

Trabajo de Fin de Master

Sistemas de Energía Eléctrica

Almacenamiento de energía en distribución eléctrica

Autor: Christopher de Jesús Liranzo Paulino

Tutor: Jose Luis Martínez Ramos
Manuel Burgos Payan

Departamento de Ingeniería Eléctrica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017



Trabajo de Fin de Master
Sistemas de Energía Eléctrica

Almacenamiento de energía en distribución eléctrica

Autor:

Christopher de Jesús Liranzo Paulino

Tutor:

Jose Luis Martínez Ramos
Manuel Burgos Payan

Departamento de Ingeniería Eléctrica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017

Trabajo de Fin de Master: Almacenamiento de energía en distribución eléctrica

Autor: Christopher de Jesús Liranzo Paulino

Tutor: Jose Luis Martínez Ramos
Manuel Burgos Payan

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2017

El Secretario del Tribunal

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por darme la oportunidad de continuar mi formación profesional como ingeniero eléctrico en esta prestigiosa escuela.

Quiero agradecer al gobierno de la República Dominicana, que en busca de desarrollar su potencial humano, ha creado políticas educativas a nivel superior, de la cual he sido beneficiado con una beca del Ministerio de Educación Superior Ciencia y Tecnología (MESCYT), para seguir desarrollando mi potencial, y aportar lo necesario para el desarrollo de mi país.

Quiero agradecer a mis padres (Luz del alba Rosario Garabito y Adolfo De Jesús Liranzo González), por brindarme su apoyo en todo momento, y confiar plenamente en que la educación es el eje principal del progreso.

A Rocio Yinet Marte Baez, por su apoyo incondicional en todo el trayecto de este proyecto, por su comprensión, entendimiento y sacrificio, pieza fundamental en la motivación de este master.

Quiero agradecer a mis tutores (José Luis Martínez Ramos y Manuel Burgos Payan), por su ardua colaboración en el desarrollo de este trabajo de fin de master. De igual manera en calidad de profesor, quiero agradecerle por el aporte sustancial de los conocimientos y temas visto en clase durante este año académico.

A mis compañeros de piso, por brindarme su apoyo y colaboración en cada momento que solicité, por aclararme todas las dudas que en algún momento sustentaba, y por brindarme una mano amiga en todo este período académico.

Finalmente, y no menos importante, quiero agradecer a todo el departamento de ingeniería eléctrica, por tener a mi disposición siempre la calidad de servicio, y ayuda a las dudas que he presentado tanto en conocimientos como en procedimientos.

Resumen

Las empresas distribuidoras se relacionan a diario con escenarios desfavorables en el suministro de energía, como son interrupciones de suministros, sobre cargas de transformadores y líneas eléctricas, incremento de la demanda en horas punta, donde el precio de la energía es elevado. Por estas razones en este trabajo se propone el almacenamiento en redes eléctricas de distribución.

En primera instancia se describen los diferentes tipos de almacenamiento, se describen sus ventajas y desventajas, y la utilización del almacenamiento en las diferentes etapas de los sistemas eléctricos de potencia.

Como eje principal de este trabajo, se evalúan las diferentes tecnologías de almacenamiento considerando diferentes criterios, para que posteriormente dependiendo al escenario que se enfrenten en las redes de distribución, sean incorporadas analizando siempre su rentabilidad.

Se evalúa un sistema de almacenamiento desde varias perspectivas. En primer lugar, se analiza la rentabilidad de un sistema de almacenamiento de energía como empresa distribuidora, con el objetivo principal de recortar la punta de la demanda a lo largo del año, haciendo un ejercicio de carga y descarga diaria durante todo el año, con el fin de minimizar la compra de energía en períodos de alto coste.

Los resultados obtenidos, muestran que el dimensionamiento óptimo de un sistema de almacenamiento está relacionado directamente con el coste de inversión. Del mismo modo se observa que el parámetro técnico que permite una mayor mejora desde el punto de vista de la reducción de coste para las empresas de distribución es el período de vida útil del sistema de almacenamiento de energía.

Se analiza de igual manera el uso de un sistema de almacenamiento desde el punto de vista del consumidor, en donde se comparan varios clientes con diferentes niveles tarifarios, y se diagnostica la rentabilidad de diferentes sistemas de almacenamiento para la reducción de picos de demanda a lo largo del año. Es decir, se analizan los datos del año 2016, de cada cliente y se verifican las ventajas y desventajas, si en ese año cada cliente tuviera instalado un sistema de almacenamiento de energía. En donde, se proponen diferentes dimensionamientos de sistemas de almacenamiento de energía, para haciendo diferentes análisis se determina el tamaño óptimo que se debe usar en cada nivel tarifario, dependiendo del consumo, y el coste de inversión.

Hay que destacar que para este estudio se analiza una red de distribución de la República Dominicana, en donde el sistema eléctrico tiene una complejidad técnico-económica, que

su profundidad provoca que las empresas de distribución operen su sistema realizando interrupciones programadas, que van desde 4 horas hasta 12 horas diarias, dependiendo de la clasificación del circuito. Debido a este motivo en este trabajo de fin de master también se analiza este caso.

Se evalúa el funcionamiento óptimo de un sistema de almacenamiento de energía, en el caso de interrupciones programadas para un cliente, con un nivel tarifario en baja tensión. Se realiza una comparación de diferentes dimensionamientos del sistema de almacenamiento, comparándolo con otra alternativa como un generador eléctrico usando gasolina como combustible.

Los resultados obtenidos muestran que para cubrir el 50% de la demanda de este cliente lo más rentable es utilizar un sistema un generador eléctrico usando gasolina como combustible, pero a medida que aumentamos la cobertura de la demanda por parte del almacenamiento u otra alternativa, lo ideal es utilizar un sistema de almacenamiento de energía.

Otra alternativa que se consideró analizar, fue la de utilizar un sistema de almacenamiento con combinación con energías renovables como placas fotovoltaicas, pero los datos necesarios para realizar este análisis no fueron facilitados, por lo que se deja abierta la posibilidad de realizar este análisis y verificar su rentabilidad.

En fin, lo que se busca es analizar la rentabilidad del almacenamiento en las redes de distribución desde el punto de vista de la empresa de distribución de energía eléctrica y de parte del cliente para proponer algunas políticas de pago para clientes que decidan incluir algún tipo de almacenamiento en su domicilio.

Índice General

1	Introducción	15
1.1	Objetivos	15
1.2	Almacenamiento de energía	15
2	Tecnologías Utilizadas para el Almacenamiento de Energía	17
2.1	Energía cinética	17
2.1.1	Tecnologías Térmicas	18
2.1.2	Tecnologías Eléctricas	20
2.1.3	Tecnologías Mecánicas	23
2.2	Energía potencial	24
2.2.1	Tecnologías mecánicas	24
2.2.2	Almacenamiento de energía por aire comprimido	25
2.2.3	Tecnologías Electroquímicas	27
2.2.3.1	Tipos de tecnologías Electroquímicas	27
2.3	Impacto del almacenamiento de energía en los diferentes niveles del sector eléctrico	30
2.3.1	Utilidad de almacenamiento en los sistemas de generación	31
2.3.2	Utilidad del almacenamiento en las redes de transporte	31
2.3.3	Utilidad del almacenamiento en redes de distribución	32
2.3.4	Utilidad del almacenamiento al consumidor final (Cliente doméstico o industrial)	33
3	Evaluación de las diferentes tecnologías de almacenamiento energético	35
		35
3.1	Criterios de evaluación de las diferentes tecnologías de almacenamiento	36
4.	Sistema eléctrico de la República Dominicana	43
4.1	Comisión nacional de energía (CNE)	43
4.2	Superintendencia de electricidad (SIE)	44
4.3	Organismo coordinador del sistema eléctrico nacional interconectado (OCSENI)	44
4.4	Corporación dominicana de empresas eléctricas estatales (CDEEE)	44
4.5	Empresas de generación	45
4.6	Empresa de Transmisión	45
4.7	Empresas de Distribución	45
4.8	Estructura tarifaria de la republica dominicana	45
4.8.1	Composición de la tarifa aplicada a clientes regulados	46
4.8.2	Tarifas aplicadas a clientes regulados	46
4.9	Tipos de tarifas reguladas	48

5.	Caso de estudio: Red de distribución de energía eléctrica.....	51
5.1	Datos de la red de estudio.....	51
5.2	Almacenamiento en la distribuidora (Reducción del consumo energético anual en el circuito en evaluación)	52
5.2.1	Competencia entre tecnologías (Almacenamiento en la distribuidora)	55
5.2.2	Análisis de rentabilidad (Almacenamiento en la distribuidora).....	57
5.2.4	Tamaño óptimo del sistema de almacenamiento (Almacenamiento en la distribuidora).....	58
5.2.5	Conclusiones (Almacenamiento en la distribuidora)	59
5.3	Almacenamiento en el usuario final (implementación de sistema de almacenamiento en clientes con tarifas en media tensión).....	60
5.3.1	Datos de clientes a estudiar	60
5.3.2	Reducción de consumo energético por tipo de tarifa de media tensión	60
5.3.2.1	Cliente MTD1.....	61
5.3.2.2	Cliente MTD2.....	63
5.3.2.3	Cliente MTH.....	66
5.3.2.4	Análisis de resultados de la implementación de almacenamiento para clientes conectados en media tensión (nivel tarifario MTD1, MTD2 y MTH)	68
5.4	Almacenamiento en el usuario final (Uso de almacenamiento en caso de interrupciones programadas)	70
5.4.1	Evaluación de sistema de almacenamiento en un cliente comercial en un nivel tarifario BTS2 perteneciente a un circuito clase C.	70
5.4.2	Conclusiones de Almacenamiento en el usuario final	74
6.	Esquema básico y algoritmos de control de un sistema de almacenamiento energético mediante el uso de baterías de Ion Litio	75
6.1	Componentes del sistema de almacenamiento planteado [2].....	75
6.2	Algoritmos de control de ciclo de carga y descarga	76
6.2.1	Algoritmo para la reducción de picos de potencia.....	76
6.2.2	Algoritmo para la actuación de almacenamiento ante interrupciones	78
7.	Conclusiones y recomendaciones	81
7.1	Resultados obtenidos	82
7.2	Propuestas para las empresas de distribución.....	84
8	Bibliografía.....	85
Anexo A:	Grado de desarrollo de las diferentes tecnologías	89
	Anexo A: Tecnologías seleccionadas para el análisis económico de rentabilidad en los sistemas de distribución.....	93
Anexo B:	Artículo sobre Almacenamiento de energía en distribución eléctrica	95

Índice de Figuras

<i>Ilustración 1. Sistema térmico de almacenamiento</i>	18
<i>Ilustración 2. Supercondensadores</i>	20
<i>Ilustración 3. Componentes de volante de inercia</i>	23
<i>Ilustración 4. Almacenamiento de energía por bombeo</i>	24
<i>Ilustración 5. Sistema de almacenamiento por Aire comprimido</i>	26
<i>Ilustración 6. Sistemas de almacenamiento en los diferentes niveles del sistema eléctrico</i>	30
<i>Ilustración 7. Eficiencia de cada tecnología evaluada</i>	36
<i>Ilustración 8. Durabilidad</i>	37
<i>Ilustración 9. Densidad de energía y potencia de almacenamiento por tecnologías</i>	37
<i>Ilustración 10. Tiempo de respuesta (Minutos)</i>	38
<i>Ilustración 11. Coste por KW Instalado</i>	40
<i>Ilustración 12. Coste por kWh producido</i>	40
<i>Ilustración 13. Agentes en el mercado eléctrico dominicano</i>	43
<i>Ilustración 14. Reducción de pico Horario</i>	52
<i>Ilustración 15. Comparación costes de sistemas de almacenamiento por potencia</i>	56
<i>Ilustración 16. Comparación de tiempo de vida útil por tecnología</i>	56
<i>Ilustración 17. Sistema de almacenamiento tarifas MTD1</i>	61
<i>Ilustración 18. Sistema de almacenamiento MTD2</i>	64
<i>Ilustración 19. Sistema de almacenamiento MTH</i>	66
<i>Ilustración 20. Potencia no suministrada</i>	71
<i>Ilustración 21. Potencia suministrada con sistema de almacenamiento</i>	72
<i>Ilustración 22. Componentes de un sistema de almacenamiento con baterías de Ion Litio [2]</i>	76

Índice de Tablas

Tabla 1. Almacenamiento por tipo de tecnología [3]	17
Tabla 5. Costes por tipo de tecnología (Datos extraídos de informe de ECOFYS sobre almacenamiento de energía, publicado en el año 2014).	39
Tabla 6. Cargos tarifarios	48
Tabla 7. Consumo de red de estudio.....	51
Tabla 8. Sistema de almacenamiento Ion-Litio (Datos de coste: informe de ECOFY).....	53
Tabla 9. Sistema de almacenamiento Plomo Acido.....	54
Tabla 10. Sistema de almacenamiento Redox-Vanadio	55
Tabla 12. Indicadores económicos.....	58
Tabla 13. Datos de consumo y pagos de clientes conectados en media tensión (Datos suministrados por la empresa de distribución)	60
Tabla 14. Sistemas de almacenamiento para clientes MTD1	62
Tabla 15. Ahorro anual para cliente MTD1	62
Tabla 16. Indicadores económicos para tarifa MTD1.....	63
Tabla 17. Sistema de almacenamiento MTD2.....	64
Tabla 18. Ahorro anual para cliente MTD2	65
Tabla 19. Indicadores económicos para tarifa MTD2.....	65
Tabla 20. Coste del sistema de almacenamiento para tarifas MTH.....	67
Tabla 21. Ahorro anual del sistema de almacenamiento para tarifa MTH	67
Tabla 22. Indicadores económicos para tarifa MTH.....	68
Tabla 23. Clase de circuito.....	70
Tabla 24. Consumo energético de una semana de cliente en evaluación (Tarifa clase BTS2).....	72
Tabla 25. Coste de un sistema de almacenamiento - Almacenamiento en el usuario final	72
Tabla 26. Consumo de combustible de un generador eléctrico de gasolina.....	73
Tabla 27. Comparación de costes de sistemas de almacenamiento vs costes de generador eléctrico	74
Tabla 2. Grado de desarrollo de las tecnologías [3]	89
Tabla 3. Tecnologías de almacenamiento (Ventajas, desventajas y aplicaciones).....	91
Tabla 4. Criterios de evaluación de las diferentes tecnologías	94

1 Introducción

1.1 Objetivos

El uso de sistemas de almacenamiento, para los sistemas eléctricos de potencia está creciendo de forma acelerada. Este estudio de sistemas de almacenamiento en las redes de distribución tiene cuatro objetivos fundamentales:

- Demostrar de qué manera el almacenamiento de energía puede proporcionarle seguridad al sistema de distribución, ante perturbaciones, siempre que éstas afecten el suministro de energía eléctrica a los clientes.
- Detallar la gestión de consumo energético en los clientes domésticos en períodos de horas punta, basada en un sistema de almacenamiento, aplicando diferentes niveles tarifarios.
- Destacar el sistema de almacenamiento de energía más rentable, en el área de distribución, dependiendo al escenario que esté enfrentado.
- Mostrar los tipos de tecnologías que se utilizan para el almacenamiento de energía, así como su importancia e impacto en los diferentes niveles del sistema eléctrico.

1.2 Almacenamiento de energía

Un sistema eléctrico de potencia se compone de empresas de generación, de transmisión y distribución de energía eléctrica. El propósito fundamental es mantener un balance entre generación y consumo. Considerando que la potencia total absorbida por los clientes de una compañía de electricidad fluctúa entre límites amplios, dependiendo de la estación del año, de la hora y del día, se deben tener los mecanismos necesarios para que no exista un desbalance que pueda afectar de forma negativa el abastecimiento de la demanda.

En el mundo actual los lineamientos a seguir, son una disminución considerable del consumo, generación con energías que no posean emisiones de CO₂, y nuevos mecanismos de generación de energía eléctrica.

Los sistemas actuales no poseen sistemas de almacenamiento con una gran diversidad, apenas se han desarrollado sistemas de almacenamientos hidráulicos por bombeo a gran

magnitud, sin embargo, sus limitaciones geográficas y el gran costo de inversión, que poseen estas tecnologías, han hecho que se indague en nuevos procedimientos, procesos y sistemas para almacenar energía, y transformarla en energía eléctrica, con el fin de mantener los sistemas eléctricos de potencia en balance energético. [1]

El propósito principal de los sistemas de almacenamiento es permitir la acumulación de energía, en determinados períodos de tiempo, para poder ser despachada o utilizada en otros.

Cuando observamos el modelo actual de generación y consumo energético, es de notar que la energía generada es directamente consumida, solo unos momentos después, lo que puede provocar que cualquier perturbación o desequilibrio puntual, debe ser compensando por otra fuente de energía. [2]

La energía almacenada en períodos valle, es devuelta a la red durante los picos de demanda pasando así a satisfacer la demanda energética con una sola planta de generación, operando a un rendimiento más elevado, cuando sin almacenamiento se precisaba de dos plantas de generación operando durante largos intervalos de tiempo a bajo rendimiento.

Cuando se dispone de sistemas de almacenamiento se precisa lograr lo siguiente:

- Balance entre demanda y consumo.
- Gestionar las redes de transmisión y distribución
- Promocionar la gestión de la demanda
- Mejorar la competitividad y seguridad de la red eléctrica.

2 Tecnologías Utilizadas para el Almacenamiento de Energía

El Almacenamiento de energía consiste conservar energía, para luego ser liberada en su forma original, o en otra que a la que ha sido transformada. En la actualidad se almacena energía en forma de energía cinética o potencial, para a posteriori ser convertida en energía eléctrica.

En la tabla 1. Se muestra las diferentes tecnologías que se utilizan para el almacenamiento de energía [3].

Tabla 1. Almacenamiento por tipo de tecnología [3]

Almacenamiento de energía	
Energía cinética	Tecnologías térmicas
	Tecnologías eléctricas
Energía potencial	Tecnologías mecánicas
	Tecnologías químicas
	Tecnologías electroquímicas

A continuación, se recurre a describir cada tipo de almacenamiento especificado en la tabla anterior, con la finalidad de entender su tecnología, su fiabilidad y su rentabilidad en el mercado de la energía eléctrica [3]:

2.1 Energía cinética

La energía cinética se define como la energía que posee un cuerpo debido a su movimiento. Cuando hablamos de almacenamiento de energía cinética, se destacan tres tipos de tecnologías que son las siguientes:

2.1.1 Tecnologías Térmicas

El almacenamiento térmico es un método, de almacenamiento que aprovecha el calor, subiendo o bajando la temperatura de una sustancia, cambiando la fase de la sustancia o una combinación de estos [3].

En este tipo de almacenamiento hay que tomar en cuenta tres criterios básicos [4]:

Período de acumulación: Tiene en cuenta el período de tiempo de acumulación, que puede ir desde una acumulación a corto plazo (horaria, diaria) a una acumulación a largo plazo (mensual, anual).

Temperatura acumulada: Se puede diferenciar entre acumulación de frío y acumulación de calor a baja, media y alta temperatura.

Principio básico de acumulación: en el que se definen tres sistemas básicos: sensible, latente y termoquímica.

En la figura 1 [5], se muestra un esquema básico de un sistema de almacenamiento térmico, que desglosa lo expuesto anteriormente [6] [7]:

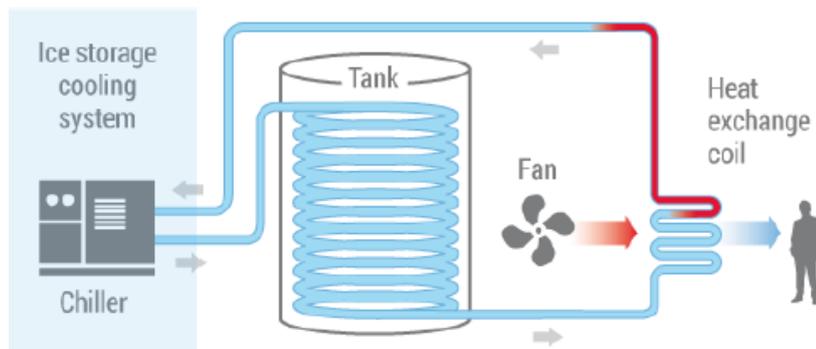


Ilustración 1. Sistema térmico de almacenamiento

- Almacenamiento sensible: Sistemas basados en el calor específico del medio de acumulación, que generalmente está almacenado en un acumulador debidamente aislado.
- Almacenamiento latente: Sistemas basados en el calor latente, o de cambio de fase, de los materiales de acumulación, que son capaces de liberar/absorber energía durante los procesos de cambio de fase a una temperatura constante.

- Almacenamiento termoquímico: Sistemas basados en la capacidad de las reacciones químicas de generar o consumir energía.

2.1.1.1 Ventajas del almacenamiento térmico

- La acumulación de calor procedente de sistemas de recuperación de energía térmica residual permite reducir el consumo de energía primaria en usos industriales, en edificios con elevados consumos térmicos o en centrales de generación eléctrica [3].
- Absorber los consumos en horas pico y disminuir el tamaño de los sistemas de generación.
- Reducir desviaciones temporales entre los perfiles de generación y de consumo.
- Facilitar la utilización de fuentes de energías renovables.
- Optimizar los sistemas híbridos de generación con distintas fuentes de energía y calor residual, muy común en procesos industriales, redes de distribución de calor y/o sistemas de climatización de edificios.
- Capacidad para combinar sistemas de almacenamiento basados en calor sensible con bombas de calor, potenciando su uso en los sistemas de calefacción y refrigeración de edificios.

2.1.1.2 Desventajas del almacenamiento Térmico

- La inserción de los sistemas de generación en acumuladores domésticos, presenta limitaciones importantes de gestión y rendimientos mejorables.
- La acumulación de calor termoquímica se encuentra en sus primeras fases de investigación.
- No existe regulación para el potencial mercado de la energía térmica almacenada.

- Reducido número de experiencias en el uso de acumulación estacional y los sistemas de gestión de carga y descarga. [8]

2.1.2 Tecnologías Eléctricas

Las tecnologías eléctricas que se han trabajado para el almacenamiento de energía, han basado su enfoque en supercondensadores o ultracondensadores y superconductores, brindándole al sector un punto de partida importante, para que, en un futuro próximo, estas tecnologías eléctricas de almacenamiento puedan ser explotadas en mayor dimensión.

2.1.2.1 Almacenamiento de energía por Supercapacitores o Supercondensadores

Los supercondensadores (figura 2), son dispositivos de almacenamiento de energía eléctrica en forma de cargas electrostáticas confinadas en pequeños dispositivos, formados por pares de placas conductoras separadas por un medio dieléctrico. La construcción y funcionamiento es similar a un condensador convencional a gran escala. Un supercondensador puede llegar a tener capacidades del orden de miles de faradios. Los supercondensadores se caracterizan por poder ser cargados y descargados en brevísimos períodos de tiempo, del orden de segundos o menos, lo cual los hace especialmente apropiados para responder ante necesidades de puntas de potencia o ante interrupciones de suministro de poca duración. Ello es debido a que el almacenamiento de cargas es puramente electrostático [9].



Ilustración 2. Supercapacitores

2.1.2.1.1 Ventaja del almacenamiento de energía con supercapacitores o supercondensadores

- La principal ventaja de los superconductores es la capacidad de inyectar potencia, aunque con poca densidad de energía.
- **Los supercondensadores son la rapidez con que se cargan y descargan.**
- Pueden proporcionar corrientes de carga altas, cosa que deteriora a las baterías.
- No necesitan mantenimiento.
- No presentan en su composición elementos tóxicos.

2.1.2.1.2 Desventaja del almacenamiento de energía con supercapacitores o supercondensadores

- La principal desventaja de los supercondensadores es la limitada capacidad de almacenar energía, y a día de hoy, su mayor precio.

2.1.3 Almacenamiento por la energía magnética de los superconductores

Los sistemas de almacenamiento de energía magnética por superconducción (SMES) fueron diseñados originalmente para satisfacer variaciones en la demanda diurna. Quizás su mejor característica es que es altamente eficiente; se ha estimado que una unidad puede tener un 90% de eficiencia [10] [11].

Las unidades de almacenamiento de energía magnética por superconducción (SMES) almacenan energía de la misma forma que lo haría un inductor convencional. Ambos, almacenan energía en el campo magnético creado por las corrientes que fluyen a través de un alambre bobinado. La principal diferencia radica en que, en el SMES, una corriente continua fluye a través de un hilo/cable superconductor; esto significa que dicho hilo/cable se encuentra a temperaturas criogénicas y no muestra resistencia conductiva alguna [12].

El hecho que no exista resistencia óhmica en el alambre implica que no hay disipación térmica, por consiguiente, la energía puede almacenarse en el SMES virtualmente por tiempo indefinido hasta que sea requerida. Dado que la energía es almacenada como corriente circulatoria, puede extraerse de las unidades SMES con una respuesta casi

instantánea siendo entregada o almacenada en períodos que varían de fracciones de segundos a algunas horas [12].

2.1.3.1 Ventajas de almacenamiento por la energía magnética de los superconductores

- Tienen la capacidad de proveer energía al sistema (reserva rodante o *spinning reserve*) si se presenta una pérdida en la generación.
- Pueden proveer estabilidad durante transitorios ya que amortigua las oscilaciones presentes en las líneas de transmisión.
- Pueden amortiguar cambios bruscos de tensión.
- El sistema de almacenamiento en general es relativamente pequeño en tamaño en comparación con otros sistemas de almacenamiento y su ubicación no se ve limitada a algún área específica.

