ha sacado normativas para agilizar el cambio hacia la economía baja en CO2, como es la agenda 2030:

La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, aprobada el 25 de septiembre de 2015 por los 193 Estados miembros de la Organización de las Naciones Unidas, consiste en un plan de acción para lograr una prosperidad respetuosa con las personas y el medio ambiente y favorecer la consecución de la paz y la justicia mundiales.

La Agenda 2030 está constituida por 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) que engloban 169 metas interrelacionadas que articulan los cinco ejes principales de la agenda (5P):

- Personas.
- Planeta.
- Prosperidad.
- Paz.
- Participación colectiva.

Este compromiso acogido por países tanto del centro como de la periferia del sistema capitalista guiará las actuaciones, políticas y estrategias de los diversos actores hacia la consecución de un futuro en el que estén presentes las 5P. Para los países menos desarrollados supone una gran oportunidad la adopción de la Agenda 2030 al concentrar esfuerzos en erradicar problemas muy presentes como la desigualdad y la pobreza extremas, impulsar el crecimiento económico mediante la creación de trabajo decente y actuar contra el cambio climático creando sociedades sostenibles, entre otros.

Además, la Agenda 2030 otorga ventajas a las empresas y entidades privadas que la adoptan al servir de guía para elaborar sus estrategias de responsabilidad social corporativa, al asegurar que sus esfuerzos estarán a la vanguardia del futuro y al mejorar el impacto en el mercado objetivo.

De la agenda 2030 surgen los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) los cuales constituyen un llamamiento universal a la acción para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y mejorar las vidas y las perspectivas de las personas en todo el mundo. En 2015, todos los Estados Miembros de las Naciones Unidas aprobaron 17 Objetivos como parte de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, en la cual se establece un plan para alcanzar los objetivos en 15 años.

El ODS 7 también aborda la necesidad de aumentar la energía procedente de fuentes renovables, además de promover tecnologías de eficiencia energética. Por consiguiente, el ODS 7 abarca metas para el acceso universal a la energía, el crecimiento de las energías renovables, la mejora en la eficiencia energética, la cooperación internacional en el desarrollo de infraestructura para la energía sostenible y la mejora tecnológica y la expansión de los sistemas energéticos.

A menudo estos objetivos están entrelazados y se refuerzan entre sí. Por ejemplo, la bajada de los precios para algunas tecnologías de energía renovable, tales como la energía solar fotovoltaica, puede permitir el acceso a los servicios energéticos incluso a consumidores de electricidad relativamente pequeños, ya que el coste de inversión incluso de los paneles solares más pequeños se compensa sin comprometer la eficiencia. Los dispositivos de alto rendimiento energético pueden estimular aún más el valor del servicio. Por tanto, la consecución de las metas del ODS 7 puede fomentar el crecimiento sostenible.

A nivel español el IDAE, como organismo de la Secretaría de Estado de Energía, tiene una destacada proyección internacional en materia de energía marcada por dos de sus objetivos estratégicos: la promoción de la presencia de empresas españolas en los mercados internacionales y la representación institucional en los programas europeos y los foros y redes internacionales.

Las actividades se pueden agrupar en dos grandes sectores: la Colaboración con la Unión Europea, con el fin de apoyar a la coordinación de la política de energía nacional con las políticas comunitarias y promover la participación española en los programas comunitarios para incrementar la tasa de retorno; y la Cooperación Internacional con otras instituciones y otras regiones en las que el empresariado español puede aportar su experiencia, tecnología y conocimiento y así contribuir a la internacionalización de la empresa española.

Además, España cuenta con el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) [8], el cual propone una reducción del 23% de emisiones de gases de efecto invernadero con respecto a 1990. Esto supondría eliminar una de cada tres toneladas de dichos gases emitidos actualmente. Este ambicioso proyecto va en concordancia con el gran esfuerzo propuesto por Europa en la agenda 2030, así como con el Acuerdo de París.

Las energías renovables tienen grandes fallas pese a ser una energía limpia, siendo una de las más marcadas su intermitencia a la hora de generar energía.

Esto podría llegar a solucionarse con baterías con la capacidad de almacenar de manera rentable, práctica, fácil y barata el exceso de energía producido por las plantas de energía fotovoltaica y los parques eólicos. Esto implica que la energía eléctrica debe generarse en todo momento de acuerdo con la demanda energética.

Es por ello, que en un mundo en plena transición de las energías fósiles a las nuevas fuentes renovables es de vital importancia una mejora del almacenamiento de energía eléctrica para respaldar dichas tecnologías emergentes, aprovechando cada megavatio verde generado.

Por todo esto se han comenzado a desarrollar diferentes técnicas de almacenaje de energía, como pueden ser:

- Hidroeléctrica reversible: Sistema a gran escala más eficiente, generando significativas cantidades de energía limpia, aunque está limitada por los pocos sitios que cuentan con las cualidades geológicas requeridas para poder instaurar este sistema.
- Aire comprimido: motor reversible que durante los excedentes de energía almacena el aire atmosférico a altas presiones.

- Almacenamiento térmico: almacenar energía en materiales que permitan retenerla y liberarla de manera controlada.
- Supercondensadores: Almacena grandes cantidades de energía eléctrica en formas de cargas electrostáticas (sin reacciones químicas). Estos supercondensadores pueden ser cargados o descargado en segundos, siendo una opción idónea para necesidades puntas de potencia.
- Volantes de inercia: Almacenaje en forma de energía cinética cuyo funcionamiento se basa en un disco al cual se la aplica energía para que comience a girar, y cuando se cesa de proporcionarle dicha energía es capaz de mantener su movimiento sin apenas rozamiento, pudiendo emplearse posteriormente.
- Baterías: Almacena energía en compuestos químicos capaces de generar carga eléctrica, las cuales pueden generar respuestas muy rápidas. Cabe remarcar en este apartado las baterías de litio, las cuales poseen un elevado potencial electroquímico y puede acumular grandes cantidades de energía, siendo su gran problema el elevado coste de fabricación.
- Pilas de combustible de hidrógeno: Almacenamiento químico continuo. La principal diferencia con las baterías es que abastece permanentemente la pila desde el exterior, permitiendo su uso constante. Existen otros tipos de pilas de combustible, pero las de hidrógeno son las más empleadas.

INSTALACIONES DE ALMACENAMIENTO ACUMULATIVO DE ENERGÍA EN TODO EL MUNDO

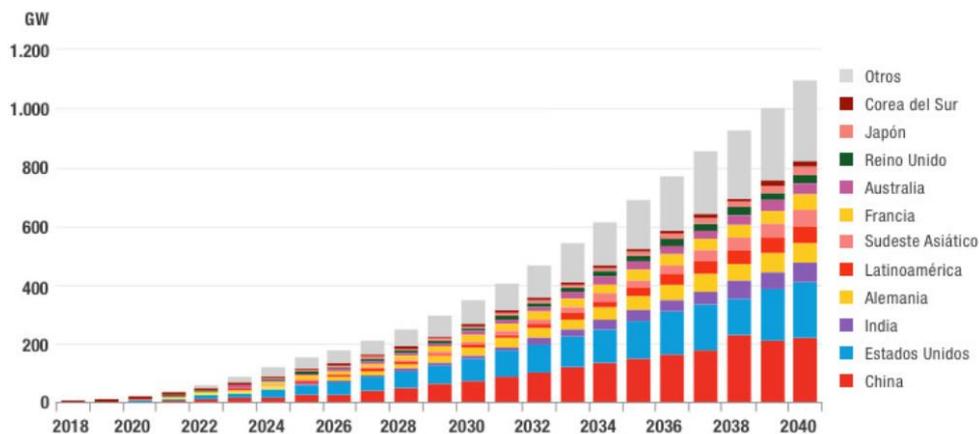


Ilustración 4. En la figura previa se muestra las instalaciones de almacenamiento acumulativo de energía de diferentes países desde el año 2018 hasta 2040. Fuente: BloombergNEF.

En la Ilustración 4 previa se muestra las instalaciones de almacenamiento acumulativo de energía de diferentes países desde el año 2018 hasta 2040.

Fuera de las técnicas de almacenamiento de energía nombradas anteriormente, las cuales son las que más importancia y relevancia tienen actualmente, existen otros tipos de almacenamiento en vías de desarrollo las cuales tienen un futuro prometedor.

3. Estado del arte

El método Power to Heat to Power es un método el cual consiste en convertir la electricidad en calor para posteriormente volver a ser transformada en electricidad. En el presente TFM se explicarán los diferentes métodos de almacenamiento térmico.

3.1 Almacenamiento térmico

Los sistemas de almacenamiento de energía térmica (TES, por sus siglas en inglés, Thermal Energy Storage) representan una categoría tecnológica de singular importancia en el ámbito de la gestión y optimización de los recursos energéticos. Estos sistemas revisten una funcionalidad crítica al permitir la acumulación y posterior liberación de calor en una variedad de aplicaciones, lo que, a su vez, conduce a un aprovechamiento más eficiente y efectivo de la energía térmica. La trascendencia de los TES se manifiesta con especial énfasis en el contexto actual, caracterizado por la creciente transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles.

Los TES operan en base a un principio fundamental: capturar el excedente de energía térmica cuando está disponible y restituirla en momentos de demanda, creando así un equilibrio en la oferta y la demanda de energía térmica. Este proceso se lleva a cabo mediante la utilización de materiales o fluidos capaces de retener y posteriormente liberar el calor en función de las necesidades del sistema.

Existen diversas categorías de TES, cada una con características particulares:

3.1.1 Almacenamiento térmico sensible (STES)

Los sistemas de almacenamiento de energía térmica (TES) sensibles son una categoría de tecnologías de TES. Implica almacenar energía térmica en un medio, que no sufre un cambio de fase cuando se le agrega calor. La cantidad de energía que se puede almacenar dentro de un medio específico depende principalmente de la capacidad calorífica específica del material, la densidad de energía, la difusividad térmica, la masa, la conductividad térmica, el volumen específico, la estabilidad mecánica, el rango de temperatura de funcionamiento, la presión de vapor y la rentabilidad [6][7].

Principios Fundamentales de los TES Sensibles:

En los sistemas de TES sensibles, el material de almacenamiento (que puede ser agua, rocas, arena, sales u otros materiales) actúa como un "depósito" para el calor. Cuando se desea almacenar energía térmica, se calienta el material mediante una fuente de calor externa, como la energía solar concentrada o la electricidad. Cuando se necesita utilizar la energía térmica almacenada, el material se enfría, liberando el calor almacenado para su uso.

Fórmulas Relevantes:

1. Capacidad Térmica Específica (C): La capacidad térmica específica de un material (también conocida como calor específico) se refiere a la cantidad de calor que se necesita para elevar la temperatura de una unidad de masa del material en una unidad de temperatura (generalmente

Kelvin o grados Celsius). Se expresa en unidades de energía por unidad de masa y unidad de temperatura. La fórmula general es:

$$Q = m \cdot C \cdot \Delta T$$

Donde:

- Q es la cantidad de calor transferida (energía térmica).
- m es la masa del material.
- C es la capacidad térmica específica del material.
- ΔT es el cambio de temperatura.

Para el almacenamiento de energía térmica, se puede utilizar esta fórmula para calcular la cantidad de energía térmica almacenada o liberada al cambiar la temperatura del material de almacenamiento.

2. Eficiencia del Almacenamiento de Energía Térmica (η): La eficiencia de un sistema de TES mide qué tan bien se puede recuperar la energía térmica almacenada cuando se libera. Se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\eta = \frac{E_{salida}}{E_{entrada}}$$

Donde:

- *E_{salida}* es la energía térmica recuperada del sistema.
- *E_{entrada}* es la energía térmica almacenada en el sistema.

Una alta eficiencia es deseable para garantizar que la mayor parte de la energía almacenada sea útil cuando se libera.

3. Tiempo de Almacenamiento (τ): El tiempo de almacenamiento se refiere al período durante el cual la energía térmica se retiene en el material de almacenamiento antes de ser liberada. Este parámetro es esencial para determinar la capacidad de un sistema de TES para mantener la energía térmica durante períodos de baja demanda. Su cálculo puede depender de varios factores, como la tasa de pérdida de calor del material y la capacidad térmica del sistema.

Los TES sensibles son ampliamente utilizados en aplicaciones como la calefacción y la refrigeración de edificios, así como en sistemas de energía solar concentrada. La elección del material de almacenamiento y el diseño del sistema juegan un papel crucial en su eficiencia y rendimiento general. Estos sistemas desempeñan un papel fundamental en la gestión de la energía térmica y son un componente esencial en la transición hacia fuentes de energía más sostenibles y renovables.

3.1.2 Almacenamiento térmico de calor latente (LHTES)

Los sistemas de almacenamiento de energía térmica (TES) latente son una categoría de tecnologías de TES que se basan en la transición de fase de un material para almacenar y liberar calor. A diferencia de los TES sensibles, donde la energía se almacena principalmente como un cambio en la temperatura, en los TES latente, la energía térmica se almacena y libera durante la fusión (cambio de fase sólido a líquido) o la solidificación (cambio de fase líquido a sólido) de un material. Profundicemos en los TES latente, incluyendo sus principios fundamentales y algunas fórmulas relevantes.

Principios Fundamentales de los TES Latente:

En los sistemas de TES latente, se utiliza un material de cambio de fase, como una sal o parafina, que tiene la propiedad de absorber y liberar grandes cantidades de energía térmica durante la transición de fase. Cuando el material se calienta y cambia de sólido a líquido (fusión), absorbe calor, almacenando energía. Cuando se enfría y cambia de líquido a sólido (solidificación), libera calor, liberando la energía almacenada. Esto permite una alta densidad de energía en comparación con los TES sensibles.

Fórmulas Relevantes:

1. Cambio de Energía (Q): La cantidad de energía térmica absorbida o liberada durante la transición de fase se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$Q = m \cdot h$$

Donde:

- Q es la cantidad de energía térmica absorbida o liberada (en julios).
- m es la masa del material de cambio de fase (en kilogramos).
- h es la entalpía de fusión o solidificación del material (en julios por kilogramo).

La entalpía de fusión (o solidificación) es una propiedad del material y representa la cantidad de energía requerida para cambiar una unidad de masa del material de sólido a líquido (o viceversa).

2. Eficiencia del Almacenamiento de Energía Térmica (η): La eficiencia de un sistema de TES latente mide qué tan bien se puede recuperar la energía térmica almacenada durante la transición de fase. Se calcula de manera similar a los TES sensibles:

$$\eta = \frac{E_{salida}}{E_{entrada}}$$

Donde:

- *Esalida* es la energía térmica recuperada del sistema durante la transición de fase.
- *Eentrada* es la energía térmica absorbida durante la transición de fase.

Una alta eficiencia es esencial para maximizar la utilidad de la energía almacenada.

3. Tiempo de Almacenamiento (τ): Al igual que en los TES sensibles, el tiempo de almacenamiento en los TES latente se refiere al período durante el cual la energía térmica se retiene en el material de cambio de fase antes de ser liberada. Su cálculo depende de varios factores, incluida la tasa de pérdida de calor del material y la capacidad de almacenamiento.

Los TES latente se utilizan en diversas aplicaciones, como sistemas de energía solar concentrada, refrigeración de edificios, almacenamiento de energía eléctrica y procesos industriales que requieren una liberación controlada de calor. La alta densidad de energía y la eficiencia de almacenamiento hacen que los TES latente sean una opción atractiva para la gestión de la energía térmica en sistemas sostenibles y eficientes desde el punto de vista energético.

3.1.3 Almacenamiento termoquímico

Los sistemas de almacenamiento de energía térmica (TES) químicos son una categoría de tecnologías de TES que utilizan reacciones químicas para almacenar y liberar energía térmica. A diferencia de los TES sensibles y latentes, que almacenan energía principalmente mediante cambios de temperatura o transiciones de fase, los TES químicos implican transformaciones químicas reversibles que involucran compuestos químicos específicos. Aquí se profundizará en los TES químicos, incluyendo sus principios fundamentales, aplicaciones y ejemplos de reacciones químicas utilizadas.

Principios Fundamentales de los TES Químicos:

Los sistemas de TES químicos aprovechan las reacciones químicas endotérmicas (absorben calor) y exotérmicas (liberan calor) para almacenar y liberar energía térmica. Estas reacciones químicas ocurren en un material de almacenamiento específico, que se carga con energía térmica durante la reacción endotérmica y se descarga cuando la reacción exotérmica es activada. La reversibilidad de estas reacciones es fundamental para la recarga y descarga repetidas del sistema.

Ejemplos de Reacciones Químicas en TES:

1. Reacción de hidratación-deshidratación de sales: Un ejemplo común es la utilización de sales hidratadas, como el cloruro de calcio hexahidratado ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). Durante la carga, la sal absorbe calor al deshidratarse (perdiendo sus moléculas de agua). Durante la descarga, la sal libera calor al hidratarse nuevamente (recuperando las moléculas de agua).
2. Reacciones redox: Algunos TES químicos utilizan reacciones redox (de reducción-oxidación) reversibles, como la reacción entre hierro y óxido de hierro (Fe/FeO), donde el hierro se oxida (absorbiendo calor) durante la carga y se reduce (liberando calor) durante la descarga.
3. Reacciones de cambio de fase químico: Algunos materiales orgánicos pueden experimentar cambios de fase químicos reversibles, como la cristalización/deshidratación de ácido tereftálico. Durante la carga, el material se cristaliza y absorbe calor, y durante la descarga, se deshidrata y libera calor.

Aplicaciones de los TES Químicos:

Los TES químicos se utilizan en una variedad de aplicaciones, incluyendo:

1. Generación de Energía: Se pueden aplicar en sistemas de generación de energía, como ciclos termodinámicos con almacenamiento químico, para proporcionar energía térmica cuando sea necesario.
2. Calefacción y Refrigeración: Los TES químicos se utilizan para sistemas de calefacción y refrigeración de edificios, almacenando calor o frío durante los períodos de bajo costo de energía y liberándolo cuando la demanda es alta.
3. Almacenamiento de Energía Solar: Los TES químicos son útiles en aplicaciones de energía solar concentrada, donde se utilizan para almacenar y liberar calor para generar electricidad de manera continua.
4. Aplicaciones Industriales: Se aplican en procesos industriales que requieren calor a temperaturas específicas, como la industria química y la metalurgia.
5. Movilidad Sostenible: En aplicaciones de movilidad sostenible, los TES químicos pueden utilizarse en sistemas de almacenamiento de calor para vehículos eléctricos o sistemas de calefacción y refrigeración de vehículos.

3.2 Materiales empleados en TES sensibles

Los sistemas de almacenamiento de energía térmica (TES) sensibles utilizan una variedad de materiales como medios de almacenamiento para absorber y liberar calor mediante cambios de temperatura. Los materiales seleccionados deben tener propiedades específicas que les permitan funcionar de manera eficiente en aplicaciones de TES. A continuación, se mencionan algunos ejemplos de materiales comunes utilizados en TES sensibles:

1. Sales Fundidas: Las sales fundidas son uno de los medios de almacenamiento de calor más utilizados en TES sensibles. Estas sales tienen puntos de fusión y solidificación bien definidos, lo

que les permite absorber calor durante la fusión y liberarlo durante la solidificación. Ejemplos de sales fundidas incluyen el nitrato de sodio y el nitrato de potasio.

2. Agua: El agua es un excelente medio de almacenamiento de calor debido a su alta capacidad térmica y su amplio rango de temperaturas de operación. Se utiliza en sistemas de TES sensibles, como tanques de almacenamiento de agua caliente.

3. Piedras o Rocas: Las piedras o rocas pueden utilizarse como material de almacenamiento en sistemas de TES sensibles. Estos materiales tienen una alta capacidad térmica y pueden mantener el calor durante períodos prolongados. Se calientan durante el día y liberan calor durante la noche. Poseen precios muy bajos.

4. Fluidos Térmicos: Los fluidos térmicos, como aceites minerales, aceite de transferencia de calor o glicol, se utilizan en sistemas de TES sensibles para transportar calor desde el colector de calor (por ejemplo, paneles solares) hasta el medio de almacenamiento.

5. Materiales de Almacenamiento de Aire Caliente: En algunos sistemas de TES sensibles, el aire caliente se utiliza como medio de almacenamiento. Durante la carga, se calienta el aire y se almacena en un contenedor aislado. Luego, el aire se libera y se utiliza para generar energía térmica cuando es necesario.

6. Cerámicas y Materiales de Alta Conductividad Térmica: Algunos materiales cerámicos y compuestos con alta conductividad térmica se utilizan para mejorar la transferencia de calor en sistemas de TES sensibles, lo que aumenta su eficiencia.

La elección del material de almacenamiento depende de factores como la temperatura de operación, la capacidad de almacenamiento de calor, la eficiencia y la durabilidad requerida para una aplicación específica. Cada material tiene sus propias ventajas y limitaciones.

3.3 Análisis del estado actual

Entre las tres opciones, la de calor sensible es la tecnología actualmente más madura, siendo la más utilizada a gran escala. Los materiales empleados en este método normalmente son sales fundidas [9] debido a sus propiedades favorables para la transferencia de calor. No obstante, cuentan con inconvenientes, ya que, tienen limitada la temperatura máxima de operación debido a la descomposición de las sales fundidas a altas temperaturas. Entre las diferentes alternativas, los materiales granulares como la arena o rocas son ampliamente empleados debido a su bajo coste.

Dependiendo del tamaño del material granular sólido del sistema TES y de la velocidad del fluido de trabajo, se pueden dar varias configuraciones de operación. Para velocidades del fluido (U) inferiores a la velocidad de mínima fluidización (U_{mf}) del material granular, el fluido percolará entre los sólidos en los procesos de carga y descarga, permaneciendo los sólidos estáticos en el proceso. Por lo tanto, los procesos de carga y descarga en este caso se producirán secuencialmente, contando con un alto grado de segregación térmica en el sistema TES, que contará con una zona de temperatura alta (T_A) y otra de baja (T_B) separados por una termoclina que se desplaza y crece a medida que el proceso de carga o descarga progresa, como puede verse en la Ilustración 5.

Sin embargo, velocidades del fluido por encima de la velocidad de mínima fluidización producen la fluidización de los sólidos, generándose burbujas de fluido en el interior del lecho que contribuyen a producir altas tasas de mezclado de los sólidos que ocasionan la homogeneización de la temperatura en todo el sistema. Por lo tanto, la temperatura del sistema TES presentará un valor intermedio (T_i) entre la temperatura alta y la baja, tal como se observa en la Ilustración 5. Un trabajo previo realizado mediante simulaciones CFD del proceso de descarga de un sistema TES con material granular y empleando CO_2 supercrítico como fluido de trabajo [10] demostró que, para aplicaciones de recuperación de energía de un sistema TES, la configuración de lecho fijo es más ventajosa que el régimen de lecho fluidizado, desde un punto de vista exergético, para maximizar la eficiencia del ciclo termodinámico y, por lo tanto, también la eficiencia global de la planta de energía solar.

En cambio, el régimen de lecho fijo limita la velocidad del fluido por debajo de la velocidad de mínima fluidización de las partículas sólidas que conforman el material granular, limitando de este modo el gasto másico de fluido. Por lo tanto, se propone un diseño novedoso para operar el lecho de partículas sólidas en un régimen de lecho fijo incluso a altas velocidades del fluido. La solución propuesta consiste en confinar el material granular mecánicamente entre dos distribuidores que permiten la circulación del fluido evitando el movimiento de los sólidos, la fluidización de las partículas y por tanto el mezclado característico de los lechos fluidizados.

De este modo, el lecho confinado podría operar a alta velocidad con segregación térmica en el interior del lecho, contando con la zona de alta y baja temperatura separadas por la termoclina, tal como se observa en la Ilustración 5, lo que permitiría maximizar la exergía del fluido de trabajo a la salida del sistema TES.

