

Guía para el dimensionamiento de sistemas de almacenamiento de energía con baterías

VERSIÓN PÚBLICA



México, D.F., abril del 2022

El presente documento de la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH se realizó bajo el marco del programa “Apoyo a la Implementación de la Transición Energética en México” (TrEM) el cual se implementa por encargo del Ministerio Federal Alemán de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ). Las opiniones expresadas en este documento son de exclusiva responsabilidad de los autores y no necesariamente representan la opinión de la GIZ.

Publicado por:

Deutsche Gesellschaft für
Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Friedrich-Ebert-Allee 36 + 40
53113 Bonn, Deutschland
T +49 228 44 60-0
F +49 228 44 60-17 66

Dag-Hammarskjöld-Weg 1 - 5
65760 Eschborn, Deutschland
T +49 61 96 79-0
F +49 61 96 79-11 15

E info@giz.de
I www.giz.de

“Apoyo a la implementación de la transición energética en México”
Agencia de la GIZ en México
Torre Hemicor, PH
Av. Insurgentes Sur No. 826
Col. Del Valle
C.P. 03100, México D.F.
T +52 55 5536 2344
F + 52 55 5536 2344
E giz-mexiko@giz.de
www.giz.de/mexico

Versión

Abril 2022

Edición y Supervisión: Javier Salas (GIZ).

Texto: Eckehard Tröster (Energynautics), Natalia Escobosa (Energynautics) y Laura Vega (Energynautics)

La GIZ es responsable del contenido de la presente publicación.

Por encargo del Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ) de Alemania.

Tabla de contenido

Resumen ejecutivo	8
1 Introducción	9
2 Gestión de la energía	11
2.1 Afeitado de picos.....	11
2.2 Arbitraje de energía.....	13
2.3 Respaldo de energía.....	14
2.4 Aumentar el autoconsumo solar	14
2.5 Combinación de casos de uso	15
3 Dimensionamiento.....	16
3.1 Afeitado de picos.....	17
3.2 Arbitraje de energía.....	18
3.3 Respaldo de energía.....	19
3.4 Aumentar el autoconsumo solar	20
3.5 Costo de un BESS	21
4 Optimización del tamaño de BESS	23
4.1 Función objetivo y variables de decisión	24
4.2 Parámetros	24
4.3 Ecuaciones y restricciones	25
Anexo 1. Ejemplos internacionales de BESS detrás del medidor.....	29
Anexo 2. Ejemplo cálculo del dimensionamiento de un BESS	35
Referencias	46

Lista de tablas

Tabla 1. Principales casos de uso para la gestión de la energía en un BESS detrás del medidor.....	11
Tabla 2. Costos de un BESS de ion-litio.....	22
Tabla 3. Experiencias internacionales de BESS detrás del medidor.....	29
Tabla 4. Capacidad total y desplegada y valor aportado en días de muestra de 2019 [11].	31
Tabla 5. Ejemplos de aplicaciones de BESS detrás del contador y ahorros para los consumidores obtenidos por la prestación del servicio [2].....	34
Tabla 6. Variables para determinar la dimensión energética de la batería para afeitado de picos.	36
Tabla 7. Variables para determinar el dimensionamiento de la batería para arbitraje de energía.....	38
Tabla 8. Potencia del inversor caso autoconsumo solar 1 y 2.	41
Tabla 9. Costos de la batería de ion-litio para el perfil de consumo horario según el tipo de aplicación (caso base).	42
Tabla 10. Costos operativos y de mantenimiento para cada una de las aplicaciones con un perfil de consumo horario.....	43
Tabla 11. Ahorros para cada una de las aplicaciones con perfil de consumo horario.	43
Tabla 12. Costos vs. Ahorros afeitado de picos con diferentes valores de potencia máxima deseada para un perfil de consumo horario.	44
Tabla 13. Costos vs. Ahorros arbitraje de energía con diferentes valores de potencia máxima deseada para un perfil de consumo horario.....	44