2.1.3.2 Desventajas de almacenamiento por la energía magnética de los superconductores

- La necesidad de disponer de un sistema de enfriamiento.
- La necesidad de disponer de sistemas modulares para favorecer la escalabilidad de los sistemas.
- El coste se torna muy elevado.
- Los elementos que se utilizan son muy escasos, para las bobinas superconductoras. Como por ejemplo el helio, que se utiliza para los procesos de enfriamiento de estas bobinas superconductoras.
- La dificultad de disponer de elementos superconductores en forma de cables robustos a causa de que muchos de los materiales superconductores son cerámicos difíciles de industrializar y de implementar en forma de bobinas.

2.1.3 Tecnologías Mecánicas

Cuando nos referimos a las tecnologías mecánicas que se utilizan para el almacenamiento de energía, debemos considerar que lo podemos hacer en forma de energía cinética o energía potencial, por la gran repercusión de la mecánica en los diferentes extractos.

2.1.3.1 Volantes de Inercia

Los volantes de inercia (Figura 3), son dispositivos mecánicos que permiten el almacenamiento de energía cinética de rotación que es facilitada por un motor eléctrico, de la misma manera que se utiliza una cuerda enrollada a la peonza para comunicarle energía cinética rotacional. Estos dispositivos se caracterizan por su elevado momento de inercia, lo que les confiere una gran resistencia a los cambios de energía rotacional. Fundamentalmente, se puede considerar una batería mecánica que requiere para cargarse un aporte de energía que aumente su velocidad de rotación, función que realiza la máquina eléctrica conectada al volante de inercia cuando dicha máquina trabaja como motor eléctrico. Al igual que ocurre con la peonza, es esencial que las pérdidas por rozamiento estén minimizadas [3].

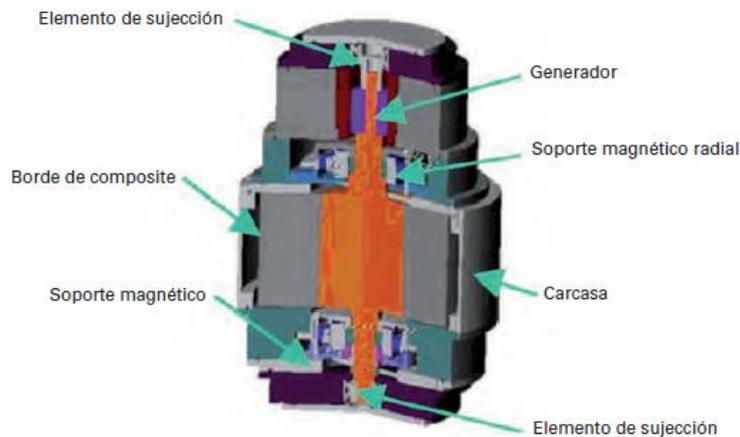


Ilustración 3. Componentes de volante de inercia

2.1.3.1.1 Ventajas de almacenamiento de energía con volantes de inercia

1. No contienen sustancias tóxicas.
2. Se puede almacenar gran cantidad de potencia y de energía.
3. Muy rápida capacidad de respuesta.
4. Poco mantenimiento y esperanza de vida de 20 años (más de 100.000 ciclos).

5. Elevada eficiencia de energía (alrededor del 85%). Algunos autores agregan que las eficiencias de estos podrían llegar a ser mayor de 95%, pero en la realidad no es más que el 85%.

2.1.3.1.2 Desventajas de almacenamiento de energía con volantes de inercia:

1. Tiene un elevado coste inicial, aunque se estima que, para su penetración en el mercado, irá disminuyendo a medida que pasan los años.
2. Utilización de equipamiento pesado para asegurar su correcto funcionamiento.

2.2 Energía potencial

2.2.1 Tecnologías mecánicas

2.2.1.1 Almacenamiento por bombeo (hidroeléctrica reversible)

Una central hidroeléctrica de bombeo es un tipo especial de central hidroeléctrica que tiene dos embalses (como se muestra en la figura 4). El agua contenida en el embalse situado en el nivel más bajo (embalse inferior), es bombeada durante las horas de menor demanda eléctrica al depósito situado en la cota más alta (embalse superior), con el fin de turbinarla, posteriormente, para generar electricidad en las horas de mayor consumo eléctrico [3].

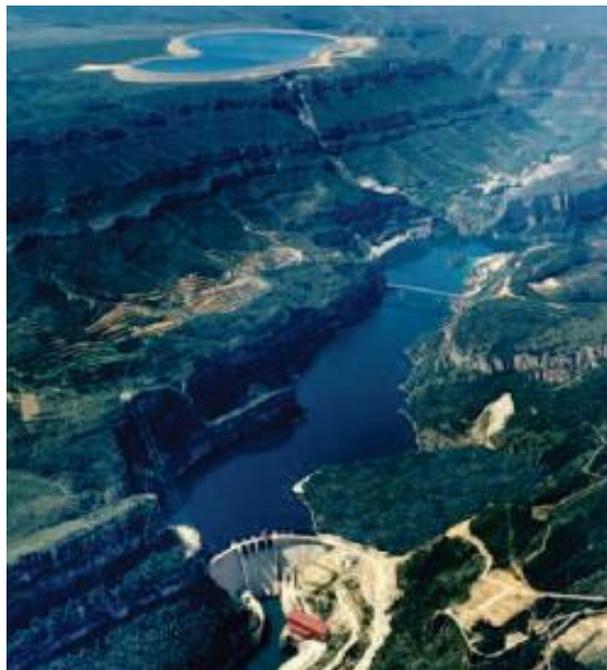


Ilustración 4. Almacenamiento de energía por bombeo

2.2.1.2 Ventajas de almacenamiento de energía por bombeo

- Permiten una mejora en la eficiencia económica de la explotación del sistema eléctrico al almacenar electricidad en forma de agua embalsada en el depósito superior. Constituye en la actualidad la forma más económica de almacenar energía eléctrica.

2.2.1.3 Desventajas de almacenamiento de energía por bombeo

- Las limitaciones geográficas.
- Las limitaciones impuestas por las actuales turbinas reversibles, que no satisfacen todos los requerimientos de estabilidad en la zona de operación entre los dos modos, así como por la falta de flexibilidad en las condiciones de trabajo de las mismas. Actualmente, no permiten bajos regímenes de funcionamiento debido a su alta sensibilidad al nivel hidráulico.
- Las limitaciones impuestas por los tiempos de arranque y de transición entre regímenes de funcionamiento.

2.2.2 Almacenamiento de energía por aire comprimido

El almacenamiento de energía por aire comprimido es conocido como **CAES** (*Compressed Air Energy Storage*), el aire a altas presiones es almacenado en depósitos bajo tierra naturales o artificiales (minas abandonadas, cavidades rellenas en soluciones minerales ó acuíferos) durante las horas de baja demanda. Posteriormente, en las horas pico, el aire almacenado se expande, moviendo un turbo generador.

En la figura 5 se muestra un esquema correspondiente a este tipo de almacenamiento [5]:

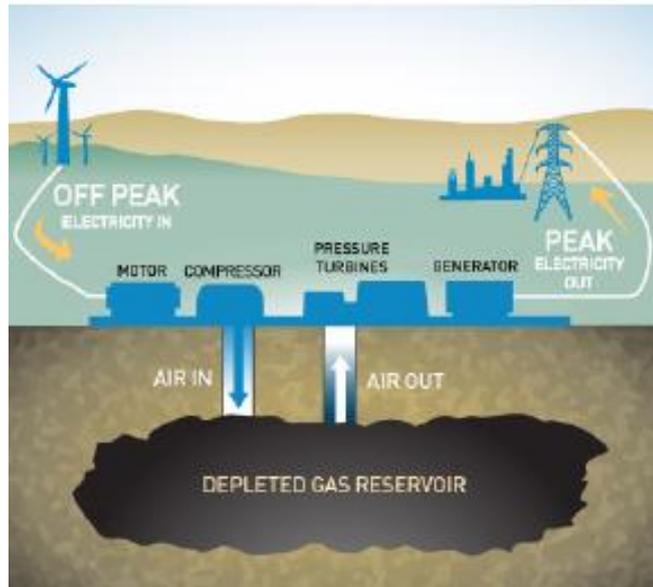


Ilustración 5. Sistema de almacenamiento por Aire comprimido

2.2.2.1 Ventajas de almacenamiento por aire comprimido

- El almacenamiento por aire comprimido procura mucha potencia, pudiendo llegar a los 100 MW, y es una buena solución para dar estabilidad a la red [4]
- El almacenamiento de energía con aire comprimido es un método no sólo ecológicamente eficiente y limpio, sino también económico.
- La filosofía de este tipo de plantas se basa en aprovechar la energía eléctrica sobrante y de bajo coste para comprimir el aire en un almacenamiento subterráneo, y más tarde utilizarlo para alimentar una turbina generadora para alimentar a la red eléctrica durante los periodos de alta demanda energética.
- Cuando se requiere la energía almacenada, se utiliza el aire comprimido para alimentar turbinas de gas de alto rendimiento, pudiéndose regenerar hasta el 80% de la energía almacenada.

2.2.2.2 Desventajas de almacenamiento de energía por aire comprimido

- Restricciones por su limitación geológica, debido a que la geología adecuada para este tipo de almacenamiento son sal, roca dura y roca porosa.
- Este sistema de almacenamiento exige estructuras y materiales específicos para que pueda ser rentable su uso [3].

2.2.3 Tecnologías Electroquímicas

Las tecnologías electroquímicas basan su principio físico en reacciones químicas de oxidación y reducción producidas en el interior de las celdas. El cátodo, que es el polo positivo, queda separado del ánodo, polo negativo, mediante la existencia de un separador poroso, los iones fluyen entre tecnologías de almacenamiento eléctrico y sus aplicaciones para la red eléctrica y el consumidor. Las dos cargas positiva y negativa a través de un electrolito. La reacción química en la celda produce una tensión y una intensidad determinadas, oscilando la tensión máxima producida (a circuito abierto) por cada celda entre 1 y 4 Voltios de tensión dependiendo del tipo de la misma [13].

2.2.3.1 Tipos de tecnologías Electroquímicas

2.2.3.1.1 Baterías de plomo ácido

2.2.3.1.1.1 Ventajas de las baterías de plomo ácido

- Las baterías de plomo ácido son las que mayor madurez tecnológica poseen, habiendo sido ya utilizadas en el siglo XIX, existen multitud de variantes en la actualidad.
- Este tipo de baterías destacan por su bajo coste, alto grado de desarrollo y baja necesidad de mantenimiento, encontrando un amplio campo de aplicación en las tecnologías de generación renovable, especialmente fotovoltaica [7].

2.2.3.1.1.2 Desventajas de las baterías de plomo ácido

- Sufren generalmente de sulfatación como mecanismo principal de degradación. Esto provoca una disminución en la capacidad y en la vida útil de la batería, siendo estos dos parámetros de los más bajos en comparación con otras alternativas de almacenamiento electroquímico.

2.2.3.1.2 Baterías alcalinas

2.2.3.1.2.1 Ventajas y desventajas de las baterías alcalinas

- Las baterías alcalinas poseen en general una mayor cantidad de energía específica y un rango de temperaturas más amplio que las de plomo ácido.
- Tienen un elevado costo y su reducido número de ciclos de vida útil.
- Uno de las variantes más conocidas de esta tecnología, las ya mencionadas de níquel-cadmio, poseen una velocidad de carga muy elevada pero también sufren de un efecto negativo relacionado con la “memoria” de la batería, dificultando la operación de la celda y reduciendo su vida útil.

2.2.3.1.3 Baterías de sales fundidas

Las baterías de sulfuro de sodio (NaS) y las de sodio metal haluro (Na/NiCl₂) son las alternativas actualmente existentes de esta tecnología, utilizando ambas, una variedad de sales fundidas como electrolito de la reacción química, por lo que las temperaturas de operación serán elevadas (entre 270 y 350 °C), siendo utilizadas para largos periodos de descarga, normalmente unas 6 horas, aunque puede ser algo mayor si poseen suficiente capacidad. **Poseen una buena ciclabilidad**, energía específica y eficiencia, aunque su coste es elevado, así como los períodos de precalentamiento necesarios a las temperaturas de operación anteriormente mencionadas. Otra de sus principales características es que el fenómeno de autodescarga es prácticamente inapreciable, por lo que su eficiencia de carga es prácticamente la unidad [14].

2.2.3.1.4 Baterías de ion-litio

Este tipo de baterías posee una de las tecnologías más esperanzadoras y con mayor perspectiva de futuro dentro del campo del almacenamiento electroquímico, poseyendo elevados valores de energía específica (entre 80 y 200 Wh/Kg), **alta ciclabilidad** (pudiendo alcanzar los 5.000 ciclos), bajos valores de autodescarga y alta eficiencia (entre un 80 % y un 90 %).

A pesar de lo anterior, es una tecnología aún en desarrollo con costes elevados, problemas de seguridad (la densidad energética de las celdas, unido a la inflamabilidad del litio y la

presencia de oxígeno pueden provocar sobrecalentamientos e incendios), causando multitud de problemas como sobrecalentamiento, sobrecarga o sobredescarga. Se deben considerar por tanto sistemas de evacuación de calor y otros elementos de diseño que limiten la profundidad de descarga, por ejemplo, entre otros elementos. Son diversos los materiales para ánodos y cátodos, que combinándolos dan lugar a una amplia variedad de baterías englobadas en esta tecnología [15].

Estas baterías encuentran su mayor uso en aplicaciones que realicen ciclos cortos de descarga (menos de 4 horas). Su alta densidad energética y potencia específica, las hace ideales además para regulación de frecuencia.

2.2.3.1.4 Baterías Redox-Vanadio

A diferencia de las anteriores, la principal peculiaridad de las baterías de flujo es que el electrolito se encuentra separado de la celda electroquímica, situándose en dos tanques, uno para el ánodo y otro para el cátodo, quedando la capacidad determinada por el tamaño de estos tanques, mientras que la potencia es función del número de celdas colocadas en fila. Las principales variantes de esta familia son las baterías de vanadio y las de zinc-bromo, aunque existen otras propuestas en desarrollo.

Este tipo de baterías es prácticamente inmune a la autodescarga, pudiendo ser descargadas totalmente sin que se acelere la degradación de la misma. Su ciclabilidad es una de las principales ventajas de la batería de flujo, superando los 12.000 ciclos con una profundidad de descarga del 100 % y un rango de temperatura de entre 10 y 35 °C, con tiempos de carga y descarga de entre 2 y 10 horas. Estas baterías sin embargo tienen como grandes limitaciones su baja energía específica (en torno a 11 Wh/Kg, lo que dificulta gravemente su aplicación para tamaños pequeños), un alto coste y un bajo grado de madurez [3].

2.2.4 Tecnologías Químicas

Cualquier excedente en la producción de energía eléctrica puede transformarse en energía química mediante electrólisis del agua. Ello es especialmente útil en los casos en los que se dispone de un elevado porcentaje de fuentes renovables para las que no se puede controlar ni programar la disponibilidad de viento o de sol.

2.2.4.1 Baterías de hidrógeno

El hidrógeno se puede producir y almacenar de distintas maneras, además de la existencia de procesos de conversión a electricidad. Las fuentes van desde el gas natural al carbón, los procesos de obtención de H₂ gas desde el reformado de metano a la gasificación pasando por la oxidación parcial.

Por otro lado, para el almacenamiento, desde la acumulación en tanques en estado líquido a gaseoductos son las opciones utilizadas y en cuanto a la conversión a electricidad, existen distintos tipos de celdas de combustible, algunas mejores que otras según el tipo de aplicación. Estas celdas de combustible se consideran importantes para el desarrollo del vehículo eléctrico. Sin embargo, esta tecnología aún posee un grado de madurez baja [3].

2.3 Impacto del almacenamiento de energía en los diferentes niveles del sector eléctrico

La incorporación de los sistemas de almacenamiento en el sector energético ha creado impacto significativo en todos los niveles, desde la generación de energía hasta el consumidor final (figura 6) [16] [17] [18] [19] [20] [21]. La diversa funcionalidad y aplicación en el campo energético hacen del almacenamiento, un sistema útil y necesario, para el sector hoy en día. El almacenamiento energético puede ser aplicado como centrales de generación convencionales, también como reguladores de frecuencia, e incluso para atenuar picos de potencia [4]. Aunque el tema principal de este trabajo es el

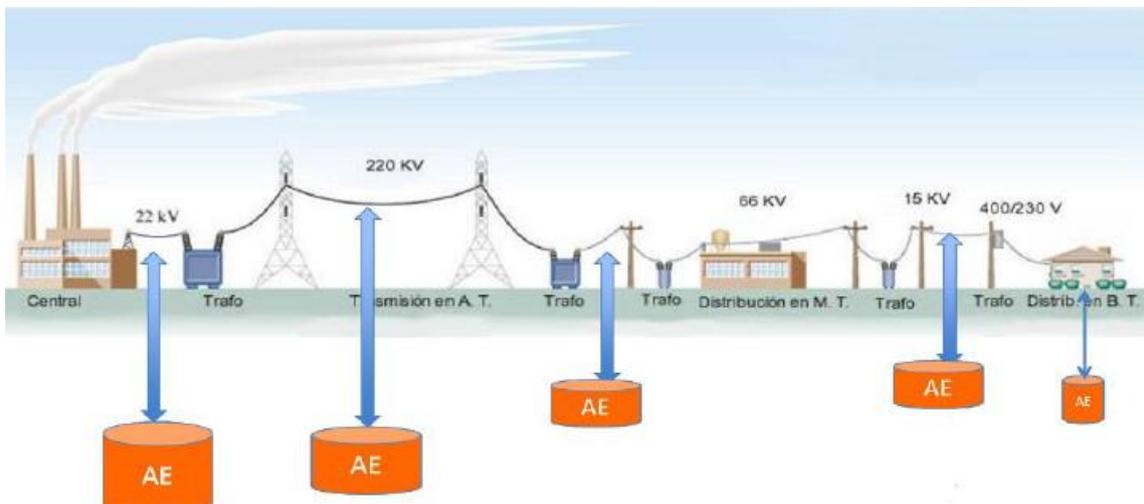


Ilustración 6. Sistemas de almacenamiento en los diferentes niveles del sistema eléctrico

almacenamiento en los sistemas eléctricos de distribución, hay que mencionar el uso del almacenamiento por los generadores, distribuidores y sistemas de transmisión de energía, aunque el mayor enfoque sigue siendo el almacenamiento de energía en redes eléctricas de distribución y consumidores finales.

A continuación, se describe los beneficios y aplicación en los diferentes niveles, desde la generación hasta el consumidor final:

2.3.1 Utilidad de almacenamiento en los sistemas de generación

Los generadores deben ofrecer al sector criterios de estabilidad de frecuencia. La forma habitual de controlar la frecuencia es variando la potencia de salida de los generadores. Basándonos en este principio, los sistemas de almacenamiento pueden utilizarse para controlar frecuencia.

Hay que considerar que la energía generada debe ser igual en todo momento a la energía demandada. Manteniendo el sistema bajo los criterios de estabilidad. Basándonos en este concepto los generadores energéticos pueden utilizar el almacenamiento energético, para aplanar la curva de demanda, mejorar la eficiencia, disminuir costes y de igual manera el consumo de combustible. La utilidad ideal, es almacenar energía en las horas valles (donde el consumo de energía es menor que en otros periodos), para liberarlo en períodos puntas (donde está el mayor consumo energético del sistema).

Cuando el sistema eléctrico se encuentra en un estado de emergencia, en los sistemas de almacenamiento tenemos una poderosa fuente de energía para subsanar esta necesidad [4].

2.3.2 Utilidad del almacenamiento en las redes de transporte

La construcción de líneas de transmisión se debe en muchos casos, a que la demanda ha aumentado, sin embargo, podemos postergar la construcción de estas líneas, utilizando

almacenamiento donde se requiera, para producir esta energía demandada. En fin, lo que se requiere es proponer pequeños almacenamientos al extremo de líneas sobrecargadas. En diferentes sistemas eléctricos, ante diferentes perturbaciones se dividen en islas aisladas. En esta ocasión lo que se estipula es tener generación disponible para suplir la demanda ante estas situaciones de emergencia. Se puede utilizar almacenamiento para hacer el suministro de potencia a los consumidores, ante esta situación. Lo que provocaría que con generadores de poca capacidad y un sistema de almacenamiento se resuelva el problema.

2.3.3 Utilidad del almacenamiento en redes de distribución

El almacenamiento en las redes de distribución puede utilizarse para atrasar o evitar inversiones necesarias para mantener la adecuada capacidad en las redes de distribución, para alimentar todas las cargas. El aplazamiento de las mejoras podría ser el reemplazo de un transformador de distribución viejo o sobre cargado en una subestación o instalar conductores más gruesos en una línea de distribución.

Cuando un transformador se sustituye por uno de mayor capacidad, la capacidad de este se selecciona de forma tal que se tenga en cuenta el crecimiento de la carga en un período de unos 15 a 20 años. Por lo tanto, gran parte de esta inversión es sub utilizada la mayoría del tiempo de vida útil del equipo.

La instalación del nuevo transformador puede aplazarse usando un sistema de almacenamiento para descargar el transformador durante los períodos de pico, así se extiende su vida operacional durante varios años. Si el sistema de almacenamiento se encuentra dentro de un contenedor, de forma tal que se pueda trasladar físicamente, se pudiera mover a otras subestaciones que lo necesitaran una vez deje de necesitarse, para así maximizar el retorno de la inversión.

El resultado de esta estrategia es que también se puede disminuir el riesgo siempre presente de que el crecimiento de la carga planeado no ocurra, lo que podría echar por tierra la inversión hecha en la distribución. Este podría ser el caso cuando una inversión grande, como un gran supermercado o un barrio residencial, no se materializan debido a que el constructor retrasa o cancela el proyecto después de que la infraestructura eléctrica ya se ha desarrollado para el incremento de la nueva carga. El almacenamiento no solo permite el aplazamiento del punto de decisión de la mejora, sino que también proporciona

tiempo para evaluar con certeza si el incremento de la carga se materializará, tiempo que podría ser de dos a tres años.

Los sistemas de almacenamiento que se usan para el aplazamiento de las mejoras en las redes de distribución podrían apoyar simultáneamente en el control de voltaje en las líneas de distribución. Los equipos regulan el voltaje dentro de límites específicos mediante los reguladores de las tomas de los transformadores en las subestaciones de distribución y capacitores variables para alimentar el reactivo de las cargas. Esto es especialmente importante en las líneas radiales largas, donde se encuentre una carga grande, como un equipo de soldadura de arco, o una planta fotovoltaica residencial, podría causar inaceptables desviaciones de voltaje en los clientes cercanos. Estas fluctuaciones de voltaje podrían ser amortiguadas efectivamente con una cantidad mínima de potencia real cargada por un sistema de almacenamiento [8].

2.3.4 Utilidad del almacenamiento al consumidor final (Cliente doméstico o industrial)

Uno de los objetivos de este trabajo es demostrar de qué manera se puede utilizar almacenamiento para brindarle seguridad a los consumidores que se encuentran aguas abajo de los sistemas de almacenamiento contra eventos de corta duración que afectan la calidad de la energía servida a las cargas de los consumidores.

Cuando nos referimos a los eventos que podrían afectar la calidad del servicio, nos enfocamos en lo siguiente:

- Variación de tensión
- Bajo factor de potencia.
- Presencia de armónicos.
- Interrupciones del servicio.

En fin, los sistemas de almacenamiento se descargan lo necesario, para amortiguar cualquier evento; al que ha sido sometido. Cabe destacar que estos eventos pueden durar desde pocos segundos hasta varios minutos.

Cuando hay una interrupción de suministro, se puede utilizar de forma efectiva el almacenamiento de energía. Este servicio requiere que tanto el sistema de almacenamiento como las cargas de los clientes se encuentren aislados durante el corte

de suministro y que sea capaz de sincronizarse a la red cuando el suministro se restablece. La capacidad de energía del sistema de almacenamiento con respecto al tamaño de la carga que está protegiendo determina el tiempo que el almacenamiento puede servir a la carga.

El desplazamiento en el tiempo de la venta de energía eléctrica a los clientes significa un sistema de almacenamiento que se usa por los consumidores finales de energía (clientes de la compañía eléctrica) para reducir sus consumos globales de energía y con ello el costo de esta. Los clientes cargan el almacenamiento durante las horas de valle cuando el precio de la energía es bajo, después descargan esta energía cuando se aplican los precios de la energía para las horas de pico. Esta aplicación es similar al desplazamiento en el tiempo de la energía eléctrica, aunque aquí los precios de la energía se basan en la tarifa eléctrica para el cliente, mientras que para cualquier hora el precio para el desplazamiento en el tiempo de la energía se refiere al precio del mercado eléctrico.

El almacenamiento de energía puede ser usado por los usuarios (clientes de la compañía eléctrica) para reducir sus costos globales de electricidad reduciendo su demanda durante los períodos de pico especificados por la compañía. Por ejemplo, para el caso concreto de la República Dominicana, las compañías de distribución de energía eléctrica, para evitar un cargo adicional por la demanda, las cargas deben reducirse durante todas las horas del período de recargo por la demanda, usualmente durante un período específico de tiempo (de 17:00 p.m. a 23:59 pm) y en días específicos (con mayor frecuencia los días entre semana). Este recargo varía dependiendo de la programación de la demanda diaria que se haya estructurado, y el costo varía dependiendo el porcentaje de desviación con relación a la energía real consumida comparándola con la energía programada.