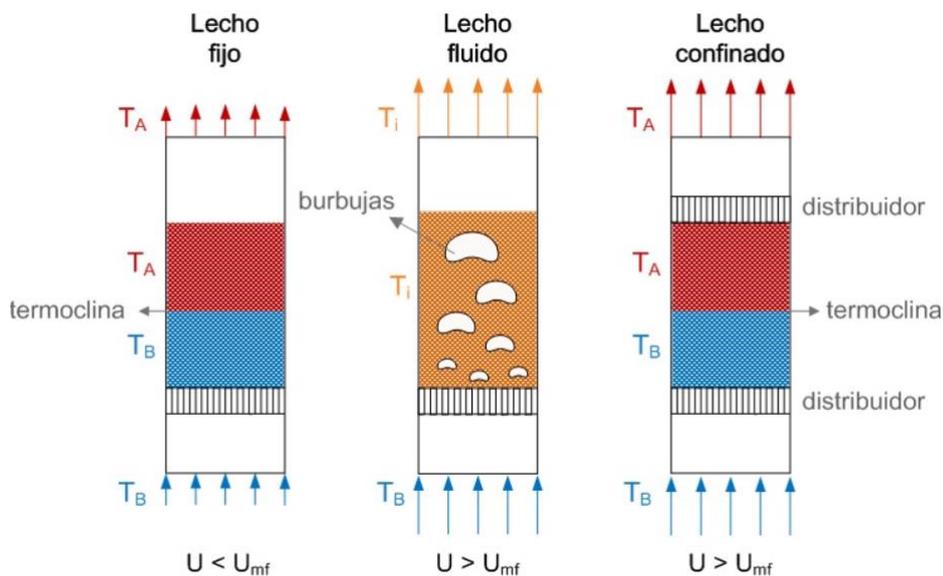


Ilustración 5. Configuraciones de funcionamiento del sistema TES basado en material granular. Referencia [9]

El crecimiento de la energía renovable requiere un almacenamiento eléctrico flexible, de bajo costo y eficiente para equilibrar el desajuste entre la oferta y la demanda de energía [11].

Cada una de las diferentes tecnologías EES (de sus siglas en inglés Electrical Energy Storage) se basa en diferentes principios físicos y, por lo tanto, tienen diferentes indicadores de rendimiento característicos, como relaciones potencia-capacidad, tiempos de respuesta de carga y descarga, diferentes relaciones energía/potencia-volumen y diferentes costos específicos por *kW* y por *kWh*[12]. Debido a estas diferencias, cada tecnología EES tiene un nicho de aplicación que se adapta mejor a ella, y varios nichos ya han encontrado su EES más adecuado.

El requisito de utilizar un medio de almacenamiento económico llamó la atención sobre conceptos de almacenamiento alternativos, aunque en la mayoría de los casos las eficiencias no son comparables con las que ofrecen las baterías. Una de las tecnologías que más está llamando la atención es el grupo de tecnología llamado Baterías de Carnot.

Baterías de Carnot:

Como ya se ha comentado, el crecimiento de las energías renovables está ligado a la necesidad de mejorar la flexibilidad del sistema eléctrico. Este problema puede enfocarse desde diferentes ángulos, tanto desde el lado de la demanda como en el de la producción.

Aumentar la capacidad de almacenamiento de energía en las redes una estrategia comprobada, estando algunos métodos de almacenaje fácilmente explotables casi agotados (hidroeléctrica por bombeo).

En los próximos años se prevé un gran aumento de energías como la fotovoltaica, la cual tiene su producción enfocada en las horas centrales del día.

Por ello se necesitará una flota de almacenamiento que pueda cargar a potencia nominal durante varias horas al día, para de esta manera trasladar cantidades masivas de energía de las horas de mayor producción a otro instante.

En otras palabras, se requerirán de sistemas a escala de red, enfocados a la larga duración (4-8 horas). En este contexto, las relaciones potencia-capacidad requeridas serán muy bajas, por lo que se descartan tecnologías como las basadas en baterías químicas de litio.

Esto hace que entren en juego tecnologías emergentes, siendo una de las que más están llamando la atención las Baterías de Carnot.

Una batería de Carnot es un sistema utilizado principalmente para almacenar energía eléctrica. En una batería de Carnot, la energía eléctrica (entrada) se utiliza para establecer una diferencia de temperatura entre dos ambientes, los depósitos de baja temperatura (LT) y alta temperatura (HT) como se muestra en la Ilustración 6.

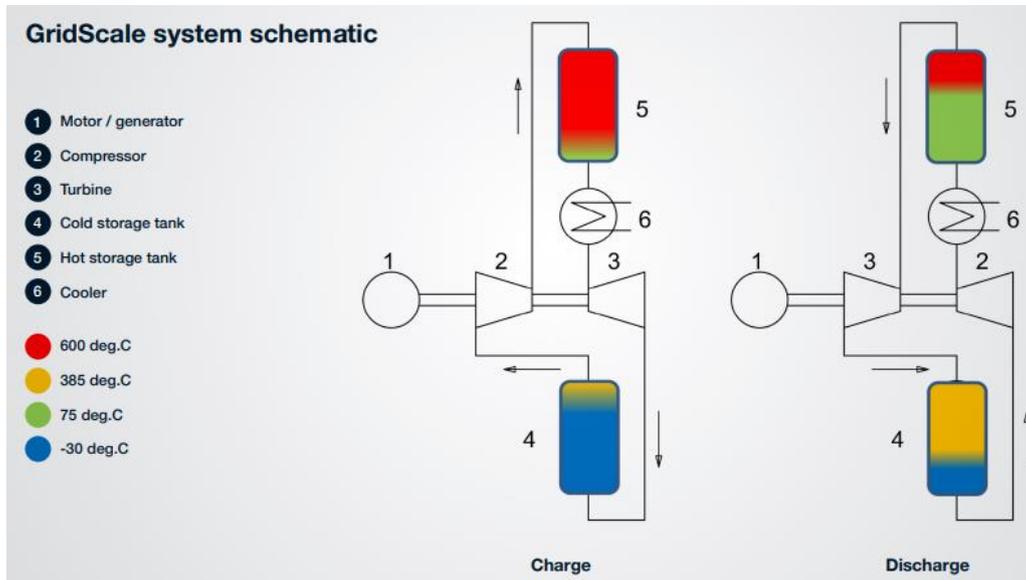


Ilustración 6. Sistema esquematizado de carga y descarga de un sistema termomecánico. [23]

De esta manera, el almacenamiento se carga y la energía eléctrica se almacena como energía térmica. A medida que el calor fluye contra el gradiente térmico, se gasta trabajo para cargar el almacenamiento. En la fase de descarga, la exergía térmica se descarga permitiendo que el calor fluya desde el depósito HT al depósito LT. El flujo de calor alimenta un motor térmico (HE) que lo convierte en trabajo y descarga el calor residual en el depósito de LT. De esta manera, se recupera una fracción del aporte eléctrico.

Así, cuando la demanda se encuentra por encima de la cantidad de energía producida, la batería de Carnot entra en funcionamiento para cubrir la demanda faltante.

Estas baterías almacenan energía eléctrica como energía térmica, la cual será recuperada durante la descarga. La carga puede efectuarse con diferentes tecnologías de calefacción, mientras que la descarga puede realizarse con diferentes tecnologías de motores térmicos.

Dado que las baterías de Carnot se basan en bombas de calor y motores térmicos, se componen de bombas, compresores, expansores, turbinas e intercambiadores de calor, que son todos componentes que pueden ampliarse fácilmente.

Estas baterías pueden tener rendimientos más bajos que otras tecnologías, pero cuentan con independencia geográfica (no requieren de depósitos o cuevas). Esta independencia geográfica se debe a que las baterías de Carnot acumulan la energía en forma de calor y no de presión (puede requerir de una pequeña presurización), permitiendo que cualquier ubicación pueda ser fácilmente explotada.

Pese a estar volviéndose cada vez más popular, tiene el nivel de disponibilidad tecnológica (TRL) más bajo entre las tecnologías EES, siendo su potencial tecnológico real poco claro.

Dentro de las baterías de Carnot, existe un amplio espectro de ellas, las cuales emplean diferentes tipos de fluidos caloportadores o diferentes variaciones en los sistemas que las componen, como pueden ser las de Ciclo Rankine Orgánico (ORC) o las que emplean el Ciclo Flash Orgánico (OFC), las cuales presentan pequeñas variaciones, haciéndolas más aptas para unos determinados casos u otros.

Las baterías de Carnot de baja temperatura mediante bombas de calor/sistemas ORC (ciclo Rankine orgánico, que utiliza un fluido de trabajo orgánico con un cambio de fase líquido a vapor o punto de ebullición que tiene lugar a temperaturas más bajas que el cambio de fase de agua a vapor) se benefician mucho de la integración térmica de las fuentes de calor residual y permiten una ampliación sencilla y económica de la capacidad de almacenamiento. Sin embargo, el desajuste de temperatura entre el medio de almacenamiento sensible y el fluido de trabajo implica inherentemente pérdidas de exergía que disminuyen la eficiencia de potencia a potencia del sistema.

Por ello, una gran opción son los ciclos flash orgánicos (OFC), ya que las baterías de Carnot de baja temperatura generalmente requieren fuentes de calor residual para producir eficiencias factibles. El ciclo flash orgánico minimiza las pérdidas de exergía durante la transferencia de calor a costa de las pérdidas por estrangulamiento.

Como resultado, los ciclos flash orgánicos son una alternativa eficiente a los ORC en las baterías de Carnot con diferenciales de temperatura de almacenamiento elevados. [13]

Los resultados [14] muestran que la calidad del vapor del ORC parcialmente evaporado, así como la relación de presión de flash del OFC, indican un óptimo específico según la temperatura de almacenamiento.

El ORC produce eficiencias más altas que el OFC básico en todas las condiciones de funcionamiento debido a las pérdidas por estrangulamiento del OFC. Por el contrario, el OFC con expansor de dos fases supera cada vez más al ORC con aumento de la temperatura de almacenamiento.

Esta ventaja aumenta en condiciones de carga parcial a medida que el OFC se vuelve menos sensible a la relación de presión de flash. Por lo tanto, esto facilita el control de la relación de presión de flash y permite eficiencias ventajosas. Por lo tanto, la evaporación parcial y la evaporación instantánea pueden mejorar el rendimiento de las baterías de Carnot en un amplio rango operativo.

Dentro de las baterías de Carnot, el método de almacenaje de energía térmica puede variar de unas tecnologías a otras. Actualmente, un método que está ganando mucha fuerza y obteniendo grandes resultados es el Packed-bed rocks:

Packed-bed rocks:

Esta tecnología se basa en utilizar como medio de almacenaje un lecho empacado (pila de partículas sueltas, como rocas o ladrillos), actuando como una batería cuya función es guardar el calor producido con la electricidad sobrante proveniente de energías renovables, para

posteriormente, emplear ese calor acumulado en el lecho empacado a fin de generar energía eléctrica. (Ilustración 7).



Ilustración 7. Lecho empacado en construcción.[15]

El almacenamiento en lechos empacados cerámicos ha demostrado grandes resultados, siendo una base muy prometedora para ser implementada en plantas de energías en las cuales se requiera un medio de almacenaje.

Para reducir costes, se han probado con otros materiales, como puede ser el caso de la roca, obteniéndose resultados esperanzadores en temperaturas hasta los 600 °C [16]. El uso de dichas partículas de roca irregulares y asimétricas da como fruto resultados altamente variables.

Además, no solo los factores de fricción difieren de un conjunto de rocas a otro, sino que también depende de la dirección de empacamiento de la roca en relación con la dirección del flujo del fluido.

El propósito de este método es encontrar maneras de bajo costo y sustentables de almacenar energía (inclusive grandes cantidades de ella).

Actualmente se están realizando pruebas experimentales de lechos de esferas de aluminio, esferas de vidrio, cubos de aluminio, roca triturada y sal fundida.

Un ejemplo de empresa que se dedica a este tipo de almacenaje es GridScale, la cual proporciona un almacenamiento de energía por bombeo de calor, capaz de almacenar grandes cantidades de energía durante horas, días o semanas.

Esta empresa emplea roca triturada (basalto, la cual al estar formada por el enfriamiento de la lava es muy resistente al calentamiento y enfriamiento rápido, siendo además un mineral bastante común) como método de almacenaje, el cual es de muy bajo coste y los materiales empleados para el almacenamiento no se degradan, contando con una vida útil muy completa.

La carga y descarga se realiza mediante turbo maquinaria (turbina de compresión para la carga y un sistema muy similar, pero con dimensionamiento diferente para la descarga), consiguiendo un almacenamiento comercial y tecnológicamente sostenible de grandes volúmenes de energía,

pudiendo llegar a cubrir durante 3-7 días las posibles lagunas producidas por los periodos de poco viento en la energía eólica.

Su funcionamiento es el siguiente: Se convierte el exceso de electricidad en calor a alta temperatura (hasta 600 °C) y se almacena en roca triturada. El sistema de carga está formado por una bomba de calor con compresores y turbinas que bombean la energía térmica desde uno o varios depósitos llenos de piedras frías a otros que cuentan con piedras calientes. El sistema de descarga está compuesto por una turbina de gas y compresor que liberan la energía térmica de los tanques calientes a los tanques fríos, tal y como se muestra en la Ilustración 6.

Cuenta con una unidad de potencia y varios acumuladores de frío y calor. Es fácilmente escalable, puesto que esto se realiza añadiendo más tanques a cada unidad (Ilustración 8).

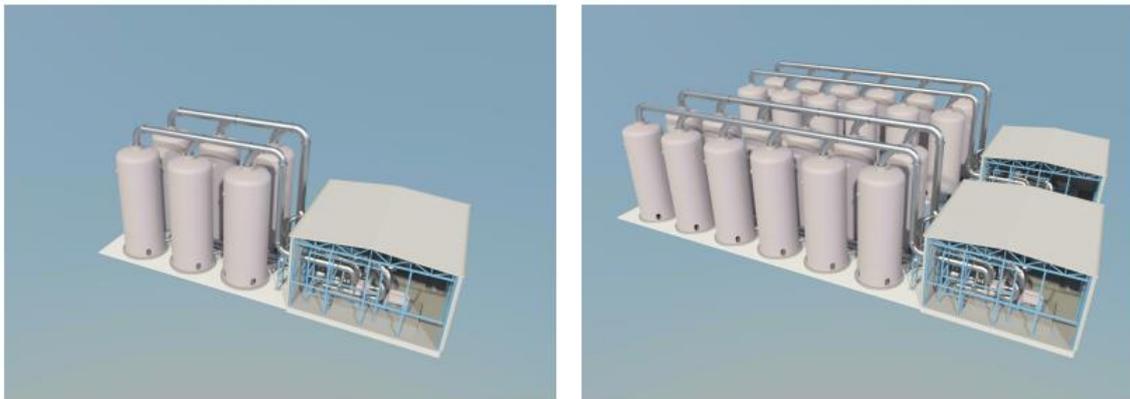


Ilustración 8. A la izquierda una sola unidad de potencia y varios acumuladores de frío y calor. A la derecha se duplica cada componente. [23]

Además, es un método totalmente flexible, el cual puede implantarse sin restricciones geográficas, contando con que los componentes requeridos están diseñados para ser fabricados con material de bajo costo.

Esto facilita y favorece enormemente la producción mediante energías renovables, alcanzando metas que antes parecían imposibles.

4. OBJETIVOS Y ALCANCE

El propósito principal de este Trabajo de Fin de Máster es investigar y evaluar la viabilidad y eficiencia de un sistema de almacenamiento de energía térmica sensible basado en el uso de grava como material de almacenamiento, teniendo en mente la obtención de un sistema económicamente viable y funcional el cual sea fácilmente escalable y se pueda combinar con los excedentes energéticos procedentes de las fuentes renovables.

En este contexto, se ha diseñado y desarrollado un prototipo de sistema de almacenamiento de energía térmica sensible a gran escala. Este prototipo aprovecha una instalación solar fotovoltaica para convertir los excedentes eléctricos en energía térmica, que se almacena en un tanque de grava. Esta energía térmica se utiliza para suplir la demanda energética en momentos en los que la producción de energía solar no es suficiente.

El enfoque principal de este trabajo se centra en analizar la viabilidad económica de este sistema de almacenamiento, considerando variaciones en la capacidad de almacenamiento y la potencia fotovoltaica. Para lograrlo, se desarrollará un prototipo desde cero, basándose en datos económicos previamente analizados.

En un contexto más amplio, es relevante destacar que el presente proyecto se alinea de manera coherente con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Estos objetivos, como se mencionó anteriormente, fueron adoptados por las Naciones Unidas con el propósito fundamental de sentar las bases para un futuro más sostenible y equitativo.

En particular, en lo que respecta a la demanda energética, el ODS número 7, titulado "Garantizar el acceso a una energía asequible, fiable, sostenible y moderna para todos", resalta la necesidad de abordar este objetivo mediante sistemas que promuevan una mayor eficiencia energética. Este enfoque permite crear un camino hacia un futuro en el que se asegure que la energía esté al alcance de todos, sea confiable y provenga de fuentes sostenibles.

En este contexto global, el proyecto que se llevará a cabo representa una contribución significativa y un paso adelante hacia una mayor eficiencia energética. Este proyecto se alinea con la visión de un futuro más sostenible y respetuoso con el medio ambiente, donde el acceso a una energía asequible y sostenible sea una realidad para todos.

5. BENEFICIOS

La investigación y desarrollo de sistemas de almacenamiento de energía térmica sensible basados en grava, como se aborda en este Trabajo de Fin de Máster, conlleva una serie de beneficios que abarcan diversas dimensiones: económica, social, ambiental y su alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas. En esta sección, exploraremos en profundidad los impactos positivos que esta innovadora tecnología puede generar en estos ámbitos clave, destacando su potencial para transformar la forma en que abordamos la energía y contribuimos a un futuro más sostenible y accesible para todos. Desde la reducción de costos energéticos hasta la promoción de empleo y la mitigación del cambio climático, los beneficios de este proyecto son numerosos y significativos. A continuación, analizaremos detalladamente cómo estas ventajas pueden influir positivamente en la sociedad y el entorno en general.

Beneficios económicos:

1. Reducción de costos energéticos: En caso de demostrar su viabilidad, se reducirían los costos de la energía, aumentando la eficiencia de la energía solar y la disminución de combustibles fósiles, cuyo precio muestra una tendencia al alza [17].
2. Al tratarse de un método de almacenamiento que no emplea baterías, se ahorraría la parte de gestión de residuos, además de contar con un bajo nivel de mantenimiento.
3. Generación de empleo: La implementación y mantenimiento de sistemas de energía renovable pueden generar empleo en el sector de las energías limpias.
4. Atracción de inversores: Si tu investigación demuestra la rentabilidad de este sistema, podría atraer inversiones en tecnologías de almacenamiento de energía térmica sensible.

Beneficios sociales:

1. Acceso a energía sostenible: Está alineado con el ODS 7 de las Naciones Unidas, "Garantizar el acceso a una energía asequible, fiable, sostenible y moderna para todos". Al promover sistemas de almacenamiento eficientes, contribuyes a este objetivo.
2. Mejora de la calidad de vida: El acceso a una energía más asequible y sostenible puede mejorar la calidad de vida de las comunidades al reducir los costos de energía y promover un ambiente más limpio.

Beneficios ambientales:

1. Reducción de emisiones de CO₂: Al facilitar la integración de energía solar y reducir la necesidad de combustibles fósiles, el sistema contribuiría a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y, por lo tanto, a la lucha contra el cambio climático.
2. Promoción de energías renovables: Promoverá el uso de fuentes de energía renovable, lo que a su vez contribuiría a la conservación de los recursos naturales y la protección del medio ambiente.

3. Eficiencia energética: Al permitir el almacenamiento eficiente de la energía solar, contribuye a una mayor eficiencia energética y reduce el desperdicio energético.

Contribución a los ODS:

1. ODS 7 - Energía Asequible y Sostenible: El proyecto contribuye directamente a este objetivo al promover sistemas de almacenamiento de energía sostenible.
2. ODS 9 - Industria, Innovación e Infraestructura: Al desarrollar un prototipo innovador, este TFM se alinea con este objetivo que busca promover la innovación tecnológica.

6. METODOLOGÍA

La metodología empleada en este Trabajo de Fin de Máster se erige como el cimiento sobre el cual se construye una investigación rigurosa y un análisis exhaustivo de un STES basado en grava. Esta sección revela el enfoque y los procedimientos que guiarán la realización de la investigación, permitiendo una evaluación crítica de la viabilidad, eficiencia y potencial de esta tecnología innovadora.

El proceso metodológico abordará aspectos clave, desde la recopilación de datos experimentales hasta el análisis numérico y la evaluación económica. A través de la implementación de un prototipo y la utilización de herramientas de simulación, se explorará el rendimiento de este sistema en situaciones diversas y se cuantificarán los impactos en términos de ahorro energético y costos.

A través de la metodología descrita en esta sección, se busca abrir la puerta a una comprensión más profunda de los sistemas de almacenamiento de energía térmica sensible basados en grava, sentando las bases para un mayor progreso significativo en la transición hacia una energía más sostenible y eficiente.

6.1 Pasos seguidos

En el proceso metodológico, se han seguido una serie de pasos esenciales para llevar a cabo la investigación de manera rigurosa. Estos pasos incluyen:

1. **Recopilación de Información:** Se realizó una exhaustiva búsqueda de información relevante sobre el sistema de almacenamiento de energía térmica (TES) basado en lecho de rocas. Esto incluyó revisar literatura científica, informes técnicos y estudios previos relacionados con el tema.
2. **Recogida de Datos:** Se recolectaron datos fundamentales utilizando las herramientas previamente mencionadas, como Pvgis y la base de datos de consumos de Castilla y León. Estos datos proporcionaron información valiosa sobre la producción fotovoltaica, la demanda y otros parámetros clave.
3. **Configuración de Software:** Se empleó Microsoft Excel para configurar un software personalizado que permitiera dimensionar los recursos necesarios para la instalación fotovoltaica y el TES de acuerdo con los requisitos de demanda, capacidad y potencia deseados.
4. **Análisis de Perfiles de Consumo y Producción:** Se llevaron a cabo análisis detallados de los perfiles de consumo de energía y producción fotovoltaica. Esto incluyó el estudio de la variación energética del almacenamiento por horas a lo largo de cada día del año en la ubicación del prototipo.
5. **Cálculo de Saldo Mensuales:** Se calcularon los saldos mensuales que resultaron de la compra de energía debido a la insuficiencia del almacenamiento y las ganancias derivadas de la retribución económica por el excedente fotovoltaico.
6. **Estudio Financiero:** Se llevó a cabo un análisis financiero exhaustivo que incluyó el cálculo de indicadores clave como el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno

(TIR) y el período de recuperación (Payback). Este análisis se realizó en un horizonte temporal de veinticinco años para evaluar la viabilidad económica del proyecto.

6.2 Herramientas y software utilizado

Se ha empleado como herramienta de simulación de producción fotovoltaica el programa Pvgis, con el cual se ha generado una simulación de la producción diaria de un año entero hora por hora en la ubicación del prototipo en Villarcayo de Merindad de Castilla La Vieja, información con la cual posteriormente se ha obtenido un día tipo de producción para cada mes del año, obteniendo resultados muy concretos.

También se ha utilizado la base de datos de consumos de Castilla y León para obtener la demanda y hacer un día tipo para cada mes del año. Esta información ha sido comparada con la producción obtenida en Pvgis para de esta manera saber los excesos de producción.

Toda la información obtenida se trasladó a Excel para poder manejar todos los campos de datos y obtener tablas y gráficos con los que sea más fácil contrastar los datos.

En la ejecución de este estudio, se han empleado diversas herramientas y software para llevar a cabo un exhaustivo análisis. Estas herramientas se han seleccionado estratégicamente con el objetivo de garantizar una investigación sólida y la obtención de resultados precisos.

Una de las herramientas fundamentales utilizadas ha sido el programa Pvgis, reconocido por su capacidad para simular la producción fotovoltaica con gran precisión. Con Pvgis, se ha llevado a cabo una simulación detallada de la producción diaria de energía fotovoltaica a lo largo de todo un año, a nivel horario. Este enfoque minucioso ha permitido la generación de perfiles de producción altamente específicos para cada hora de cada día, lo que constituye una valiosa fuente de datos para el análisis.