Lista de figuras

Figura 1. Curva de potencia-tiempo para la carga con afeitado de picos [4].....	12
Figura 2. Comportamiento del sistema de almacenamiento de energía para el arbitraje de energía en un mercado liberalizado (izquierda) y tarifa TOU (derecha) [5].....	13
Figura 3. Carga del BESS en función de la energía fotovoltaica y la carga [6].	15
Figura 4. Pasos para dimensionar un BESS para el afeitado de picos [7].	18
Figura 5. Pasos para dimensionar un BESS para el arbitraje energético.....	19
Figura 6. Pasos para dimensionar un BESS para aumentar el autoconsumo solar.	21
Figura 7. Costos estimados de un BESS comercial/industrial [9].....	21
Figura 8. Diagrama que representa el proceso de optimización.	23

Figura 9. Comparación del costo nivelado del almacenamiento [USD/MWh] [2] IRENA (fuente original: LAZARD, 2018).	30
Figura 10. Capacidad acumulada de las baterías y potencia de las baterías de los sistemas de almacenamiento detrás del medidor en Alemania [13].	32
Figura 11. Evolución de los precios de venta al público (incluido el 19% de IVA) de los sistemas de baterías de ion-litio para uso detrás del medidor de diferentes clases de capacidad en Alemania [13].	32
Figura 12. Costos de la electricidad de los sistemas FV y FV-batería comparados con el precio promedio de la electricidad para los hogares [14].	33
Figura 13. Perfil de consumo horario.	35
Figura 14. Capacidad necesaria de la batería para el afeitado de picos con perfil de consumo horario.	36
Figura 15. Perfil de consumo original vs. Perfil de consumo con afeitado de picos.	37
Figura 16. Energía punta original entre las 18h y 21h.	37
Figura 17. Energía punta deseada para el arbitraje de energía.	38
Figura 18. Perfil de consumo original vs. Perfil de consumo con arbitraje de energía.	38
Figura 19. Perfil 1 de generación fotovoltaica.	39
Figura 20. Perfil 2 de generación fotovoltaica.	39
Figura 21. Capacidad requerida de energía de la batería para el caso 1.	40
Figura 22. Capacidad requerida de energía de la batería para el caso 2.	40
Figura 23. Potencia máxima del inversor caso 1.	41
Figura 24. Potencia máxima del inversor caso 2.	41
Figura 25. Perfil de autoconsumo solar caso 1.	42
Figura 26. Perfil de autoconsumo solar caso 2.	42

Listado de abreviaturas

BESS	Sistema de almacenamiento de energía con batería
CFE	Comisión Federal de Electricidad
DIT	Demanda Industrial en Transmisión
DIST	Demanda Industrial en Subtransmisión
ESS	Sistema de almacenamiento de energía
GDMTH	Gran Demanda Media Tensión Horaria
IRENA	Agencia Internacional de Energías Renovables
ISO	Operador Independiente del Sistema
LCOE	Costo nivelado de la electricidad
PML	Precio marginal local
PPA	Acuerdo de compra de energía
PV	Fotovoltaico
RE	Energía renovable
RoCoF	Tasa de variación de la frecuencia
PyMEs	Pequeñas y medianas empresas
VPP	Central eléctrica virtual
VRE	Energía renovable variable

Glosario

Densidad de energía. La cantidad de energía que se puede almacenar en un sistema por unidad de volumen o por unidad de peso [1].

Eficiencia de ida y vuelta. La escala de rendimiento que puede utilizarse para evaluar la eficiencia de un BESS [1]. Considera la eficiencia de carga y la eficiencia de descarga. En algunos casos puede incluir la conversión AC/DC y DC/AC.

Profundidad de descarga (DOD). Se refiere a la capacidad máxima utilizable de la batería.

Degradación. Este valor describe la reducción de la capacidad del BESS en función de su tasa de utilización.

Resumen ejecutivo

En la actualidad, se están llevando a cabo diferentes proyectos relacionados con los sistemas de almacenamiento de energía con baterías (BESS). Estos sistemas se pueden clasificar según su ubicación; delante del medidor o detrás del medidor. Por otro lado, durante los últimos años se han desarrollado nuevas tecnologías que permiten que los costos de los BESS disminuyan, especialmente los de las baterías de ion-litio y de plomo, las cuales son las más utilizadas en los BESS. Estos sistemas pueden permitir la integración de energías renovables a la red y crear ahorros en los costos de la factura de electricidad.