Los recargos a la demanda más significativos son los que se basan en la máxima carga durante el período de pico de la demanda (por ejemplo, 18:00 p.m. a 22:00 p.m.) en cualquier época del año.

Estos recargos a la demanda están impuestos por las organizaciones competentes, con el propósito fundamental de poseer una fina estimación del consumo y una cantidad estructurada de la energía que se requiere comprar [22].

3 Evaluación de las diferentes tecnologías de almacenamiento energético

En esta sección se busca analizar y detallar la clasificación de las tecnologías según su grado de desarrollo (ver anexo A). De la misma manera se compara el coste de la energía por el sistema de almacenamiento, dependiendo del tipo de tecnología que se esté utilizando. Basado, en las estrategias de cálculos que posteriormente se mencionarán, se recurre a realizar comparaciones, y comprobar la factibilidad y viabilidad de los diferentes sistemas de almacenamiento en una red de distribución [23].

En primera instancia, se empezará detallando el grado de madurez que poseen los diferentes sistemas de almacenamiento (ver tabla 2 en anexo A), luego se evalúan bajo algunos criterios y se realiza un análisis de coste para su posterior incorporación ante diferentes escenarios que se podrían presentar en las redes eléctricas de distribución y en los consumidores finales de energía eléctrica (ver anexo A) [24].

Basado en el grado de desarrollo de las diferentes tecnologías de almacenamiento, se escogen las tres tecnologías más viables, para comprobar su rentabilidad. Para ello también se toman en cuenta las ventajas que ofrecen, y el dimensionamiento para ser instaladas a nivel de distribución.

En la tabla 3, (ver anexo A), se analizan las características de las posibles tecnologías a evaluar, para su incorporación en redes eléctricas de distribución y en los clientes finales pertenecientes a las diferentes empresas de distribución.

Basados en estas características, se analiza una comparación directa de cada tipo de tecnología de almacenamiento, y en la sección 3.1, se inicia con el proceso de comparación.

3.1 Criterios de evaluación de las diferentes tecnologías de almacenamiento

Según los datos mostrados en el anexo A, se comparan todos los criterios de evaluación, para la selección de un sistema de almacenamiento, para su posterior aplicación a una red de distribución.

3.1.1 Eficiencia

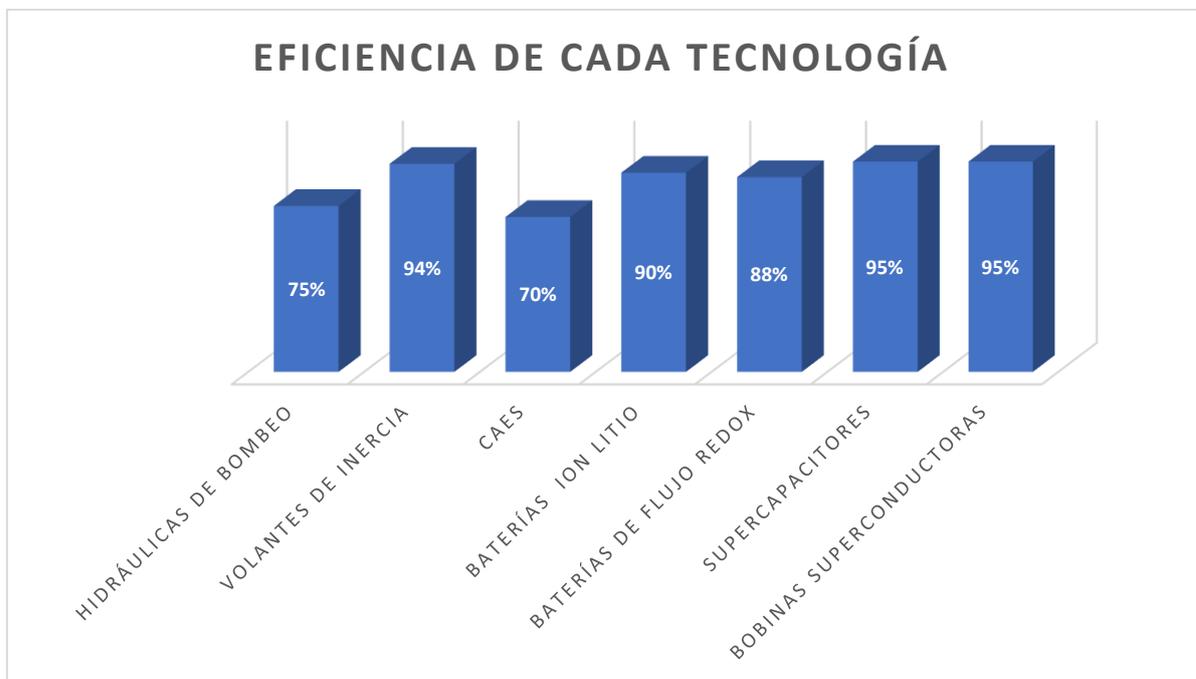


Ilustración 7. Eficiencia de cada tecnología evaluada

En esta gráfica podemos observar la eficiencia que presentan los diferentes tipos de tecnologías evaluados. Esta evaluación se refiere al rendimiento de carga y descarga en cuanto al ciclo completo. Se puede verificar que los almacenamientos por bobinas superconductoras, los supercapacitores y volantes de inercia poseen mejor eficiencia que las demás tecnologías. (Ver anexo A)

3.1.2 Durabilidad

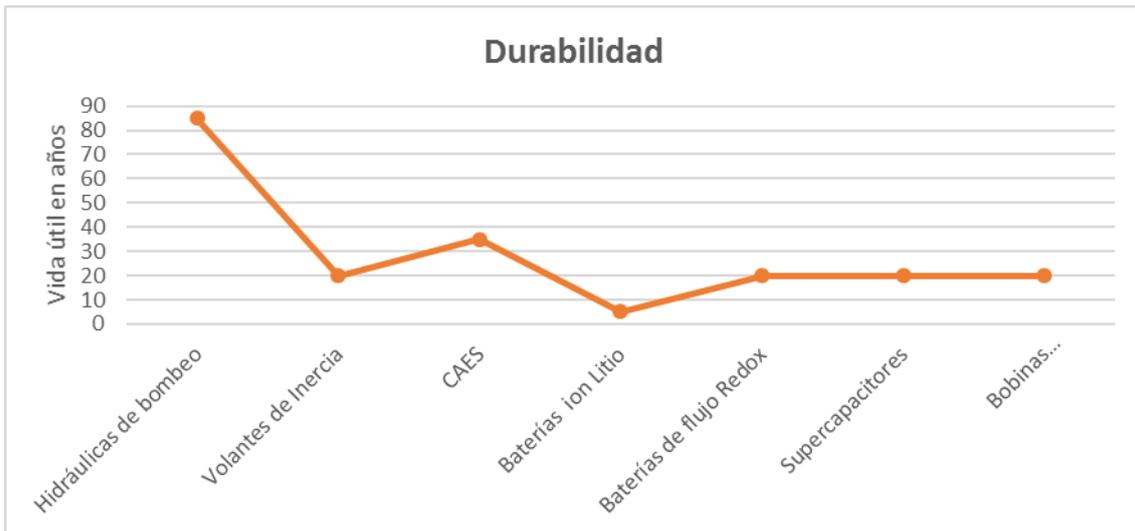


Ilustración 8. Durabilidad

En esta gráfica podemos observar la durabilidad de los diferentes sistemas de almacenamiento presentados, en donde es de notar que el almacenamiento por bombeo es el de mayor duración, sin embargo, hay que evaluar si es necesario una alta durabilidad en los diferentes escenarios que se pueden presentar en los sistemas eléctricos de distribución.

3.1.3 Densidad de energía y potencia de almacenamiento

En este caso ya se ha descartado el sistema de almacenamiento por bombeo. El motivo que los sistemas de almacenamiento tienen limitaciones geográficas y el objetivo de este trabajo es ponderar un sistema de almacenamiento para las redes de distribución y uso doméstico. (para más detalle ver anexo A)

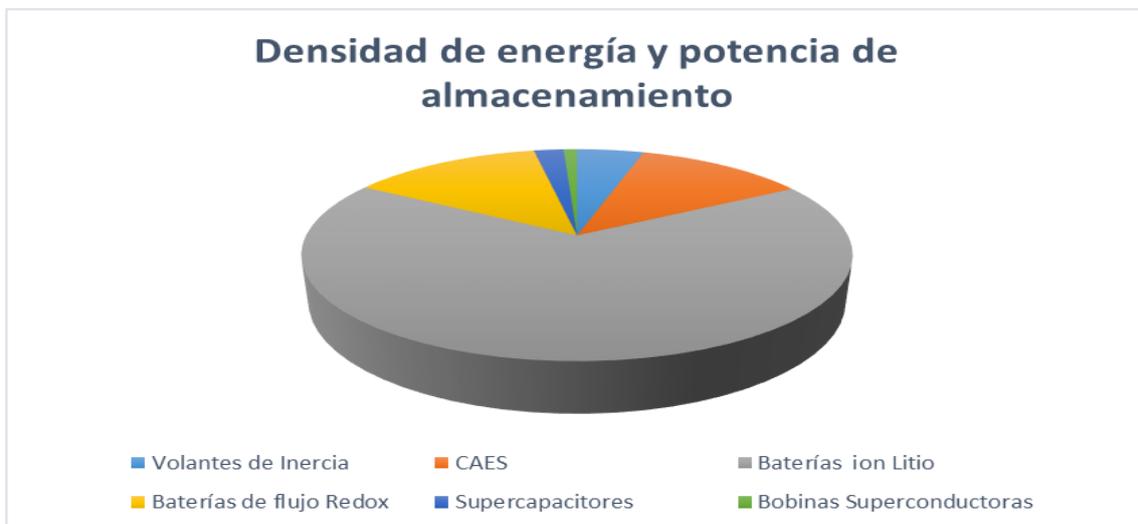


Ilustración 9. Densidad de energía y potencia de almacenamiento por tecnologías

En este caso se evalúa la densidad de energía y potencia de almacenamiento. Este tema tiene mucha relevancia para las redes de distribución y los clientes finales. Es de notar que las baterías de Ion-Litio, las baterías de flujo redox y los sistemas CAES, son los que poseen mayor densidad de potencia y energía de almacenamiento.

3.4.1 Tiempo de respuesta

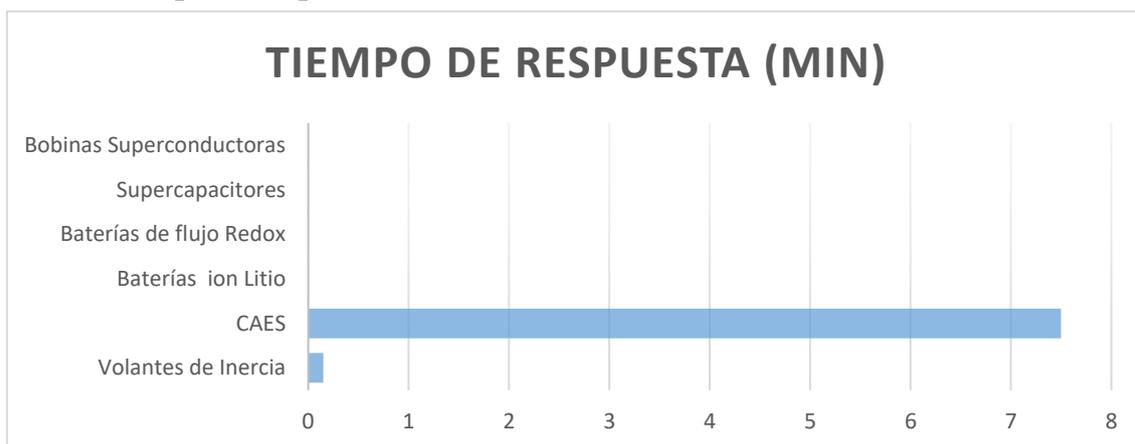


Ilustración 10. Tiempo de respuesta (Minutos)

Un punto muy importante ante perturbaciones transitorias que se presentan en los sistemas eléctricos de distribución es el tiempo de respuesta. En esta gráfica se puede verificar que los sistemas CAES para este tipo de funciones no sería factible.

3.1.5 Coste de la energía almacenada

El aspecto de mayor repercusión en todo el ámbito de los negocios es el aspecto económico. El almacenamiento de energía será la mejor alternativa siempre que sea la solución más factible, económicamente hablando. En este capítulo, se verificará la rentabilidad del almacenamiento, y las tecnologías de almacenamiento más factible para ser utilizada en las redes de distribución y en los consumidores finales.

La mayoría de las tecnologías analizadas anteriormente están todavía en una fase de intenso desarrollo tecnológico y esto se traduce en unos costes elevados. Instalaciones de bombeo de agua o baterías de plomo son tecnologías maduras (el desarrollo tecnológico de las baterías de plomo se ha llevado a cabo desde hace más de 140 años), pero otras tecnologías, como baterías de litio, de sodio-azufre, baterías de flujo, supercapacitores, etc., son relativamente jóvenes. Por estos motivos es fundamental la evaluación de costes para los sistemas de almacenamiento, de manera que se pueda comparar el valor del kWh

almacenado según diferentes tecnologías respecto al valor medio del kWh puesto en la red eléctrica según mercado.

Es necesario comparar la factibilidad almacenamiento en los consumidores finales, mirándolo desde el punto de vista económico, dimensionamiento físico, beneficios y utilidad.

3.1.5.1 Evaluación de costes de los sistemas de almacenamiento de energía

3.1.5.1.1 Coste de la energía generada por el sistema de almacenamiento LCOE

Finalmente, el coste de la energía generada por el sistema de almacenamiento expresado en €/kWh se obtiene del cociente entre el coste total del sistema y la producción total de energía durante la vida útil del mismo [3]:

$$LCOE = \frac{C_{total}}{E_{a*} * \sum_{j=i}^{j=n} \left[\frac{(1+w)}{(1+i)} \right]^j (1+i)^n}$$

Fórmula 1. Coste de la energía generada por el sistema de almacenamiento LCOE

A continuación, se presenta en la tabla 5 un resumen que contiene el coste de los diferentes sistemas de almacenamiento y sus características principales para su posterior utilización en las redes de distribución [14]:

Tabla 2. Costes por tipo de tecnología (Datos extraídos de informe de ECOFYS sobre almacenamiento de energía, publicado en el año 2014).

Tecnología	Coste (€/kW)	Coste (€/kWh)	Eficiencia	Tiempo de respuesta
Bombeo	1,500 - 2,700	138 - 338	80-82%	Seg-min
Aire comprimido	960 - 1,250	60 - 150	60-70%	Seg-min
Volante de inercia	1,950 - 2,200	7,800 - 8,800	85-87%	Instantáneo
Baterías plomo-acido	950 - 5,800	350 - 3,800	75-90%	Milisegundos
Baterías Ion-Litio	1,085 - 4,100	900 - 6,200	87-94%	Milisegundos
Baterías Redox	3,000 - 3,700	620 - 830	65-75%	Milisegundos
Supercapacitores	-	-	90-94% ¹³	Milisegundos
Superconductores	-	-	95% ¹⁴	Instantáneo

Para un mejor análisis se especifica el coste promedio por kW y por kWh:

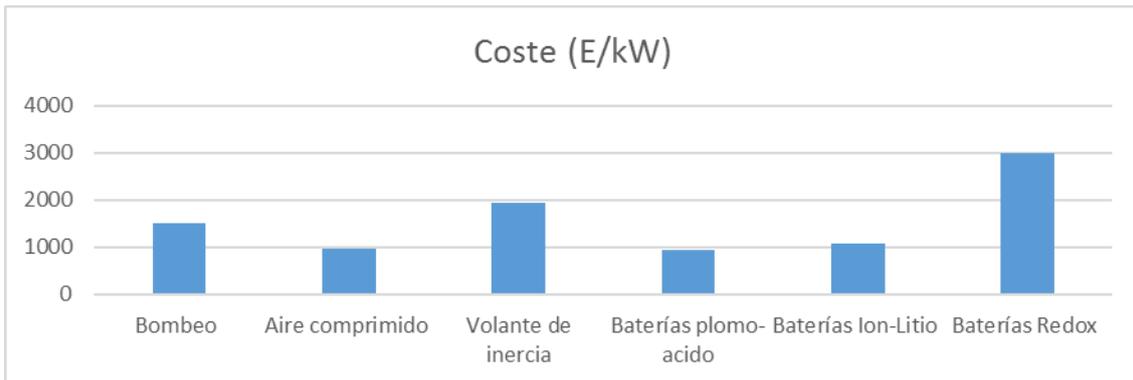


Ilustración 11. Coste por KW Instalado

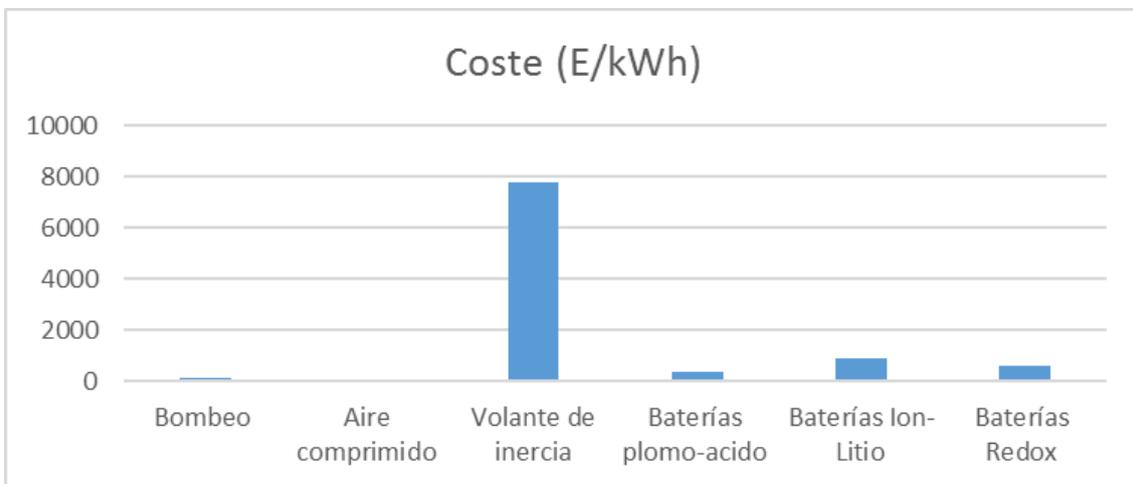


Ilustración 12. Coste por kWh producido

Como se ha podido verificar, el coste por tipo de tecnología en cuanto a kW instalado y a kWh producido es muy diverso a la hora de elegir el tipo de sistema de almacenamiento. Las centrales hidroeléctricas de bombeo son actualmente la única solución económica para esta tarea, pero su dificultad geográfica y las capacidades de las nuevas plantas son limitadas o incluso completamente utilizadas. Tecnologías y conceptos están disponibles, pero todavía necesitan más tiempo para ser maduros y económicos. Las plantas Adiabáticas CAES tienen buenos cambios para convertirse en una alternativa a las plantas hidroeléctricas bombeadas después de una exitosa fase de pruebas en diferentes proyectos como por ejemplo el proyecto ADELE en Alemania; Pero, se necesitará probablemente otra década antes de que esta tecnología llegue a ser comercialmente disponible y rentable para los operadores.

Las baterías sólo encontrarán su uso en sistemas descentralizados, ya que las tecnologías existentes son simplemente demasiado caras o necesitan una gran cantidad de recursos. La idea de almacenar la energía en hidrógeno o metano no es deseable debido a la baja eficiencia, pero es probable que juegue un papel en el futuro debido al gran potencial de almacenamiento. Como cada una de las tecnologías mostradas tienen sus propios beneficios y defectos, es posible que una mezcla de todos ellos entre en acción, dependiendo de las situaciones individuales hasta que en algún momento uno pueda avanzar lo suficiente y emerger sobre los demás [25].

Se analizará la rentabilidad para los diferentes tipos de tecnologías electroquímicas que han sido evaluadas, y a partir de ahí es necesario comprobar la viabilidad técnica-económica que representa cada una de ellas para una empresa de distribución de energía eléctrica, así como para los tipos de clientes que interfieren en las redes de dicha empresa.

4. Sistema eléctrico de la República Dominicana

En este capítulo se procede a describir el esquema tarifario de la República Dominicana. El propósito principal es comprender como funcionan los precios implantados a los clientes y verificar la rentabilidad real del negocio de la energía eléctrica, bajo el esquema incorporado en todo el territorio dominicano [26].

A continuación, se presentan los agentes directos que intervienen en el mercado eléctrico dominicano [27]:

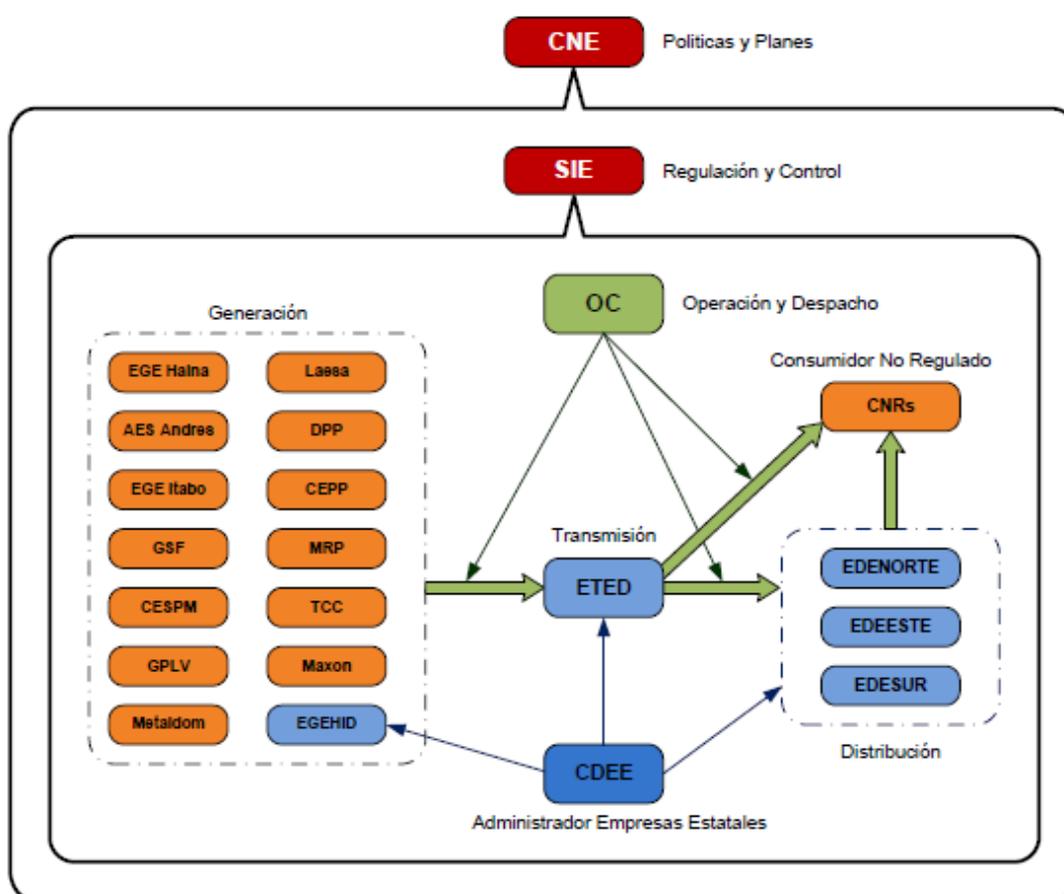


Ilustración 13. Agentes en el mercado eléctrico dominicano

4.1 Comisión nacional de energía (CNE)

Es la institución encargada de trazar las políticas del Estado y supervisar la operación del sector energético de República Dominicana.

4.2 Superintendencia de electricidad (SIE)

Es el organismo regulador, encargado de fiscalizar y supervisar el cumplimiento de las disposiciones legales y reglamentarias, así como las normas técnicas en relación con la generación, transmisión, distribución y comercialización de electricidad en República Dominicana.

4.3 Organismo coordinador del sistema eléctrico nacional interconectado (OCSENI)

Es el encargado de coordinar y supervisar la operación del mercado eléctrico mayorista. Los miembros de la organización son las entidades corporativas que participan en el mercado eléctrico mayorista, esto es, las empresas eléctricas de generación, transmisión, distribución y comercialización, y los auto productores y cogeneradores que venden sus excedentes a través del SENI.

El OCSENI es una entidad pública descentralizada del poder ejecutivo del estado, con personalidad jurídica, patrimonio propio y sin fines de lucro. La máxima autoridad del OCSENI es el Consejo de Coordinación, formado por un representante de la SIE, quien lo preside, un representante de las empresas eléctricas de generación privada, uno de la empresa eléctrica de generación estatal (hidroeléctrica), uno de la empresa de transmisión y uno de las distribuidoras.