Además, se ha recurrido a la base de datos de consumos de energía de la región de Castilla y León. Esta base de datos ha servido como fuente para obtener información sobre la demanda de energía eléctrica en la zona de estudio. Mediante este recurso, se ha construido un perfil de demanda típico para cada mes del año, información crucial para poder evaluar junto a el perfil de producción fotovoltaica los excedentes de energía que se generarán.

La etapa de análisis y procesamiento de datos se ha realizado principalmente en la plataforma de Microsoft Excel. Esta herramienta ha sido fundamental para la manipulación de los datos obtenidos, permitiendo la creación de tablas y gráficos que facilitan la comparación y contraste de la información recopilada.

6.3 Consideraciones climáticas y estacionales

En el desarrollo de este estudio, es crucial tener en cuenta las condiciones climáticas y estacionales de la ubicación del prototipo en Villarcayo de Merindad de Castilla la Vieja, una localidad al norte de la provincia de Burgos, España. Estas consideraciones son esenciales para comprender la dinámica de producción y demanda de energía en la región, así como para evaluar

la viabilidad y eficiencia del sistema de almacenamiento de energía térmica sensible basado en grava.

1. Variabilidad Estacional: Villarcayo de Merindad de Castilla La Vieja experimenta cambios estacionales significativos en términos de temperatura y condiciones climáticas. Los inviernos pueden ser fríos, con temperaturas bajo cero, mientras que los veranos tienden a ser más cálidos. Esta variabilidad estacional tiene un impacto directo en la demanda de energía, ya que la necesidad de calefacción en invierno contrasta con la demanda de refrigeración en verano. Estas fluctuaciones estacionales deben ser consideradas al evaluar la capacidad del sistema de almacenamiento de energía térmica sensible para satisfacer la demanda en diferentes momentos del año.
2. Disponibilidad Solar: La radiación solar también varía a lo largo del año en esta región. Los meses de verano tienden a tener una mayor cantidad de horas de sol y una radiación solar más intensa en comparación con los meses de invierno. Esta variabilidad estacional de la radiación solar impactará directamente en la producción fotovoltaica y, por lo tanto, en la cantidad de energía disponible para el almacenamiento.
3. Perfil de Demanda: La demanda de energía eléctrica en la localidad de Villarcayo de Merindad de Castilla la Vieja puede estar influenciada por factores estacionales, como el aumento de la población durante las vacaciones de verano o la mayor necesidad de calefacción en invierno. Comprender estos patrones de demanda estacionales es fundamental para evaluar la capacidad del sistema de almacenamiento de energía térmica sensible para cubrir picos de demanda en momentos específicos del año.
4. Eficiencia Estacional: Dado que las condiciones estacionales pueden afectar la eficiencia y el rendimiento del sistema de almacenamiento de energía térmica sensible, es importante evaluar cómo se comporta en diferentes momentos del año. Esto implica considerar la capacidad de carga y descarga en función de las temperaturas ambiente y los requerimientos de demanda.

6.4 Parámetros variables

Este proyecto está ubicado en la localidad de Villarcayo de Merindad de Castilla la Vieja, España y evaluará diferentes situaciones, variando para ello 3 parámetros fundamentales: número de módulos solares, capacidad de almacenaje y potencia del almacenaje.

Se estudiarán tres diferentes casos para cada uno de los parámetros:

6.4.1 Módulos

En cuanto a los módulos solares, se contempla un análisis pormenorizado que abarcará tres escenarios distintos, cada uno de ellos diseñado para cumplir con un porcentaje específico de la demanda eléctrica durante el mes de agosto. Este mes se selecciona estratégicamente debido a que representa el punto álgido de consumo eléctrico a lo largo del año, impulsado por un notable aumento de población durante dicho período.

Los módulos solares en consideración cuentan con una superficie de 1,93 metros cuadrados y una eficiencia del 22,80%. Cada unidad posee un valor unitario de 350,00€, lo que influye significativamente en el desembolso económico necesario para cada escenario de estudio.

Para ilustrar estas configuraciones en detalle:

1. Caso del 80%: En esta instancia, se requiere un conjunto de 69.595 paneles solares para atender el 80% de la demanda durante el mes de agosto.
2. Caso del 60%: Este escenario contempla la instalación de 52.196 paneles solares con el objetivo de satisfacer el 60% de la demanda de agosto.
3. Caso del 30%: Para cumplir con el 30% de la demanda en este escenario, se requieren 26.098 paneles solares.

Estos datos y configuraciones representan un análisis detenido de las necesidades y costos asociados con la instalación de paneles solares en los diferentes escenarios de cobertura de demanda, contribuyendo de manera significativa a la comprensión de la viabilidad económica y operativa de este TES.

6.4.2 Capacidad TES

Los tres casos de estudio han sido cuidadosamente seleccionados con el objetivo de abarcar un rango representativo de capacidades de almacenamiento de energía térmica sensible (STES). Estas capacidades específicas son de 10MW, 20MW y 30MW, y su elección está respaldada por un análisis detenido que busca obtener resultados significativos y aplicables en el contexto del sistema de almacenamiento de energía térmica sensible basado en grava.

La razón detrás de la elección de estas capacidades radica en un equilibrio estratégico. Por un lado, se ha considerado que capacidades por encima de los 30MW no proporcionarían mejoras significativas en el rendimiento del sistema STES en cuestión. Esto se debe a que, a medida que se incrementa la capacidad de almacenamiento más allá de este umbral, los beneficios adicionales en términos de cobertura de picos de demanda tienden a ser marginales. Por lo tanto, para optimizar la eficiencia y la rentabilidad, se ha establecido este límite superior.

Por otro lado, se ha tenido en cuenta que capacidades por debajo de los 10MW resultarían insuficientes para abordar de manera efectiva los momentos de mayor demanda energética. Estos casos de estudio con capacidades menores no lograrían cubrir de manera significativa los picos de consumo, lo que limitaría su aplicabilidad práctica y su impacto en la eficiencia energética.

Así, los tres casos de estudio seleccionados representan un conjunto integral que abarca desde una capacidad moderada hasta una capacidad máxima efectiva, proporcionando una perspectiva completa de las capacidades del STES basado en grava en diferentes escenarios. Esta variedad de capacidades permitirá una evaluación exhaustiva de su rendimiento y viabilidad en diversas situaciones, garantizando que los resultados obtenidos sean aplicables y significativos tanto a nivel local como global en la búsqueda de soluciones más sostenibles y eficientes en el ámbito de la energía térmica sensible.

6.4.3 Potencia TES

En el ámbito de la potencia del sistema de almacenamiento de energía térmica sensible (STES), se llevará a cabo un análisis minucioso que abarcará una gama de capacidades específicas cuidadosamente seleccionadas para ofrecer una comprensión integral de su impacto y eficacia en el contexto de esta tecnología innovadora.

Los casos de estudio que se explorarán en términos de potencia del STES son los siguientes: 2500kW, 5000kW y 7500kW. Estas capacidades han sido elegidas estratégicamente con el objetivo de capturar una visión completa de las capacidades de potencia del sistema, y esta elección se basa en consideraciones técnicas y prácticas fundamentales.

En primer lugar, se ha observado que, a medida que la potencia del STES aumenta más allá de los 7500kW, los cambios en su rendimiento y eficiencia tienden a ser marginales. En otras palabras, las mejoras adicionales en términos de la capacidad para cubrir la demanda se vuelven cada vez menos significativas a medida que se aumenta la potencia. Por lo tanto, se ha considerado que los casos seleccionados ofrecen un rango representativo que permite abordar eficazmente los requisitos de potencia sin entrar en regiones de retornos decrecientes.

Por otro lado, capacidades de potencia por debajo de los 2500kW se han descartado debido a que no serían capaces de satisfacer de manera efectiva la demanda energética en momentos críticos. Estos casos de menor potencia resultarían insuficientes para cubrir adecuadamente los picos de consumo, lo que limitaría su utilidad y eficacia en la aplicación práctica.

En resumen, la elección de los casos de estudio de potencia del STES busca proporcionar una evaluación completa y significativa de su rendimiento en diversas situaciones, desde una capacidad moderada hasta una capacidad máxima efectiva. Esto asegura que los resultados obtenidos tengan relevancia tanto a nivel local como global en el contexto de la búsqueda de soluciones energéticas más eficientes y sostenibles.

7. DESCRIPCION Y ANALISIS DE LOS RESULTADOS

En esta sección, se expondrán y examinarán en detalle los resultados derivados de las simulaciones previamente definidas en la sección 6.4. La metodología aplicada ha involucrado la variación de las tres variables fundamentales identificadas en la sección 6.1, con el propósito de analizar la influencia que ejercen sobre el (TES). Se llevará a cabo un análisis exhaustivo para determinar si el aumento o la disminución de estas variables tienen un impacto significativo en el rendimiento del sistema de almacenamiento. Los resultados se describirán y comentarán de manera detallada en las secciones subsiguientes. Este análisis proporcionará una comprensión sólida de cómo estas variables fundamentales afectan el TES y servirá como base para la evaluación crítica de su eficiencia y viabilidad.

7.1 Perfil producción y consumo

Como ya se comentó anteriormente, el mes que se ha tomado de referencia para cubrir un porcentaje de su demanda de manera fotovoltaica ha sido el mes de agosto por ser el mes con mayor demanda de todo el año debido al aumento de la población en este mes. En Ilustración 9, Ilustración 10 e Ilustración 11 se muestran los perfiles de producción y consumo para un 80%, 60% y 30% de la demanda. Estos perfiles proporcionan una visión clara de la variación en la generación fotovoltaica y el consumo eléctrico en estos escenarios.

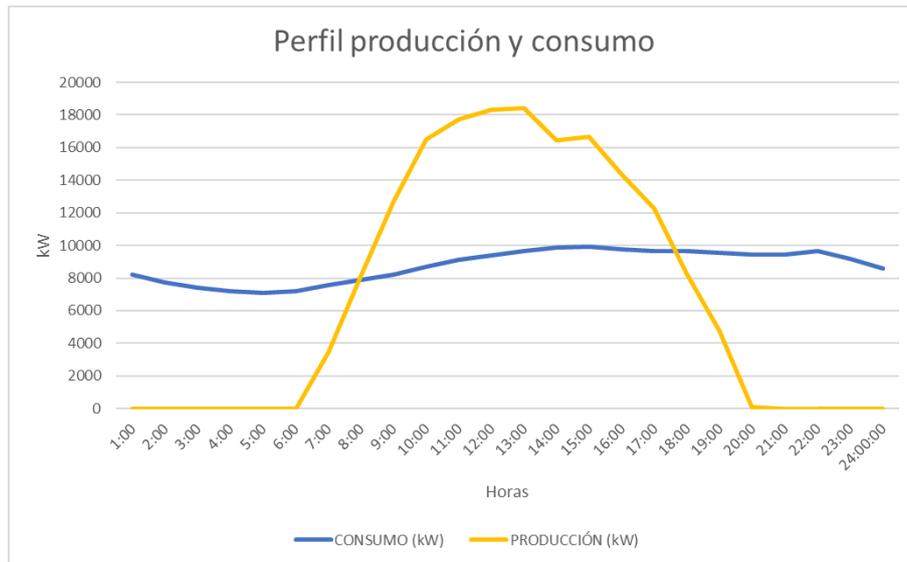


Ilustración 9. Perfil producción y consumo de agosto, cubriendo el 80% de la demanda.

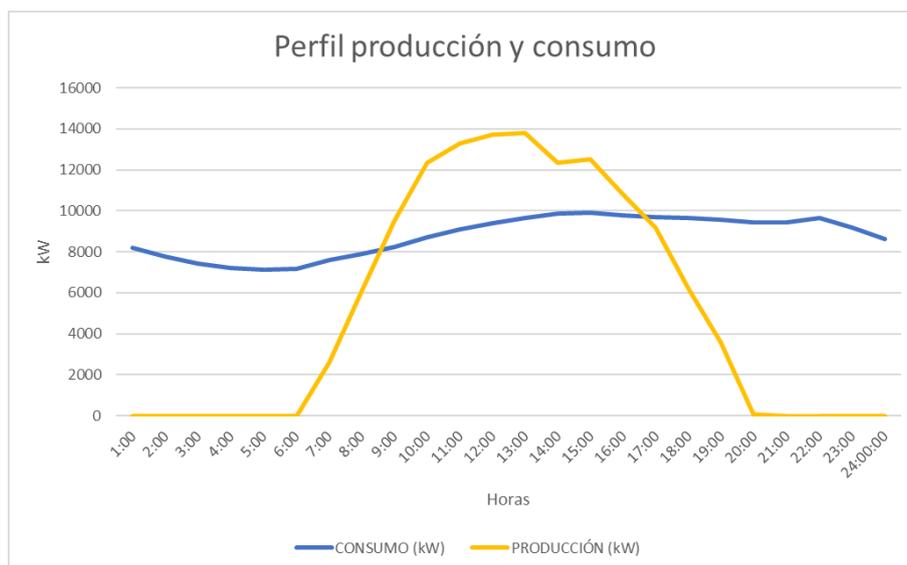


Ilustración 10. Perfil producción y consumo de agosto, cubriendo el 60% de la demanda.

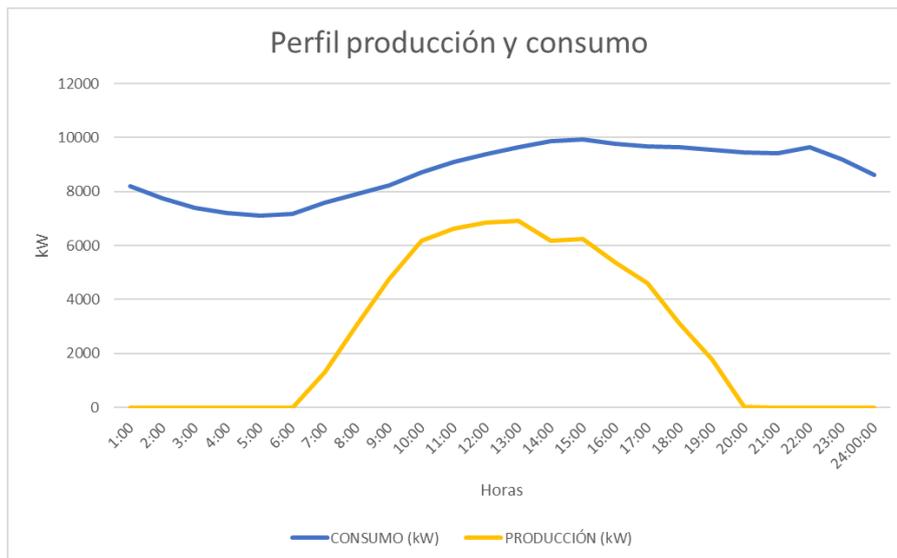


Ilustración 11. Perfil producción y consumo de agosto, cubriendo el 30% de la demanda.

El análisis del perfil de consumo revela patrones distintivos en la demanda eléctrica a lo largo del día:

1. Inicio del Día: El perfil de consumo muestra una disminución en las primeras horas del día, alcanzando su punto más bajo alrededor de las 5:00 de la mañana. Esta reducción inicial en la demanda eléctrica puede atribuirse a la disminución de actividades durante la noche y a la menor necesidad de iluminación y electrodomésticos en funcionamiento en ese momento.

2. Crecimiento a Mediodía: A partir de las primeras horas de la mañana, la demanda comienza a aumentar gradualmente, pero el crecimiento se vuelve más pronunciado hacia el mediodía. El pico máximo de demanda se alcanza aproximadamente entre las 14:00 y las 15:00. Este aumento puede explicarse por la actividad diurna, que incluye la operación de empresas, fábricas y la mayoría de los dispositivos eléctricos en uso.

3. Descenso Tardío: Después del pico de mediodía, la demanda comienza a disminuir gradualmente, pero no de manera tan pronunciada como en las primeras horas de la mañana. Esto sugiere que las actividades continúan durante la tarde, aunque a un ritmo más lento que al mediodía.

4. Segundo Pico Nocturno: El perfil de consumo muestra un segundo pico de demanda alrededor de las 22:00. Este aumento nocturno podría estar relacionado con actividades adicionales que ocurren en el hogar durante la noche, como la cocción de alimentos y el uso de dispositivos electrónicos.

5. Ciclo Repetitivo: Estos patrones de crecimiento y disminución en la demanda se repiten a lo largo del día, formando un ciclo recurrente. Este ciclo destaca la necesidad de adaptar la generación y el almacenamiento de energía para satisfacer las demandas cambiantes a lo largo del día.

En resumen, el perfil de consumo eléctrico muestra una dinámica que refleja las actividades diarias y las variaciones en la necesidad de energía eléctrica a lo largo del día y la noche.

Estos perfiles son esenciales para la planificación y dimensionamiento adecuado del sistema de almacenamiento de energía. Ayudan a determinar la capacidad de almacenamiento requerida para garantizar que se pueda cubrir la demanda en todos los escenarios, especialmente en momentos críticos.

Este ensayo demuestra que, a medida que se intenta cubrir un mayor porcentaje de la demanda con energía solar, se acerca más a la producción, pero aún existen momentos en los que se necesita energía adicional, lo cual resalta la necesidad de un sistema de almacenamiento de energía efectivo para aprovechar al máximo la generación solar excedente durante el día y utilizarla para satisfacer la demanda en las horas nocturnas.

El perfil de consumo es repetitivo a lo largo del año, para ello se mostrarán los perfiles de consumo de febrero y octubre (meses elegidos al azar) con la Ilustración 12 e Ilustración 13 respectivamente para comprobar su veracidad.

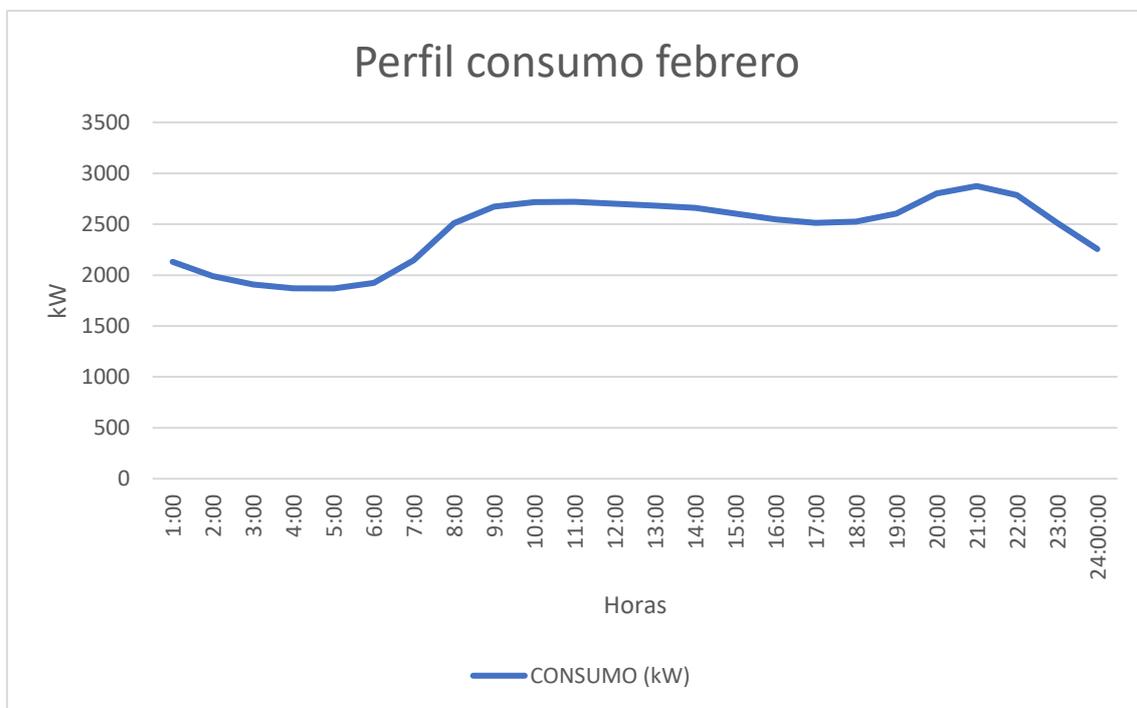


Ilustración 12. Perfil consumo febrero.

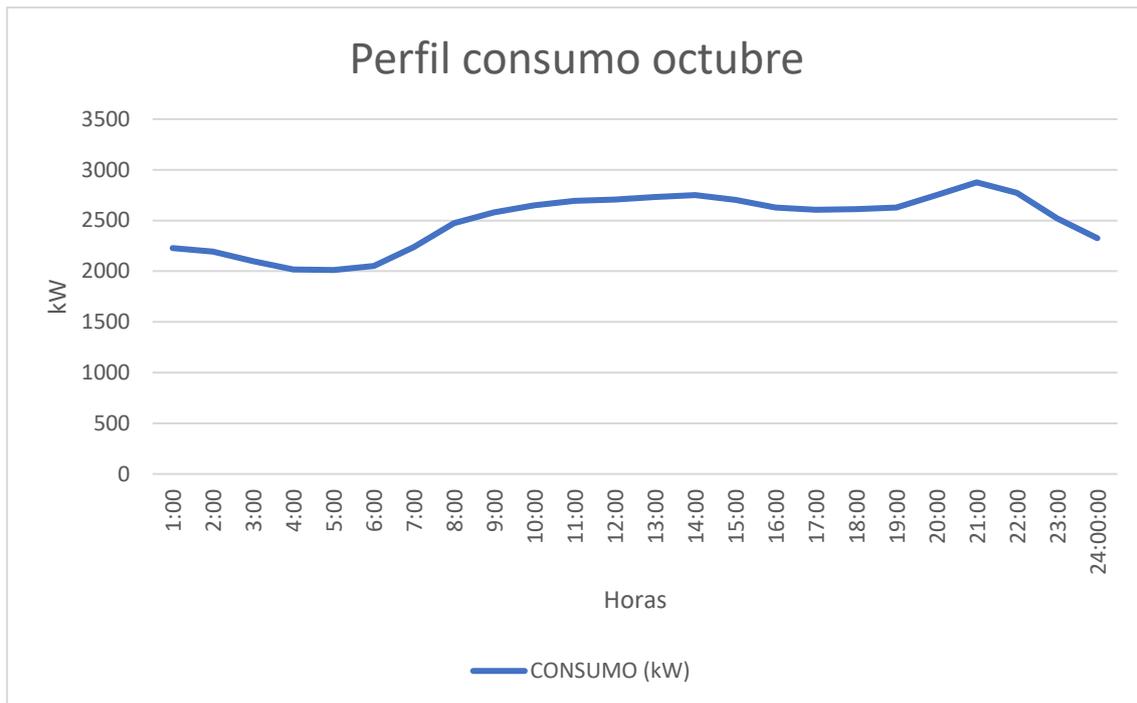


Ilustración 13. Perfil consumo octubre.

Es evidente que estos patrones de consumo presentan una estabilidad a lo largo de todo el año, con fluctuaciones mínimas en su comportamiento. La observación de estas tendencias constantes proporciona una base sólida para la planificación y optimización de sistemas de energía renovable y almacenamiento en la región.

Como se comentó en el apartado 6.1.1 el cubrir el 80% de la demanda equivale a 69.595 módulos solares, el 60% a 52.196 y el 30% a 26.098. Cubrir el 80% de la demanda en agosto, siendo este el mes con mayor demanda supone que los meses con una menor demanda tengan energía sobrante, la cual acabará llenando el TES y tendrá que ser volcada a la red, por la cual se recibirá una compensación económica, la cual ha sido establecida en 0,13 €/kW. Esta cifra ha sido obtenida mediante el promedio de precios que ofrecen las principales compañías eléctricas al volcar los excedentes eléctricos a su red.