Esta guía se centra en los sistemas de almacenamiento de energía con baterías detrás del medidor (BESS BTM) y sus aplicaciones para pequeñas y medianas empresas en México (PyMEs). Para cumplir con el objetivo de la guía, la información se presenta en tres secciones; gestión de la energía, dimensionamiento y optimización del tamaño del BESS.

En la sección sobre gestión de la energía se presentan casos de uso que permiten mejorar el manejo de la energía por medio del uso de las baterías. La primera aplicación es el afeitado de picos, el cual permite la reducción de la demanda máxima de electricidad. El arbitraje de energía, por su parte, aprovecha los precios bajos para comprar energía y los precios altos para venderla. El tercer uso analizado es el de respaldo en casos de pérdida de suministro. Finalmente, cuando se cuenta con un sistema fotovoltaico (FV), los BESS pueden almacenar el exceso de energía solar durante los periodos en los que la demanda es inferior a la generación, aumentando el autoconsumo.

La siguiente sección presenta a grandes rasgos métodos para determinar el tamaño adecuado del BESS de acuerdo a la aplicación. La energía y la potencia del BESS deben dimensionarse por separado, y, de acuerdo a la aplicación será determinante la energía o la potencia. Asimismo, se consideran factores como la eficiencia de carga y descarga, la profundidad de descarga (DoD) y la degradación de la batería, los cuales influyen en el dimensionamiento del BESS.

El tamaño óptimo de un BESS se dará por una combinación entre ahorros e inversión por lo que la sección de optimización esboza las ecuaciones que se utilizarían para la optimización del tamaño de un BESS utilizando software. Para ello se necesita determinar una función objetivo, modelar los parámetros técnicos y económicos, como lo son el CAPEX, el OPEX, la inflación, la DoD, la eficiencia, etc. con el fin de implementar diversas ecuaciones y restricciones que relacionan dichos parámetros con el tamaño de la batería.

1 Introducción

El almacenamiento ha sido continuamente denominado como el habilitador clave de la transición energética, especialmente por su capacidad de integrar energía renovable variable a la red. Esta guía se centra específicamente en los sistemas de almacenamiento de energía con baterías (BESS) detrás del medidor. Los motivos se describen a continuación.

Dentro de las tecnologías de almacenamiento, se espera que las baterías crezcan considerablemente debido a su rápida disminución de costos, versatilidad y escalabilidad. Por batería se entiende el conjunto de celdas encapsuladas, donde se almacena químicamente la energía. Un sistema de almacenamiento de energía con baterías (BESS) comprende la batería más los siguientes componentes:

- **Convertidores de energía:** Los más comunes incluyen un inversor que convierte la corriente continua de la batería en una salida de corriente alterna para la inyección a la red. Un convertidor de potencia también puede ayudar a proporcionar otros servicios como la compensación de potencia reactiva o el control del voltaje.
- **Sistemas de control:** Hay diferentes sistemas que pueden incluirse en un BESS, como el sistema de gestión de la batería, que ayuda a mantener el voltaje, la temperatura y la corriente adecuados; el sistema de gestión de la energía, que tiene en cuenta otras señales externas, como los precios o la producción fotovoltaica, para gestionar la carga y la descarga de la batería; el equipo de protección, que ayuda a garantizar que no se produzcan daños en el BESS debido a sobrevoltajes, sobrecorrientes o incluso incendios.
- **Transformadores y switchgear:** Estos equipos son necesarios para la conexión del BESS a la red.

Además, según el lugar de instalación de la batería, pueden clasificarse en baterías detrás del medidor (BTM) o delante del medidor (más conocidas como baterías a gran escala). Esta guía pretende dar apoyo a los sistemas de baterías detrás del medidor.