4.4 Corporación dominicana de empresas eléctricas estatales (CDEEE)

La Corporación Dominicana de Empresas Eléctricas Estatales (CDEEE), está encargada de liderar y coordinar las estrategias, objetivos y actuaciones de las empresas eléctricas de carácter estatal, así como aquellas en las que el Estado es propietario mayoritario o controlador y los entes o unidades que dependan de esta Institución o de cualquier otra empresa estatal vinculada al sector eléctrico. En tal sentido, se incluye dentro de dicho régimen [28]:

- Empresa de Transmisión Eléctrica Dominicana (ETED),
- Empresa de Generación Hidroeléctrica Dominicana (EGEHID),
- Empresa Distribuidora de Electricidad del Norte, S.A. (EDENORTE),
- Empresa Distribuidora de Electricidad del Sur, S.A. (EDESUR)
- Empresa Distribuidora de Electricidad del Este, S.A. (EDEESTE)

Además, la CDEEE está encargada de llevar a cabo los programas del Estado en materia de electrificación rural y suburbana a favor de las comunidades de escasos recursos económicos, así como de la administración y aplicación de los contratos de suministro de energía con los Productores Independientes de Electricidad (IPP).

4.5 Empresas de generación

En la generación participan 16 empresas. Toda la generación hidráulica está a cargo de EGEHID que es de propiedad del Estado y administrada por la CDEEE, y la generación térmica está a cargo de 13 empresas privadas y 2 de capital mixto.

4.6 Empresa de Transmisión

La Empresa de Transmisión Eléctrica Dominicana (ETED) con autonomía presupuestaria y personería jurídica propia, es la encargada de la operación, mantenimiento y administración de todas las redes de alta tensión, subestaciones, equipos, maquinarias destinadas a la transmisión de electricidad.

ETED es remunerada por el servicio de transmisión mediante un peaje regulado.

4.7 Empresas de Distribución

El servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica en La República Dominicana está a cargo de 3 empresas:

Empresa Distribuidora de Electricidad del Norte, S.A. (EDENORTE)

Empresa Distribuidora de Electricidad del Sur, S.A. (EDESUR)

Empresa Distribuidora de Electricidad del Este, S.A. (EDEESTE)

Estas empresas son controladas por el estado a través de La Corporación Dominicana de Empresas Eléctricas Estatales (CDEEE).

4.8 Estructura tarifaria de la republica dominicana

La estructura tarifaria es el mecanismo que utiliza el regulador para trasladar los costos de todas las etapas del suministro eléctrico, a los clientes finales de este servicio.

La estructura tiene dos objetivos primordiales: reflejar la condición de precio del mercado competitivo en la tarifa, considerando la estructura de costos de las empresas del sector; y consolidar el principio fundamental de equidad social en el pago del servicio, a través del establecimiento de tarifas con criterios sociales. Una estructura tarifaria exitosa, no afecta mayormente, el nivel tarifario de las empresas reguladas.

Para el caso particular de República Dominicana, a continuación, se presenta un análisis de los principales aspectos que determinan la estructura tarifaria para el subsector eléctrico.

4.8.1 Composición de la tarifa aplicada a clientes regulados

La tarifa técnica que se aplique a los clientes regulados tiene dos componentes principales: costo de suministro de electricidad, y valor agregado de distribución.

El coste de suministro de electricidad, corresponde al precio promedio de la energía comprada por cada distribuidora en el mercado mayorista, que es calculado por la superintendencia de electricidad, como el promedio ponderado de todos los contratos de largo plazo que haya suscrito dicha distribuidora con los generadores, y de los costes marginales de las compras sin contrato, en las que se incluyen las realizadas en el mercado spot. Estos precios estarán referidos a los puntos de entrega de energía a las distribuidoras, por tanto, incluyen el peaje de transmisión.

El valor agregado de distribución, corresponde a los costes asociados a la actividad de distribución, como resultado del mecanismo de regulación económica que la superintendencia de electricidad utiliza para la definición del nivel tarifario para esta actividad.

4.8.2 Tarifas aplicadas a clientes regulados

Los costes del servicio eléctrico, aceptados por el regulador, corresponden al nivel tarifario. Estos, son trasladados a los usuarios finales a través de diversas configuraciones de cargos tarifarios, que son dimensionados para cumplir los criterios de equidad social y eficiencia asignativa.

Dada la estructura de costes típica de los sectores eléctricos, las tarifas generalmente, son en dos partes, y no lineales. Idealmente, los cargos fijos deberían ser diseñados para recuperar los costes fijos; mientras que los costes marginales o costes variables, se recuperarían a través de cargos que dependen del consumo de energía del cliente. En la práctica, este tipo de estructura, se aplica dividiendo los conceptos facturados en dos: cargos por acceso, cuyos costes están asociados a todas las actividades que las empresas deben realizar independiente de si el cliente consume o no energía (costes fijos); y el componente variable, asociado directamente a los costes que se generan cuando el cliente consume energía, es decir, el pago por el coste de generación, transmisión, pérdidas, etc. (costes variables). Con estos criterios, se asegura que la estructura tarifaria cumpla con dos objetivos primordiales: eficiencia asignativa y sostenibilidad del servicio.

El problema relacionado con el criterio antes descrito, es que, el resultado obtenido de su aplicación, no es socialmente aceptable, especialmente en países en desarrollo, como la mayoría de los latinoamericanos, entre estos, república dominicana, donde los valores de los cargos fijos, muy probablemente limiten el acceso al servicio a clientes de escasos recursos, porque los costes fijos del servicio se consideran elevados.

Este problema, se soluciona, parcialmente, a través de la fijación de cargos fijos y variables que no estén asociados directamente a los costes fijos y variables, respectivamente; sino a la disposición al pago de los clientes que reciben el servicio, es decir, a la elasticidad de la demanda. La parametrización, o definición de los valores de los componentes fijos y variables de las tarifas, toma en cuenta criterios como los que se lista a continuación:

- Identificación de costes asociados al acceso y costos variables
- Tipo de consumidor (industrial, comercial, residencial)
- Elasticidad de la demanda
- Elasticidad precio cruzado de la demanda

En el caso de República Dominicana, la estructura tarifaria adoptada, consiste en tarifas en dos partes, con las que se facturan los siguientes rubros: cargo fijo (independiente del consumo), cargo por energía, y cargo por potencia máxima.

A continuación, se presenta una descripción de cada uno de estos componentes:

Cargo fijo mensual: Es un cargo que se cobra al cliente, de forma mensual, y que es independiente de si este consume o no energía.

Cargo por energía: Es el precio de cada kilovatio-hora consumido por el cliente.

Cargo por potencia máxima: Es un cargo que se aplica a la demanda de potencia de un usuario determinado, y su valor será igual a la multiplicación de la potencia máxima demandada al cliente en un mes, independientemente del valor de energía facturada.

Cargo por potencia máxima en horas de punta: Es un cargo que se aplica a clientes que accedan a tarifas horarias, y por tanto, sus medidores permitan obtener registros de energía y demanda en diferentes horas del día. Su valor es igual a la multiplicación del cargo por potencia máxima en horas de punta (desde las 18:30 hasta las 23:00), por la demanda máxima de potencia registrada en ese mismo periodo, independientemente del consumo de energía o de la demanda máxima registrada en el mes.

A pesar de que el régimen tarifario normal que se establece en el la Ley general de electricidad, determina que la estructura tarifa, y las fórmulas de indexación que

aplique la SIE, deberán estar respaldadas en estudios que esta entidad realice cada cuatro años, que tomen en cuenta los criterios y disposiciones que constan en la mencionada Ley y en sus reglamentos.

4.9 Tipos de tarifas reguladas

El pliego tarifario vigente establece dos grupos de tarifas para los clientes regulados: tarifas en baja tensión y en media tensión. Estas a su vez, se dividen en siete tipos diferentes: **BTS1, BTS2, BTD, BTH, MTD1, MTD2 Y MTH**.

A continuación, en la tabla 6, se presenta una descripción de cada tipo de tarifa, y las condiciones que deben cumplir los consumidores para acceder a ellas para el mes de julio de 2016 [29].

Tabla 3. Cargos tarifarios

TARIFA	CARGOS TARIFARIOS	SIE-044-2016
		jul-16
BTS1	Cargos Fijos	
	Menores o iguales a 50 kWh	
	> a 50 kWh < o iguales a 75 kWh	0.76 €
	> a 75 kWh < o iguales a 100 kWh	
	> a 100 kWh < o iguales a 125 kWh	
	> a 125 kWh < o iguales a 150 kWh	2.75 €
	> a 150 kWh < o iguales a 175 kWh	
	> a 175 kWh	
	Cargos por Energía	
	0-75 kWh	0.09 €
	76-200 kWh	0.14 €
	201-300 kWh	
	301-400 kWh	
	401-500 kWh	0.22 €
	501-600 kWh	
601-700 kWh		
701 - 1000 kWh	0.22 €	
> 1000 kWh		
BTS2	Cargo Fijo	2.75 €
	Cargos por Energía	
	0-75 kWh	0.12 €
	76-200 kWh	
	201-300 kWh	0.17 €
	301-400 kWh	
	401-500 kWh	
	501-600 kWh	0.23 €
	601-700 kWh	
	701 - 1000 kWh	
> 1000 kWh	0.23 €	

TARIFA	CARGOS TARIFARIOS	SIE-044-2016
		jul-16
BTD	Cargo Fijo	4.49 €
	Energía	0.15 €
	Potencia Máxima	19.88 €
BTH	Cargo Fijo	4.49 €
	Energía	0.15 €
	Potencia Máxima fuera de punta	5.07 €
	Potencia Máxima en horas de punta	28.25 €
MTD1	Cargo Fijo	4.49 €
	Energía	0.16 €
	Potencia Máxima	9.72 €
MTD2	Cargo Fijo	4.49 €
	Energía	0.15 €
	Potencia Máxima	6.81 €
MTH	Cargo Fijo	4.49 €
	Energía	0.15 €
	Potencia Máxima fuera de punta	1.95 €
	Potencia Máxima en horas de punta	19.71 €

Estos cargos por tipo de tarifas tienen incluidos subsidios del gobierno que van desde el 18% hasta un 60%, dependiendo del tipo de tarifa.

La aplicación de subsidios, en países en vías de desarrollo, a un servicio básico como el eléctrico, tiene el objetivo principal de permitir que los usuarios con poca disposición al pago, que generalmente corresponden a usuarios de escasos recursos, puedan acceder al mismo [27].

Otras políticas, además de promover la universalidad de los subsidios, buscan mejorar la competitividad de las industrias y comercios cuyos costes son muy dependientes del suministro eléctrico.

En cualquier caso, el subsidio se traduce en un pago reducido por el servicio recibido.

El problema con los subsidios es que, en la mayoría de los casos, son instrumentados a través de modificaciones directas a las tarifas técnicamente calculadas, lo cual origina distorsiones importantes en el mercado.

Históricamente, se ha visto que los sectores eléctricos en los que se han intervenido las tarifas, aplicando subsidios al precio real de la energía, han sufrido problemas de sostenibilidad y, principalmente, la expansión del servicio se ha visto limitada.

Sin embargo, la política de subsidios en este sector, no es de ninguna manera negativa, aunque genere distorsiones, ya que la electricidad es un bien vital para la ciudadanía, lo que lo diferencia de bienes que se comercializan en otros mercados. Además, independientemente de la ideología política, para cualquier gobierno es deseable que todos, o la mayoría de sus ciudadanos, puedan acceder al servicio eléctrico. El problema

con las políticas en materia de subsidios, es que los mecanismos para su focalización, suelen ser distorsivos, además, envían señales erróneas a quienes los reciben. En el siguiente capítulo se analizarán diferentes escenarios que ocurren en las empresas distribuidoras y clientes finales con el uso de almacenamiento, usando como fuente principal los costes recibidos por los usuarios, con el subsidio correspondiente aplicado.

5.Caso de estudio: Red de distribución de energía eléctrica

En este capítulo se analizarán diferentes escenarios de una red de distribución. Los datos corresponden a la evolución de su demanda del año 2016. Los escenarios que se evalúan son: potencia punta en el centro de transformación, se verifican las interrupciones programadas (para disminuir la compra de energía), y el posible uso de un sistema de almacenamiento en clientes industriales y domésticos.

El propósito fundamental es evaluar la viabilidad económica de la posible instalación de un sistema de almacenamiento de energía para cada uno de los escenarios planteados, haciendo una comparación con otras posibles soluciones viables. [30] [31] [32]

5.1 Datos de la red de estudio

En la tabla 7, se muestra el evolutivo del año 2016, correspondiente al consumo energético del circuito en evaluación. Es de notar que, debido a las características climatológicas de República Dominicana, el consumo energético no posee un pico relevante en cuanto a estaciones del año nos referimos.

A continuación, se analizará el evolutivo de compra energética, publicado por la empresa distribuidora y se analizará la viabilidad económica de un almacenamiento energético en dicha red.

Tabla 4. Consumo de red de estudio

Mes	Compra de empresa kWh	Consumo del circuito kWh	Porcentaje de la empresa que representa el circuito	Pago medio Euro/kWh	Total pagado	Total pagado por el circuito
ene-16	377,402,338	3,430,619	0.9090%	0.10 €	36,985,429.12 €	336,200.71 €
feb-16	366,535,551	3,410,773	0.9305%	0.13 €	47,649,621.63 €	443,400.46 €
mar-16	396,752,912	3,746,102	0.9442%	0.11 €	43,206,392.12 €	407,950.56 €
abr-16	399,538,102	3,936,547	0.9853%	0.11 €	43,949,191.22 €	433,020.15 €
may-16	439,437,094	4,154,349	0.9454%	0.14 €	61,521,193.16 €	581,608.92 €
jun-16	431,173,720	4,328,910	1.0040%	0.13 €	56,914,931.04 €	571,416.09 €
jul-16	443,283,519	4,507,985	1.0170%	0.15 €	66,492,527.85 €	676,197.82 €
ago-16	440,672,991	4,388,745	0.9959%	0.15 €	63,897,583.70 €	636,368.05 €
sep-16	440,677,880	4,502,246	1.0217%	0.10 €	43,627,110.12 €	445,722.38 €
oct-16	433,985,568	4,498,486	1.0366%	0.12 €	52,512,253.73 €	544,316.84 €
nov-16	401,559,230	3,967,931	0.9881%	0.10 €	39,754,363.77 €	392,825.17 €
dic-16	407,248,104	4,046,301	0.9936%	0.14 €	57,829,230.77 €	574,574.68 €

5.2 Almacenamiento en la distribuidora (Reducción del consumo energético anual en el circuito en evaluación)

En este escenario se analizará la potencia máxima del circuito en evaluación y se procede a aplicar un sistema de almacenamiento, para al mismo tiempo analizar la reducción de costes que tendrá la empresa de distribución al momento de comprar energía eléctrica.

Se procede a analizar los datos de potencia y energía del año 2016, del circuito en evaluación, se analizan 3 tipos de almacenamientos electroquímicos y se verifica su rentabilidad.

El criterio utilizado para la evaluación será mediante el cálculo de ciclos de carga y descarga que realizará durante el año 2016. Haciendo uso del conjunto de potencias medias horarias para un año completo, según distintos tamaños de baterías, se puede estimar cuantos picos eliminará al año respecto al intervalo de mayor potencia demandada durante el año completo, que resulta ser de 8,722.74 kW, dicha potencia se produjo el 12 de julio de 2016.

De este modo, por ejemplo, para una potencia máxima consumida en intervalos de 1 hora durante todo el año, un sistema de baterías de 1000 kW eliminará aquellas potencias superiores a 7,722.74 kW aprovechando el sistema para suplir aquellos intervalos en los que el consumo sea mayor. De esta manera la vida útil del sistema disminuirá acorde con el número de intervalos en los que el sistema actúe.

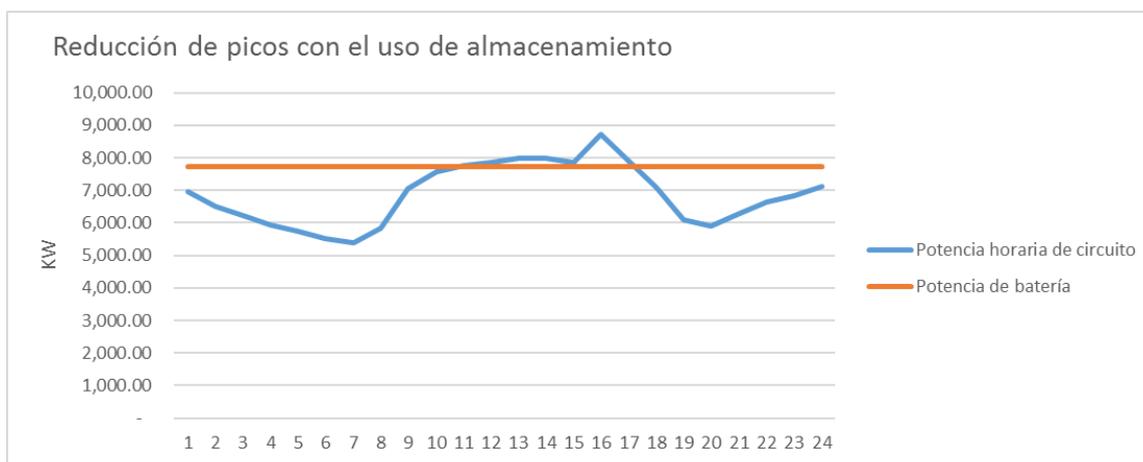


Ilustración 14. Reducción de pico Horario

En la Figura 14 se muestra lo explicado anteriormente.

Para este día en concreto se usaría la batería para suplir 5 intervalos temporales de 1 hora aplicando un ciclo de descarga.

Para estimar los ciclos de descarga que realizará la batería, se aplica el proceso determinado en el párrafo anterior respecto al año completo.

Si se asume un ciclo de carga por cada vez que se produce uno de descarga en el sistema, se calculará para distintos tamaños de las baterías el número de veces que entra acción al año, suponiendo que se mantenga el mismo consumo durante los años próximos y una vida útil de las baterías de ion-litio de 4500 ciclos, el resultado se expresa en la tabla 8:

Tabla 5. Sistema de almacenamiento Ion-Litio (Datos de coste: informe de ECOFY)

Potencia del sistema de almacenamiento (kW)	Capacidad de almacenamiento (kWh)	Ciclo de carga y descarga utilizados en 1 año	Vida útil (Años)	Coste (Euros)
750	82.5	38	118	813,750.00 €
1000	108.56	325	13.8	1,085,000.00 €
1250	113.5	1,596	2.8	1,356,250.00 €
1500	165	2,968	1.5	1,627,500.00 €
2000	220	3,563	1.26	2,170,000.00 €
2500	275	4,011	1.12	2,712,500.00 €
3000	330	4,958	10 meses	3,255,000.00 €

En la tabla 8, se determina el coste de un sistema de almacenamiento basado en baterías de Ion Litio, para diferentes potencias a suministrar, y con diferentes capacidades de almacenamiento energético. Del mismo modo es de importante relevancia destacar que los ciclos de carga y descarga fueron calculados con el histórico consumo del año 2016, correspondiente al circuito en cuestión.

Se procede a realizar el mismo análisis suponiendo que se mantenga el mismo consumo durante los años próximos y una vida útil de las baterías de plomo acido de 2500 ciclos, el resultado se expresa en la tabla 9:

Tabla 6. Sistema de almacenamiento Plomo Acido

Potencia del sistema de almacenamiento (kW)	Capacidad de almacenamiento (kWh)	Ciclo de carga y descarga utilizados en 1 año	Vida útil (Años)	Coste (€)
750	82.5	38	65.7	712,500.00 €
1000	108.56	325	7.7	950,000.00 €
1250	113.5	1,596	1.6	1,187,500.00 €
1500	165	2,968	8 meses	1,425,000.00 €
2000	220	3,563	7 meses	1,900,000.00 €
2500	275	4,011	6 meses	2,375,000.00 €
3000	330	4,958	5 meses	2,850,000.00 €

En la tabla 9, se determina el coste de un sistema de almacenamiento basado en baterías de plomo acido para diferentes potencias a suministrar, y con diferentes capacidades de almacenamiento energético. Del mismo modo es de importante relevancia destacar que los ciclos de carga y descarga fueron calculados con el histórico consumo del año 2016, correspondiente al circuito en cuestión.

Si se asume un ciclo de carga por cada vez que se produce uno de descarga en el sistema, se calculará para distintos tamaños de las baterías el número de veces que entra acción al año, suponiendo que se mantenga el mismo consumo durante los años próximos y una vida útil de las baterías Redox-vanadio de 20,000 ciclos, el resultado se expresa en la siguiente tabla 10:

Tabla 7. Sistema de almacenamiento Redox-Vanadio

Potencia del sistema de almacenamiento (kW)	Capacidad de almacenamiento (kWh)	Ciclo de carga y descarga utilizados en 1 año	Vida útil (Años)	Coste (€)
750	82.5	38	526	2,250,000.00 €
1000	108.56	325	61	3,000,000.00 €
1250	113.5	1,596	12.53	3,750,000.00 €
1500	165	2,968	6.7	4,500,000.00 €
2000	220	3,563	5.6	6,000,000.00 €
2500	275	4,011	4.9	7,500,000.00 €
3000	330	4,958	4	9,000,000.00 €

En la tabla 10, se determina el coste de un sistema de almacenamiento Redox-Vanadio para diferentes potencias a suministrar, y con diferentes capacidades de almacenamiento energético. Del mismo modo es de importante relevancia destacar que los ciclos de carga y descarga fueron calculados con el histórico consumo del año 2016, correspondiente al circuito en cuestión.

5.2.1 Competencia entre tecnologías (Almacenamiento en la distribuidora)

En esta sección se evalúa cada tipo de sistema de almacenamiento propuesto, para su posterior instalación en esta red de distribución. Se comparan la vida útil por potencia, y el coste por potencia de cada uno de los sistemas de almacenamiento.

En primera instancia se someten los tres sistemas de almacenamiento a ser comparadas costes por potencias, y se pueden verificar en la gráfica 15:

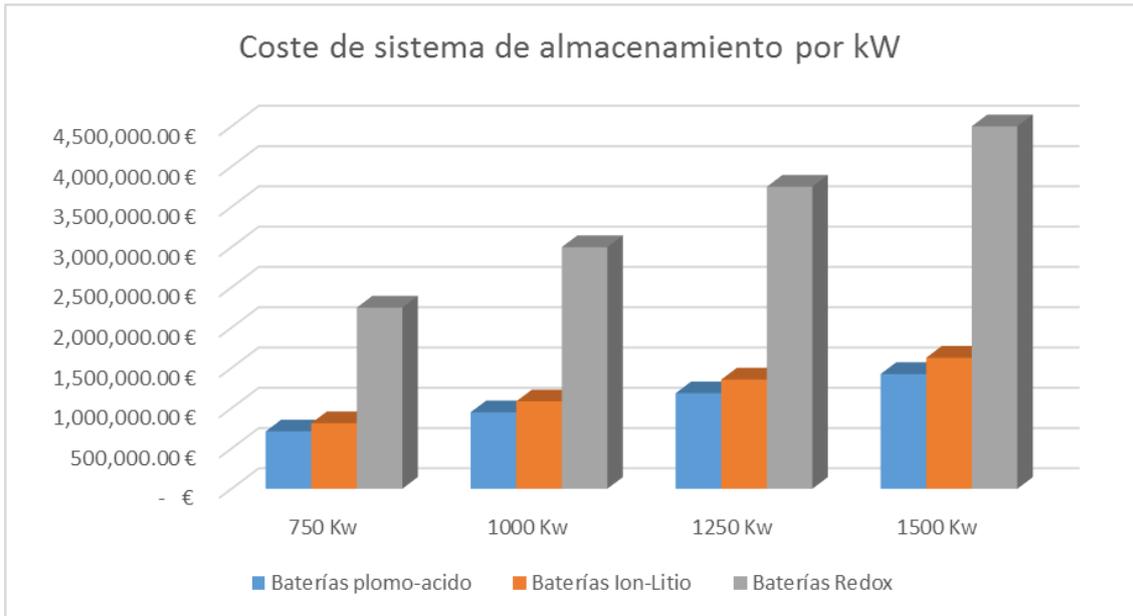


Ilustración 15. Comparación costes de sistemas de almacenamiento por potencia

Se pueden observar que a medida que aumenta la cantidad de potencia del sistema de almacenamiento, aumenta el coste de cada sistema. Del mismo modo se observa que la tecnología menos costosa es con baterías de plomo acido, sin embargo, es la que posee menos eficiencia, cuando la comparamos con Ion litio y redox-vanadio. Del mismo modo es de observar que las baterías redox, tienen una cantidad de vida útil mucho mayor que las demás, pero para los fines ni su coste, ni la cantidad de años de duración son relevantes para este análisis, debido a que un almacenamiento a este nivel, es una solución momentánea y no permanente.