A continuación, se mostrará en la Ilustración 14, Ilustración 15 e Ilustración 16 los perfiles de producción y consumo de todo el año en función de 69.595, 52.196 y 26.098 módulos solares:

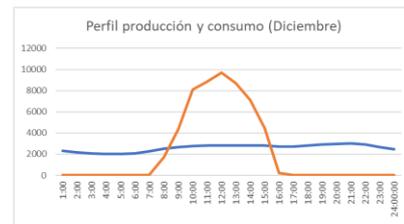
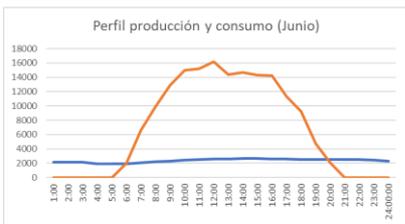
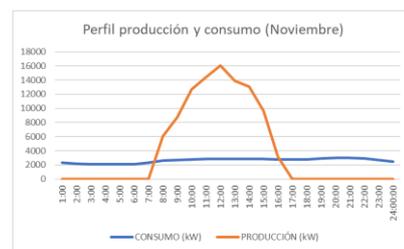
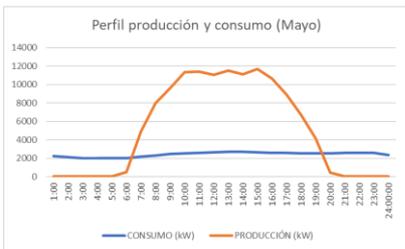
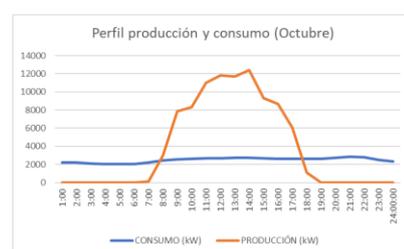
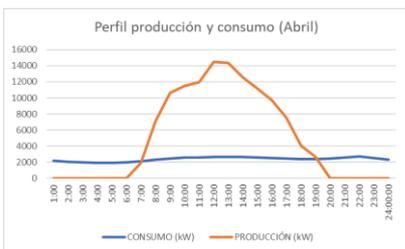
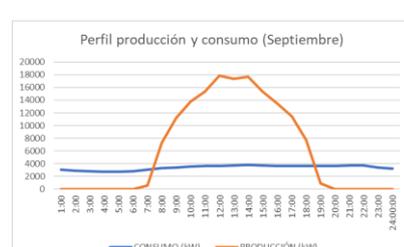
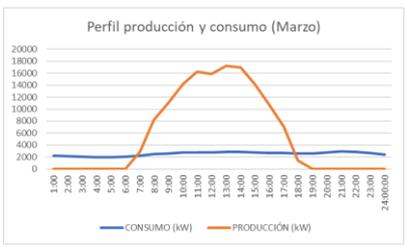
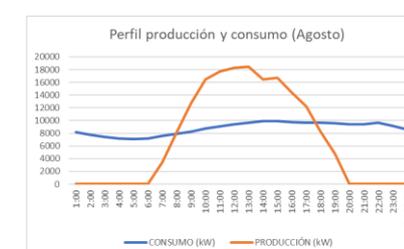
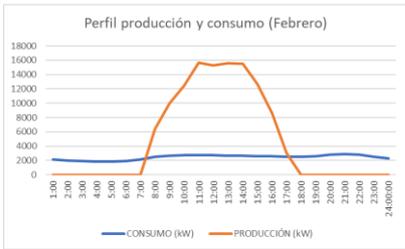
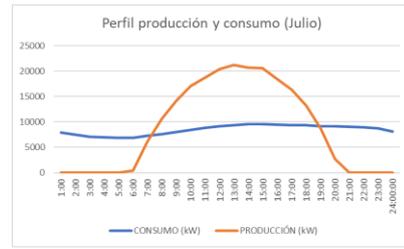
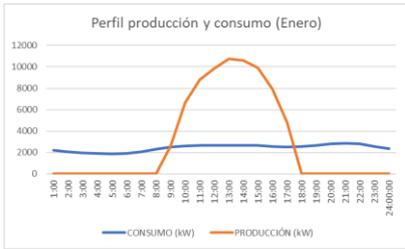


Ilustración 14. Perfil producción y demanda mensual para un año completo con 69.595 módulos.

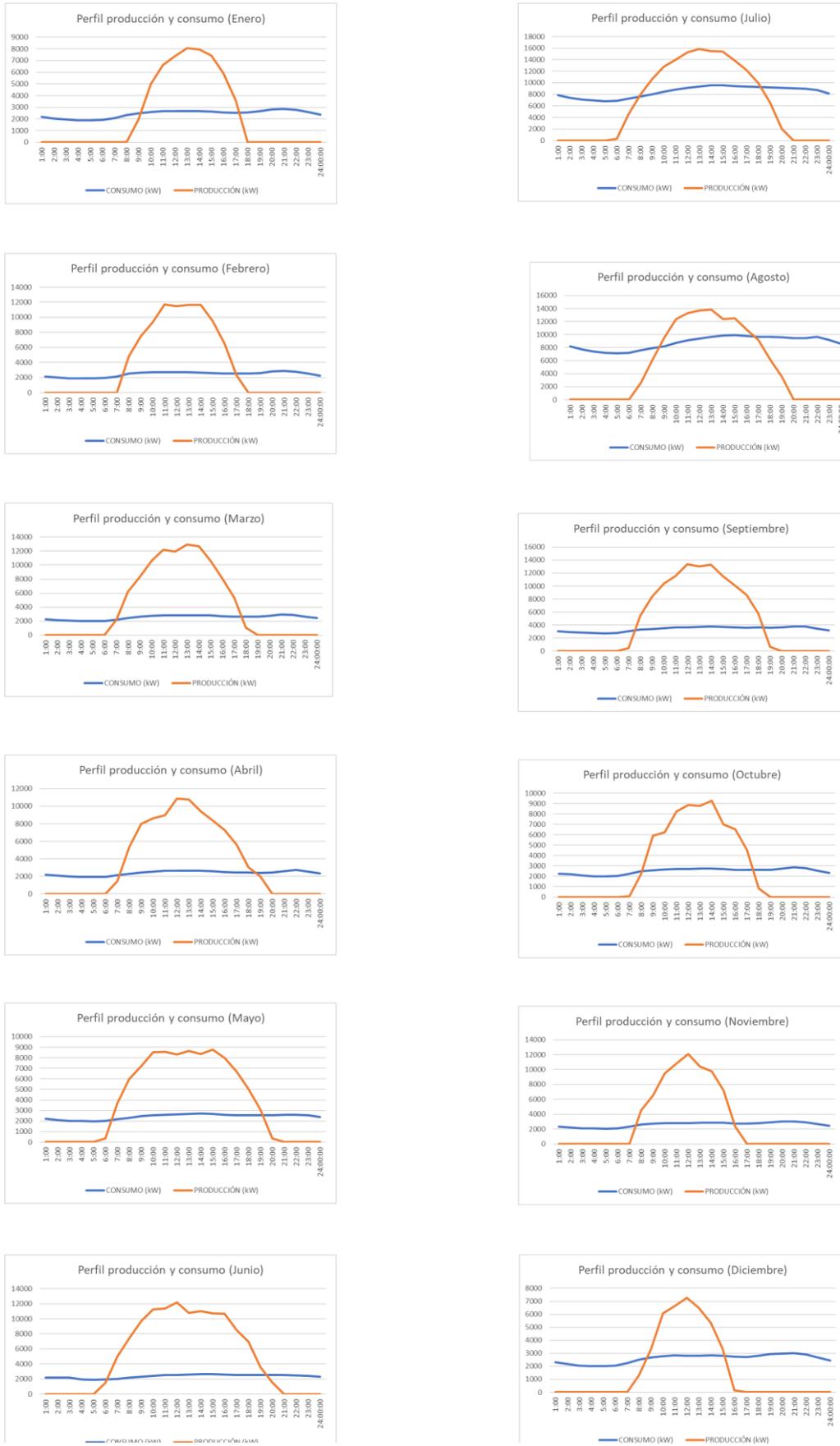


Ilustración 15. Perfil producción y demanda mensual para un año completo con 52.196 módulos.

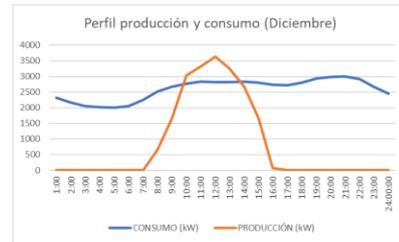
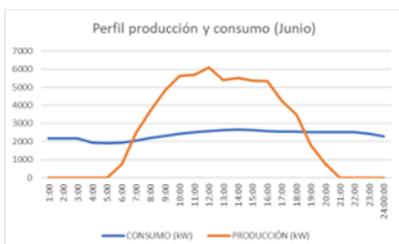
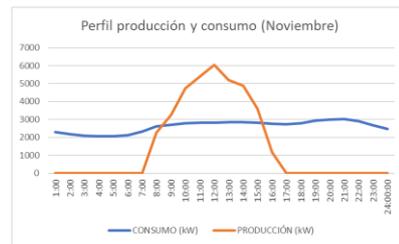
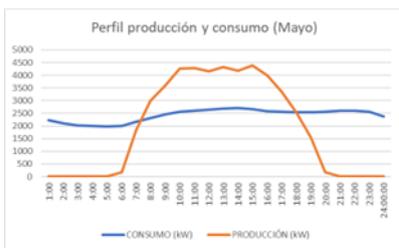
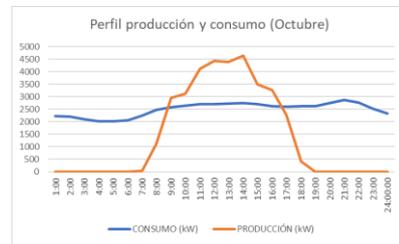
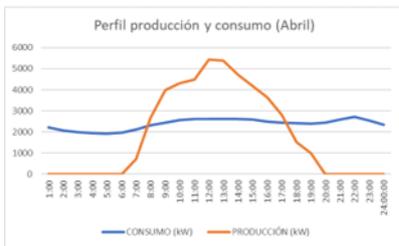
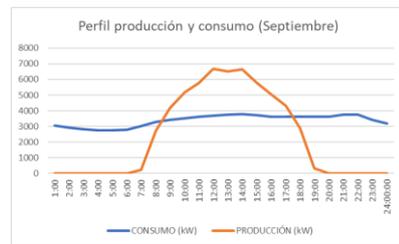
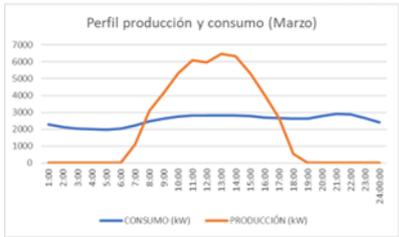
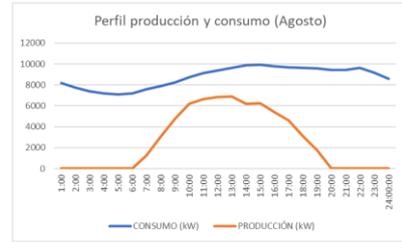
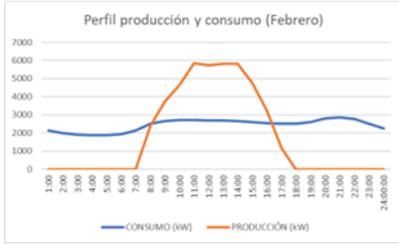
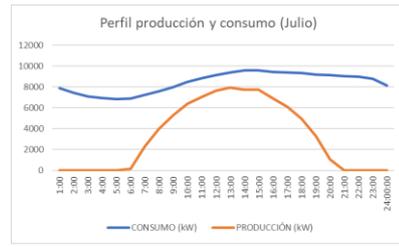
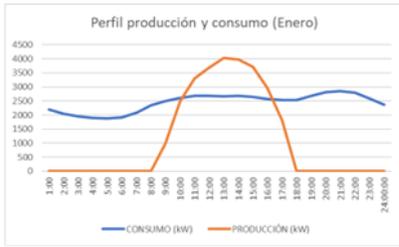


Ilustración 16. Perfil producción y demanda mensual para un año completo con 26.098 módulos.

Es evidente, a partir de los resultados obtenidos, que la variación en la cantidad de módulos fotovoltaicos tiene un impacto significativo en la producción de energía eléctrica y, por lo tanto, en la capacidad de carga térmica del TES. Observamos que, con una instalación de 69.595 módulos fotovoltaicos, se generan numerosas horas de excedente energético, superando con creces el consumo eléctrico promedio. Este excedente energético resultante puede canalizarse de manera efectiva hacia la carga térmica del TES, y una vez que el almacenamiento alcance su capacidad máxima, la energía restante puede ser vendida a la red eléctrica, lo que potencialmente representa una fuente adicional de ingresos.

De manera similar, aunque con una menor magnitud, observamos que con 52.196 módulos fotovoltaicos se produce un excedente significativo de energía eléctrica en comparación con el consumo promedio. Esto aún permite una carga efectiva del TES y la venta de excedentes, aunque en menor medida que en el escenario anterior.

Sin embargo, el escenario cambia notoriamente cuando se consideran 26.098 módulos fotovoltaicos. En este caso, especialmente durante los meses de alta demanda, como julio y, sobre todo, agosto, la producción de energía fotovoltaica no logra superar el consumo en ningún momento del día. Esto indica que, en estos meses, la relevancia del TES disminuye, ya que su capacidad de carga se utiliza de manera más esporádica, y la venta de excedentes se reduce significativamente.

La elección de la capacidad de generación fotovoltaica debe equilibrarse cuidadosamente para aprovechar al máximo los excedentes de energía, garantizando un funcionamiento eficiente tanto del sistema de almacenamiento como de la red eléctrica, lo cual será estudiado a posteriori.

7.2 Carga y descarga del TES

Para representar de manera más efectiva las variaciones en el funcionamiento del TES en relación con el número de módulos, la capacidad de almacenamiento y la potencia, se ha seleccionado un enfoque focalizado en cuatro meses que representan distintas estaciones del año. Estos meses elegidos para el análisis son febrero, mayo, agosto y octubre. Este enfoque estacional permitirá una comprensión más completa de cómo el TES responde a las condiciones cambiantes a lo largo del año, proporcionando una visión más detallada de su rendimiento y eficiencia en diferentes contextos estacionales.

Se mostrará la carga y descarga del TES en función de todos los parámetros variables que se han escogido.

A continuación se expondrán los casos con 69.595 módulos fotovoltaicos en la Ilustración 17, Ilustración 18, Ilustración 19, Ilustración 20, Ilustración 21, Ilustración 22, Ilustración 23, Ilustración 24 e Ilustración 25.

- 69.595 módulos, 30MWh de capacidad de almacenamiento y variando la potencia:



Ilustración 17. Carga y descarga TES con 69.595 módulos, 30MWh de capacidad de almacenamiento y 7500 kW de potencia.

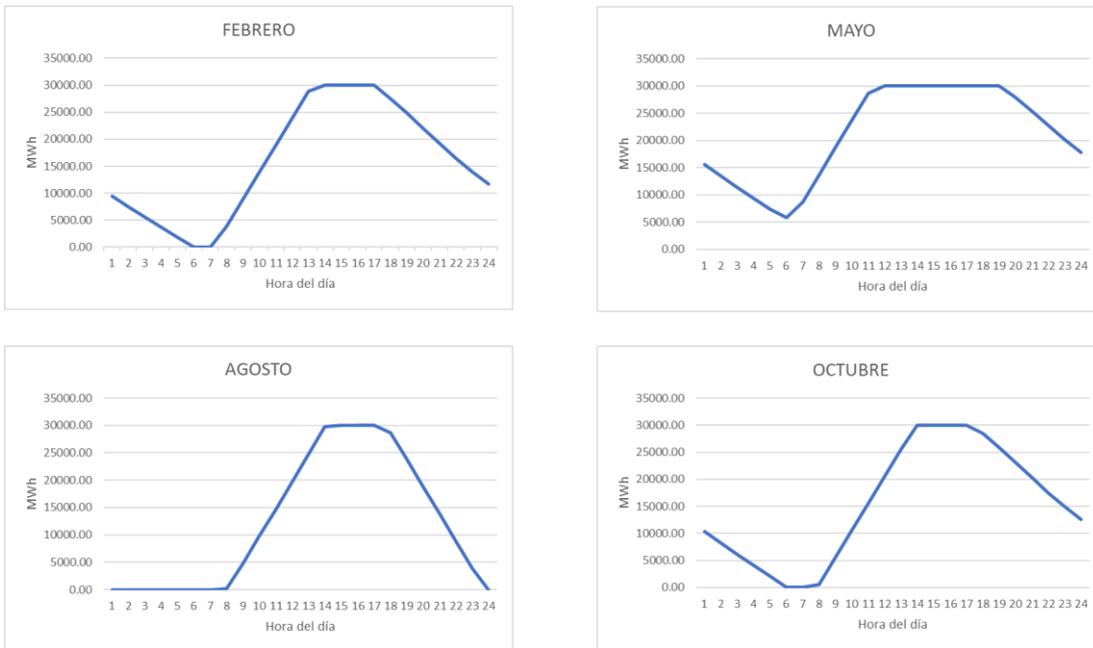


Ilustración 18. Carga y descarga TES con 69.595 módulos, 30MWh de capacidad de almacenamiento y 5000 kW de potencia

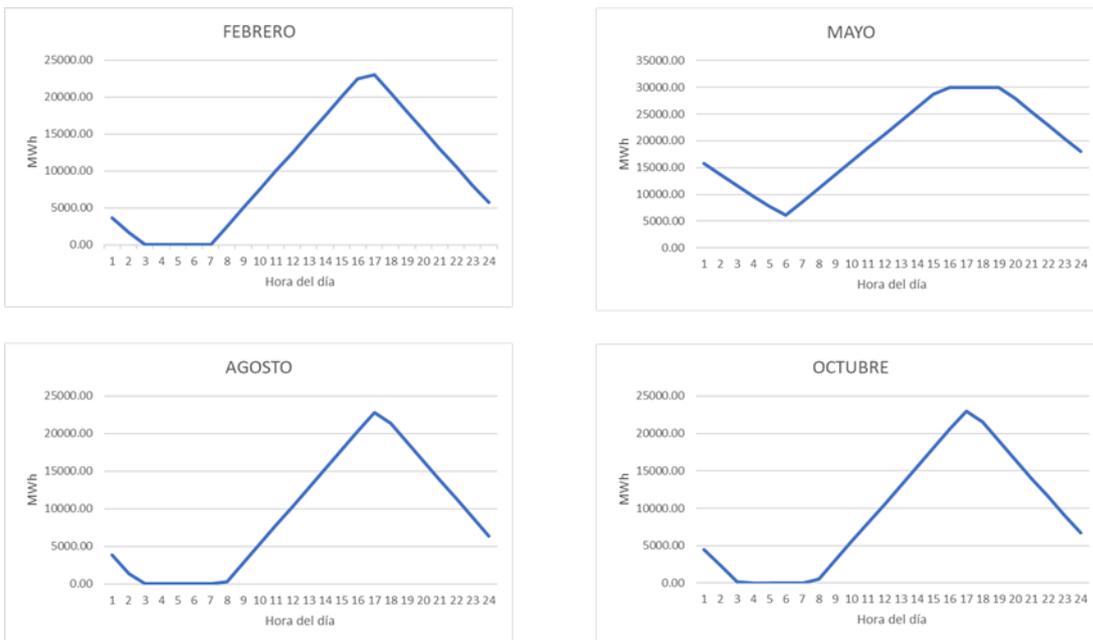


Ilustración 19. Carga y descarga TES con 69.595 módulos, 30MWh de capacidad de almacenamiento y 2500 kW de potencia.

A partir de las primeras ilustraciones, se pueden extraer conclusiones. Se observa claramente que, al aumentar la potencia, tanto las pendientes de carga como de descarga se vuelven más pronunciadas. Esta dinámica se debe al mayor flujo de energía permitido, lo que facilita la transferencia de un mayor excedente fotovoltaico para cargar el TES. En el momento de la descarga, estas pendientes adquieren una inclinación más marcada, ya que la capacidad para satisfacer la demanda en momentos críticos es más efectiva con una mayor potencia. En

contraste, en escenarios con una potencia más reducida, se observarían pendientes más suaves debido a que el sistema de almacenamiento no tendría la capacidad suficiente para atender esos puntos críticos de la demanda.

Es relevante destacar que, en situaciones en las que se alcance la potencia máxima y aún quede excedente, esta energía no se desperdicia, sino que se vende a la red. Esta consideración cobra importancia, ya que, en los casos de menor potencia, donde el TES se llena a un ritmo más pausado, ese excedente se convierte en un ingreso adicional. En contraste, en los casos de mayor potencia, donde se puede destinar más energía al llenado del almacenamiento térmico, una vez que este se satura, toda la energía restante se vierte directamente a la red.

Estas observaciones subrayan la importancia de optimizar la potencia del sistema en función de las condiciones y los objetivos específicos, considerando tanto la eficiencia del TES como las oportunidades de ingresos adicionales mediante la venta de excedentes a la red eléctrica.

Con este almacenamiento de 69.595 módulos, 30MWh de capacidad de almacenamiento, se aprecia que en todos los casos se pueden cubrir los picos principales de la demanda, en los que el precio de la electricidad es mayor, lo cual supone un ahorro energético notorio.

Es posible cuestionar si estos prototipos pudieran estar sobredimensionados, dado que el TES alcanza su capacidad máxima de almacenamiento durante un extenso período de horas diarias.

- 69.595 módulos, 20MWh de capacidad de almacenamiento y variando la potencia:



Ilustración 20. Carga y descarga TES con 69.595 módulos, 20MWh de capacidad de almacenamiento y 7500 kW de potencia.

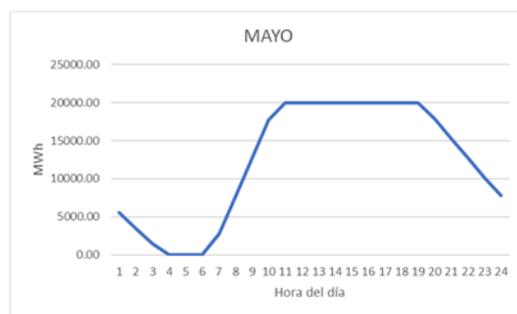


Ilustración 21. Carga y descarga TES con 69.595 módulos, 20MWh de capacidad de almacenamiento y 5000 kW de potencia.

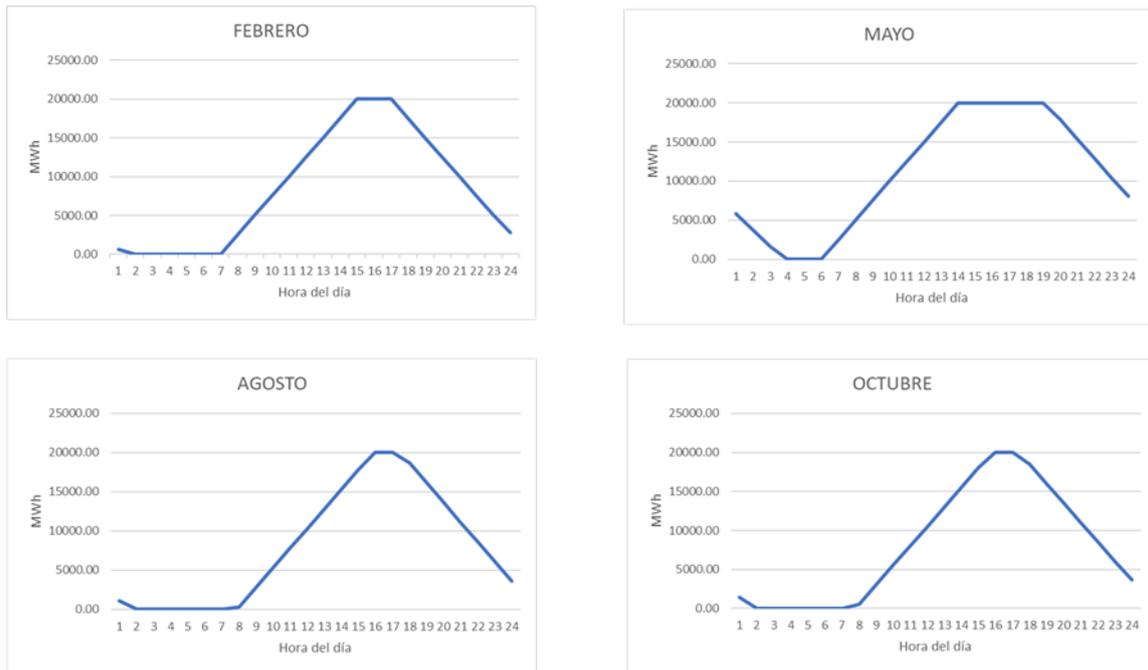


Ilustración 22. Carga y descarga TES con 69.595 módulos, 20MWh de capacidad de almacenamiento y 2500 kW de potencia.