En [2], IRENA analiza las baterías BTM, que suelen oscilar entre los 3 kW y los 5 MW, y suelen instalarse en un sistema híbrido fotovoltaico-batería. Las baterías de los consumidores residenciales suelen tener una capacidad de hasta 5 kW/13.5 kWh, mientras que las de los consumidores comerciales e industriales suelen tener una capacidad de hasta 2 MW/4 MWh. La mayoría de los BESS BTM utilizan tecnología de baterías de ion-litio o de plomo.

Los proyectos de BTM suponen un ahorro para los consumidores con la posibilidad de gestionar la factura de electricidad, reducir los cargos por picos de demanda mediante la nivelación de la carga y aumentar el autoconsumo. Estos casos de uso o estrategias de gestión de la energía se describirán con más detalle en la sección 2. Normalmente, los BTM BESS no están bajo el control directo del operador del sistema de distribución, por lo que los beneficios para el sistema son indirectos, como el aplazamiento de las inversiones en la red. Sin embargo, dependiendo de los marcos regulatorios y de mercado, también puede haber ahorros para la empresa proveedora de electricidad por los servicios prestados a la red, como el control del voltaje.

La mayoría de las Pequeñas y Medianas Empresas (PyMEs) de México tienen un contrato con la Comisión Federal de Electricidad (CFE). La tarifa correspondiente depende de la cantidad de energía, la potencia, el nivel de tensión, la región y el mes. Las tarifas más comunes para las PyMEs industriales y comerciales son:

- GDMTH: Gran demanda, media tensión, dependiente de la hora del día.
- GDMTO: Gran demanda, media tensión.
- GDBT: Gran demanda, baja tensión.
- PDBT: Pequeña demanda, baja tensión.
- DIT: Demanda industrial conectada a la transmisión; depende de la hora del día.
- DIST: Demanda industrial conectada a la subtransmisión; depende de la hora del día.

El análisis se limita a GDMTH, DIT, DIST, ya que estas tarifas suelen tener un componente de costo muy elevado por el consumo de energía en los horarios punta y la energía se factura en función del tiempo de uso. Al desplazar el consumo durante el día, los costos totales son considerablemente menores. Este desplazamiento puede lograrse mediante un sistema de almacenamiento de energía con baterías (BESS). El costo de un sistema BESS depende en gran medida de su aplicación, ya que ésta determina el tamaño, la química y la configuración del BESS.

Por lo tanto, este informe ofrece una visión de la gestión de la energía, el dimensionamiento y la optimización de los sistemas de almacenamiento con baterías para PyMEs..

2 Gestión de la energía

La gestión de la energía puede definirse como el uso adecuado de la energía para lograr los objetivos previstos [3]. Hoy en día existe una amplia gama de servicios prestados por los BESS en todo el mundo, como se ejemplifica en la Tabla 1. La escala de tiempo de respuesta de los BESS necesaria para estas aplicaciones oscila entre segundos y algunas horas. También existen aplicaciones de almacenamiento asociadas a escalas de tiempo más largas (más de un día) pero éstas están asociadas sobre todo a redes aisladas.

Tabla 1. Principales casos de uso para la gestión de la energía en un BESS detrás del medidor.

Contexto	Servicios de apoyo a la red	Aplicación	Plazo indicativo de aplicación (relación energía/potencia)
Aplicable en pequeñas y medianas empresas en México	Cambio de energía/ Nivelación de carga	Conectado a la energía solar	Diariamente (1-10h)
	Afeitado de picos	Autónomo/ Conectado a la energía solar	Diariamente (1-10h)
	Respaldo de energía	Autónomo/ Conectado a la energía solar	Diariamente (1-10h)
	Aumentar el autoconsumo solar	Conectado a la energía solar	Diariamente (1-10h)
Otras aplicaciones en todo el mundo	Respuesta en frecuencia (regulación rápida de la frecuencia)	Autónomo/ Conectado a la energía solar	De segundos a minutos (<0.25h): control primario de la frecuencia;
	Suavización de la producción de las energías renovables, control de la tasa de rampa y refuerzo de la capacidad	Autónomo/ Conectado a la energía solar	De segundos a minutos (<0.25h); Diariamente (1-10h)

En el contexto del BESS en un entorno industrial, la gestión de la energía se centra en cómo manejar una batería como un activo para utilizar mejor la energía, gestionando la factura eléctrica para reducir los costos. Las siguientes cuatro aplicaciones son las más adecuadas para las PyMEs de México.