Al mismo tiempo se ha comparado el tiempo de vida útil de cada una de las tecnologías evaluadas, y para su comprobación se representan en la gráfica 16:

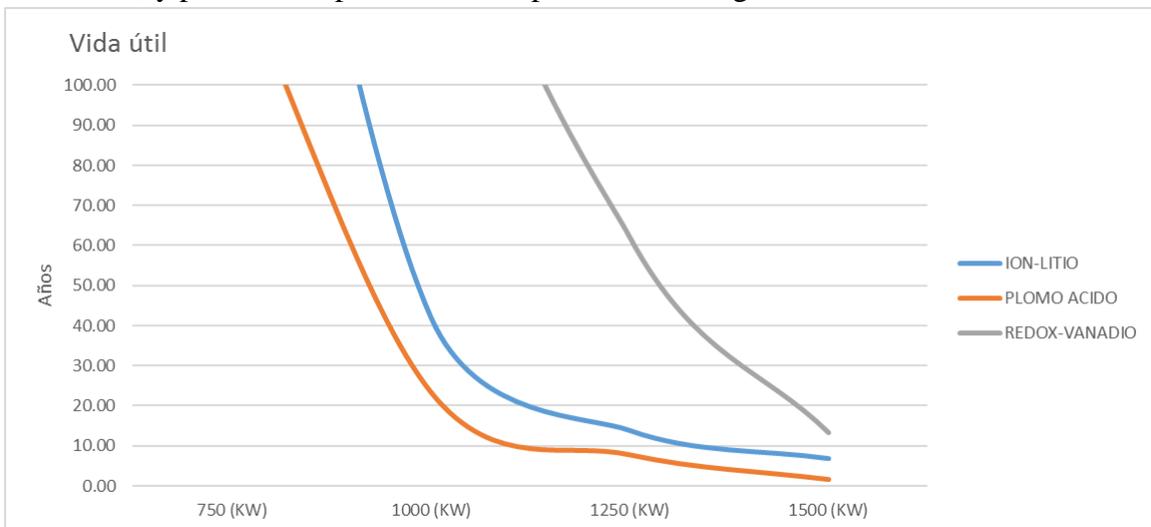


Ilustración 16. Comparación de tiempo de vida útil por tecnología

Luego de analizar y evaluar los diferentes tipos de almacenamiento mirándolo del entorno del tiempo de vida útil, se puede verificar que las baterías Redox vanadio, son los que me pueden proporcionar mayor cantidad de vida útil, pero eso conviene en caso de que este almacenamiento sea una solución determinante a largo plazo.

Considerando que un proyecto de almacenamiento para esta red sería rentable a partir de 1.25 MW, la tecnología seleccionada será Ion Litio, por su bajo coste y efectividad de vida útil a este nivel de potencia.

5.2.2 Análisis de rentabilidad (Almacenamiento en la distribuidora)

Verificado todo lo anterior, se estimará la rentabilidad del proyecto para distintos tamaños del sistema de almacenamiento mediante diferentes parámetros económicos y financieros, de forma que se pueda seleccionar la opción más óptima con criterio [33].

Para este análisis de rentabilidad, se proponen una serie de indicadores económicos, que son quienes definen la viabilidad o no de los sistemas de almacenamiento planteados.

- Valor actual neto (VAN): es un procedimiento que permite calcular el valor presente de un determinado número de flujos de caja futuros, originados por una inversión. La metodología consiste en descontar al momento actual (es decir, actualizar mediante una tasa) todos los flujos de caja futuros o en determinar la equivalencia en el tiempo 0 de los flujos de efectivo futuros que genera un proyecto y comparar esta equivalencia con el desembolso inicial. Dicha tasa de actualización (k) o de descuento (d) es el resultado del producto entre el coste medio ponderado de capital (CMPC) y la tasa de inflación del periodo. Cuando dicha equivalencia es mayor que el desembolso inicial, entonces, es recomendable que el proyecto sea aceptado.

La fórmula que nos permite calcular el valor actual neto (VAN) es la siguiente:

$$VAN = \sum_{T=1}^N \frac{V_t}{(1+k)^t} - I_0$$

Fórmula 2. VAN

Donde:

V_t representa los flujos de caja en cada período t

I_0 representa el valor de desembolso inicial de la inversión

N es el número de períodos considerados

K es el tipo de interés

- Tasa interna de retorno (TIR): es la media geométrica de los rendimientos futuros esperados de dicha inversión, y que implica por cierto el supuesto de una oportunidad para "reinvertir". En términos simples, diversos autores la conceptualizan como la tasa de descuento con la que el valor actual neto o valor presente neto (VAN o VPN) es igual a cero.

El tipo de descuento que hace el VAN igual a cero es:

$$VAN = \sum_{T=1}^N \frac{V_t}{(1 + (TIR))^t} - I_0$$

Fórmula 3. TIR

Ahora se recurre a verificar la rentabilidad y viabilidad del proyecto en la tabla 12:

Tabla 8. Indicadores económicos

Potencia del sistema de almacenamiento (kW)	VAN	TIR	Recuperación de la inversión (años)
750	- 628,891.71 €	0.19%	105.75
1000	- 248,299.02 €	0.72%	12.36
1250	16,729.83 €	5.7%	2.52
1500	59,469.39 €	8.0%	1.35
2000	110,606.80 €	9.7%	1.13
2500	153,034.01 €	10.6%	1.00
3000	542,612.24 €	23.4%	0.81

5.2.4 Tamaño óptimo del sistema de almacenamiento (Almacenamiento en la distribuidora)

El valor actual neto presenta unos valores de rentabilidad positivos para sistemas de almacenamiento a partir de 1250 kW, en los casos de menos dimensionamiento presenta pérdidas considerables.

Se puede verificar una TIR positiva para los sistemas de almacenamiento con potencias superiores a 1250 kW, en los demás la tasa interna de retorno es negativa.

De la misma manera y para los sistemas de almacenamiento del mismo tamaño se puede observar que en los sistemas donde es posible recuperar la inversión es en aquellos donde el TIR y el VAN son positivos.

5.2.5 Conclusiones (Almacenamiento en la distribuidora)

En esta sección se desglosan las conclusiones más relevantes para este escenario:

- Se demuestra que un sistema de almacenamiento para esta red, tiene la capacidad de suavizar los picos de potencia a lo largo del año, haciendo ciclos de carga y descarga diarias, cada vez que sea necesario.
- Se demuestra que, para esta red, los dimensionamientos óptimos de los sistemas de almacenamientos mediante baterías de Ion Litio corresponden a los sistemas superiores a 1250 kW.
- Es posible recuperar la inversión en 2.5 años.
- Con un sistema de almacenamiento como lo que se ha planteado, la empresa tendría ahorros significativos que podrían ser utilizados para hacer inversiones en otros sectores.

La instalación del nuevo transformador puede aplazarse usando un sistema de almacenamiento para descargar el transformador durante los períodos de pico, así se extiende su vida operacional durante varios años. Si el sistema de almacenamiento se encuentra dentro de un contenedor, de forma tal que se pueda trasladar físicamente, se pudiera mover a otras subestaciones que lo necesitaran una vez deje de necesitarse, para así maximizar el retorno de la inversión.

El resultado de esta estrategia es que también se puede disminuir el riesgo siempre presente de que el crecimiento de la carga planeado no ocurra, lo que podría echar por tierra la inversión hecha en la distribución. Este podría ser el caso cuando una inversión grande, como un gran supermercado o un barrio residencial, no se materializan debido a que el constructor retrasa o cancela el proyecto después de que la infraestructura eléctrica ya se ha desarrollado para el incremento de la nueva carga. El almacenamiento no solo permite el aplazamiento del punto de decisión de la mejora, sino que también proporciona tiempo para evaluar con certeza si el incremento de la carga se materializará, tiempo que podría ser de dos a tres años.

5.3 Almacenamiento en el usuario final (implementación de sistema de almacenamiento en clientes con tarifas en media tensión)

Como se ha comentado, en la República dominicana el esquema tarifario depende del nivel del consumo energético. En esta sección se analizarán varios clientes con diferentes niveles tarifarios en media tensión, pertenecientes a la red de estudio y se analiza la rentabilidad de un sistema de almacenamiento para cada uno de los casos.

5.3.1 Datos de clientes a estudiar

Tabla 9. Datos de consumo y pagos de clientes conectados en media tensión (Datos suministrados por la empresa de distribución)

Mes	Consumo cliente MTD1 kWh	Total pagado por Cliente MTD1	Consumo cliente MTD2 kWh	Total pagado por Cliente MTD2	Consumo cliente MTH kWh	Total pagado por Cliente MTH
ene-16	24,480	19,035.89 €	11,880	11,924.43 €	5,640	14,169.09 €
feb-16	21,960	18,632.69 €	12,060	11,944.61 €	6,840	14,361.09 €
mar-16	23,760	18,920.69 €	11,160	11,843.72 €	4,800	14,034.69 €
abr-16	23,940	18,949.49 €	11,820	11,917.70 €	5,400	14,130.69 €
may-16	25,200	19,151.09 €	11,940	11,931.16 €	7,200	14,418.69 €
jun-16	25,740	19,237.49 €	13,920	12,153.11 €	5,880	14,207.49 €
jul-16	28,080	19,611.89 €	11,640	11,897.53 €	6,360	14,284.29 €
ago-16	29,160	19,784.69 €	12,240	11,964.78 €	7,320	14,437.89 €
sep-16	29,520	19,842.29 €	12,420	11,984.96 €	5,880	14,207.49 €
oct-16	29,700	19,871.09 €	11,760	11,910.98 €	6,480	14,303.49 €
nov-16	28,080	19,611.89 €	11,460	11,877.35 €	6,360	14,284.29 €
dic-16	23,580	18,891.89 €	11,100	11,836.99 €	6,120	14,245.89 €

En la tabla 13, se puede observar el consumo energético de clientes conectados a la media tensión. Se verifica de igual manera el monto pagado por kWh, a lo largo del año 2016, para posteriormente analizar estos datos y evaluar la rentabilidad de un sistema de almacenamiento.

5.3.2 Reducción de consumo energético por tipo de tarifa de media tensión

En este escenario se analizará la potencia máxima de los clientes por tipo de tarifa en media tensión en evaluación y se procede a aplicar un sistema de almacenamiento, para al mismo tiempo analizar la reducción de costes que tendrá cada tipo de cliente a la empresa de distribución.

Se procede a analizar los datos de potencia y energía del año 2016, del circuito en evaluación, se analiza 1 tipo de almacenamiento electroquímico (Ion-Litio), ya que en las pruebas anteriores se determinó que es el más rentable económicamente.

5.3.2.1 Cliente MTD1

El criterio utilizado para la evaluación será mediante el cálculo de ciclos de carga y descarga que realizará durante el año 2016. Haciendo uso del conjunto de potencias medias horarias para un año completo, según distintos tamaños de baterías, se puede estimar cuantos picos eliminará al año respecto al intervalo de mayor potencia demandada durante el año completo, que resulta ser de 51.003577 kW, dicha potencia se produjo el 24 de mayo de 2016.

En la figura 17 se presenta las 24 horas del día que se produjo la potencia máxima de este cliente. Del mismo modo se presentan diferentes sistemas de almacenamiento, donde se procede a evaluar su rentabilidad y viabilidad económica.

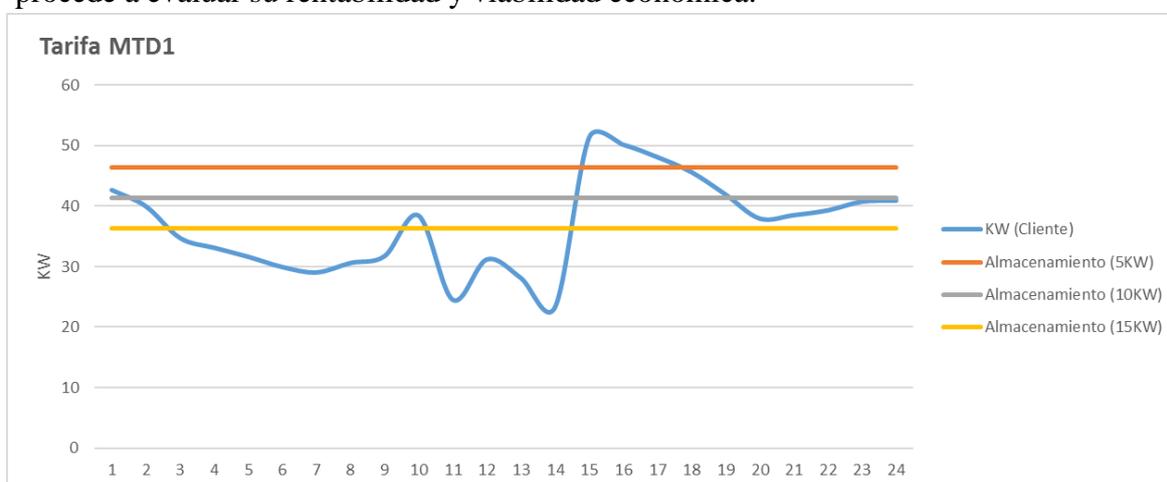


Ilustración 17. Sistema de almacenamiento tarifas MTD1

Se observa el comportamiento de la potencia a lo largo del día de la mayor potencia del año para este cliente (línea azul), y del mismo modo se observan de qué manera se suavizaría la punta, con diferentes potencias del sistema de almacenamiento.

Se procede a verificar la rentabilidad económica, de 3 sistemas de almacenamiento variando el recorte de potencia que ocasionarían en la potencia evaluada de este tipo de clientes.

Si se asume un ciclo de carga por cada vez que se produce uno de descarga en el sistema, se calculará para distintos tamaños de las baterías el número de veces que entra acción al año, suponiendo que se mantenga el mismo consumo durante los años próximos y una vida útil de las baterías de ion-litio de 4500 ciclos, el resultado se expresa en la tabla 14:

Tabla 10. Sistemas de almacenamiento para clientes MTD1

En la tabla 14 se puede observar que a medida que aumenta el recorte de potencia que

Potencia del sistema de almacenamiento (kW)	Capacidad del sistema de almacenamiento (Wh)	Potencia reducida (kW)	Ciclos de carga y descarga (año)	Vida útil (años)	Coste del sistema de almacenamiento (€)
5	550	46.35	534	8.4	12,962.5
10	1,100	41.35	1608	2.8	25,925
15	1650	36.35	3677	1.2	38,887.5

tendría el cliente por un sistema de almacenamiento disminuye la vida útil y aumenta el coste. Lo que se quiere es analizar su rentabilidad y por esta razón se recurre a realizar un análisis de los ahorros anuales que puede tener este cliente.

En la tabla 15, se muestra el ahorro anual que tiene este cliente al aumentar el sistema de almacenamiento:

Tabla 11. Ahorro anual para cliente MTD1

Potencia del sistema de almacenamiento (kW)	Ahorro anual (€)
5	2,132.15
10	12,883.01
15	44,189.32

Para el cálculo del ahorro anual, se determina lo que pagó la empresa de distribución por kW Y kWh, en el año 2016. Se considera el coste del sistema de almacenamiento y se divide entre los años de vida útil dependiendo el nivel de potencia considerado, para así obtener el coste del sistema de almacenamiento de forma anual; este valor se suma al coste del kWh que la empresa hubiera pagado si contemplada dicho sistema de almacenamiento, y posteriormente se hace la diferencia entre este valor obtenido y el pago efectuado.

5.3.2.1.1 Análisis de rentabilidad económica

En esta sección se calculan los indicadores económicos para cada sistema de almacenamiento planteado, y se determina el tamaño óptimo de un sistema de almacenamiento para este cliente.

La tabla 16, muestra el valor presente neto y la tasa interna de retorno para cada uno de los casos:

Tabla 12. Indicadores económicos para tarifa MTD1

Potencia del sistema de almacenamiento (kW)	VAN	TIR	Retorno de la inversión
5	1,171.77	7.226%	6.1 (años)
10	5,547.84	17.3222%	2.1 (años)
15	8,771.16	27.05%	11 meses

El valor actual neto presenta unos valores de rentabilidad positivos para todos los sistemas de almacenamiento planteados.

Hay que considerar que para potencias superiores a las planteadas se obtendría mejores beneficios, pero su vida útil sería disminuida considerablemente, debido a que aumentan los ciclos de carga y descarga para el año en cuestión.

Se puede verificar una TIR positiva para todos los sistemas de almacenamiento.

El retorno de la inversión dependerá de la potencia del sistema de almacenamiento que se desee emplear, y según lo planteado va desde 11 meses hasta 6.1 años.

5.2.3.2 Cliente MTD2

El criterio utilizado para la evaluación será mediante el cálculo de ciclos de carga y descarga que realizará durante el año 2016. Haciendo uso del conjunto de potencias medias horarias para un año completo, según distintos tamaños de baterías, se puede estimar cuantos picos eliminará al año respecto al intervalo de mayor potencia demandada durante el año completo, que resulta ser de 26.04 kW, dicha potencia se produjo el 28 de junio de 2016.

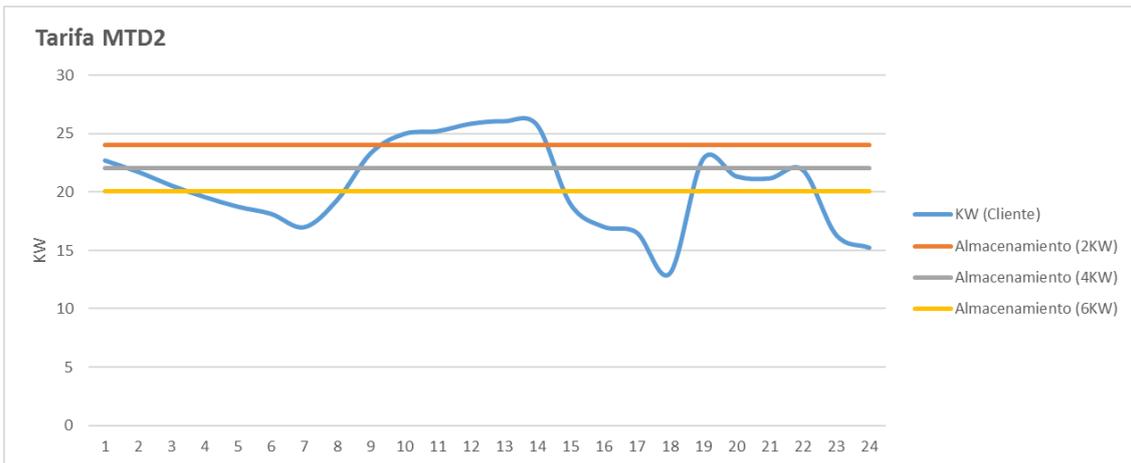


Ilustración 18. Sistema de almacenamiento MTD2

En la figura 18 se presenta las 24 horas del día que se produjo la potencia máxima de este cliente. Del mismo modo se presentan diferentes sistemas de almacenamiento, donde se procede a evaluar su rentabilidad y viabilidad económica.

Se procede a verificar la rentabilidad económica, de 3 sistemas de almacenamiento variando el recorte de potencia que ocasionarían en la potencia evaluada de este tipo de clientes.

Si se asume un ciclo de carga por cada vez que se produce uno de descarga en el sistema, se calculará para distintos tamaños de las baterías el número de veces que entra acción al año, suponiendo que se mantenga el mismo consumo durante los años próximos y una vida útil de las baterías de ion-litio de 4500 ciclos, el resultado se expresa en la tabla 17:

Tabla 13. Sistema de almacenamiento MTD2

Potencia del sistema de almacenamiento (kW)	Potencia reducida (kW)	Ciclos de carga y descarga (año)	Vida útil (años)	Coste del sistema de almacenamiento (€)
2	24.04	43	104.7	5,185
4	22.04	187	24.1	10,370
6	20.04	777	5.8	15,555.5

En la tabla 17 se puede observar que a medida que aumenta el recorte de potencia que tendría el cliente por un sistema de almacenamiento disminuye la vida útil y aumenta el coste. Lo que se quiere es analizar su rentabilidad y por esta razón se recurre a realizar un análisis de los ahorros anuales que puede tener este cliente.

En la tabla 18, se muestra el ahorro anual que tiene este cliente al aumentar el sistema de almacenamiento:

Tabla 14. Ahorro anual para cliente MTD2

Potencia del sistema de almacenamiento (kW)	Ahorro anual (€)
2	91.71
4	797.66
6	4,971.56

5.3.2.1.1 Análisis de rentabilidad económica

En esta sección se calculan los indicadores económicos para cada sistema de almacenamiento planteado, y se determina el tamaño óptimo de un sistema de almacenamiento para este cliente.

La tabla 19, muestra el valor presente neto y la tasa interna de retorno para cada uno de los casos:

Tabla 15. Indicadores económicos para tarifa MTD2

Potencia del sistema de almacenamiento (kW)	VAN	TIR	Retorno de la inversión
2	-3,202.17	1.313%	66 años
4	606.31	5.622%	13 años
6	9,217.44	22.504%	3.2 años

El valor actual neto presenta unos valores de rentabilidad positivos para los sistemas de almacenamiento de 4kW Y 6kW.

Se puede verificar una TIR positiva para todos los sistemas de almacenamiento.

5.3.2.3 Cliente MTH

El criterio utilizado para la evaluación será mediante el cálculo de ciclos de carga y descarga que realizará durante el año 2016. Haciendo uso del conjunto de potencias medias horarias para un año completo, según distintos tamaños de baterías, se puede estimar cuantos picos eliminará al año respecto al intervalo de mayor potencia demandada durante el año completo, que resulta ser de 16.97 kW, dicha potencia se produjo el 24 de mayo de 2016.

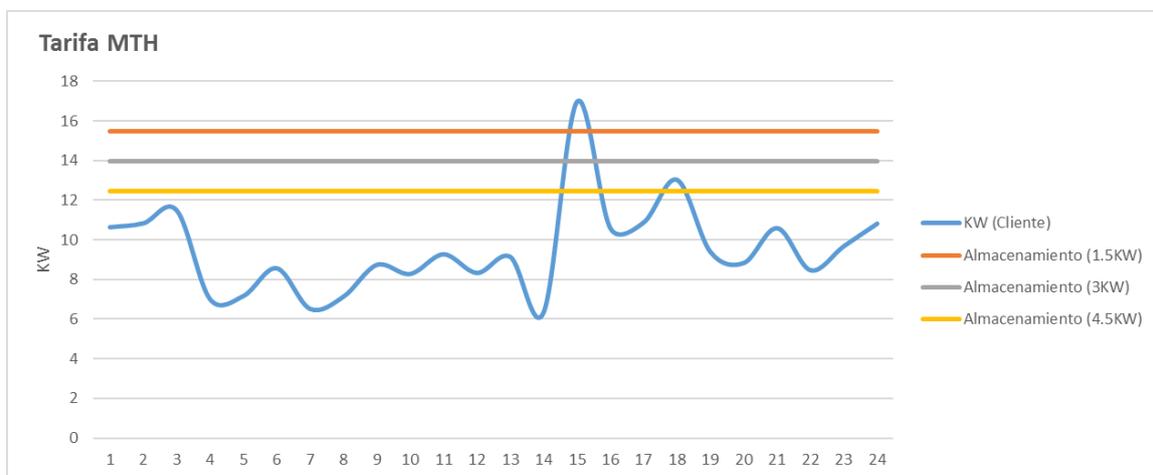


Ilustración 19. Sistema de almacenamiento MTH

En la figura 19 se presenta las 24 horas del día que se produjo la potencia máxima de este cliente. Del mismo modo se presentan diferentes sistemas de almacenamiento, donde se procede a evaluar su rentabilidad y viabilidad económica.

Se procede a verificar la rentabilidad económica, de 3 sistemas de almacenamiento variando el recorte de potencia que ocasionarían en la potencia evaluada de este tipo de clientes.

Si se asume un ciclo de carga por cada vez que se produce uno de descarga en el sistema, se calculará para distintos tamaños de las baterías el número de veces que entra acción al año, suponiendo que se mantenga el mismo consumo durante los años próximos y una vida útil de las baterías de ion-litio de 4500 ciclos, el resultado se expresa en la tabla 20:

Tabla 16. Coste del sistema de almacenamiento para tarifas MTH

Potencia del sistema de almacenamiento (kW)	Potencia reducida (kW)	Ciclos de carga y descarga (año)	Vida útil (años)	Coste del sistema de almacenamiento (€)
1.5	15.47	16	281.25	3,888.75 €
3	13.97	109	41.2	7,777.5 €
4.5	12.47	302	15	11,666.65 €
6	10.97	422	10.7	15,552.00 €
7.5	9.47	502	9.0	19,440.00 €
9	7.97	788	5.7	23,328.00 €

En la tabla 20 se puede observar que a medida que aumentas el recorte de potencia que tendría el cliente por un sistema de almacenamiento disminuye la vida útil y aumenta el coste. Lo que se quiere es analizar su rentabilidad y por esta razón se recurre a realizar un análisis de los ahorros anuales que puede tener este cliente.

En la tabla 21, se muestra el ahorro anual que tiene este cliente al aumentar el sistema de almacenamiento:

Tabla 17. Ahorro anual del sistema de almacenamiento para tarifa MTH

Potencia del sistema de almacenamiento (kW)	Ahorro anual (€)
1.5	55.86
3	761.25
4.5	3,163.67
6	5,893.23
7.5	9,639.34
9	16,506.63

5.3.2.3.1 Análisis de rentabilidad económica

En esta sección se calculan los indicadores económicos para cada sistema de almacenamiento planteado, y se determina el tamaño óptimo de un sistema de almacenamiento para este cliente.

La tabla 22, muestra el valor presente neto y la tasa interna de retorno para cada uno de los casos:

Tabla 18. Indicadores económicos para tarifa MTH

Potencia del sistema de almacenamiento (kW)	VAN	TIR	Retorno de la inversión
1.5	-2,639.69	1.41%	69 años
3	5,131.7	9.56%	10 años
4.5	20,163.5	26.30%	4 años
6	28,527.58	36.12%	3 años
7.5	46,737.82	48.25%	2 años
9	57,575.78	68.36%	1.3 años

El valor actual neto presenta unos valores de rentabilidad positivos para los sistemas de almacenamiento a partir de 3kW.

Se puede verificar una TIR positiva para todos los sistemas de almacenamiento.