Estos escenarios se asemejarían a los previos (69.595 módulos, 20MWh de capacidad de almacenamiento, variando la potencia), pero debido a la menor capacidad de almacenamiento de este TES, alcanzaría su máxima capacidad más temprano y comenzaría a vender el excedente a la red con mayor anticipación.

Esta situación implicaría una mayor cantidad de ingresos, pero, al tener menos capacidad de almacenamiento, requeriría utilizar energía de fuentes externas antes de lo previsto, lo que resultaría en costos adicionales.

Ambos casos continuarían cubriendo los picos de demanda al mediodía y a las 10 de la noche, por lo que se requerirá un análisis posterior para determinar cuál de ellos sería más viable.

- 69.595 módulos, 10MWh de capacidad de almacenamiento y variando la potencia:



Ilustración 23. Carga y descarga TES con 69.595 módulos, 10MWh de capacidad de almacenamiento y 7500 kW de potencia.

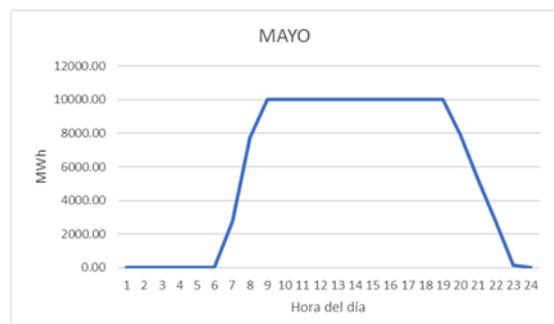


Ilustración 24. Carga y descarga TES con 69.595 módulos, 10MWh de capacidad de almacenamiento y 5000 kW de potencia.



Ilustración 25. Carga y descarga TES con 69.595 módulos, 10MWh de capacidad de almacenamiento y 2500 kW de potencia.

Este escenario se asemejaría al caso anterior, pero con una capacidad de almacenamiento significativamente reducida, lo que daría lugar a una mayor acentuación de las características y diferencias en su funcionamiento. La disminución en la capacidad de almacenamiento tendría un impacto notable en la dinámica del sistema, generando variaciones más pronunciadas.

La principal diferencia con los casos anteriores sería que, debido a la limitada capacidad de almacenamiento, en varios no llegaría a cubrir casos las horas de la zona pico de la noche, teniendo que extraer electricidad de la red a las horas más caras del día.

Se pasará a representar los casos con 52.196 placas fotovoltaicas en las ilustraciones siguientes: Ilustración 27, Ilustración 26, Ilustración 29, Ilustración 28, Ilustración 30, Ilustración 31, Ilustración 33, Ilustración 32 y la Ilustración 34.

- 52.196 módulos, 30MWh de capacidad de almacenamiento y variando la potencia:



Ilustración 27. Carga y descarga TES con 52.196 módulos, 30MWh de capacidad de almacenamiento y 7500 kW de potencia.



Ilustración 26. Carga y descarga TES con 52.196 módulos, 30MWh de capacidad de almacenamiento y 5000 kW de potencia.

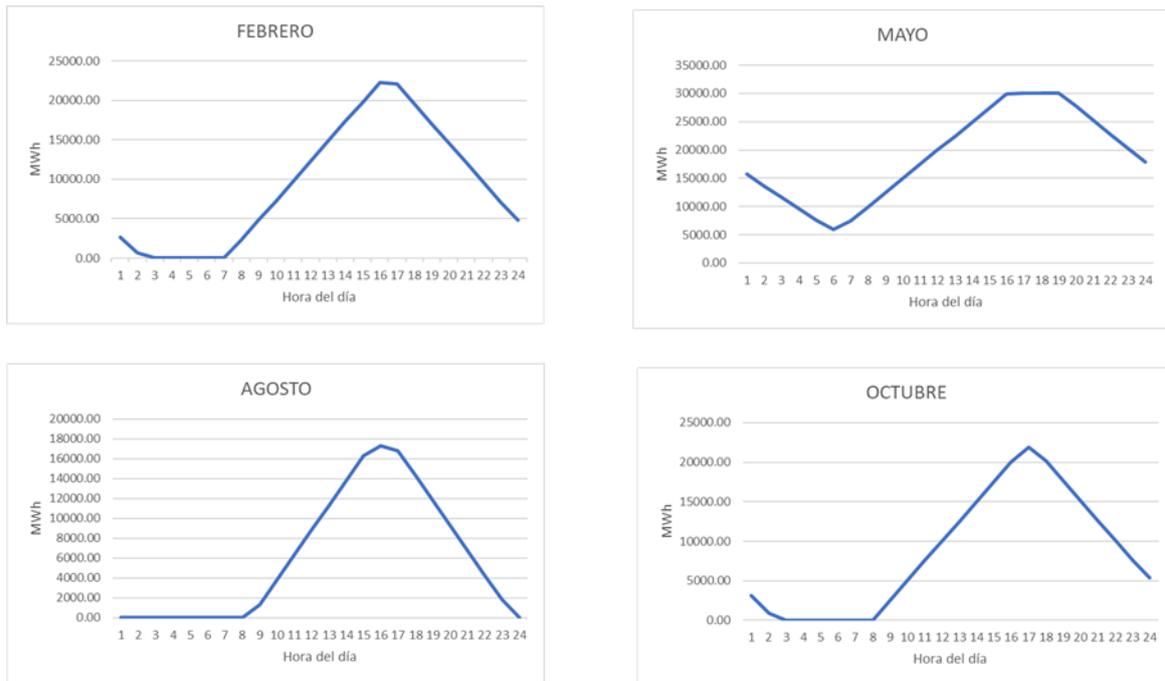


Ilustración 28. Carga y descarga TES con 52.196 módulos, 30MWh de capacidad de almacenamiento y 2500 kW de potencia.

En estos escenarios, se obtiene un perfil de funcionamiento de gran similitud con el observado en el caso de 69.595 paneles, siendo la principal diferencia el mes de agosto, el cual no logra alcanzar su capacidad máxima de llenado en ningún momento del día.

La potencia, como factor determinante, muestra efectos notables en los resultados obtenidos, con notorias diferencias entre las configuraciones. Estas diferencias se acentúan especialmente en los meses con menor irradiación solar, donde la variación de potencia se traduce en llenados más parciales de los sistemas de almacenamiento de energía térmica sensible. En el extremo de la menor potencia, se llega al escenario en el que el almacenamiento no alcanza su capacidad máxima en ningún momento

En los meses de mayo (mes con buena producción solar, pero con poca demanda) el sistema de almacenaje no termina por descargarse en ningún punto del día.

- 52.196 módulos, 20MWh de capacidad de almacenamiento y variando la potencia:

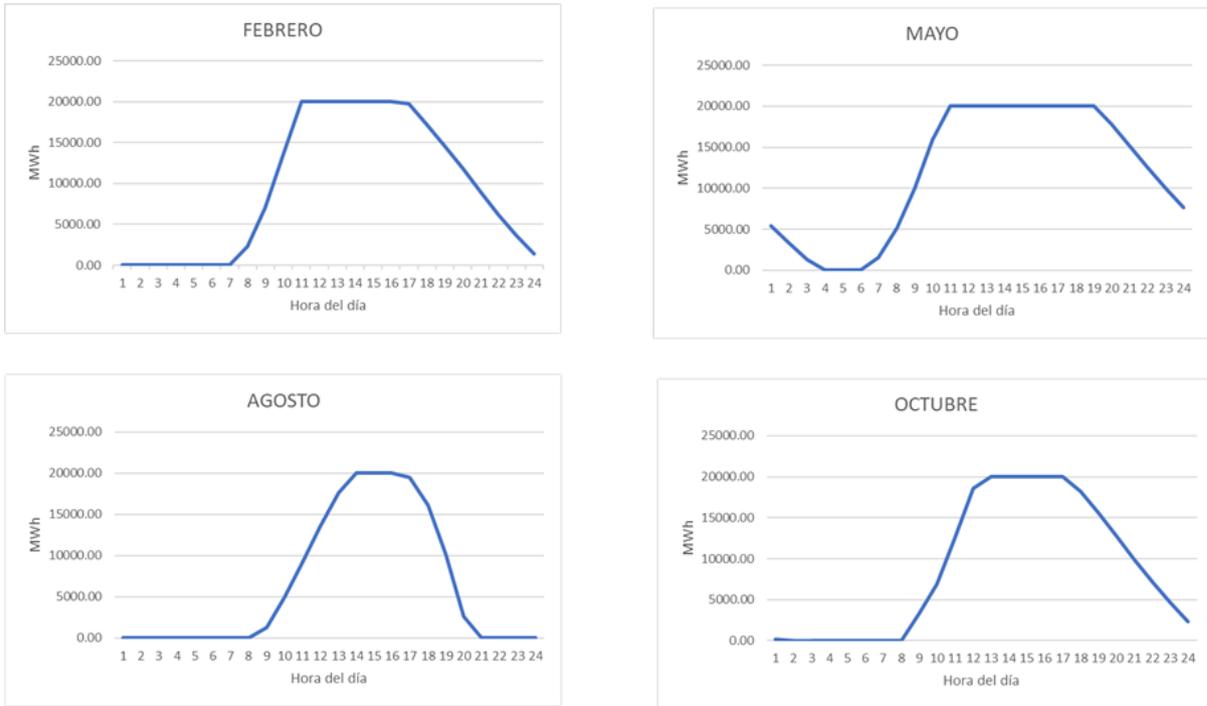


Ilustración 29. Carga y descarga TES con 52.196 módulos, 20MWh de capacidad de almacenamiento y 7500 kW de potencia.

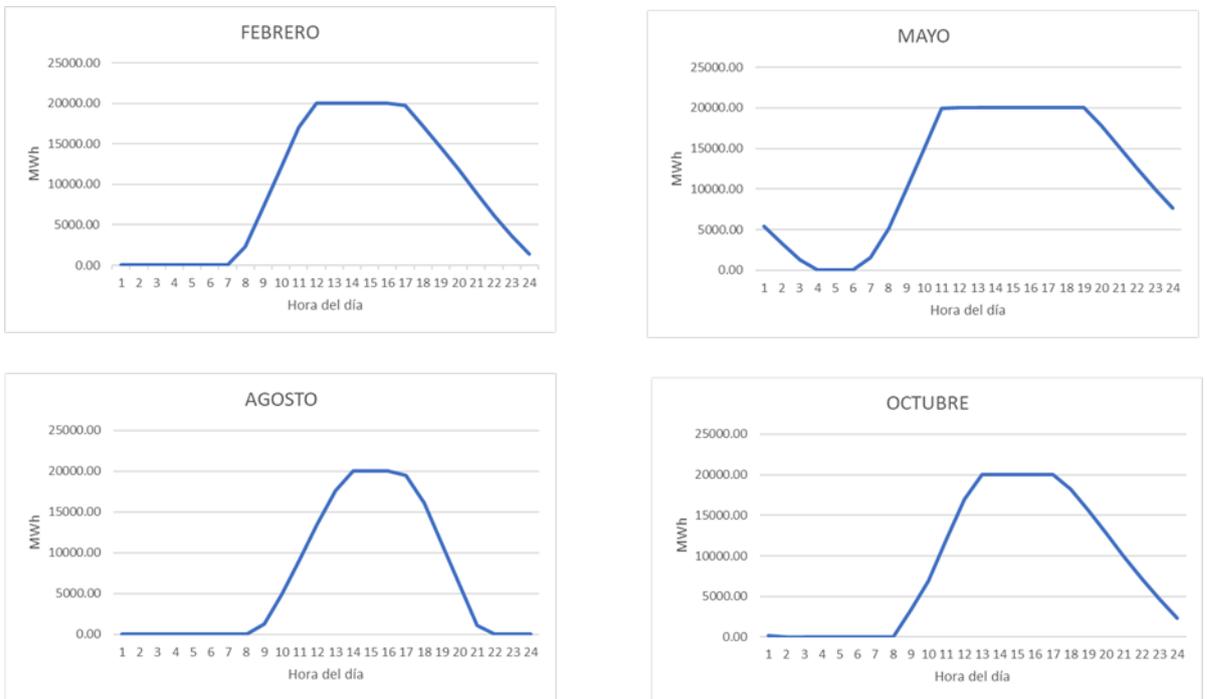


Ilustración 30. Carga y descarga TES con 52.196 módulos, 20MWh de capacidad de almacenamiento y 5000 kW de potencia.

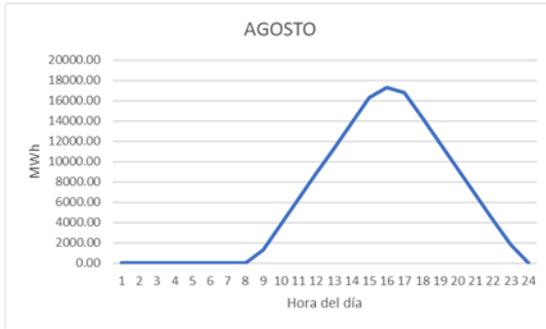


Ilustración 31. Carga y descarga TES con 52.196 módulos, 20MWh de capacidad de almacenamiento y 2500 kW de potencia.

Gran similitud al caso anterior el cual contaba con un mayor almacenamiento, pero obteniendo gráficos más achatados debido a la capacidad más reducida de almacenamiento.

Es importante resaltar que, aun contando con una capacidad menor, cubre las horas donde la energía se establece entre los puntos más caros del día.

- 52.196 módulos, 20MWh de capacidad de almacenamiento y variando la potencia:

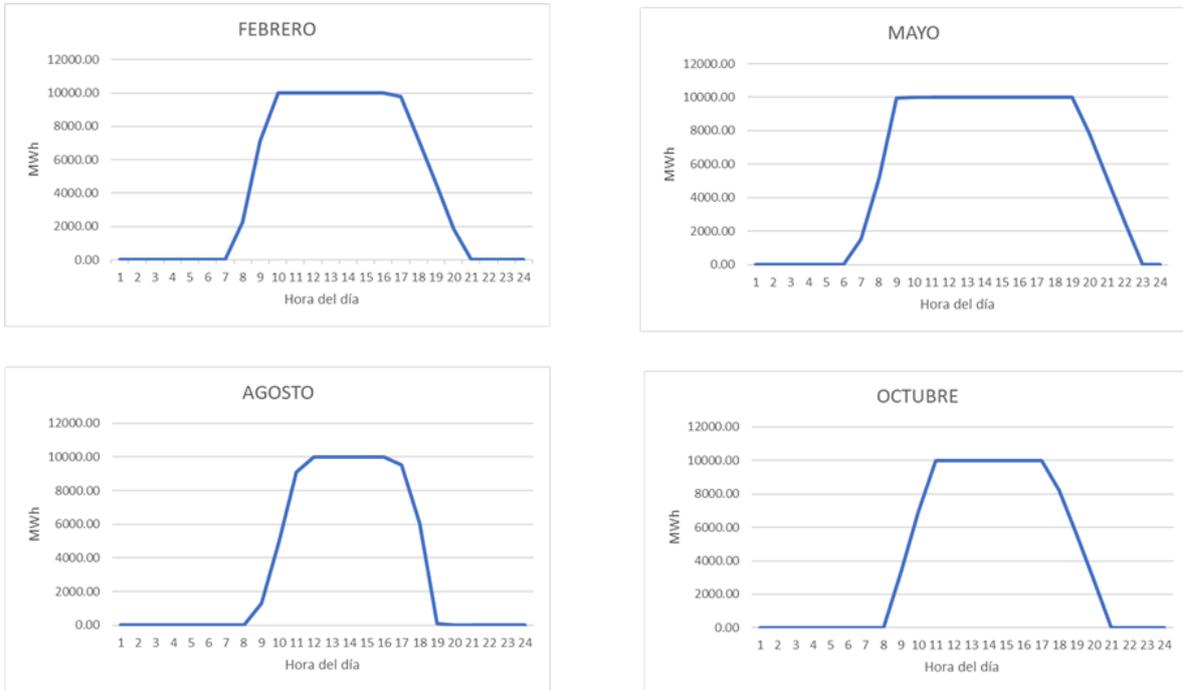


Ilustración 32. Carga y descarga TES con 52.196 módulos, 10MWh de capacidad de almacenamiento y 7500 kW de potencia.

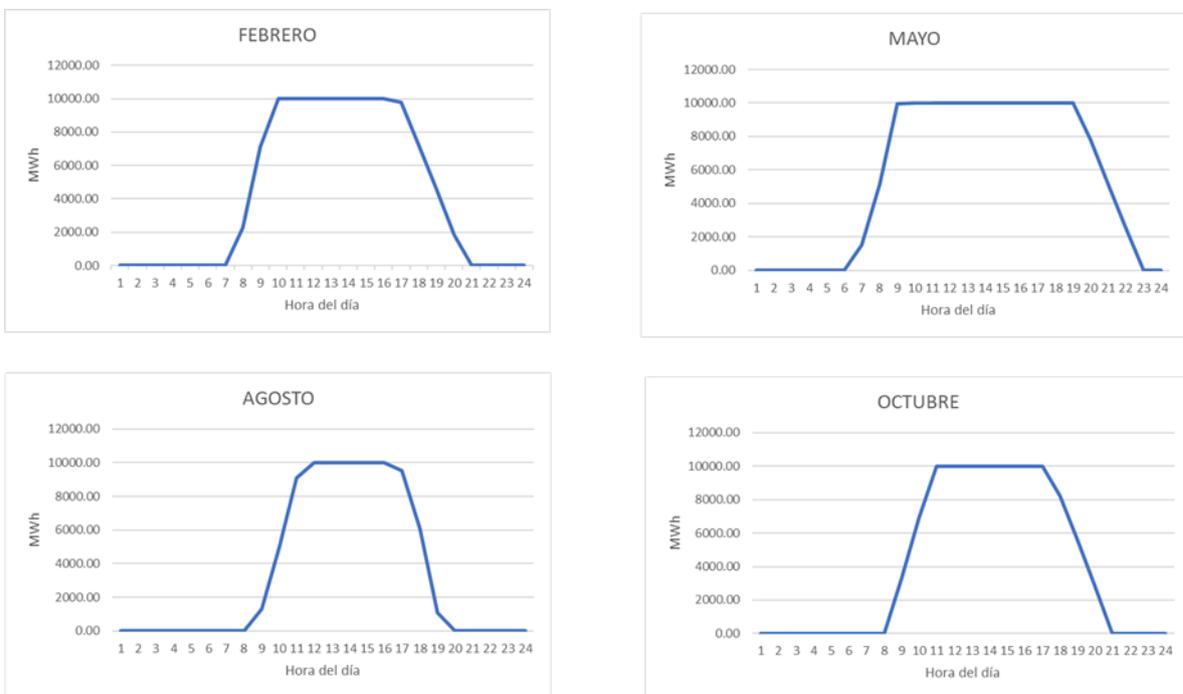


Ilustración 33. Carga y descarga TES con 52.196 módulos, 10MWh de capacidad de almacenamiento y 5000 kW de potencia.

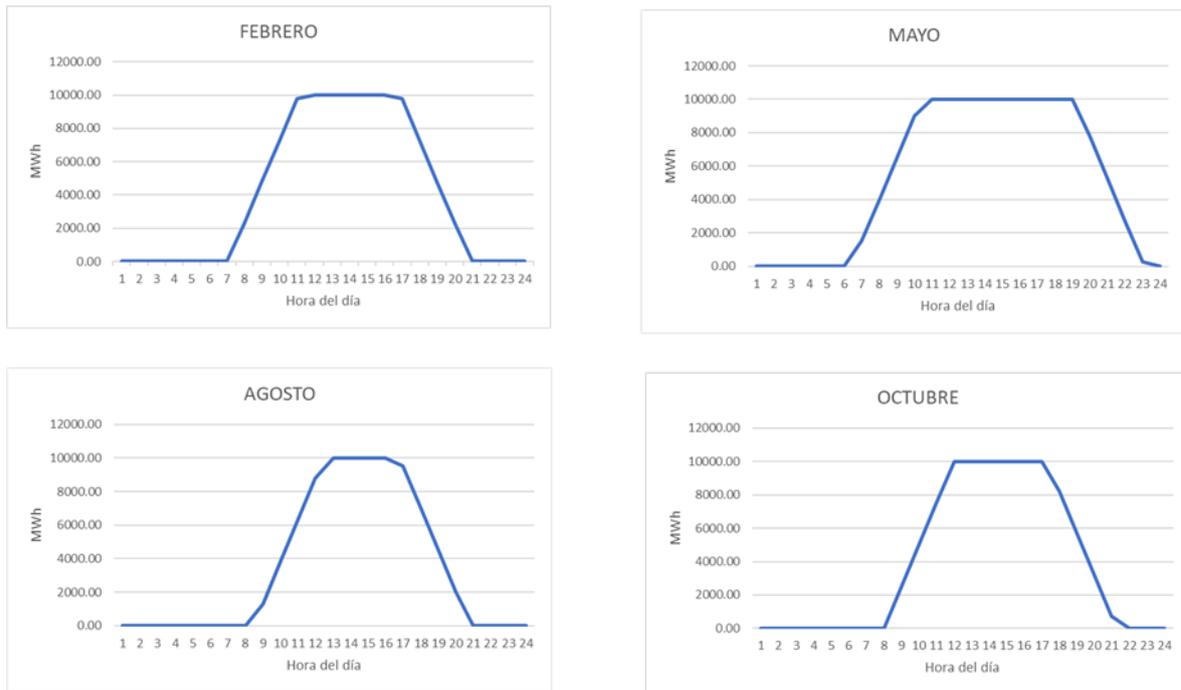


Ilustración 34. Carga y descarga TES con 52.196 módulos, 10MWh de capacidad de almacenamiento y 2500 kW de potencia.

Se observa que los gráficos generados para esta configuración de menor capacidad presentan una forma rectangular característica, lo cual se debe a que, dada su capacidad reducida, el llenado del sistema ocurre en un período de tiempo bastante reducido durante el día.

Curiosamente, estos gráficos son prácticamente idénticos entre sí, con diferencias mínimas y, en su mayoría, insignificantes. La razón de esta similitud está en el hecho de que, debido a su capacidad limitada, el almacenamiento se completa en las primeras horas del día cuando la radiación solar aún no alcanza niveles elevados. En consecuencia, el llenado se realiza a una potencia relativamente baja.

En el contexto de esta configuración específica (52.196 módulos y 10MWh de capacidad), la potencia de llenado se vuelve en gran medida irrelevante en términos generales, lo que plantea interrogantes sobre la pertinencia económica de considerar casos de mayor potencia en este contexto particular.

A continuación, se mostrarán el comportamiento del TES con 26.098 paneles solares en las siguientes ilustraciones: Ilustración 35, Ilustración 36, Ilustración 37, Ilustración 39, Ilustración 38, Ilustración 40, Ilustración 42 e Ilustración 43.

- 26.098 módulos, 30MWh de capacidad de almacenamiento y variando la potencia:

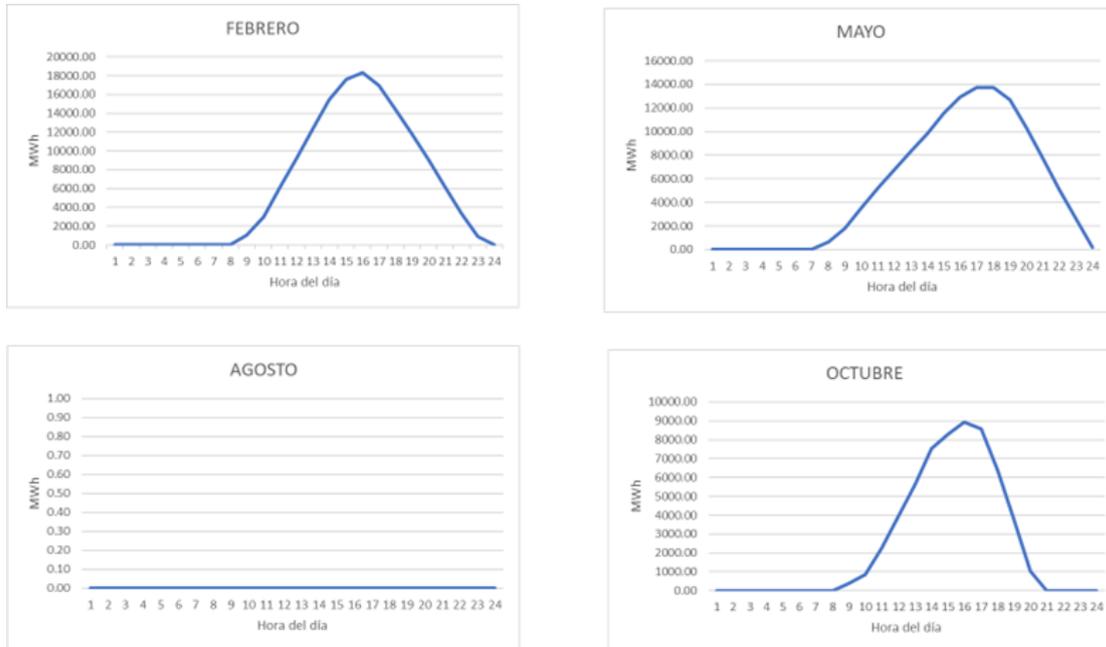


Ilustración 35. Carga y descarga TES con 26.098 módulos, 30MWh de capacidad de almacenamiento y 7500 kW de potencia.

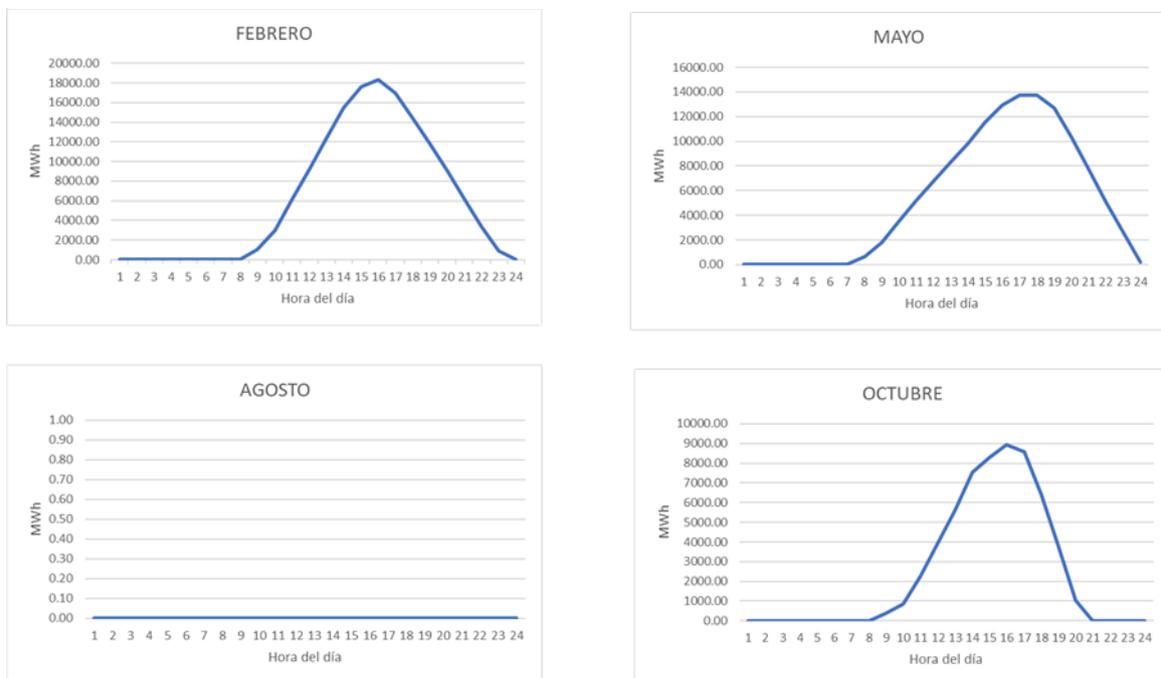


Ilustración 36. Carga y descarga TES con 26.098 módulos, 30MWh de capacidad de almacenamiento y 5000 kW de potencia.

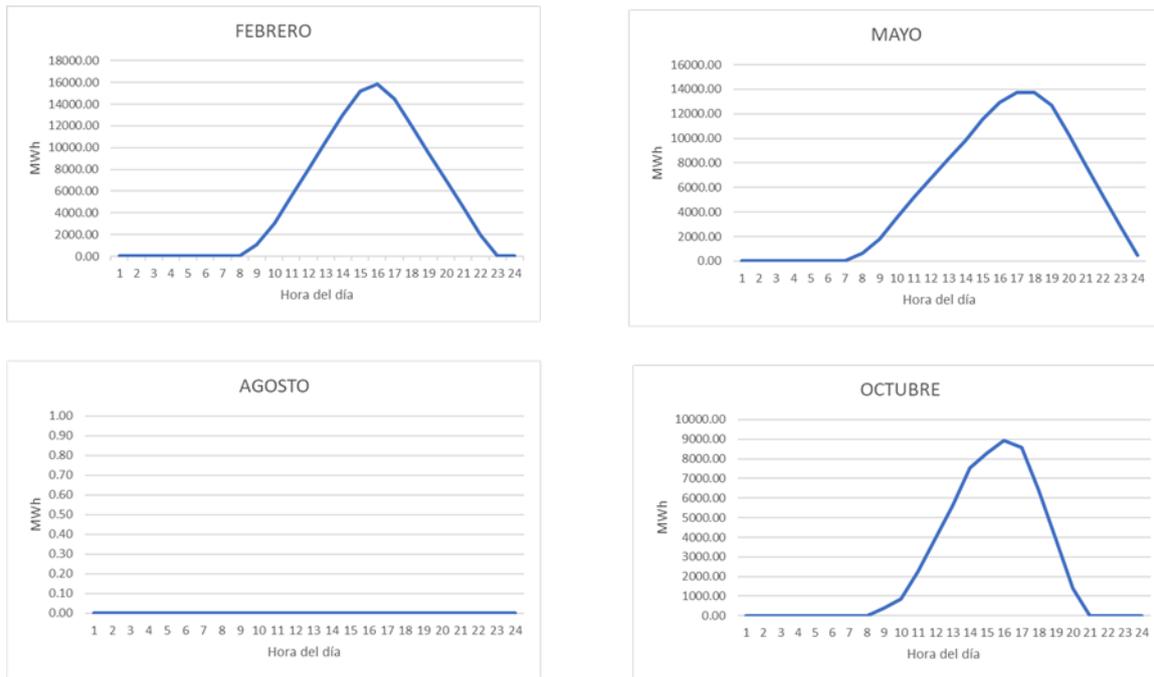


Ilustración 37. Carga y descarga TES con 26.098 módulos, 30MWh de capacidad de almacenamiento y 2500 kW de potencia.

Para comenzar, se observa como el mes de agosto no consigue cargarse en ningún momento. Esto es debido a que al contar con un número mucho más reducido de módulos solares que en los casos anteriores, la producción de estos no da en ningún punto del día para sobrepasar la demanda eléctrica, siendo inviable el llenado del TES. Esto también ocurrirá en los casos venideros, por lo que, una vez tratado en este apartado, no se volverá a comentar.

En los meses de menor demanda se llegan a cubrir las franjas horarias en donde la energía es más cara, pero en los meses con una demanda mayor o una radiación solar muy pobre, no se llega a cubrir dichas zonas.

Cabe destacar de nuevo la similitud de todas las gráficas de los mismos meses entre sí. Esto es producido por el hecho de que, al contar con menos paneles fotovoltaicos, el excedente energético que se produce es inferior. Esto supone que no se lleguen a potencias pico elevadas, por lo que la carga de este se realiza a un ritmo lento, por lo que tener una mayor potencia de carga del TES no influirá en su comportamiento.

- 26.098 módulos, 20MWh de capacidad de almacenamiento y variando la potencia:

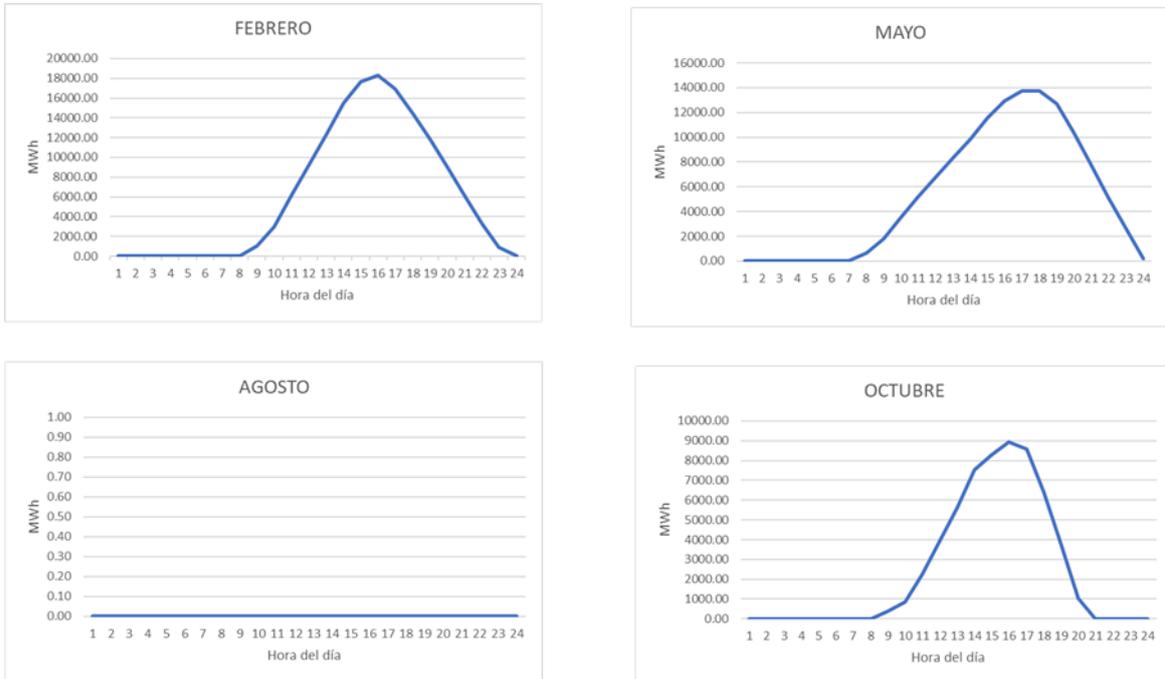


Ilustración 38. Carga y descarga TES con 26.098 módulos, 20MWh de capacidad de almacenamiento y 7500 kW de potencia.

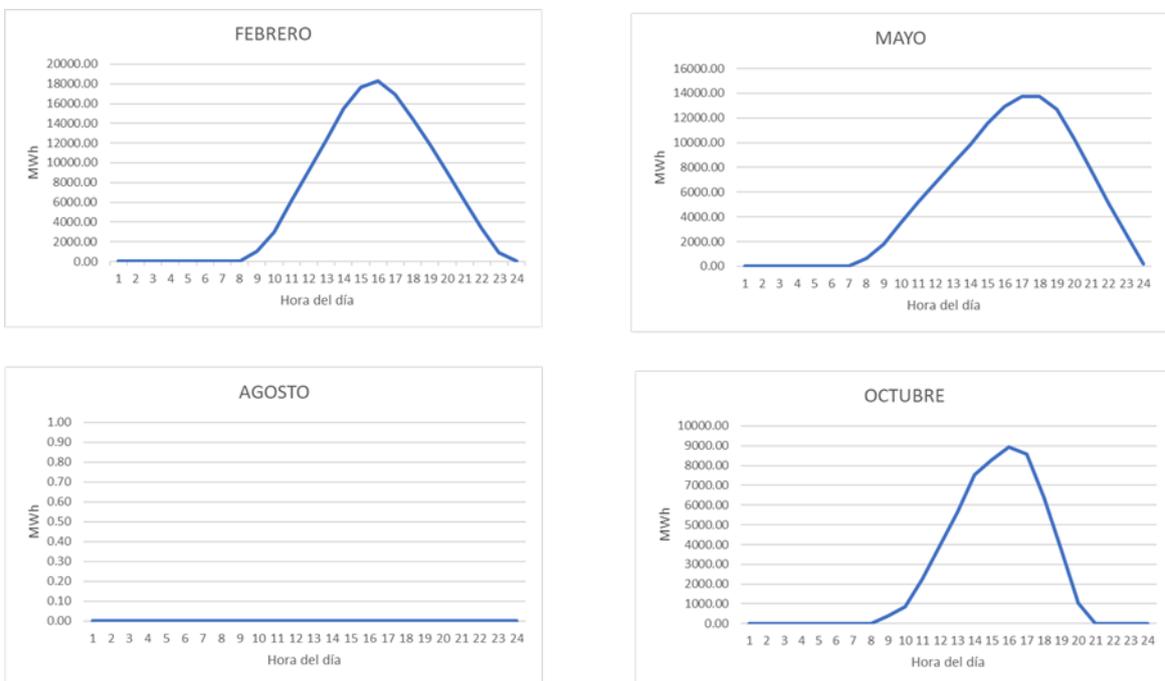


Ilustración 39. Carga y descarga TES con 26.098 módulos, 20MWh de capacidad de almacenamiento y 5000 kW de potencia.

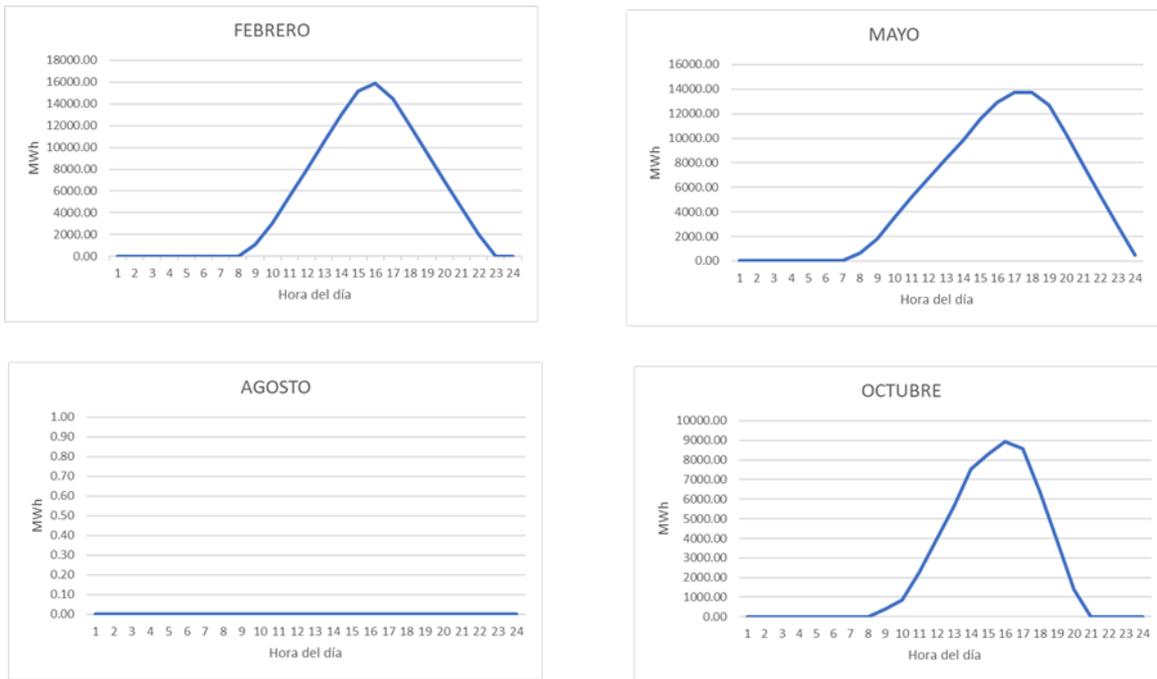


Ilustración 40. Carga y descarga TES con 26.098 módulos, 20MWh de capacidad de almacenamiento y 2500 kW de potencia.

En estos casos, se observa que su comportamiento es completamente igual al que se discutió en la sección anterior, ya que en ningún momento se supera la capacidad de 20MWh del TES.

Es por esta razón que este modelo es potencialmente más rentable que el anterior, ya que implica un desembolso inicial menor, al tiempo que proporciona resultados idénticos en términos de rendimiento y eficiencia.

- 26.098 módulos, 10MWh de capacidad de almacenamiento y variando la potencia:

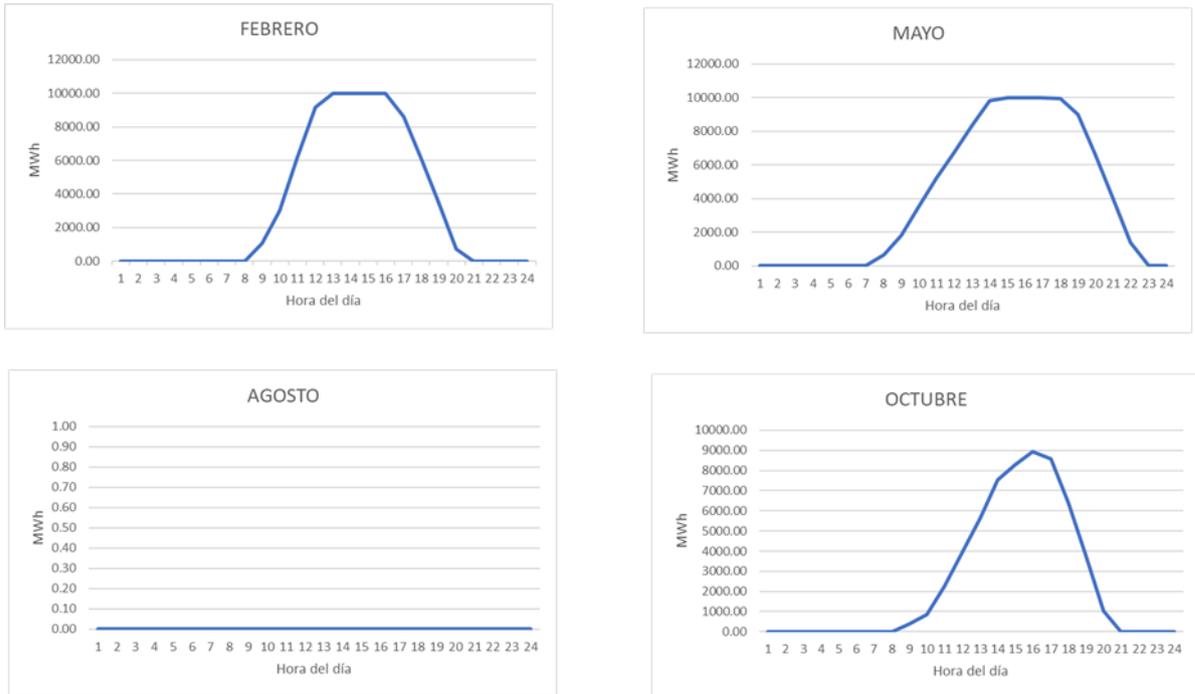


Ilustración 41. Carga y descarga TES con 26.098 módulos, 10MWh de capacidad de almacenamiento y 7500 kW de potencia

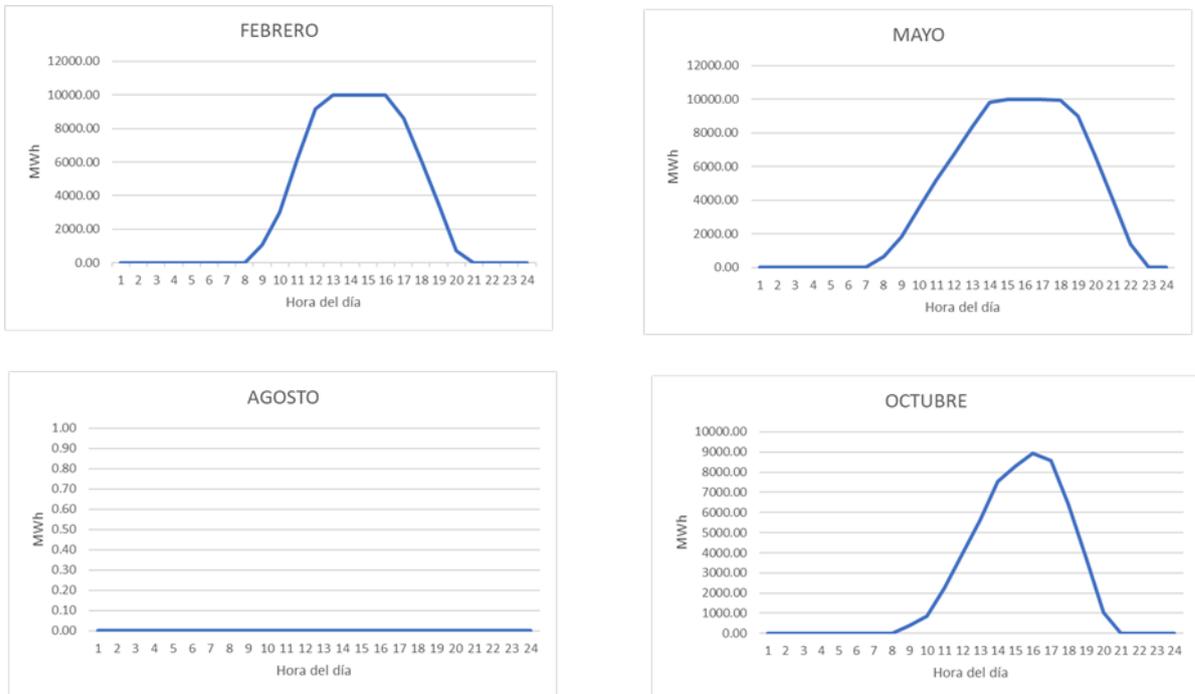


Ilustración 42. Carga y descarga TES con 26.098 módulos, 10MWh de capacidad de almacenamiento y 5000 kW de potencia.

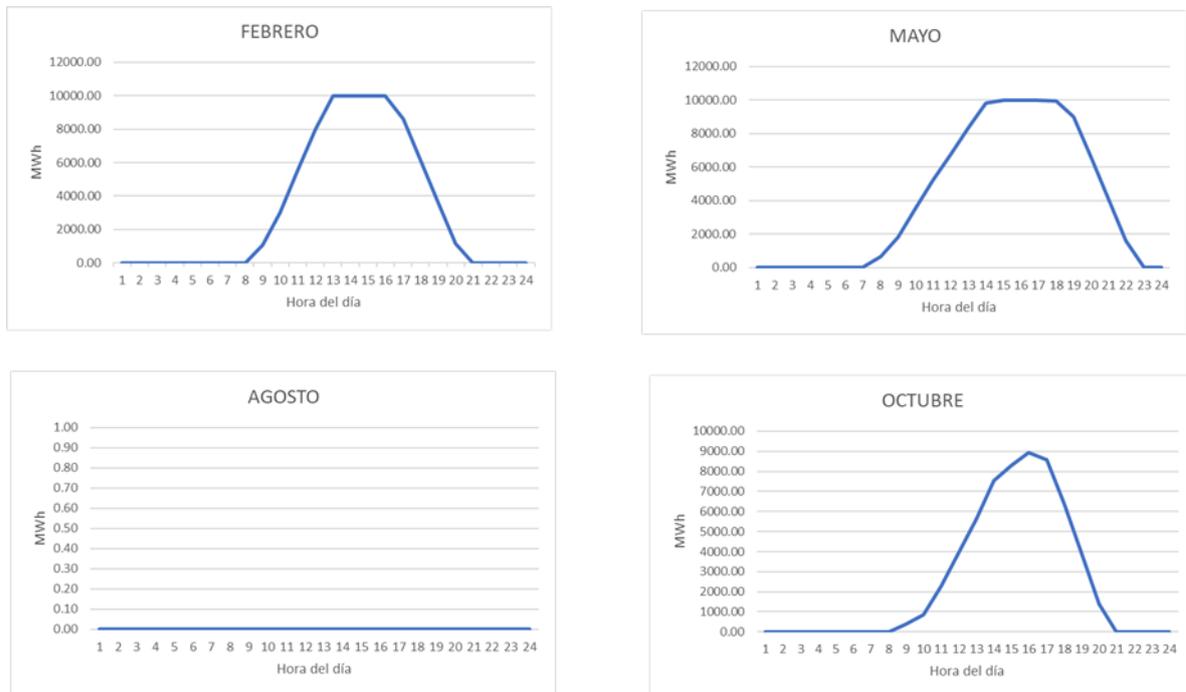


Ilustración 43. Carga y descarga TES con 26.098 módulos, 10MWh de capacidad de almacenamiento y 2500 kW de potencia.