5.3.2.4 Análisis de resultados de la implementación de almacenamiento para clientes conectados en media tensión (nivel tarifario MTD1, MTD2 y MTH)

Se ha presentado un sistema de almacenamiento para suavizar la punta de cada nivel tarifario en media tensión. Se midió la rentabilidad de estos sistemas variando la potencia, y se estimó el retorno de la inversión en cada uno de los casos.

En el análisis de este escenario se presentan una serie de resultados en lo que se refiere al suavizado de picos de potencia a nivel industrial usando un sistema de almacenamiento de energía, subrayando el hecho de que el método utilizado adopta un punto de vista diferente en cuanto a la literatura existente en este ámbito. El objetivo inicial consistía en demostrar que se puede conseguir un ahorro significativo en la factura eléctrica, centrando de esta forma el proceso de optimización en disminuir los costes asociados a la potencia eléctrica consumida. Para llevar a cabo esta optimización anteriormente mencionada se ha definido y seleccionado un sistema de almacenamiento en baterías, incluyendo control y conversión de potencia en el coste presentado.

En fin, los hechos relevantes de este análisis son los siguientes:

Nivel tarifario: MTD1

- Se demuestra que para un nivel tarifario MTD1, la potencia máxima en este circuito es de 51.0035 kW.
- Se plantean sistemas de almacenamiento desde 5kW hasta 15 kW, con un coste que oscilan desde 12,962.5 hasta 38,887.5 Euros.
- En el mismo orden mientras aumentan las potencias y capacidad de almacenamiento de estos sistemas, aumenta el ahorro sistemático que tendría dicho cliente.
- Para este caso el tamaño óptimo sería un sistema de almacenamiento de 10 kW, ya que me proporciona un retorno de la inversión en 2.1 año y una vida útil de mi sistema de 2.8 años.

Nivel tarifario: MTD2

- Se demuestra que para un nivel tarifario MTD1, la potencia máxima en este circuito es de 26.04 kW.
- Se plantean sistemas de almacenamiento desde 2kW hasta 6 kW, con un ahorro anual de 91.7 hasta 4,971 euros.
- En el mismo orden mientras aumentan las potencias y capacidad de almacenamiento de estos sistemas, aumenta el ahorro sistemático que tendría dicho cliente.
- Para este caso el tamaño óptimo sería un sistema de almacenamiento de 6 kW, ya que me proporciona un retorno de la inversión en 3.2 años y una vida útil de mi sistema de 6.8 años.

Nivel tarifario: MTH

- Se demuestra que para un nivel tarifario MTH, la potencia máxima en este circuito es de 16.97 kW.
- Se plantean sistemas de almacenamiento desde 1.5kW hasta 9 kW, con un ahorro anual de 55.86 hasta 16,506 euros.
- En el mismo orden mientras aumentan las potencias y capacidad de almacenamiento de estos sistemas, aumenta el ahorro sistemático que tendría dicho cliente.
- Para este caso el tamaño óptimo sería un sistema de almacenamiento a partir de 4.5 kW, ya que me proporciona un retorno de la inversión en 4 años y una vida útil de mi sistema de 15 años, o de un mayor dimensionamiento.

5.4 Almacenamiento en el usuario final (Uso de almacenamiento en caso de interrupciones programadas)

Una interrupción de suministro energético es un descenso del valor eficaz de la tensión por debajo de un umbral de 10%, de la tensión nominal. Hay que caracterizar que existen dos tipos de interrupciones que son: Programadas e imprevistas.

Este escenario se basa en interrupciones programadas, debido a la magnitud de su importancia en el sistema eléctrico de la Republica Dominicana. No obstante, se realiza una breve hipótesis del uso de sistemas de almacenamiento para interrupciones imprevistas, debido a faltas de cortocircuitos, o la actuación de protecciones frente a diferentes faltas.

Las empresas distribuidoras de la republica dominicana hacen su programación diaria basada en interrupciones programadas. Estas interrupciones están clasificadas por tipo de circuito, y cada tipo de circuito está determinado por el balance de facturación y cobro de la energía despachada.

Otras interrupciones programadas se deben a los mantenimientos en redes eléctricas de distribución. Dichas interrupciones no son motivo de este análisis.

La clasificación se especifica en la tabla 23 y la cantidad de horas diarias de interrupciones está directamente relacionada con las pérdidas no técnicas (pérdidas comerciales) equivalentes de cada circuito.

Tabla 19. Clase de circuito

Clase de circuito	Horas de interrupciones diarias
Circuito clase A	0 horas de interrupciones diarias
Circuito clase B	4 horas de interrupciones diarias
Circuito clase C	8 horas de interrupciones diarias
Circuito clase D	12 horas de interrupciones diarias

El coste de esta energía no suministrada en que incurren los clientes al no disponer de energía y tener que obtenerla de fuentes alternativas o bien la pérdida económica derivada de la falta de producción y/o venta de bienes y servicios, y la pérdida de bienestar por disminución de la calidad de vida, en el caso del sector residencial.

5.4.1 Evaluación de sistema de almacenamiento en un cliente comercial en un nivel tarifario BTS2 perteneciente a un circuito clase C.

Para este caso se analizará un cliente perteneciente a un circuito clase C, y con una tarifa BTS2 (Comercial). Este se ve afectado directamente por el desabastecimiento de energía

en su sector, y como fuente alternativa utiliza un generador de energía eléctrica que utiliza como fuente primaria gasolina. La potencia de dicho generador es de 5 kW.

Se pretende analizar la rentabilidad de un sistema de almacenamiento óptimo frente al generador utilizado por dicho cliente.

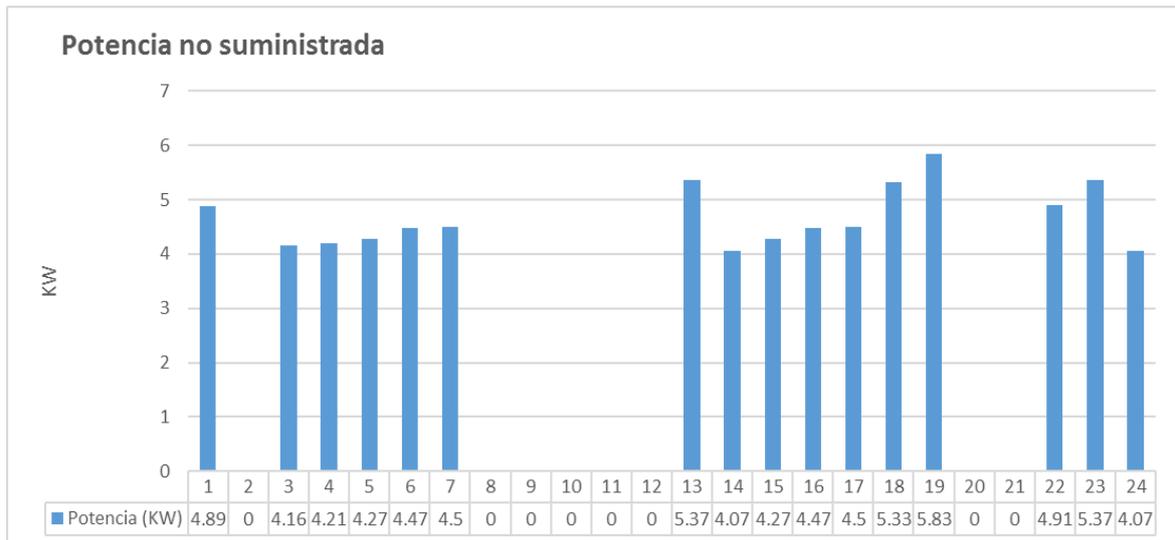


Ilustración 20. Potencia no suministrada

Este es un cliente comercial. Se puede observar que el consumo máximo se presenta de viernes a domingo.

En la gráfica 20 se presenta la programación semanal de interrupciones para el circuito al que pertenece dicho cliente:

En la gráfica 20, se puede observar el desabastecimiento semanal que afecta a los clientes que pertenecen a los circuitos clases C. Se verifica que existen 8 horas de interrupciones programadas.

El día representado en la gráfica 20, corresponde al día que se produce la potencia máxima del año 2016, para este cliente, como se puede observar es de 5.83 kW.

En la tabla 24, se presenta el consumo energético de una semana de dicho cliente, y la cantidad de horas de interrupciones realizadas:

Tabla 20. Consumo energético de una semana de cliente en evaluación (Tarifa clase BTS2)

Días	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
kWh	74.67	80.1	91.35	88.33	101.56	105.6	110.5

Para solucionar esta situación se analiza la rentabilidad de un sistema de almacenamiento, comparándolo con otra posible solución, para determinar la alternativa más viable.

Es de notar que el sistema de almacenamiento debe ser capaz, de soportar la potencia máxima del cliente por el período de tiempo que esté en acción.

Se evaluará un sistema de almacenamiento de al menos 5.83 kW, para que pueda abastecer la demanda en los periodos de interrupciones programadas. En la figura 21 se muestra el propósito del sistema de almacenamiento:

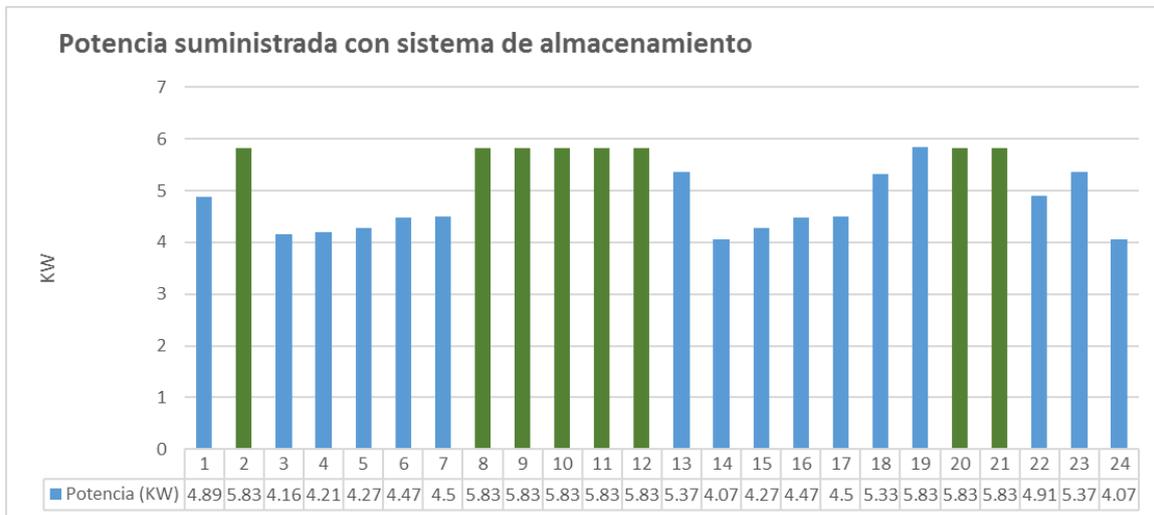


Ilustración 21. Potencia suministrada con sistema de almacenamiento

En la figura 21, se muestra los periodos en que debe actuar el sistema de almacenamiento (color verde), para abastecer la demanda del cliente en evaluación.

Se procede a realizar los pasos necesarios para evaluar la rentabilidad de un sistema de almacenamiento bajo estas condiciones.

Tabla 21. Coste de un sistema de almacenamiento - Almacenamiento en el usuario final

Potencia del sistema de almacenamiento (kW)	Ciclos de carga y descarga al año	Vida útil (años)	Coste del sistema de almacenamiento (€)
3	2,720	1.65	7,777.50

4	2,720	1.65	10,370.45
6	2,720	1.65	15,555.67

Los ciclos de carga y descarga al año se evalúan con la cantidad de horas no suministradas al año, asumiendo que el circuito no cambiará de clase C a clase B. Se plantea un sistema de almacenamiento variando la potencia.

Sistema de almacenamiento de 3KW: El sistema solo tiene la función de abastecer las cargas básicas para que el sistema continúe funcionando.

Sistema de almacenamiento de 4KW: El sistema solo tiene la función de abastecer las cargas básicas y en ocasiones toda la carga para que el sistema continúe funcionando.

Sistema de almacenamiento de 6KW: El sistema tiene la función de abastecer toda la carga en todo momento para que el sistema continúe funcionando.

Se observa de igual forma que el coste del sistema de almacenamiento oscila desde 7,777 Euros hasta 15,555 Euros, dependiendo directamente de la potencia. Hay que tomar en cuenta que la vida útil aumentará si con miras al corto plazo el circuito pasa de clase C a clase B.

La rentabilidad de este sistema está directamente relacionada con la falta de producción y/o venta de bienes y servicios, del cliente al que se le incurre con desabastecimiento de la demanda.

Otra alternativa considerable es implantar un generador eléctrico de gasolina o diésel para abastecer la demanda. Esta es la alternativa que se hace de forma continua en muchos locales comerciales que pertenecen a circuitos clase C y clase D.

Una planta de generación eléctrica con gasolina funcionando a plena carga tiene un consumo de combustible de la siguiente manera (tabla 26) [34]:

Tabla 22. Consumo de combustible de un generador eléctrico de gasolina

Potencia del generador eléctrico (Gasolina) (kW)	Consumo de combustible (gl/hr)	Coste de galón de combustible	Coste anual de combustible
3	0.6	4.4	7,180
4	1.14	4.4	13,643
6	1.72	4.4	20,584

El coste del galón de combustible fue tomado con el coste medio anual del año 2016, de la república dominicana que equivale a 4.4 euros por galón.

El coste total de combustible al año se calcula multiplicando las horas de utilización anual del generador eléctrico por el coste del galón de combustible por el consumo horario de un generador eléctrico para una potencia determinada.

En la tabla 27, se comparan los costes de los sistemas de almacenamiento planteados y los costes medios del mercado de los generadores eléctricos de estas capacidades de potencias.

Tabla 23. Comparación de costes de sistemas de almacenamiento vs costes de generador eléctrico

Potencia generador eléctrico (gasolina) (kW)	Costes Generador eléctrico (Gasolina)	Costes anual del consumo de combustible	Coste total del generador eléctrico	Coste del sistema de almacenamiento (€)
3	253	7,180	7,433	7,777.50
4	380	13,643	14,023	10,370.45
6	479	20,584	21,063	15,555.67

En la tabla 27, los costes del generador eléctrico se refieren a la marca alemana Kaiser. En el mismo es de notar que para una potencia de 3 kW, lo más rentable sería utilizar un generador eléctrico, en cambio para 4kW y 6 kW lo ideal es utilizar un sistema de almacenamiento planteado.

Cuando hay una interrupción de suministro, se puede utilizar de forma efectiva el almacenamiento de energía. Este servicio requiere que tanto el sistema de almacenamiento como las cargas de los clientes se encuentren aislados durante el corte de suministro y que sea capaz de sincronizarse a la red cuando el suministro se restablece.

5.4.2 Conclusiones de Almacenamiento en el usuario final

En este escenario se ha descrito diferentes sistemas de almacenamiento para la ocurrencia de interrupciones programadas un cliente BTS2 en un circuito clase C. Sin embargo, se ha plantado otra alternativa, que ha servido para realizar una comparación de costes y beneficios para el cliente en cuestión.

Según los resultados obtenidos se puede verificar que un generador eléctrico para 3 kW es más factible que un sistema de almacenamiento utilizando baterías de Ion Litio.

Otro punto relevante y de gran importancia es, que lo que encarece el coste del generador eléctrico es el coste del combustible.

En fin, un sistema de almacenamiento sería una alternativa considerable para el suministro de energía eléctrica ante interrupciones programadas.

6. Esquema básico y algoritmos de control de un sistema de almacenamiento energético mediante el uso de baterías de Ion Litio

En los capítulos anteriores se han descrito y analizados los diferentes sistemas de almacenamiento para proponer su uso en las redes eléctricas de distribución. El algoritmo de control y el esquema básico a utilizar para los sistemas de almacenamiento planteados se presentan en esta sección [2].

6.1 Componentes del sistema de almacenamiento planteado [2]

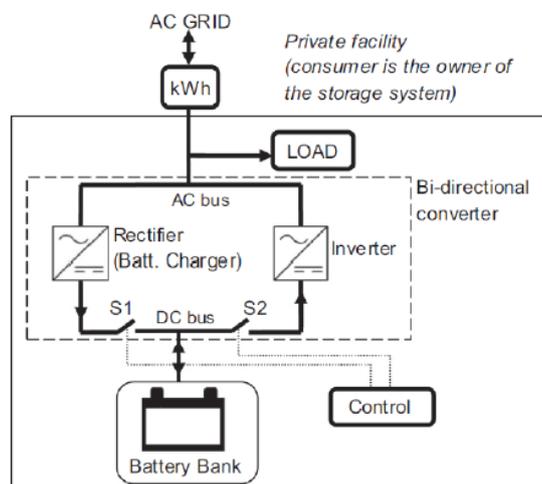
Red eléctrica: Es la parte del sistema de almacenamiento donde se cargará el banco de baterías, para posteriormente utilizar esta energía como fuente de abastecimiento energético.

Banco de baterías: Es el conjunto de baterías que se utilizan para suplir la energía demandada.

Convertidor bidireccional: Es el dispositivo del sistema de almacenamiento capaz de permitir el flujo energético en ambas direcciones (desde la red eléctrica al banco de baterías y viceversa). El convertidor bidireccional está compuesto por un rectificador (transforma la energía AC a DC) y de un inversor (transforma la energía DC en AC).

Sistema de control: es el encargado de ejecutar los ciclos de carga y descarga del sistema de almacenamiento actuando sobre el convertidor bidireccional.

En la gráfica 22, se muestra un esquema de los elementos anteriormente mencionados.



6.2 Algoritmos de control de ciclo de carga y descarga

En esta sección se describen las variables de entrada y salida de un sistema de control, para el sistema de almacenamiento planteado, en los 3 escenarios anteriormente analizados.

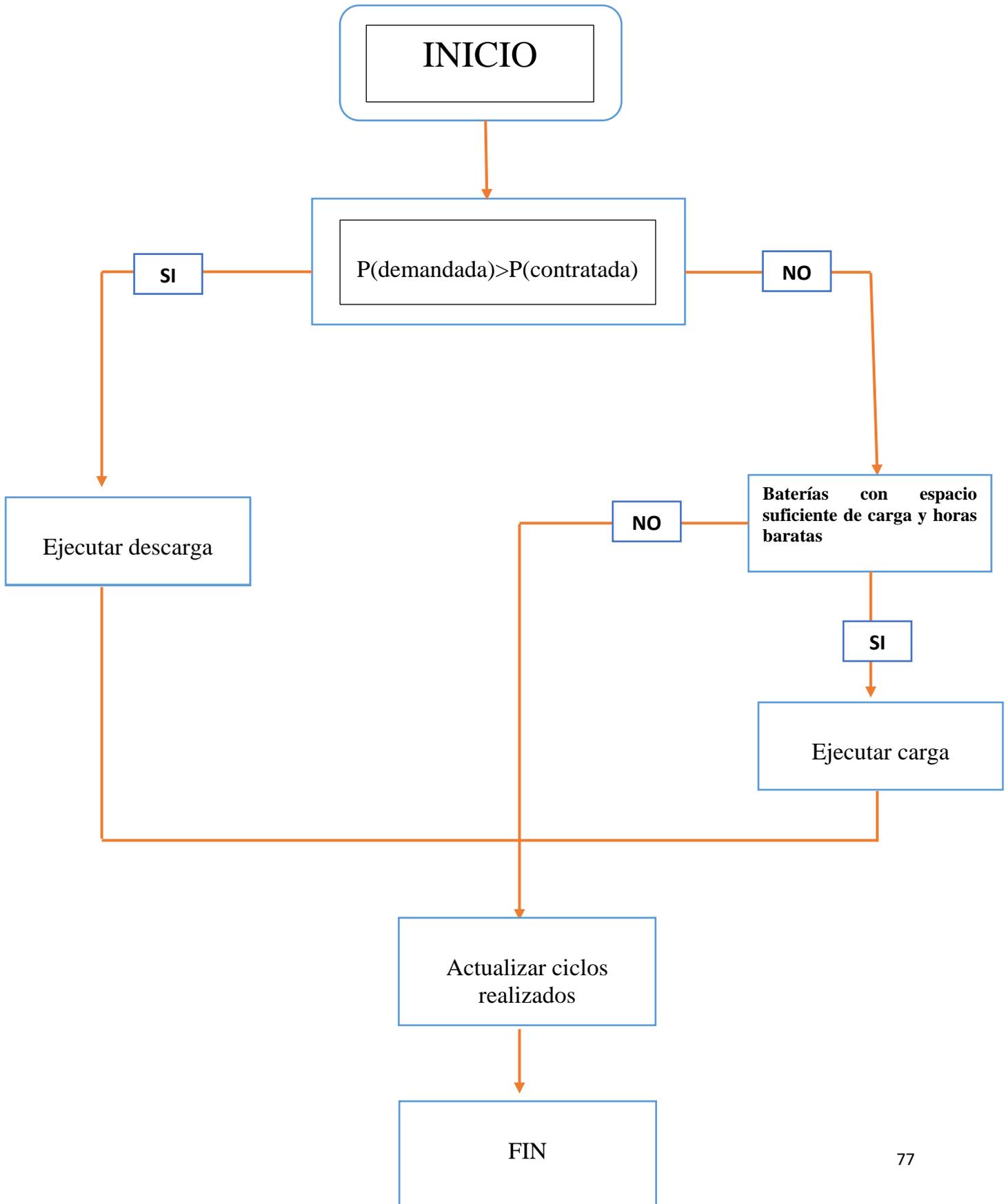
6.2.1 Algoritmo para la reducción de picos de potencia

Se presenta un algoritmo simplificado para la eliminación de picos de potencia. Este método no monitoriza el estado de carga del sistema de baterías cada vez que se realiza una operación, si no que se lleva a cabo una estimación respecto a cuantos ciclos de descarga puede realizar consecutivos el sistema basada en una hipótesis inicial.

Este método presenta mayor utilidad en la aplicación de reducción de picos de potencia, ya que no es necesario cuantificar de manera exacta los flujos de energía durante cada operación si no que interesa simplemente que las baterías estén disponibles para proporcionar la potencia necesaria durante un intervalo de tiempo determinado para eliminar los picos de potencia del sistema. La comprobación en este caso viene dada por verificar que la potencia demandada ($P(\text{demandada})$) supera la potencia reducida respecto a la potencia contratada por el cliente ($P(\text{reducida})$).

Este algoritmo se muestra en el siguiente esquema:

Algoritmo para la reducción de picos de potencia



En este esquema se muestra el algoritmo de funcionamiento para la reducción de picos de potencia, planteados en los escenarios 1 y escenarios 2, mostrados en el capítulo 5. La ventaja de este algoritmo es su simplicidad y su bajo coste computacional. Como ejemplo para las dos vertientes que se muestran en este algoritmo se muestra lo siguiente:

Ejemplo 1: Proceso de descarga de la batería

El algoritmo realiza una iteración durante un intervalo horario durante el cual se produce una demanda de potencia media de 5.3 kW. El sistema de baterías posee una capacidad total de 1.5 kW y el cliente tiene una potencia contratada de 6.5 kW, por lo que, según las hipótesis adoptadas, se consumirá energía almacenada para eliminar todos los picos superiores a: $6.5 - 1.5 = 5$ kW.

$5.3 \text{ kW} > 5 \text{ kW}$ por lo que en este caso el sistema iniciaría el proceso de descarga de las baterías para suplir el consumo y actualizaría el número de ciclos realizados.

Ejemplo 1: Proceso de carga de la batería

El algoritmo realiza una iteración durante un intervalo horario durante el cual se produce una demanda de potencia media de 5.3 kW. El sistema de baterías posee una capacidad total de 1 kW y el cliente tiene una potencia contratada de 6.5 kW, por lo que, según las hipótesis adoptadas, se consumirá energía almacenada para eliminar todos los picos superiores a: $6.5 - 1 = 5.5$ kW.

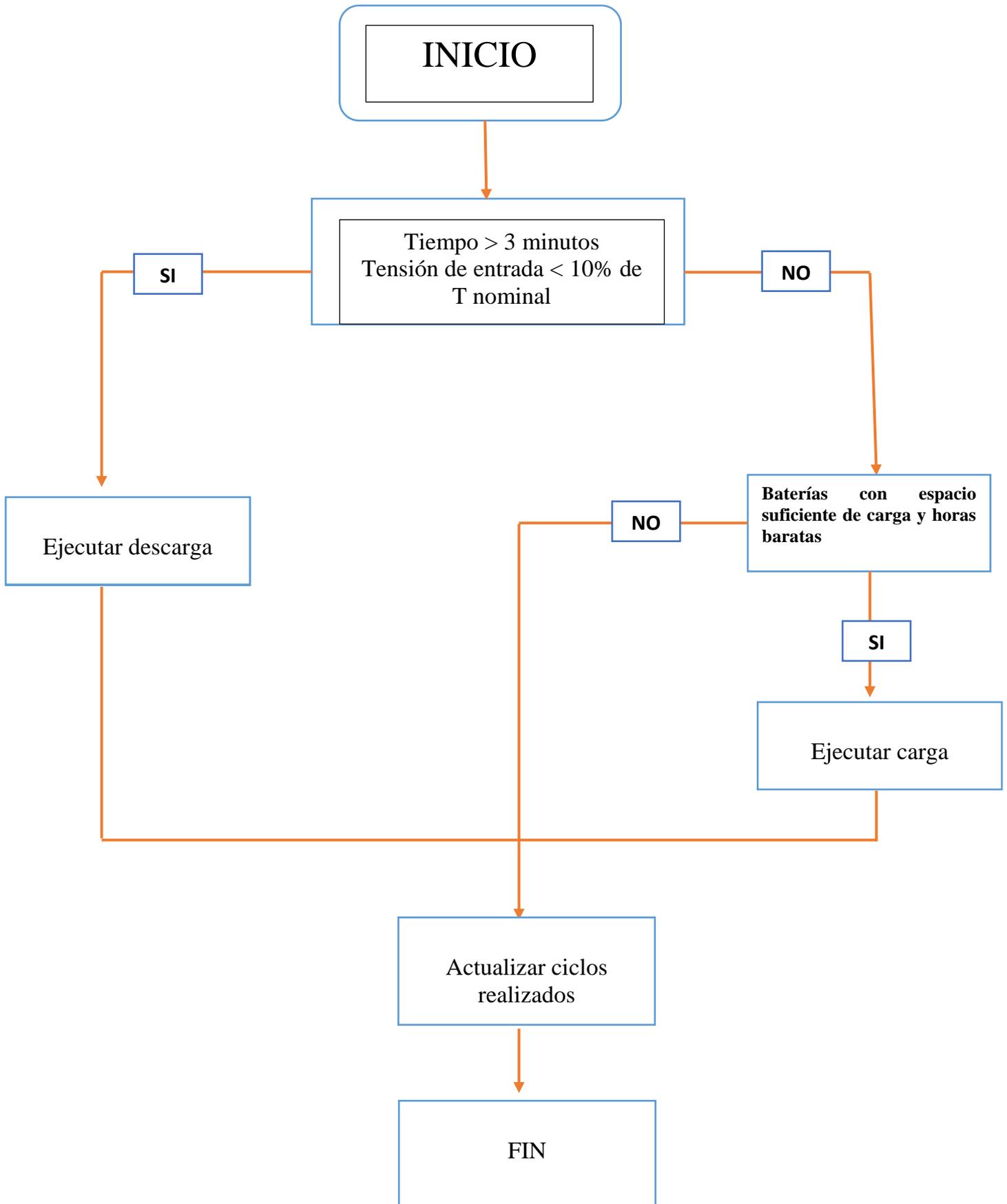
$5.3 \text{ kW} < 5.5 \text{ kW}$ por lo que en este caso el sistema iniciaría el proceso de carga de las baterías si estas no están cargadas a su capacidad y los costes de la energía se encuentran en una franja horaria de bajo coste.

6.2.2 Algoritmo para la actuación de almacenamiento ante interrupciones

Se presenta un algoritmo simplificado para el abastecimiento de la demanda ante interrupciones. Este método verifica que la tensión de entrada sea igual o mayor a cero.

Este algoritmo se muestra en el siguiente esquema:

Algoritmo de actuación de almacenamiento ante interrupciones



En este esquema se muestra el algoritmo de funcionamiento para el abastecimiento ante interrupciones, planteado en el Almacenamiento en el usuario final, mostrados en el capítulo 5. La ventaja de este algoritmo es su simplicidad y su bajo coste computacional. La función principal es abastecer la energía demandada para disminuir el coste de la energía no suministrada, en cada intervalo temporal, cuando la tensión de entrada tiene un descenso menor 10% de la tensión nominal, en un periodo de tiempo mayor de 3 minutos.

7. Conclusiones y recomendaciones

Dentro del funcionamiento habitual que poseen los sistemas eléctricos de potencia, los sistemas de almacenamiento de energía se deben consolidar como pieza clave a la hora de poder almacenar y gestionar los recursos generados en cada nodo de la red. Estos sistemas de almacenamiento han evolucionado mucho a lo largo del tiempo, ofreciendo actualmente una gama de nuevas posibilidades y tecnologías a la hora de implementarlos. Tecnologías que se destacan desde tecnologías eléctricas hasta electroquímicas, destacando en especial para las redes de distribución los sistemas de almacenamiento basados en baterías de Ion litio. Tecnología que, debido a su alta densidad de energía, eficiencia y su reducción actual de precio en el mercado se ha impuesto como una de las principales tecnologías a tener en cuenta para implementar un sistema de almacenamiento.

A la hora de emprender el diseño de un sistema de almacenamiento basado en baterías de litio para su implementación en las redes de distribución y en el usuario final de dichas empresas, hay que tener presente la profundidad y el alcance que pueden llegar a tener este tipo de proyectos y, en consecuencia, hay que plantearse su ejecución de una forma metódica y organizada, con el fin de evitar un posible fracaso del proyecto por falta de organización, especificaciones o no medir de forma correcta el alcance del mismo.

Los problemas habituales a los cuales se enfrentan las empresas de distribución son, perturbaciones de corta y larga duración que ocasionan interrupciones de suministro, los altos costes de la energía, las pérdidas comerciales, entre otros. Para los clientes de dicha empresa, se presentan problemas similares.

Para solucionar los problemas anteriores se proponen sistemas de almacenamiento mediante baterías de Ion Litio, ante escenarios de reducción de picos a lo largo del año, tanto para la empresa como para el usuario final, y escenarios, ante la ocurrencia de interrupciones programadas.

7.1 Resultados obtenidos

- El almacenamiento en las redes de distribución puede utilizarse para atrasar o evitar inversiones necesarias para mantener la adecuada capacidad en las redes de distribución, para alimentar todas las cargas. El aplazamiento de las mejoras podría ser el reemplazo de un transformador de distribución viejo o sobre cargado en una subestación o instalar conductores más gruesos en una línea de distribución.
- Cuando un transformador se sustituye por uno de mayor capacidad, la capacidad de este se selecciona de forma tal que se tenga en cuenta el crecimiento de la carga en un período de unos 15 a 20 años. Por lo tanto, gran parte de esta inversión es sub utilizada la mayoría del tiempo de vida útil del equipo.
- El almacenamiento de energía puede ser usado por los usuarios (clientes de la compañía eléctrica) para reducir sus costos globales de electricidad reduciendo su demanda durante los períodos de pico especificados por la compañía.
- Con un sistema de almacenamiento como lo que se ha planteado en el Almacenamiento en la distribuidora, la empresa tendría ahorros significativos que podrían ser utilizados para hacer inversiones en otros sectores.
- Se demuestra que para un nivel tarifario MTD1, la potencia máxima en este circuito es de 51.0035 kW.
- Se plantean sistemas de almacenamiento desde 5kW hasta 15 kW, con un coste que oscilan desde 12,962.5 hasta 38,887.5 Euros.
- En el mismo orden mientras aumentan las potencias y capacidad de almacenamiento de estos sistemas, aumenta el ahorro sistemático que tendría dicho cliente.
- Para este caso el tamaño óptimo sería un sistema de almacenamiento de 10 kW, ya que me proporciona un retorno de la inversión en 2.1 año y una vida útil de mi sistema de 2.8 años.
- Se demuestra que para un nivel tarifario MTD1, la potencia máxima en este circuito es de 26.04 kW.
- Se plantean sistemas de almacenamiento desde 2kW hasta 6 kW, con un ahorro anual de 91.7 hasta 4,971 euros.
- En el mismo orden mientras aumentan las potencias y capacidad de almacenamiento de estos sistemas, aumenta el ahorro sistemático que tendría dicho cliente.

- Para este caso el tamaño óptimo sería un sistema de almacenamiento de 6 kW, ya que me proporciona un retorno de la inversión en 3.2 años y una vida útil de mi sistema de 6.8 años.
- Se demuestra que para un nivel tarifario MTH, la potencia máxima en este circuito es de 16.97 kW.
- En el mismo orden mientras aumentan las potencias y capacidad de almacenamiento de estos sistemas, aumenta el ahorro sistemático que tendría dicho cliente.
- Para este caso el tamaño óptimo sería un sistema de almacenamiento de 4.5 kW, ya que me proporciona un retorno de la inversión en 4 años y una vida útil de mi sistema de 15 años.
- Se realizó un estudio de la utilización de un sistema de almacenamiento ante interrupciones programadas, y se compara con otra alternativa, donde se comprueba a que nivel es efectivo un sistema de almacenamiento energético.
- Del mismo modo se muestran los dos algoritmos de control que se deben seguir para que un sistema de almacenamiento funcione en óptimas condiciones en los diferentes escenarios planteados.

A modo general, el almacenamiento de energía es una alternativa que las empresas de distribución deben considerar a la hora de encontrar una solución óptima en problemas como los planteados en este trabajo. Hay que medir con lente de lupa, la rentabilidad del proyecto para diferentes dimensionamientos, debido a que este es un eje principal al momento de hacer el balance entre inversión y beneficios, a corto, mediano y largo plazo.

7.2 Propuestas para las empresas de distribución

En esta sección se presentan diferentes recomendaciones según los resultados obtenidos, para la empresa de distribución proveedora de los datos empleados:

El almacenamiento de energía representa un desafío para los reguladores y los encargados de formular políticas. Los recursos generadores de energía han tendido a añadirse a los sistemas para satisfacer de manera fiable la demanda en momentos de picos del sistema o para asegurar que se dispone de suficiente energía para satisfacer la carga a lo largo del año. El almacenamiento de energía proporciona tanto la generación como la carga, ya que puede agregar generación para ayudar a satisfacer la demanda máxima, al tiempo que presenta requerimientos de energía adicionales para aprovechar mejor la generación durante los períodos de baja carga. Los recursos de almacenamiento de energía pueden encontrar una aplicación económica por otros motivos, como el aplazamiento o la eliminación de las actualizaciones del sistema de distribución. Históricamente, el almacenamiento de energía a granel se ha justificado sobre la base de variaciones diurnas de los precios, pero estudios recientes han demostrado tanto valor procedente de la prestación de servicios auxiliares.

En este trabajo se han se ha propuesto la utilización de un sistema de almacenamiento en distintos escenarios, como son reducción de picos a nivel de circuito, a nivel comercial, industrial y doméstico, así como la utilización de un sistema de almacenamiento ante interrupciones programadas.

Basado en estas afirmaciones, y comprobaciones se recurre a recomendar:

- Instalar sistemas de almacenamiento en zonas donde sea de gran factibilidad su interacción en las redes eléctricas de distribución.
- Las empresas distribuidoras deben empezar a promover a sus clientes la instalación de sistemas de almacenamiento, ofreciéndoles un beneficio en el precio de la factura, para de este modo la empresa compre a bajo coste y el cliente pague menos.
- Promover políticas que remunere de forma apetecible a los clientes industriales que instalen sistemas de almacenamiento energético.
- Los usuarios finales, deben utilizar esta alternativa de almacenamiento de energía para desconectarse parcial o completamente de las redes de distribución, utilizando esta alternativa en combinación con energías renovables; de manera que cuando tenga excesiva cantidad de energía pueda exportar a las redes de distribución, y de este modo obtener beneficios económicos.

8 Bibliografía

- [1] T. Wildi, Maquinas Eléctricas y sistemas de potencia, Mexico: Pearson, 2007.
- [2] D. L. Laguna, Gestion de picos de potencia eléctrica a nivel doméstico mediante almacenamiento energetico en baterías, Sevilla: ETSI, 2016.
- [3] J. R. Morante, Almacenamiento de la electricidad, Madrid: Fundación Gas natural Fenosa, 2014.
- [4] L. E. Ventura, Análisis Global de los Diferentes Sistemas de Almacenamiento, Sevilla, 2016.
- [5] A. L. Sanchez, ESTUDIO DEL ALMACENAMIENTO DE ALMACENAMIENTO MEDIANTE AIRE COMPRIMIDO, Universidad Politécnica de Catalunya, 2015.
- [6] R. tecnologías, «centralestermosolares.com,» 2017. [En línea]. [Último acceso: 30 mayo 2017].
- [7] M. d. R. A. Corchado, Comparación de Sistemas de control de almacenamiento de energía para aportar a regulación de frecuencia, Sevilla, 2016.
- [8] G. G. Gonzalez, «Almacenamiento de energía magnetica por superconducción,» 2016.
- [9] I. G. Mera, «Baterías y supercondensadores,» de *DISEÑO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA HÍBRIDO BASADO EN BATERÍAS Y SUPERCONDENSADORES PARA SU INTEGRACIÓN EN MICROREDES ELÉCTRICAS* , Sevilla, Universidad de sevilla (ETSI), 2016.
- [10] L. G. Tabarez, «Diseño de una bobina superconductor de baja temperatura crítica para su utilización en un regulador de corriente,» Ciemat, Madrid.
- [11] B. M.-C. BRINTRUP, Dimensionamiento y localización optima de los sistemas de almacenamiento de energía en redes de distribución, Santiago de chile, 2014.
- [12] P. Mckenna, «<https://www.technologyreview.es/s/1809/unos-imanessuperconductores-para-el-almacenamiento-de-energia-escala-de-redes>,» Mit technology review, 10 marzo 2011. [En línea]. Available: technologyreview.es. [Último acceso: 1 junio 2017].

- [13] Z. Yu, «IMPROVING THE POWER QUALITY AND POWER RELIABILITY BY ENERGY STORAGE TECHNOLOGY—THE PRACTICE OF SMEPC,» *IEEE*, n° 0479, pp. 8-11, 2009.
- [14] K. dragoon, Energy storage opportunities and callenges (ECOFYS), 2014.
- [15] G. DELILLE, B. FRANÇOIS, G. MALARANGE y J.-L. FRAISSE, «ENERGY STORAGE SYSTEMS IN DISTRIBUTION GRIDS: NEW ASSETS TO UPGRADE,» *CIREN*, n° 0493, pp. 1-4, 2009.
- [16] Z. ZHANG y S. LIUE, «THE ENERGY STORAGE APPLICATION STRATEGY IN DIFFERENT VOLTAGE LEVELS OF DISTRIBUTION SYSTEM,» *CIREN*, 2011.
- [17] R. Cremers, «STORAGE OPTIMIZATION IN DISTRIBUTION SYSTEMS,» *CIREN*, 2011.
- [18] V. SILVA, V. STANOJEVIĆ y D. PUDJIANTO, «APPLICATION OF STORAGE AND DEMAND SIDE MANAGEMENT TO OPTIMISE EXISTING NETWORK CAPACITY,» *CIREN*, 2012.
- [19] M. KLEIMAIER, W. GLAUNSINGER y D. U. SAUER, «RELEVANCE OF ENERGY STORAGE IN FUTURE DISTRIBUTION NETWORKS WITH HIGH PENETRATION OF RENEWABLE ENERGY SOURCES,» *CIREN*, 2009.
- [20] F. j. a. martinez, «Tecnologías de baterías eléctricas; Analisis y viabilidad económica».
- [21] T. TENGNER, W. HERMANSON y J. EHNBERG, «PRACTICAL GRID BENEFITS OF BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEM IN FALKÖPING DISTRIBUTION GRID,» *CIREN*, 2013.
- [22] F. J. M. Arroba, Desarrollo de sistemas de almacenamiento de energía para smart grids, Sevilla, 2016.
- [23] N. C. Loreto, Caracterización de los Sistemas de Almacenamiento, Sevilla, 2016.
- [24] A. Oberhofer, Global Energy Network Institute, 2012.
- [25] A. Oberhofer, «GENI (Global Energy Network Institute),» Mexico, 2012.
- [26] S. d. Electricidad, «Ley General de Electricidad 125-01 y su reglamento de aplicación 2012,» SIE, Santo Domingo, 2012.
- [27] OLADE, «Aspectos regulatorios y tarifarios-caso Republica Dominicana,» 2014.

- [28] U. d. A. d. Distribución, División Territorial de Empresas Distribuidoras Dominicanas, Santo Domingo: CDEEEE, 2012.
- [29] S. d. electricidad, «SIE.GOV.DO,» 28 Junio 2017. [En línea]. Available: <http://www.sie.gob.do/regulacion/estadisticas-regulacion>. [Último acceso: Junio 30 2017].
- [30] CIGRE, «Benchmark Systems for Network Integration of Renewable and Distributed Energy Resources,» 2013.
- [31] C. JARDINE y A. ALARCÓN-RODRIGUEZ, «MODELLING AND OPTIMISATION OF ENERGY STORAGE SYSTEMS IN POWER DISTRIBUTION NETWORKS,» *CIGRE*, 2011.
- [32] J. M. J. M. Garrett Fitzgerald, «THE ECONOMICS OF BATTERY ENERGY STORAGE,» Rocky montain institute, 2015.
- [33] F. J. M. Brieva, «La TIR un Herramienta de cuidado,» Chile, 2010.
- [34] «Keiser generadores,» Keiser, [En línea]. Available: <http://www.ventageneradores.net/generadores-gasolina?gclid=CKGj6ev16tQCFcEp0wodGAQAqA>. [Último acceso: 2017 Julio 2].
- [35] I. G. mera, «Diseño de un almacenamiento Híbrido basado en baterías y superconductores para su integración en microredes eléctricas,» 2016.

Anexo A: Grado de desarrollo de las diferentes tecnologías

En esta sección se desglosan las características principales de los diferentes sistemas de almacenamiento, así como su grado de madurez y sus principales ventajas y desventajas.

A continuación, la tabla 2, desglosa el grado de madurez de las diferentes tecnologías de almacenamiento:

Tabla 24. Grado de desarrollo de las tecnologías [3]

Desarrollo	Definición	Tecnologías
Madura	Aquellas tecnologías con muchas décadas de experiencia y múltiples unidades comerciales operando.	<ol style="list-style-type: none">1. Hidráulica de Bombeo2. Batería de plomo Ácido
Comercial	Posee algunas décadas de experiencia y unidades de tamaño comercial operando.	<ol style="list-style-type: none">6. Primera generación de CAES7. Baterías de Plomo ácido.8. Baterías de sulfuro de sodio

Demostración	Con años de experiencia y con alguna unidad de tamaño comercial actualmente en funcionamiento.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Segunda generación de CAES. 2. Batería de flujo (Redox) de Vanadio. 3. NiMH (Batería de Niquel con Hidruro metálico). 4. Plomo ácido avanzado 5. Ion-Litio 6. Térmico 7. Volante de inercia
Piloto	Sin experiencia comercial, con algunas unidades piloto en funcionamiento.	Ion-Litio, Fe/Cr, NaNiCl ₂
Laboratorio	Sin unidades actualmente en operación, realizando testeos de unidades pequeñas	Zn/air, Zn-Cl, Ion-Litio avanzado, Plomo ácido avanzado.
Idea	Vistas en la literatura, pero sin antecedentes de aplicaciones reales.	CAES sin combustible (“adiabático”), nano-supercapacitores.

A continuación, en la tabla 3 se analizan las posibles tecnologías a utilizar en un sistema de almacenamiento en redes de distribución:

Tabla 25. Tecnologías de almacenamiento (Ventajas, desventajas y aplicaciones)

Tecnologías	Ventajas	Desventajas	Aplicaciones
Volantes de inercia	Elevada densidad de potencia y energía. Rápida capacidad de respuesta. Poco mantenimiento y esperanza de vida de 20 años.	Coste inicial mayor que las baterías pero requieren menos mantenimiento y presentan mayor durabilidad.	Estabilización de frecuencia de la red. Sector transporte (trenes, autobuses eléctricos). Suministro de energía durante un breve intervalo de tiempo (ascensores y grúas). Ejemplo de aplicación: planta de regulación de Stephentown (EEUU).
CAES	El CAES Isotérmico destaca por su flexibilidad, la ausencia de emisiones y escalabilidad independiente en la potencia y capacidad de almacenamiento.	Elevado tiempo de respuesta. Las capacidades y rendimientos son menores en comparación al sistema hidráulico de bombeo. Poca madurez tecnológica.	Soporte a la red de distribución eliminando la necesidad de sistemas auxiliares de estabilización. Actúan como elemento para obtener el balanceo de generación de potencia entre oferta y demanda, así como de elementos de restablecimientos del sistema. Ejemplo de aplicación: Plantas de CAES de Huntorf (Alemania) y McIntosh (EEUU).
Supercapacitores	Alta densidad de potencia, tiempos de respuestas rápidos. Amplio rango de temperatura de trabajos desde -40 °C a +85 °C.	Densidad energética baja, alto nivel de autodescargas fluctuaciones en los valores de voltaje de carga y descarga. Costes excesivos	Automoviles, autobuses híbridos, dispositivos electrónicos como móviles y portátiles, taladros y maquinarias portátiles, luces flash de cámaras, trenes, grúas, ascensores, sistemas de frenado en autobuses, trenes ó tranvías. Elementos para sistemas híbridos de almacenamiento.

	Eficiencia alta por ciclo de carga/descarga 85-98%. Nulo mantenimiento, con un elevado número de ciclos.	limitan su uso en redes eléctricas.	Ejemplo de aplicación. Instalaciones de energía solar y eólica así como redes in Palmdale, California (USA).
Superconductores	Alta capacidad de almacenamiento de energía magnética, y larga vida útil. Carecen de partes móviles lo que hace incrementar su fiabilidad y robustez. Son fácilmente integrables como parte de sistemas híbridos de almacenamiento.	Necesidad de disponer de un sistema criogénico y sistemas modulares para favorecer la escalabilidad. Costes elevados. Elementos críticos poco abundantes para las bobinas superconductoras	Calidad de onda en las redes de distribución de electricidad, típicamente la neutralización de las caídas y súbitas de tensión y los microcortes. Componentes en sistemas híbridos. Ejemplo de aplicación: Wisconsin Estados Unidos.
Baterías			
Batería Plomo-Ácido	Madurez tecnológica. Modularidad que permite diseños avanzados de sistemas a partir de combinación de celdas y módulos más simples o en sistemas híbridos.	Largos tiempos de carga. Excesiva influencia de la temperatura ambiente. Mantenimiento excesivo. Bajo número de ciclos para sus aplicaciones en redes eléctricas.	Automoción. Control de la red: frecuencia, tensión, potencia. Nivelación de la curva de demanda diaria. Ejemplo de aplicación: Southern Californi Edison Chino Battery Storage Project, Ca, (USA).
Batería Ni-Cd	Tecnología madura y robusta. Elevado rendimiento (mejor rendimiento que la batería de plomo ácido).	Alta toxicidad del cadmio, elevado coste, efecto memoria.	Dispositivos domésticos, aplicaciones en telecomunicaciones, satélites y astronáutica y compensación de energía reactiva. Ejemplo de aplicación: Golden Valey Electric Association (GVEA), Fairbarks, Alaska, USA.
Batería NiMH	Ecológicamente benigna y con mayor densidad de energía que la batería Ni-Cd.	Alta autodescarga. Rango de temperaturas aconsejables (0-45 °C). No trabajan bien a bajas temperaturas. Celdas costosas.	Dispositivos electrónicos portables (teléfono móviles), vehículos híbridos, telecomunicaciones, satélites, astronáutica.

Batería Ion Litio	Alta eficiencia y densidad de energía, comparada a otras tecnologías electroquímicas Bajo mantenimiento requerido. Alto voltaje de la reacción redox por celda.	<ul style="list-style-type: none"> • Costes elevados para aplicaciones de escala media y alta. • Debido a su compleja estructura interna, mantenimiento de voltajes de seguridad y rangos de temperatura de operación. • Se requieren circuitos de protección. • Uso de electrolitos orgánicos inflamables. 	<ul style="list-style-type: none"> • Pequeños dispositivos, vehículo eléctrico, soporte a red y al transporte de electricidad. <p>Ejemplo de aplicación: Proyecto de Tehachapi, en California, EEUU.</p>
-------------------	---	---	--

Anexo A: Tecnologías seleccionadas para el análisis económico de rentabilidad en los sistemas de distribución

En esta sección se evalúan los sistemas de almacenamiento, basados en los diferentes criterios que se detallan a continuación [12]:

1. **Eficiencia:** Los dispositivos de almacenamiento presentan pérdidas. Para evaluar la eficiencia se debe tener en cuenta el ciclo completo: Carga, Mantenimiento de carga y descarga.
2. **Durabilidad:** El tiempo de vida dependerá en algunos casos del número de ciclos de carga y descarga, profundidad del ciclo, nivel de no retorno en la descarga y envejecimiento.
3. **Densidad de energía y potencia de almacenamiento:** Son relevantes para la evaluación de la relación energía/potencia de una tecnología y para determinar el volumen y peso de una solución dada. Estas son características importantes para las aplicaciones con espacio y peso limitado, como el transporte o aparatos móviles y para su instalación en zonas urbanas o edificios donde el espacio es limitado.
4. **Fiabilidad:** Probabilidad que un dispositivo funcione durante un periodo de tiempo especificado.
5. **Tiempo de respuesta:** Desde unos milisegundos a algunos minutos.