Este prototipo, caracterizado por tener el menor número de módulos y la capacidad de almacenamiento más limitada, se posiciona como el modelo de estudio que cubre la menor parte de la demanda energética mediante la combinación de TES y paneles solares. Sin embargo, esta limitación en sus parámetros se traduce en una mayor eficiencia en términos económicos. Esto se debe a que, en los casos previamente analizados con capacidades mayores, la mayoría de las veces no se alcanzaba a llenar el TES por completo, lo que resultaba en un desembolso inicial significativo para un recurso que apenas se usa. Desde una perspectiva económica, esta configuración con menor capacidad de almacenamiento podría considerarse la más rentable.

Dentro del conjunto de casos analizados, todos con una capacidad de almacenamiento de 10 MWh y 26,098 paneles, la opción de menor potencia podría ser evaluada como una de las más atractivas. Esto se debe a que las diferencias observadas con respecto a los casos de mayor potencia son mínimas.

El TES es capaz de satisfacer la demanda energética durante las horas pico del mediodía, cuando la electricidad alcanza su precio más alto en el mercado. Sin embargo, es insuficiente en la mayoría de los casos para abastecer la demanda durante las horas pico nocturnas.

Esta situación plantea una oportunidad para optimizar aún más la configuración del sistema, buscando un equilibrio entre la capacidad de almacenamiento y la potencia de carga y descarga.

7.3 Análisis energético y económico

El análisis económico de este estudio representa un paso fundamental en la evaluación de los distintos prototipos estudiados. Tras detallar los perfiles de consumo y los procesos de carga y descarga de cada configuración, se procederá a desglosar el análisis económico en tres enfoques clave: el sistema conjunto de módulos solares y TES, los módulos solares de forma independiente y el TES por separado.

En la evaluación del sistema completo, se considerarán los ahorros generados tanto por la venta de excedentes de energía como por la retención y posterior utilización de energía no demandada a través del TES. Este enfoque permitirá comprender la sinergia entre los componentes del sistema y cómo contribuyen al rendimiento global y la eficiencia económica.

Cuando se analicen únicamente los paneles solares, se tendrá en cuenta la energía generada exclusivamente por ellos y no suministrada desde la red, así como los ingresos obtenidos por la venta de excedentes. Este enfoque permitirá evaluar la eficacia de los paneles solares como generadores de energía y su impacto en la factura energética.

Por último, al examinar el TES de manera independiente, se considerarán los ahorros y beneficios adicionales derivados de la implementación de este sistema de almacenamiento en combinación con los paneles solares. Esto incluirá el aprovechamiento de la energía térmica almacenada y su contribución a la eficiencia energética general de la instalación.

Para todos estos análisis, se emplearán numerosas tablas enlazadas que otorgarán resultados precisos de los pagos y retribuciones obtenidos en cada mes, como se muestra en el siguiente ejemplo, en la Ilustración 44.



Ilustración 44. Ejemplo de retribuciones menos pagos anual, en el caso de 52.196 módulos, 30 MWh y 7500kW.

Han sido empleados los siguientes precios de la electricidad:

- Pico (10:00-14:00 y 18:00-22:00): 0,21 €/kWh.
- Llano (8:00-10:00, 14:00-18:00 y 22:00-24:00): 0,16 €/kWh.
- Valle (00:00-8:00): 0,13 €/kWh.

El precio establecido como retribución de los excedentes energéticos ha sido 0,13 €/kWh. Este dato se ha realizado mediante el promedio que ofrecen las principales empresas del mercado.

Para determinar qué sistema es más rentable, se analizarán tres factores clave: Payback, Tasa Interna de Retorno y el Valor Actual Neto.

Pero antes de realizar este análisis es necesario conocer los datos de los precios de los elementos:

1. Módulos solares: Como ya se comentó en un apartado anterior, los paneles fotovoltaicos tienen un precio unitario de 350,00€.
2. Compresor: contará con un precio de $2035\left(\frac{X}{10}\right)^{0.6}$, [18] siendo X el número de MW de la potencia de entrada (en este proyecto, la potencia de entrada y la de salida es la misma). Las opciones disponibles serán 7.5, 5 y 2.5 MW.
3. Turbina: Supondrá un coste de $1002 * 3 * \left(\frac{x}{10}\right)^{1/3}$, [18] siendo X el número de MW de la potencia de salida (7.5, 5 y 2.5 MW).
4. Grava: Su precio variará en función de la fórmula: $8\left(\frac{x}{1000}\right)$, [18] siendo X la masa en toneladas.
5. Tanque de almacenaje: El desembolso a realizar será: $563 + 0.22 * x$, [18], siendo X el volumen del tanque en metros cúbicos. Dicho volumen será el necesario para cubrir toda la grava que se requiera.

Dependiendo del modelo seleccionado, los costos de sus componentes experimentarán variaciones significativas.

Antes de realizar el análisis económico, se mostrarán a continuación los ahorros energéticos que se consiguen con los diferentes modelos en las tablas Tablas 1, Tablas 2 y Tablas 3. Para un mejor entendimiento visual, se empleará una escala de colores, que van desde el mejor caso en color verde más oscuro, al peor caso, el cual sería rojo oscuro.

Tablas 1. Ahorro energético 69595 paneles.

Ahorro energético de la red [kW] 69595 paneles	CAPACIDAD ALMACENAJE	CAPACIDAD ALMACENAJE	CAPACIDAD ALMACENAJE
POTENCIA [kW]	10 [MWh]	20 [MWh]	30 [MWh]
2500 [kW]	19677841	23177156	24362960
5000 [kW]	19677841	23327841	26283528
7500 [kW]	19677841	23327841	26354038

Tablas 2. Ahorro energético 52196 paneles.

Ahorro energético de la red [kW] 52196 paneles	CAPACIDAD ALMACENAJE	CAPACIDAD ALMACENAJE	CAPACIDAD ALMACENAJE
POTENCIA [kW]	10 [MWh]	20 [MWh]	30 [MWh]
2500 [kW]	19184494	22473569	23404744
5000 [kW]	19184494	22801431	25395931
7500 [kW]	19184494	22801431	25395931

Tablas 3. Ahorro energético de la red 26098 paneles

Ahorro energético de la red [kW] 26098 paneles	CAPACIDAD ALMACENAJE	CAPACIDAD ALMACENAJE	CAPACIDAD ALMACENAJE
POTENCIA [kW]	10 [MWh]	20 [MWh]	30 [MWh]
2500 [kW]	15289990	16572734	16691869
5000 [kW]	15289990	16765641	16954020
7500 [kW]	15289990	16765641	16954020

Como era de anticipar, los mayores ahorros energéticos se manifiestan en aquellos casos que poseen tanto un mayor número de paneles solares como una capacidad de almacenaje más amplia. Por consiguiente, el prototipo que destaca por su máxima eficiencia en términos de ahorro energético es el configurado con 69595 paneles solares, 30 MWh de capacidad de almacenamiento y una potencia de 7500 kW. Le sigue de cerca su homólogo con una potencia de 5000 kW.

En un plano similar, se encuentran los prototipos compuestos por 52196 paneles solares y con capacidad de 30 MWh y potencias de 7500W y 5000W. Estos dos escenarios, sin diferencias en términos de ahorro energético, demuestran la eficacia de una capacidad de almacenamiento de 30 MWh y una potencia de 5000 kW en la optimización de la eficiencia energética y el ahorro económico.

En el extremo opuesto de la escala, se ubican los prototipos caracterizados por una capacidad de almacenamiento más reducida y 26098 paneles solares. Estos modelos registran ahorros energéticos inferiores en comparación con los de mayor capacidad.

Es fundamental destacar que estos datos no representan un factor determinante en la elección del modelo más competitivo, dado que es evidente que los prototipos con capacidades de almacenamiento y generación fotovoltaica inferiores no pueden competir en términos de ahorro energético con aquellos de mayor capacidad.

Para tomar una decisión más fundamentada y seleccionar el modelo más competitivo, será esencial llevar a cabo un análisis económico más exhaustivo que evalúe factores como los costos iniciales, los ingresos generados por la venta de excedentes y la eficiencia general de cada configuración en el contexto del sistema de almacenamiento de energía térmica sensible basado en grava.

7.3.1 Payback

El "payback" es el tiempo que lleva recuperar el dinero que se invirtió inicialmente en un proyecto o inversión a través de los ingresos generados por ese proyecto. Por lo general, se mide en años o meses y obtener un período de payback más corto es preferible, ya que significa que se recupera la inversión más rápido. El cálculo implica dividir la inversión inicial por los flujos de efectivo generados para determinar cuánto tiempo se necesita para igualar la inversión inicial.

Debido a que los módulos solares poseen una vida útil de 25 años, se empleará este dato como número de periodos para la realización del payback.

A continuación, se mostrarán en las tablas Tablas 4, Tablas 5 y Tablas 6 las retribuciones anuales y el desembolso inicial a realizar del prototipo TES más paneles:

- 69595 paneles:

Tablas 4. Retribución anual y desembolso inicial con 69595 módulos, variando la capacidad de almacenamiento y la potencia.

	retribucion anual	desembolso inicial
2500 kW, 10 MWh	7,005,975.53 €	26,827,176.03 €
2500 kW, 20 MWh	7,064,078.08 €	27,222,321.78 €
2500 kW, 30 MWh	7,067,052.35 €	27,617,467.52 €
5000 kW, 10 MWh	7,025,123.00 €	27,985,849.14 €
5000 kW, 20 MWh	7,108,344.20 €	28,380,994.89 €
5000 kW, 30 MWh	7,113,931.48 €	28,776,140.63 €
7500 kW, 10 MWh	7,025,123.00 €	28,945,362.74 €
7500 kW, 20 MWh	7,123,948.74 €	29,340,508.48 €
7500 kW, 30 MWh	7,134,593.31 €	29,735,654.23 €

- 52196 paneles:

Tablas 5. Retribución anual y desembolso inicial con 52196 módulos, variando la capacidad de almacenamiento y la potencia.

	retribucion anual	desembolso inicial
2500 kW, 10 MWh	5,510,422.64 €	20,737,526.03 €
2500 kW, 20 MWh	5,561,620.06 €	21,132,671.78 €
2500 kW, 30 MWh	5,572,494.41 €	21,527,817.52 €
5000 kW, 10 MWh	5,522,452.11 €	21,896,199.14 €
5000 kW, 20 MWh	5,617,190.70 €	22,291,344.89 €
5000 kW, 30 MWh	5,618,890.93 €	22,686,490.63 €
7500 kW, 10 MWh	5,522,452.11 €	22,855,712.74 €
7500 kW, 20 MWh	5,630,189.49 €	23,250,858.48 €
7500 kW, 30 MWh	5,637,655.27 €	23,646,004.23 €

- 26098 paneles:

Tablas 6. Retribución anual y desembolso inicial con 26098 módulos, variando la capacidad de almacenamiento y la potencia

	retribucion anual	desembolso inicial
2500 kW, 10 MWh	3,101,414.33 €	11,603,226.03 €
2500 kW, 20 MWh	3,124,261.54 €	11,998,371.78 €
2500 kW, 30 MWh	3,124,270.42 €	12,393,517.52 €
5000 kW, 10 MWh	3,104,667.81 €	12,761,899.14 €
5000 kW, 20 MWh	3,140,575.03 €	13,157,044.89 €
5000 kW, 30 MWh	3,140,575.03 €	13,552,190.63 €
7500 kW, 10 MWh	3,104,667.81 €	13,721,412.74 €
7500 kW, 20 MWh	3,140,575.03 €	14,116,558.48 €
7500 kW, 30 MWh	3,140,575.03 €	14,511,704.23 €

Se pasará a mostrar en las tablas Tablas 7, Tablas 8 y Tablas 9 las retribuciones anuales y el desembolso inicial de solamente el TES:

- 69595 paneles:

Tablas 7. Retribución anual y desembolso inicial con 69595, variando la capacidad de almacenamiento y la potencia (solamente TES)

	retribucion anual	desembolso inicial
2500 kW, 10 MWh	958,874.96 €	2,468,926.03 €
2500 kW, 20 MWh	1,016,977.52 €	2,864,071.78 €
2500 kW, 30 MWh	1,019,951.78 €	3,259,217.52 €
5000 kW, 10 MWh	978,022.43 €	3,627,599.14 €
5000 kW, 20 MWh	1,061,243.64 €	4,022,744.89 €
5000 kW, 30 MWh	1,066,830.92 €	4,417,890.63 €
7500 kW, 10 MWh	978,022.43 €	4,587,112.74 €
7500 kW, 20 MWh	1,076,848.17 €	4,982,258.48 €
7500 kW, 30 MWh	1,087,492.74 €	5,377,404.23 €

- 52196 paneles:

Tablas 8. Retribución anual y desembolso inicial con 52196, variando la capacidad de almacenamiento y la potencia (solamente TES)

	retribucion anual	desembolso inicial
2500 kW, 10 MWh	689,552.61 €	2,468,926.03 €
2500 kW, 20 MWh	740,750.03 €	2,864,071.78 €
2500 kW, 30 MWh	751,624.38 €	3,259,217.52 €
5000 kW, 10 MWh	701,582.08 €	3,627,599.14 €
5000 kW, 20 MWh	796,320.67 €	4,022,744.89 €
5000 kW, 30 MWh	798,020.90 €	4,417,890.63 €
7500 kW, 10 MWh	701,582.08 €	4,587,112.74 €
7500 kW, 20 MWh	809,319.46 €	4,982,258.48 €
7500 kW, 30 MWh	816,785.24 €	5,377,404.23 €

- 26098 paneles:

Tablas 9. Retribución anual y desembolso inicial con 26098, variando la capacidad de almacenamiento y la potencia (solamente TES)

	retribucion anual	desembolso inicial
2500 kW, 10 MWh	275,046.13 €	4,759,337.24 €
2500 kW, 20 MWh	297,893.35 €	6,882,457.19 €
2500 kW, 30 MWh	297,902.22 €	9,005,577.14 €
5000 kW, 10 MWh	278,299.61 €	5,918,010.35 €
5000 kW, 20 MWh	314,206.83 €	8,041,130.30 €
5000 kW, 30 MWh	314,206.83 €	10,164,250.25 €
7500 kW, 10 MWh	278,299.61 €	6,877,523.95 €
7500 kW, 20 MWh	314,206.83 €	9,000,643.89 €
7500 kW, 30 MWh	314,206.83 €	11,123,763.84 €

Por último, se mostrará en la Tablas 10 el desembolso inicial y retribución anual de solamente los paneles:

Tablas 10. Retribución anual y desembolso inicial de solo paneles.

	retribucion anual	desembolso inicial
2500 kW, 80%	6,047,100.57 €	24,358,250.00 €
5000 kW, 80%	6,047,100.57 €	24,358,250.00 €
7500 kW, 80%	6,047,100.57 €	24,358,250.00 €
2500 kW, 60%	4,820,870.03 €	18,268,600.00 €
5000 kW, 60%	4,820,870.03 €	18,268,600.00 €
7500 kW, 60%	4,820,870.03 €	18,268,600.00 €
2500 kW, 30%	2,826,368.19 €	9,134,300.00 €
5000 kW, 30%	2,826,368.19 €	9,134,300.00 €
7500 kW, 30%	2,826,368.19 €	9,134,300.00 €

Una vez mostrados de donde provienen los precios y los desembolsos que hay que realizar para cada payback posteriormente analizado, se puede adquirir una comprensión más precisa de los períodos de recuperación que se alcanzarán en cada caso. Esto permite una visión más detallada y completa de los resultados económicos de los diferentes prototipos.

En las próximas Tablas 11, Tablas 12 y Tablas 13, y, se presentarán detalladamente los períodos de recuperación económica (payback) ofrecidos por los diferentes prototipos que incorporan tanto el sistema de almacenamiento térmico (TES) como los paneles fotovoltaicos (PV). Estos datos son esenciales para evaluar la viabilidad financiera de cada configuración y determinar cuál de ellas es la más conveniente en términos de retorno de inversión.

Con el propósito de facilitar la comprensión visual, se ha implementado una codificación de colores, donde los resultados más favorables se representan en tonos de verde oscuro y los menos favorables en tonos de rojo.

Tablas 11. Paybacks en años de los prototipos con 69595 módulos solares (paneles más TES).

TES + Paneles 69595 paneles	CAPACIDAD ALMACENAJE	CAPACIDAD ALMACENAJE	CAPACIDAD ALMACENAJE
POTENCIA [kW]	10 [MWh]	20 [MWh]	30 [MWh]
2500 [kW]	3.83	3.85	3.91
5000 [kW]	3.98	3.99	4.05
7500 [kW]	4.12	4.12	4.17

Tablas 12. Paybacks en años de los prototipos con 52196 módulos solares (paneles más TES).

TES + Paneles 52196 paneles	CAPACIDAD ALMACENAJE	CAPACIDAD ALMACENAJE	CAPACIDAD ALMACENAJE
POTENCIA [kW]	10 [MWh]	20 [MWh]	30 [MWh]
2500 [kW]	3.76	3.80	3.86
5000 [kW]	3.96	3.97	4.04
7500 [kW]	4.14	4.13	4.19

Tablas 13. Paybacks en años de los prototipos con 26098 módulos solares (paneles más TES).

TES + Paneles 26098 paneles	CAPACIDAD ALMACENAJE	CAPACIDAD ALMACENAJE	CAPACIDAD ALMACENAJE
POTENCIA [kW]	10 [MWh]	20 [MWh]	30 [MWh]
2500 [kW]	3.74	3.84	3.97
5000 [kW]	4.11	4.19	4.32
7500 [kW]	4.42	4.49	4.62

Observando las tablas presentadas, se pueden extraer conclusiones sobre la relación entre la capacidad de almacenamiento, la potencia y los tiempos de retorno de inversión. Se percibe una leve tendencia hacia tiempos de recuperación de la inversión más cortos a medida que disminuye la capacidad de almacenamiento y la potencia en cada tabla individual. Este patrón se mantiene consistente a lo largo de los análisis, y se observa que un aumento en la potencia tiende a prolongar los tiempos de retorno más que un aumento en la capacidad de almacenaje.

El caso de los 26,098 paneles presenta una curiosidad notable, ya que tiene tanto el payback más corto como el más largo. Aunque este salto es mínimo, dado que el tiempo de retorno más corto es de 3,74 años y el más largo es de 4,62 años, lo que equivale a menos de un año de diferencia en el período de recuperación económica.

En cuanto a los casos de 69,595 y 52,196 paneles, muestran similitudes notables entre sí. Los paybacks oscilan en rangos de 3,83 a 4,17 años y de 3,76 a 4,19 años, respectivamente, siendo el primero el que presenta un rango de años más estrecho de los tres casos analizados.

Es importante destacar que las diferencias en los tiempos de retorno de inversión entre los diferentes prototipos no son significativas, ya que un año de diferencia en un período de vida útil de 25 años no representa un obstáculo importante. Por lo tanto, se hace evidente la necesidad de llevar a cabo análisis económicos adicionales y considerar otros factores relevantes antes de tomar decisiones finales sobre la selección del prototipo más adecuado para el proyecto.

En las próximas Tablas 14, Tablas 15 y Tablas 16 se presentarán detalladamente los períodos de recuperación económica (payback) ofrecidos por los diferentes modelos de estudio que incorporan solamente el sistema de almacenamiento térmico (TES):

Tablas 14. Paybacks en años de los prototipos con 69595 módulos solares (solamente TES).

TES 69595 paneles	CAPACIDAD ALMACENAJE	CAPACIDAD ALMACENAJE	CAPACIDAD ALMACENAJE
POTENCIA [kW]	10 [MWh]	20 [MWh]	30 [MWh]
2500 [kW]	2.57	2.82	3.20
5000 [kW]	3.71	3.79	4.14
7500 [kW]	4.69	4.63	4.94

Tablas 15. Paybacks en años de los prototipos con 52196 módulos solares (solamente TES).

TES 52196 paneles	CAPACIDAD ALMACENAJE	CAPACIDAD ALMACENAJE	CAPACIDAD ALMACENAJE
POTENCIA [kW]	10 [MWh]	20 [MWh]	30 [MWh]
2500 [kW]	3.58	3.87	4.34
5000 [kW]	5.17	5.05	5.54
7500 [kW]	6.54	6.16	6.58

Tablas 16. Paybacks en años de los prototipos con 26098 módulos solares (solamente TES).

TES 26098 paneles	CAPACIDAD ALMACENAJE	CAPACIDAD ALMACENAJE	CAPACIDAD ALMACENAJE
POTENCIA [kW]	10 [MWh]	20 [MWh]	30 [MWh]
2500 [kW]	17.30	23.10	30.23
5000 [kW]	21.26	25.59	32.35
7500 [kW]	24.71	28.65	35.40

Se puede apreciar una clara tendencia en los resultados de los paybacks en función de las variables clave del proyecto. Cuanto mayor es el número de paneles y menor la capacidad de almacenamiento y la potencia, se tiende a obtener un payback más favorable. El caso que presenta el payback más bajo (2,57 años) corresponde al prototipo con 69,595 paneles, 10 MWh de capacidad de almacenamiento y 2,500 kW de potencia, mostrando una notoria ventaja en comparación con el caso menos favorable, que sería el prototipo con 26,089 paneles, 30 MWh de capacidad y 7,500 kW de potencia, con un período de recuperación económica de 35,40 años.

Cuando se examinan los prototipos con 69,595 y 52,192 módulos, no se observa una diferencia tan marcada, ya que los paybacks oscilan entre 2,57 años en el mejor de los casos y 6,58 años en el peor. Sin embargo, al analizar los prototipos con 26,098 módulos, se evidencia un cambio significativo en los períodos de recuperación económica, siendo el mejor caso de este grupo el que alcanza un payback de 17,30 años.

Esto tiene sentido, puesto que cuanto mayor sea el número de módulos, es natural que se genere un ahorro energético más significativo gracias al almacenamiento térmico. Esto se debe a la mayor capacidad del TES para satisfacer una cantidad superior de la demanda energética, lo que a su vez permite aprovechar más eficazmente el excedente de energía fotovoltaica y reducir la necesidad de recurrir a la red eléctrica convencional.

En las próximas Tablas 17, se presentarán detalladamente los períodos de recuperación económica (payback) ofrecidos por los diferentes prototipos que incorporan solamente los módulos solares:

Tablas 17. Paybacks en años de los prototipos, con diferente número de módulos solares (solamente paneles).

Solo Paneles			
Número Paneles	69595	52196	26098
Payback	4.03	3.79	3.23

Es importante destacar que los modelos con el mismo número de paneles tienen un tiempo de retorno idéntico. Esto se debe a que al contar únicamente con paneles solares y no disponer del sistema de almacenamiento térmico (TES) ni de la potencia necesaria para cargarlo, estos factores se vuelven irrelevantes, dejando como único factor relevante la cantidad de paneles presentes en el prototipo.

En todos los casos analizados se obtienen resultados muy favorables en términos de tiempo de retorno de la inversión. El mejor de estos resultados es de 3.23 años, y corresponde a los modelos que cuentan con el menor número de módulos solares. Esta situación se debe en gran parte al elevado costo de los paneles solares, especialmente cuando se trata de prototipos con un gran número de paneles. Por ejemplo, el presupuesto para los 26,098 paneles asciende a 9,134,300 €, mientras que en el caso con más paneles alcanza los 24,358,250 €. Por lo tanto, es comprensible que se requiera más tiempo para recuperar la inversión en el caso de los modelos con mayor cantidad de paneles.

El sistema de almacenamiento de energía térmica (TES) presenta una influencia positiva en los resultados económicos, ya que el período de retorno de la inversión (payback) obtenido en los prototipos que incorporan tanto paneles solares como TES es menor en comparación con los casos que solo cuentan con paneles solares. Esto sugiere que el uso del TES permite una utilización más eficiente de la energía fotovoltaica generada, en lugar de simplemente vender los excedentes a la red eléctrica. Al aprovechar el almacenamiento térmico para satisfacer la demanda energética, se logra maximizar el autoconsumo y reducir la dependencia de la red, lo que se traduce en un retorno de inversión más rápido y, en última instancia, en una mayor rentabilidad del sistema.

7.3.2 VAN

El Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR) son dos medidas financieras utilizadas en el análisis de inversiones para evaluar la rentabilidad de proyectos o inversiones a lo largo del tiempo.

El VAN es una métrica que calcula la diferencia entre el valor presente de los flujos de efectivo entrantes (ingresos) y salientes (costos o inversiones) de un proyecto o inversión. En otras palabras, indica cuánto vale en términos de dinero actual un proyecto o inversión futura.

Para calcular el VAN, se descuentan todos los flujos de efectivo futuros a su valor presente utilizando una tasa de descuento adecuada. Si el VAN resultante es positivo, indica que la inversión generará un retorno mayor que la tasa de descuento y, por lo tanto, puede ser considerada como rentable.

Para este proyecto se ha elegido una tasa de interés del 3% y para hacer el análisis del VAN de una manera más ordenada, se hará primero el análisis de TES más paneles (Tablas 18), después de solamente el TES (Tablas 19) y por último solamente de paneles (Tablas 20). Se contará, al igual que los apartados anteriores, con una leyenda de colores que irá desde el verde al rojo en función de sus mejores o peores resultados.

- VAN (TES más paneles):

Tablas 18. VAN (TES más paneles)

VAN	2500kW, 10MWh	2500kW, 20MWh	2500kW, 30MWh	5000kW, 10MWh	5000kW, 20MWh	5000kW, 30MWh	7500kW, 10MWh	7500kW, 20MWh	7500kW, 30MWh
69595 paneles	95,168,911 €	95,785,513 €	95,442,159 €	94,343,655 €	95,397,653 €	95,099,799 €	93,384,142 €	94,709,863 €	94,500,073 €
52196 paneles	75,216,277 €	75,712,640 €	75,506,851 €	74,267,075 €	75,521,626 €	75,156,087 €	73,307,561 €	74,788,463 €	72,517,270 €
26098 paneles	42,402,160 €	42,404,856 €	42,009,865 €	41,300,140 €	41,530,252 €	41,135,106 €	40,340,626 €	40,570,738 €	40,175,593 €

Los resultados del análisis financiero muestran una amplia gama de valores de Valor Actual Neto (VAN) para los diferentes escenarios evaluados a lo largo de un período de 25 años. Estos valores proporcionan una visión clara de la rentabilidad de cada prototipo y sus variaciones en función del número de paneles solares, capacidad y potencia utilizados. A continuación, se detallarán y analizarán en profundidad estos resultados para comprender mejor su significado y relevancia económica.

En primer lugar, es importante destacar que los mejores VAN se obtienen en el caso de mayor número de paneles solares, donde los valores se sitúan en torno a los 95 millones de euros. Esto sugiere que el prototipo con una mayor capacidad de generación fotovoltaica y, por lo tanto, una mayor inversión inicial, presenta el mayor potencial de generación de ingresos a lo largo de los 25 años.

Por otro lado, los peores resultados de VAN se encuentran en los casos con un menor número de paneles solares, con valores que oscilan entre 41,4 y 40,1 millones de euros. Estas cifras reflejan que los prototipos con menor capacidad de generación fotovoltaica generan menos ingresos a lo largo del período de análisis y, en consecuencia, obtienen un VAN menos favorable.

Es interesante observar que, dentro de grupos con el mismo número de paneles solares, como se puede apreciar en las tablas anteriores, no se producen variaciones significativas en términos

de VAN. Esto sugiere que, para estos casos específicos, la variación en la capacidad de almacenamiento y la potencia no tiene un impacto significativo en la rentabilidad de la inversión, al menos en el período de tiempo analizado.

Un aspecto positivo que se desprende de estos resultados es que todos los casos evaluados muestran valores de VAN positivos. Esto indica que, independientemente de la configuración específica del prototipo, cada inversión tiene la capacidad de generar beneficios financieros durante el período de 25 años, lo que sugiere que son inversiones rentables desde una perspectiva financiera.

En resumen, el análisis del VAN proporciona una visión detallada de la rentabilidad de los diferentes prototipos en función del número de paneles solares y otras variables. Aunque los resultados muestran diferencias significativas en los valores de VAN, es alentador observar que todos los casos analizados son financieramente viables y tienen el potencial de generar beneficios sólidos a lo largo del tiempo. Estos hallazgos respaldan la inversión en sistemas de almacenamiento de energía térmica sensible basados en grava junto con paneles solares como una opción rentable para la generación y el almacenamiento de energía sostenible a largo plazo.

- VAN (solamente TES):

Tablas 19. VAN (solamente TES)

VAN	2500kW, 10MWh	2500kW, 20MWh	2500kW, 30MWh	5000kW, 10MWh	5000kW, 20MWh	5000kW, 30MWh	7500kW, 10MWh	7500kW, 20MWh	7500kW, 30MWh
69595 paneles	14,228,105 €	14,844,708 €	14,501,353 €	13,402,850 €	14,456,847 €	14,158,994 €	12,443,336 €	13,769,058 €	13,559,268 €
52196 paneles	9,538,355 €	10,034,718 €	9,828,929 €	8,589,153 €	9,843,705 €	9,478,165 €	7,629,640 €	9,110,541 €	8,845,398 €
26098 paneles	30,082 € -	1,695,196 € -	3,818,162 € -	1,071,938 € -	2,569,800 € -	4,692,920 € -	2,031,452 € -	3,529,314 € -	5,652,434 € -

Cuando nos enfocamos en analizar los beneficios derivados exclusivamente del uso del sistema de almacenamiento de energía térmica sensible (TES), se revelan resultados de interés. Los casos que cuentan con un mayor número de paneles solares muestran valores positivos de Valor Actual Neto (VAN), lo que indica que la inversión en el TES resulta altamente rentable en estos escenarios. De manera similar, los casos intermedios también proporcionan resultados positivos en términos de VAN.

No obstante, la situación cambia significativamente en los casos que poseen el menor número de módulos solares. En estas configuraciones, los valores de VAN llegan a ser negativos, lo que sugiere que la inversión en el sistema de almacenamiento térmico en combinación con un bajo número de paneles solares no sería económicamente viable ni rentable a lo largo del período de análisis.

Esta discrepancia en los resultados resalta la importancia de seleccionar cuidadosamente la capacidad de generación de energía solar fotovoltaica en relación con la capacidad de almacenamiento térmico para lograr una inversión eficiente y rentable. El número de paneles solares desempeña un papel crucial en la rentabilidad del sistema TES y debe ser considerado con atención para maximizar los beneficios económicos en proyectos similares en el futuro.

- VAN solamente paneles:

Tablas 20. VAN (solo paneles).

Número Paneles	VAN
69595	80,940,805.26 €
52196	65,677,921.85 €
26098	40,081,666.75 €

Los resultados obtenidos por la tabla son claros: en cada uno de los escenarios evaluados, se ha constatado la presencia de valores positivos en el Valor Actual Neto (VAN). Esto indica de manera concluyente que, desde una perspectiva económica, todas las configuraciones de los modelos son inversiones rentables. Sin embargo, la diferenciación entre los distintos casos reside en el grado de rentabilidad, y en este aspecto, se evidencia una tendencia clara en favor de una mayor cantidad de módulos solares.

Dicho de otra manera, los resultados apuntan a que, si bien todos los prototipos son ventajosos en términos económicos, aquellos que incorporan un mayor número de módulos solares presentan retornos económicos más sólidos a lo largo del horizonte de análisis de 25 años.

No obstante, cabe destacar que los mejores resultados económicos se obtienen cuando se integra el prototipo de paneles fotovoltaicos con el TES. Esto indica que la combinación de ambas tecnologías genera sinergias que optimizan la rentabilidad de la inversión, lo que podría considerarse como la opción más ventajosa desde el punto de vista económico.

7.3.2 TIR

Tasa Interna de Retorno (TIR)

La TIR es la tasa de rendimiento anual que iguala el valor presente de los flujos de efectivo de un proyecto con la inversión inicial. En otras palabras, es la tasa a la cual se obtiene un VAN igual a cero.

Para calcular la TIR, se busca la tasa de descuento que hace que el VAN sea igual a cero. Si la TIR es igual o mayor que la tasa de descuento utilizada en el análisis (generalmente, la tasa de costo de capital o el costo de oportunidad), el proyecto se considera rentable. Cuanto mayor sea la TIR, más rentable será el proyecto.

Es decir, la TIR representa la tasa de rendimiento anual que ofrece ese proyecto. Ambas métricas son esenciales para evaluar si una inversión o proyecto es financieramente viable y rentable a lo largo del tiempo.

Como se ha dicho anteriormente, se empleará una tasa de interés del 3% y un periodo de 25 años.

Y para hacer el análisis del TIR de una manera más ordenada, se hará primero el análisis de TES más paneles en la Tablas 21, después del solamente TES en la Tablas 22 y por último solamente paneles en la Tablas 23. Se contará, al igual que los apartados anteriores, con una leyenda de colores que irá desde el verde al rojo en función de sus mejores o peores resultados.

- TIR paneles más TES:

Tablas 21. TIR (TES más paneles).

TIR	2500kW, 10MWh	2500kW, 20MWh	2500kW, 30MWh	5000kW, 10MWh	5000kW, 20MWh	5000kW, 30MWh	7500kW, 10MWh	7500kW, 20MWh	7500kW, 30MWh
69595 paneles	26%	26%	26%	25%	25%	25%	24%	24%	24%
52196 paneles	26%	26%	26%	25%	25%	25%	24%	24%	23%
26098 paneles	27%	26%	25%	24%	24%	23%	22%	22%	21%

Las TIR de los modelos TES más paneles, tienen una tendencia clara. Cuanto menor sea el número de paneles, la potencia y el almacenamiento, mayor es el TIR.

De nuevo se obtiene el caso en el que el modelo con menos paneles se encuentra en los dos puntos más críticos, obteniendo el mejor resultado cuando se minimizan todos los parámetros, siendo este un 27%, y el peor de los resultados, cuando se maximizan los parámetros. Esto tiene sentido y se puede relacionar con la información obtenida en el apartado 7.2 Carga y descarga del TES, cuando se veía que el TES no sobrepasaba los 10MWh salvo en contadas ocasiones.

De todos modos, todas las TIR obtenidas se hallan por encima del 3%, lo que quiere decir que los proyectos son totalmente rentables

El análisis de la Tasa Interna de Retorno (TIR) de los modelos que incluyen tanto el TES como los paneles fotovoltaicos revela una tendencia definida: a medida que disminuye el número de paneles, así como la potencia y la capacidad de almacenamiento, la TIR tiende a aumentar. Este patrón es especialmente evidente en el caso de los prototipos con menos paneles, donde se obtienen los valores más altos de TIR.

De manera interesante, se repite el escenario en el cual el modelo con la menor cantidad de paneles logra las TIR más elevadas, siendo el valor máximo alcanzado en este caso un impresionante 27%. Por otro lado, el resultado menos favorable se produce cuando se maximizan todos los parámetros. Esta variación en la TIR tiene una correlación lógica con lo observado en el apartado de 7.2 Carga y descarga del TES, donde se evidenció que el TES rara vez superaba los 10 MWh, a excepción de casos sueltos.

Sin embargo, es importante destacar que, independientemente de la configuración específica, todas las TIR obtenidas se sitúan por encima del 3%. Este hecho es fundamental, ya que indica que todos los proyectos son altamente rentables desde un punto de vista financiero. En otras palabras, los valores de la TIR confirman que cada uno de los prototipos analizados representa una inversión sólida y atractiva con la capacidad de generar un retorno económico significativo a lo largo de su vida útil de 25 años, siendo el mejor de los casos el de 26098 paneles, 10MWh y 2500kW (27%).

- TIR solo TES:

Tablas 22. TIR (solamente TES).

TIR	2500kW, 10MWh	2500kW, 20MWh	2500kW, 30MWh	5000kW, 10MWh	5000kW, 20MWh	5000kW, 30MWh	7500kW, 10MWh	7500kW, 20MWh	7500kW, 30MWh
69595 paneles	39%	35%	31%	27%	26%	24%	21%	21%	20%
52196 paneles	28%	26%	23%	19%	20%	18%	15%	16%	15%
26098 paneles	3%	1%	-1%	1%	0%	-2%	0%	-1%	-3%

En el caso de analizar los beneficios únicamente aportados por el TES, el mejor resultado lo hallamos en el prototipo con mayor número de paneles, pero menor cantidad de capacidad de almacenamiento y potencia, caso el cual obtiene una TIR increíblemente alta (39%), la cual disminuye hasta casi la mitad si aumentamos progresivamente la capacidad de almacenamiento y la potencia (20%).

El caso de 52196 paneles también ofrece buenos resultados, oscilando entre el 28 y el 15%, siguiendo el patrón del caso anterior.

Con 26098 paneles, la cosa cambia, puesto que la tasa más elevada obtenido es del 3% la cual iguala, pero no supera la tasa de interés preseleccionada. El resto de las tasas que se generan están por debajo de este 3%, incluso estando en negativo, por lo cual no se llegaría a considerar rentable este proyecto.

Al analizar los beneficios generados exclusivamente por el TES, observamos una variación significativa en las Tasas Internas de Retorno (TIR) en función de la configuración de los prototipos. Los resultados son particularmente notables.

El mejor rendimiento se encuentra en el prototipo con la mayor cantidad de paneles, pero con menor capacidad de almacenamiento y potencia. En este caso, se obtiene una TIR sorprendentemente alta, alcanzando un asombroso 39%. No obstante, esta TIR se reduce casi a la mitad cuando aumentamos gradualmente tanto la capacidad de almacenamiento como la potencia, situándose en el 20%.

El caso de 52,196 paneles también arroja resultados positivos, con Tasas Internas de Retorno que oscilan entre el 28% y el 15%, siguiendo un patrón similar al caso anterior.

Sin embargo, la situación cambia radicalmente cuando nos centramos en el prototipo con 26,098 paneles. En este caso, la TIR más alta alcanzada es del 3%, igualando, pero no superando la tasa de interés preseleccionada. Además, el resto de las tasas generadas están por debajo del 3%, llegando incluso a valores negativos. Esto indica que, en estos escenarios, el proyecto no sería considerado rentable, ya que no generaría un retorno económico que justificara la inversión.

Estos resultados subrayan la importancia de la configuración específica de los prototipos en relación con el TES y cómo esto influye en su rentabilidad desde un punto de vista financiero.

- TIR solo paneles:

Tablas 23. TIR (solamente paneles).

Número Paneles	TIR
69595	25%
52196	26%
26098	31%

Cuando analizamos el caso de solo paneles, los resultados son consistentemente positivos en todas las combinaciones evaluadas. Sin embargo, es interesante anotar que existen algunas diferencias notables en cuanto a la rentabilidad entre los diferentes modelos.

El prototipo con 26,089 paneles ha demostrado ser el más eficiente en términos de rentabilidad, obteniendo ligeramente mejores resultados en comparación con el modelo con la mayor cantidad de paneles. Esto indica que, en este escenario particular, la inversión se recupera más rápido y genera un retorno económico más sólido.

Por otro lado, el modelo con el mayor número de módulos, aunque sigue siendo rentable, muestra resultados ligeramente menos favorables en términos de tiempo de recuperación de la inversión y tasas de retorno. A pesar de estas diferencias, todos los casos de solo paneles han demostrado ser inversiones sólidas y rentables.

8. CONCLUSIONES

En el desarrollo de este trabajo de investigación, se ha realizado un exhaustivo análisis de sistemas fotovoltaicos con almacenamiento termomecánico (TES), teniendo en cuenta múltiples variables y configuraciones. El objetivo fundamental ha sido evaluar la viabilidad económica de estos sistemas en función de diferentes parámetros, considerando aspectos como la capacidad de almacenamiento, la potencia, el número de paneles solares y la demanda energética. A lo largo de las secciones anteriores, se han analizado detenidamente los resultados obtenidos en términos de producción de energía, carga y descarga del TES, así como indicadores financieros clave como el Payback, el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR).

En este apartado de conclusiones, se presentarán las reflexiones finales basadas en los hallazgos y análisis realizados durante el desarrollo de este trabajo:

En cuanto al payback, todos los modelos evaluados en este estudio muestran Paybacks muy bajos (salvo el caso de solo TES con el menor número de paneles), lo que indica que la inversión en sistemas fotovoltaicos con TES es, en general, financieramente rentable. Esta conclusión respalda la viabilidad económica de estos proyectos, puesto que la mayoría de los prototipos tienen payback comprendidos entre los 3 y 6 años.

Las conclusiones del análisis del VAN son que todos los modelos evaluados muestran valores positivos de VAN, lo que indica que la inversión en sistemas fotovoltaicos con TES es financieramente rentable. Esto respalda la viabilidad de estos proyectos desde una perspectiva económica.

Se han observado diferencias significativas en los valores del VAN entre las distintas configuraciones analizadas. Estas diferencias reflejan la importancia de elegir cuidadosamente la configuración del sistema en función de los objetivos financieros específicos y las condiciones del proyecto.

Los modelos con un mayor número de paneles solares muestran VAN más altos, siendo poco relevante las variaciones de potencia y capacidad de almacenaje.

Los modelos con un menor número de módulos fotovoltaicos tienden a mostrar VAN ligeramente más bajos. Esto indica que la inversión es sólida, pero se generarán repercusiones económicas menores.

Los resultados de la TIR han confirmado que todos los modelos evaluados son inversiones rentables, ya que sus tasas de retorno están por encima de la tasa de interés preseleccionada, salvo en los casos de solo TES con el menor número de paneles. Sin embargo, se han observado diferencias significativas en términos de rentabilidad entre las distintas configuraciones.

Se ha observado que, en términos generales, los modelos con una menor cantidad de paneles solares, menor capacidad de almacenamiento y menor potencia de carga y descarga del TES tienden a mostrar tasas de retorno más altas, a excepción del caso solo TES, caso particular en el que, a mayor número de paneles, mayor TIR. Esto sugiere que, en este contexto particular, un enfoque de menor escala puede ser más beneficioso desde el punto de vista financiero.

Por otro lado, los modelos con una mayor capacidad de almacenamiento y mayor potencia de carga y descarga, aunque siguen siendo rentables, muestran tasas de retorno ligeramente más

bajas. Esto indica que la inversión es sólida, pero el tiempo requerido para recuperar la inversión es mayor en comparación con los modelos de menor escala.

La elección de la configuración adecuada dependerá de los objetivos financieros específicos y las condiciones del proyecto, lo que destaca la importancia de un enfoque personalizado en la implementación de sistemas de energía solar con TES.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] «D. Sostenible, “Asamblea General,” Boletín la Soc. Geológica Mex., vol. 4, no. 1, pp. 1–40, 1908, doi: 10.18268/bsgm1908v4n1x1.»
- [2] «Comision Europea, “Un planeta limpio para todos. La visión estratégica europea a largo plazo de una economía próspera, moderna, competitiva y climáticamente neutra,”», Accedido: 8 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:52018DC0773&from=EN>
- [3] U. Nations, «El Acuerdo de París | Naciones Unidas», Accedido: 8 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.un.org/es/climatechange/paris-agreement>
- [4] Eurostat, «Energy data 2020 edition», p. 334, 2020, Accedido: 8 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/3217494/11099022/KS-HB-20-001-EN-N.pdf/bf891880-1e3e-b4ba-0061-19810ebf2c64>
- [5] «Consumo por usos residencial». <https://informesweb.idae.es/consumo-usos-residencial/informe.php> (accedido 8 de septiembre de 2023).
- [6] M. Tawalbeh, H. A. Khan, A. Al-Othman, F. Almomani, y S. Ajith, «A comprehensive review on the recent advances in materials for thermal energy storage applications», *International Journal of Thermofluids*, vol. 18, p. 100326, may 2023, doi: 10.1016/J.IJFT.2023.100326.
- [7] «Scopus preview - Scopus - Document details - A comprehensive review of thermal energy storage». <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85040772960&origin=inward&txGid=ca12e0d3dfc50a487f9ffbc01aea2fd0> (accedido 9 de septiembre de 2023).
- [8] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, «Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC)», 2021. <https://www.miteco.gob.es/es/prensa/pniec.aspx> (accedido 19 de diciembre de 2022).
- [9] Javier Dufour, «Sistema de almacenamiento térmico en material granular bajo la novedosa configuración de lecho confinado», 25 de noviembre de 2022. <https://www.madrimasd.org/blogs/energiasalternativas/2022/11/25/135292> (accedido 19 de diciembre de 2022).
- [10] F. Hernández-Jiménez, A. Soria-Verdugo, A. Acosta-Iborra, y D. Santana, «Exergy recovery from solar heated particles to supercritical CO₂», *Appl Therm Eng*, vol. 146, pp. 469-481, ene. 2019, doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2018.10.009.
- [11] O. Dumont, G. F. Frate, A. Pillai, S. Lecompte, M. de paepe, y V. Lemort, «Carnot battery technology: A state-of-the-art review», *J Energy Storage*, vol. 32, p. 101756, dic. 2020, doi: 10.1016/J.EST.2020.101756.

- [12] O. Dumont, G. F. Frate, A. Pillai, S. Lecompte, M. De paepe, y V. Lemort, «Carnot battery technology: A state-of-the-art review», *J Energy Storage*, vol. 32, 2020, doi: 10.1016/j.est.2020.101756.
- [13] M. Weitzer, D. Müller, D. Steger, A. Charalampidis, S. Karellas, y J. Karl, «Organic flash cycles in Rankine-based Carnot batteries with large storage temperature spreads», *Energy Convers Manag*, vol. 255, p. 115323, mar. 2022, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2022.115323.
- [14] M. Weitzer, D. Müller, y J. Karl, «Two-phase expansion processes in heat pump – ORC systems (Carnot batteries) with volumetric machines for enhanced off-design efficiency», *Renew Energy*, vol. 199, pp. 720-732, nov. 2022, doi: 10.1016/J.RENENE.2022.08.143.
- [15] Greenplan, «Lechos empacados y lechos de roca». <https://www.greenplan.co.za/case-studies/rock-bed/> (accedido 20 de diciembre de 2022).
- [16] K. G. Allen, T. W. Von Backström, y D. G. Kröger, «Packed rock bed thermal storage in power plants: Design considerations», en *Energy Procedia*, 2014. doi: 10.1016/j.egypro.2014.03.072.
- [17] «Evolución del precio del Diésel y la Gasolina | RACE». <https://www.race.es/evolucion-precio-diesel-gasolina> (accedido 10 de septiembre de 2023).
- [18] A. Vecchi y A. Sciacovelli, «Long-duration thermo-mechanical energy storage – Present and future techno-economic competitiveness», *Appl Energy*, vol. 334, p. 120628, mar. 2023, doi: 10.1016/J.APENERGY.2022.120628.
- [19] red eléctrica, «Demanda energética España hasta junio 2022», 2022. <div class="csl-entry">red eléctrica. (n.d.). *Demanda energética España hasta junio 2022*.</div> (accedido 19 de diciembre de 2022).
- [20] KillMyBill, «Mix energético España 2015», 2015. <https://www.killmybill.es/mix-energetico-espana/> (accedido 19 de diciembre de 2022).
- [21] slideshare, «Balance energético 2010», 12 de enero de 2012. <https://es.slideshare.net/Guiacabos/balance-energetico-2010> (accedido 19 de diciembre de 2022).
- [22] OVACEN, «EL futuro de las renovables en 2040», 2019. <https://ovacen.com/el-futuro-de-las-renovables/> (accedido 19 de diciembre de 2022).
- [23] «GridScale Energy storage system». [En línea]. Disponible en: www.stiesdal.com