6. **Capacidad de almacenamiento:** potencia y energía. En algunas aplicaciones es preciso disponer de una alta capacidad de almacenamiento de energía mientras que otros casos se requieren sistemas con gran capacidad de potencia.
7. **Coste de la energía almacenada:** El precio del kWh almacenado puesto de nuevo en la red eléctrica comparado con el coste del kWh generado y puesto también en la red (Costes LCD "Levelized Cost of the Energy")

A continuación, la tabla 4 muestra una evaluación de estos criterios, para las diferentes tecnologías [12]:

Tabla 26. Criterios de evaluación de las diferentes tecnologías

Características	Hidráulicas de bombeo	Volantes de Inercia	CAES	Baterías ion Litio	Baterías de flujo Redox	Supercapacitores	Bobinas Superconductoras
Rango de Potencia (MW)	1000-1500 MW	0.002-20 MW	100-300 MW	50 MW	Hasta 7 MW	0.01 – 1 MW	0.01 – 10 MW
Intervalo de duración (Tiempo)	1 – 24 h	s – 15 min	1 – 24 h	min- h	>10 h	ms – min	ms – 5 min
Tiempo de respuesta (s-min)	s-min	s	5 – 15 min CAES submarino <2 min	variable	ms	ms	ms
Densidad de energía Wh/Kg ó Wh/l	0,04-1,5 Wh/l	5 – 30 Wh/kg	30-60 Wh/Kg	250 Wh/Kg	50 Wh/kg	0.1-15 Wh/Kg	0.05-5 Wh/Kg
Autodescarga (%/día)	0 %/día	0-100 %/día	0%/día	0.2 %/día	0.1%/día	2-40%/día	2-40%/día
Rendimiento del ciclo de carga y descarga (%)	75 %	85-95 %	55 – 75 %	90 %	85 – 90 %	95 %	95 %
Vida media (Años)	50 – 100	>20	25 - 40	5	>20	>20	>20

Anexo B: Artículo sobre Almacenamiento de energía en distribución eléctrica

Almacenamiento de energía en distribución eléctrica

Liranzo Paulino Christopher de Jesús
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Resumen— Las empresas distribuidoras se relacionan a diario con escenarios desfavorables en el suministro de energía, como son interrupciones de suministros, sobre cargas de transformadores y líneas eléctricas, incremento de la demanda en horas punta, donde el precio de la energía es elevado. Por estas razones en este trabajo se propone el almacenamiento en redes eléctricas de distribución. En primera instancia se describen los diferentes tipos de almacenamiento, se describen sus ventajas y desventajas, y la utilización del almacenamiento en diferentes sectores de los sistemas eléctricos de potencia. Se evalúa un sistema de almacenamiento desde varias perspectivas. En primer lugar, se analiza la rentabilidad de un sistema de almacenamiento de energía como empresa distribuidora, con el objetivo principal de recortar la punta de la demanda a lo largo del año, haciendo un ejercicio de carga y descarga diaria durante todo el año, con el fin de minimizar la compra de energía en períodos de alto coste. Se analiza de igual manera el uso de un sistema de almacenamiento desde el punto de vista del consumidor, en donde se comparan varios clientes con diferentes niveles tarifarios, y se diagnostica la rentabilidad de diferentes sistemas de almacenamiento para la reducción de picos de demanda a lo largo del año.

I. INTRODUCCIÓN

Un sistema eléctrico de potencia se compone de empresas de generación, de transmisión y distribución de energía eléctrica. El propósito fundamental es mantener un balance entre generación y consumo. Considerando que la potencia total absorbida por los clientes de una compañía de electricidad fluctúa entre límites amplios, dependiendo de la estación del año, de la hora y del día, se deben tener los mecanismos

necesarios para que no exista un desbalance que pueda afectar de forma negativa el abastecimiento de la demanda.

En el mundo actual los lineamientos a seguir, son una disminución considerable del consumo, generación con energías que no posean emisiones de CO₂, y nuevos mecanismos de generación de energía eléctrica.

Los sistemas actuales no poseen sistemas de almacenamiento con una gran diversidad, apenas se han desarrollado sistemas de almacenamientos hidráulicos por bombeo a gran magnitud, sin embargo, sus limitaciones geográficas y el gran costo de inversión, que poseen estas tecnologías, han hecho que se indague en nuevos procedimientos, procesos y sistemas para almacenar energía, y transformarla en energía eléctrica, con el fin de mantener los sistemas eléctricos de potencia en balance energético.

El propósito principal de los sistemas de almacenamiento es permitir la acumulación de energía, en determinados períodos de tiempo, para poder ser despachada o utilizada en otros.

Cuando observamos el modelo actual de generación y consumo energético, es de notar que la energía generada es directamente consumida, solo unos momentos después, lo que puede provocar que cualquier perturbación o desequilibrio puntual, debe ser compensando por otra fuente de energía.

La energía almacenada en períodos valle, es devuelta a la red durante los picos de demanda pasando así a satisfacer la demanda energética con una sola planta de generación, operando a un rendimiento más elevado, cuando sin almacenamiento se precisaba de dos plantas de generación operando durante largos intervalos de tiempo a bajo rendimiento [1].

Cuando se dispone de sistemas de almacenamiento se precisa lograr lo siguiente:

- Balance entre demanda y consumo.
- Gestionar las redes de transmisión y distribución
- Promocionar la gestión de la demanda
- Mejorar la competitividad y seguridad de la red eléctrica.

II. TECNOLOGÍAS UTILIZADAS PARA EL ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA

A. Concepto general

El Almacenamiento de energía consiste conservar energía, para luego ser liberada en su forma original, o en otra que a la que ha sido transformada. En la actualidad se almacena energía en forma de energía cinética o potencial, para a posteriori ser convertida en energía eléctrica.

En la tabla 1. Se muestra las diferentes tecnologías que se utilizan para el almacenamiento de energía [2].

Tabla 1. Almacenamiento por tipo de tecnología [3]

ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA				
Energía cinética			Energía potencial	
Térmica	Eléctrica	Mecánica	Química	Electroquímica

Cada una de estas tecnologías tienen su división particular, que la caracteriza respondiendo a la energía primaria en cuestión. Se procede a describir el impacto en los diferentes niveles del sistema eléctrico de potencia que poseen los sistemas de almacenamiento de energía.

B. Impacto de los sistemas de almacenamiento de energía en los sistemas eléctricos de potencia

La incorporación de los sistemas de almacenamiento en el sector energético ha creado impacto significativo en todos los niveles, desde la generación de energía hasta el consumidor final (figura 1). La diversa funcionalidad y aplicación en el campo energético hacen del almacenamiento, un sistema útil y necesario, para el sector hoy en día. El almacenamiento energético puede ser aplicado como centrales de generación convencionales, también como reguladores de frecuencia, e incluso para atenuar picos de potencia. Aunque el tema

principal de este trabajo es el almacenamiento en los sistemas eléctricos de distribución, hay que mencionar el uso del almacenamiento por los generadores, distribuidores y sistemas de transmisión de energía, aunque el mayor enfoque sigue siendo el almacenamiento de energía en redes eléctricas de distribución y consumidores finales [3].

1. Utilidad del almacenamiento en los sistemas de generación

Los generadores deben ofrecer al sector criterios de estabilidad de frecuencia. La forma habitual de controlar la frecuencia es variando la potencia de salida de los generadores. Basándonos en este principio, los sistemas de almacenamiento pueden utilizarse para controlar frecuencia.

Hay que considerar que la energía generada debe ser igual en todo momento a la energía demandada. Manteniendo el sistema bajo los criterios de estabilidad. Basándonos en este concepto los generadores energéticos pueden utilizar el almacenamiento energético, para aplanar la curva de demanda, mejorar la eficiencia, disminuir costes y de igual manera el consumo de combustible. La utilidad ideal, es almacenar energía en las horas valles (donde el consumo de energía es menor que en otros periodos), para liberarlo en períodos puntas (donde está el mayor consumo energético del sistema).

Cuando el sistema eléctrico se encuentra en un estado de emergencia, en los sistemas de almacenamiento tenemos una poderosa fuente de energía para subsanar esta necesidad.

2. Utilidad del almacenamiento en las redes de transporte

La construcción de líneas de transmisión se debe en muchos casos, a que la demanda ha aumentado, sin embargo, podemos postergar la construcción de estas líneas, utilizando almacenamiento donde se requiera, para producir esta energía demandada. En fin, lo que se requiere es proponer pequeños almacenamientos al extremo de líneas sobrecargadas.

En diferentes sistemas eléctricos, ante diferentes perturbaciones se dividen en islas aisladas. En esta ocasión lo que se estipula es tener generación disponible para suplir la demanda ante estas

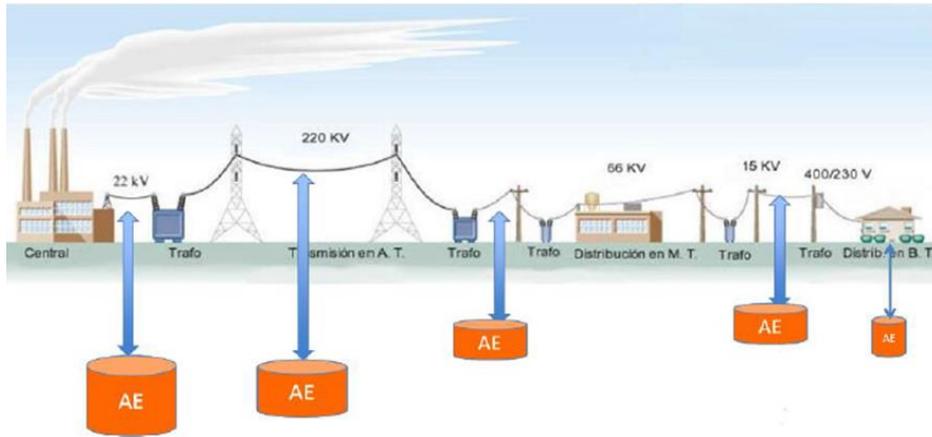


Ilustración 1. Ilustración 1. Sistemas de almacenamiento en los diferentes niveles del sistema eléctrico

situaciones de emergencia. Se puede utilizar almacenamiento para hacer el suministro de potencia a los consumidores, ante esta situación. Lo que provocaría que con generadores de poca capacidad y un sistema de almacenamiento se resuelva el problema.

3. Utilidad del almacenamiento en redes eléctricas de distribución

El almacenamiento en las redes de distribución puede utilizarse para atrasar o evitar inversiones necesarias para mantener la adecuada capacidad en las redes de distribución, para alimentar todas las cargas. El aplazamiento de las mejoras podría ser el reemplazo de un transformador de distribución viejo o sobre cargado en una subestación o instalar conductores más gruesos en una línea de distribución.

Cuando un transformador se sustituye por uno de mayor capacidad, la capacidad de este se selecciona de forma tal que se tenga en cuenta el crecimiento de la carga en un período de unos 15 a 20 años. Por lo tanto, gran parte de esta inversión es sub utilizada la mayoría del tiempo de vida útil del equipo.

4. Utilidad del almacenamiento por el usuario final

Uno de los objetivos de este trabajo es demostrar de qué manera se puede utilizar almacenamiento para brindarle seguridad a los consumidores que se encuentran aguas abajo de los sistemas de almacenamiento contra eventos de corta duración que afectan la calidad de la energía servida a las cargas de los consumidores.

Cuando nos referimos a los eventos que podrían afectar la calidad del servicio, nos enfocamos en lo siguiente:

- Variación de tensión
- Bajo factor de potencia.
- Presencia de armónicos.
- Interrupciones del servicio.

En fin, los sistemas de almacenamiento se descargan lo necesario, para amortiguar cualquier evento; al que ha sido sometido. Cabe destacar que estos eventos pueden durar desde pocos segundos hasta varios minutos.

III. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LAS DIFERENTES TECNOLOGÍAS

En la tabla 2, se muestran las características principales de los distintos tipos de tecnologías de almacenamiento que se proponen a utilizar, para aplicarlas a redes eléctricas de distribución.

Tabla 2. Características de las distintas tecnologías

Tecnología	Eficiencia	Tiempo de respuesta
Bombeo	80-82%	Seg-min
Aire comprimido	60-70%	Seg-min
Volante de inercia	85-87%	Instantáneo
Baterías plomo-acido	75-90%	Milisegundos
Baterías Ion-Litio	87-94%	Milisegundos
Baterías Redox	65-75%	Milisegundos
Supercapacitores	90-94% ¹³	Milisegundos
Superconductores	95% ¹⁴	Instantáneo

Los costes de los sistemas de almacenamiento varían dependiendo de la potencia y la energía. Esta es el factor principal que se debe considerar a la

hora de medir la rentabilidad de un proyecto de esta magnitud. En la tabla 3, se muestran la variación de los costes por potencia y energía de los distintos tipos de almacenamiento.

Tabla 3. Costes de los sistemas de almacenamiento

Tecnología	Coste (€/kW)	Coste (€/kWh)
Bombeo	1,500 - 2,700	138 - 338
Aire comprimido	960 - 1,250	60 - 150
Volante de inercia	1,950 - 2,200	7,800 - 8,800
Baterías plomo-acido	950 - 5,800	350 - 3,800
Baterías Ion-Litio	1,085 - 4,100	900 - 6,200

IV. CASO DE ESTUDIO

Se analiza un circuito correspondiente a una red de distribución (tabla 4), de manera que se proponen verificar la rentabilidad técnico-económica de diferentes dimensionamientos de sistemas de almacenamientos para cada uno de los casos cuestionados.

Tabla 4. Datos de circuito suministrado

Mes	Consumo del circuito kWh	Total pagado por el circuito
ene-16	3,430,619	336,200.71 €
feb-16	3,410,773	443,400.46 €
mar-16	3,746,102	407,950.56 €
abr-16	3,936,547	433,020.15 €
may-16	4,154,349	581,608.92 €
jun-16	4,328,910	571,416.09 €
jul-16	4,507,985	676,197.82 €
ago-16	4,388,745	636,368.05 €
sep-16	4,502,246	445,722.38 €
oct-16	4,498,486	544,316.84 €
nov-16	3,967,931	392,825.17 €
dic-16	4,046,301	574,574.68 €

Se procede a medir la rentabilidad de distintos dimensionamientos de sistemas de almacenamiento mediante baterías de Ion Litio, porque según las características del mismo es el más favorable para

este tipo de situaciones.

V. PRUEBAS

Este estudio analiza los beneficios de un sistema de almacenamiento mediante baterías de Ion Litio para la red de la tabla 4, sometándose a los siguientes escenarios:

Escenario 1: Almacenamiento en la distribuidora (Reducción del consumo energético anual del circuito en evaluación).

Escenario 2: Almacenamiento en el usuario final (Reducción del consumo energético anual del circuito en evaluación).

Escenario 3: Almacenamiento en el usuario final (Almacenamiento en caso de interrupciones programadas).

La empresa de distribución pagó en el año 2016 sólo por compras de energía para este circuito alrededor de 6 millones de euros. Con un sistema de almacenamiento reduciendo el consumo energético anual lo que se busca es, reducir este monto y con este ahorro, dicha empresa pueda realizar inversiones en otros sectores.

Se analizan diferentes dimensionamientos como muestra la tabla 5:

Tabla 5. Rentabilidad del sistema de almacenamiento

Potencia del sistema de almacenamiento (kW)	VAN	TIR	Recuperación de la inversión (años)
750	- 628,891.71 €	0.19%	105.75
1000	- 248,299.02 €	0.72%	12.36
1250	16,729.83 €	5.7%	2.52
1500	59,469.39 €	8.0%	1.35
2000	110,606.80 €	9.7%	1.13
2500	153,034.01 €	10.6%	1.00
3000	542,612.24 €	23.4%	0.81

El valor actual neto presenta valores positivos a partir de 1.25 MW en donde la empresa de distribución obtiene una recuperación de la inversión en 2 años y 6 meses y, una vida útil de 12 años y 6 meses. Este resultado indica que dicho sistema de almacenamiento representa alrededor de 10 años de beneficios, en donde las inversiones en

otros sectores pueden ser beneficiosas. Hay que destacar que a medida que aumenta el dimensionamiento del sistema de almacenamiento, disminuye la vida útil debido a que aumenta la frecuencia de los ciclos de carga y descarga anual, y la recuperación de la inversión es cada vez en menor tiempo.

Para el escenario 2, donde se trata de reducir el consumo energético anual en el usuario final, se aplica a tres clientes con diferentes niveles tarifarios. En la tabla 6, se muestra el comportamiento de estos clientes en el año 2016, y a posteriori se analizan distintos dimensionamientos de sistemas de almacenamiento para cada una de las cuestiones citadas.

Hay que destacar que, para la red de estudio, el nivel tarifario de los clientes se clasifica dependiendo del punto de conexión a la red de distribución y del consumo energético. En este caso se analizan tres clientes conectados a la red de media tensión.

Tabla 6. Consumo de cliente por nivel tarifario

Mes	Consumo cliente MTD1 kWh	Consumo cliente MTD2 kWh	Consumo cliente MTH kWh
ene	24,480	11,880	5,640
feb	21,960	12,060	6,840
mar	23,760	11,160	4,800
abr	23,940	11,820	5,400
may	25,200	11,940	7,200
jun	25,740	13,920	5,880
jul	28,080	11,640	6,360
ago	29,160	12,240	7,320
sep	29,520	12,420	5,880
oct	29,700	11,760	6,480
nov	28,080	11,460	6,360
dic	23,580	11,100	6,120

Cabe caracterizar que el consumo máximo lo posee los clientes con tipo de factura MTD1 y el mínimo los clientes con tarifas MTH, sin embargo, el coste por potencia y energía es mayor para un nivel tarifario MTH y menor para un nivel tarifario MTD1.

Es de notar el comportamiento durante el año 2016, de cada uno de los clientes conectados en la red de media tensión. A continuación, en las tablas

7,8 y 9, se analizan diferentes dimensionamientos para cada tipo de cliente:

Tabla 7. Cliente MTD1

Potencia del sistema de almacenamiento (kW)	VAN	TIR	Retorno de la inversión
5	1,171.77	7.226%	6.1 (años)
10	5,547.84	17.3222%	2.1 (años)
15	8,771.16	27.05%	11 meses

Tabla 8. Cliente MTD2

Potencia del sistema de almacenamiento (kW)	VAN	TIR	Retorno de la inversión
2	-3,202.17	1.313%	66 años
4	606.31	5.622%	13 años
6	9,217.44	22.504%	3.2 años

Tabla 9. Cliente MTH

Potencia del sistema de almacenamiento (kW)	VAN	TIR	Retorno de la inversión
1.5	-2,639.69	1.41%	69 años
3	5,131.7	9.56%	10 años
4.5	20,163.5	26.30%	4 años
6	28,527.58	36.12%	3 años
7.5	46,737.82	48.25%	2 años
9	57,575.78	68.36%	1.3 años

Nivel tarifario: MTD1

- Para este caso el tamaño óptimo sería un sistema de almacenamiento de 10 kW, ya que me proporciona un retorno de la inversión en 2.1 año y una vida útil de mi sistema de 2.8 años.

Nivel tarifario: MTD2

- Para este caso el tamaño óptimo sería un sistema de almacenamiento de 6 kW, ya que me proporciona un retorno de la inversión en 3.2 años y una vida útil de mi sistema de 6.8 años.

Nivel tarifario: MTH

- Para este caso el tamaño óptimo sería un sistema de almacenamiento a partir de 4.5 kW, ya que me proporciona un retorno de la inversión en 4 años y una vida útil de mi sistema de 15 años, o de un mayor dimensionamiento.

Cuando la vida útil de un sistema de almacenamiento supera el tiempo de utilización en una zona determinada, se debe considerar instalar un sistema de almacenamiento móvil para que, en caso de cambios bruscos en el consumo de una zona en específica, se proceda a instalar en otra zona. Un factor que puede ser de gran consideración es repotenciar este sistema una vez deje de ser rentable, en dicha zona.

Ahora se plantea el escenario 3, en donde hay que destacar una serie de datos importantes: Primero: La red en consideración, es una red de Republica dominicana, en donde se programan horas de interrupciones diarias por tipo de circuito. Segundo: El cliente en consideración es un cliente conectado a la red de baja tensión, y a dicho cliente se le programan 8 horas diarias de interrupciones. Tercero: Se analizará un sistema de almacenamiento considerando el día que se produjo la potencia máxima en el año 2016, debido a que dicho sistema debe estar en la capacidad de abastecer el consumo máximo en una zona determinada; no obstante, se consideran almacenamientos que tengan la capacidad de cubrir la mitad y/o el 75% de la demanda de dicho cliente.

Cuarto: Una vez se analiza el sistema de almacenamiento, se recurre a comparar con otra alternativa probable, que para este caso se considera un generador eléctrico utilizando gasolina como fuente primaria.

En la gráfica 2, se analiza el consumo de potencia y las horas de interrupciones programadas para este

día, de manera que en la gráfica 3, se plantea el sistema de almacenamiento propuesto.

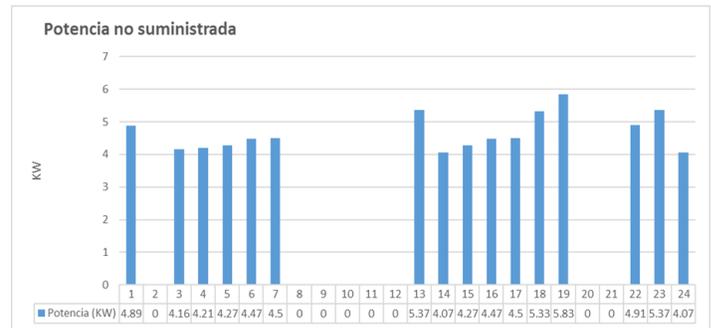


Ilustración 2. Potencia no suministrada de cliente BTS2

En la gráfica 2, es de notar que la potencia máxima es de 5.83 kW. Los periodos 2,8,9,10,11,12,20 y 21, es donde hay ocurrencia de interrupciones programadas.

La rentabilidad para un sistema de almacenamiento de diferentes dimensionamientos se verifica en la tabla 10, siendo comparado con la otra alternativa mencionada:

Tabla 10. Comparación de alternativas

Potencia del sistema de almacenamiento o generador eléctrico (kW)	Coste total del generador eléctrico (€)	Coste del sistema de almacenamiento (€)
3	7,433	7,777.50
4	14,023	10,370.45
6	21,063	15,555.67

Otro punto relevante y de gran importancia es, que lo que encarece el coste del generador eléctrico es el coste del combustible, por lo que para una posible investigación debe compararse con un sistema de almacenamiento adaptado a energías renovables como por ejemplo placas fotovoltaicas.

En fin, un sistema de almacenamiento sería una alternativa considerable para el suministro de energía eléctrica ante interrupciones programadas, siempre que se desee abastecer más del 75% de la demanda.

En la gráfica 3, se observa cómo queda el consumo de potencia con el sistema de almacenamiento

planteado. Las barras color verde representan la potencia suministrada por el sistema de almacenamiento.



Ilustración 3. Potencia suministrada con sistema de almacenamiento

VI. CONCLUSIONES

El almacenamiento en las redes de distribución puede utilizarse para atrasar o evitar inversiones necesarias para mantener la adecuada capacidad en las redes de distribución, para alimentar todas las cargas. El aplazamiento de las mejoras podría ser el reemplazo de un transformador de distribución viejo o sobre cargado en una subestación o instalar conductores más gruesos en una línea de distribución.

Cuando un transformador se sustituye por uno de mayor capacidad, la capacidad de este se selecciona de forma tal que se tenga en cuenta el crecimiento de la carga en un período de unos 15 a 20 años. Por lo tanto, gran parte de esta inversión es sub utilizada la mayoría del tiempo de vida útil del equipo.

El almacenamiento de energía puede ser usado por los usuarios (clientes de la compañía eléctrica) para reducir sus costos globales de electricidad reduciendo su demanda durante los períodos de pico especificados por la compañía.

Con un sistema de almacenamiento como lo que se ha planteado en el Almacenamiento en la distribuidora, la empresa tendría ahorros significativos que podrían ser utilizados para hacer inversiones en otros sectores.

VII. REFERENCIAS

[1] T. Wildi, Maquinas Eléctricas y sistemas de potencia, Mexico: Pearson, 2007.
 [2] D. L. Laguna, Gestion de picos de potencia eléctrica a nivel doméstico mediante almacenamiento energetico en baterías, Sevilla: ETSI, 2016.

[3] J. R. Morante, Almacenamiento de la electricidad, Madrid: Fundación Gas natural Fenosa, 2014.
 [4] L. E. Ventura, Análisis Global de los Diferentes Sistemas de Almacenamiento, Sevilla, 2016.
 [5] A. L. Sanchez, ESTUDIO DEL ALMACENAMIENTO DE ALMACENAMIENTO MEDIANTE AIRE COMPRIMIDO, Universidad Politécnica de Catalunya, 2015.
 [6] R. tecnologías, «centralestermosolares.com,» 2017. [En línea]. [Último acceso: 30 mayo 2017].
 [7] M. d. R. A. Corchado, Comparación de Sistemas de control de almacenamiento de energía para aportar a regulación de frecuencia, Sevilla, 2016.
 [8] G. G. Gonzalez, «Almacenamiento de energía magnetica por superconducción,» 2016.
 [9] I. G. Mera, «Baterías y supercondensadores,» de DISEÑO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA HÍBRIDO BASADO EN BATERÍAS Y SUPERCONDENSADORES PARA SU INTEGRACIÓN EN MICROREDES ELÉCTRICAS , Sevilla, Universidad de sevilla (ETSI), 2016.
 [10] K. dragoon, Energy storage opportunities and challenges (ECOFYS), 2014.
 [11] G. DELILLE, B. FRANÇOIS, G. MALARANGE y J.-L. FRAISSE, «ENERGY STORAGE SYSTEMS IN DISTRIBUTION GRIDS: NEW ASSETS TO UPGRADE,» CIREN, n° 0493, pp. 1-4, 2009.
 [12] Z. ZHANG y S. LIUE, «THE ENERGY STORAGE APPLICATION STRATEGY IN DIFFERENT VOLTAGE LEVELS OF DISTRIBUTION SYSTEM,» CIREN, 2011.
 [13] R. Cremers, «STORAGE OPTIMIZATION IN DISTRIBUTION SYSTEMS,» CIREN, 2011.