2.1 Afeitado de picos

El afeitado de picos, o *peak shaving* en inglés se refiere a la reducción de la demanda máxima de energía eléctrica [1]. La Figura 1 muestra el principio de esta aplicación utilizando un BESS. El consumo durante el periodo de máxima demanda se desplaza a otros periodos de menor demanda, aplanando la curva. Esto tiene beneficios para la red, ya que puede reducir sus

congestiones e incluso aplazar inversiones. Para los consumidores finales, se puede conseguir un beneficio económico si su tarifa correspondiente tiene un componente de costo relacionada a la demanda máxima o demanda pico. Un riesgo importante de esta aplicación es la posibilidad de que la batería no funcione de manera adecuada un día del periodo de facturación. Debido a que este componente del costo tiene en cuenta la demanda máxima registrada durante el mes o el bimestre en su totalidad, un fallo en la reducción de demanda máxima de un día puede hacer que no se obtenga ningún beneficio.

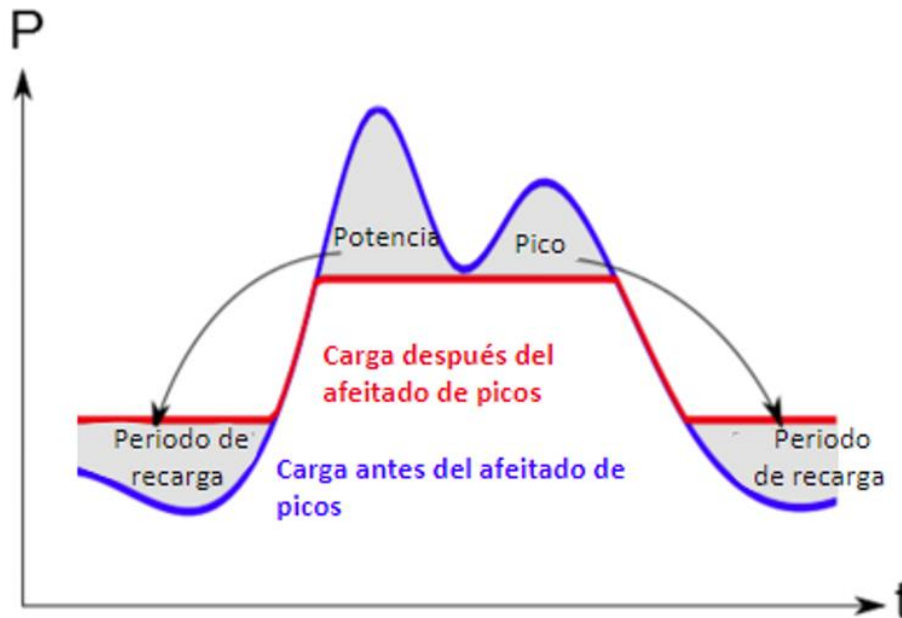


Figura 1. Curva de potencia-tiempo para la carga con afeitado de picos [4].

En México, todas las tarifas reguladas consideran un costo por demanda máxima. Éste es denominado costo por capacidad. Sin embargo, la manera de calcular dicha componente depende de cada tarifa y existen tres categorías:

- Costo por kWh consumido. Este es el caso para las tarifas domésticas, pequeña demanda, alumbrado en baja tensión y riego agrícola en baja tensión.
- Costo por kW máximo durante el mes. Este es el caso para las tarifas de gran demanda en baja tensión, riego agrícola en media tensión, alumbrado público en baja tensión, y gran demanda en media tensión.
- Costo por kW máximo en periodos punta. Este es el caso para las tarifas de gran demanda en media tensión horaria (GDMTH), demanda industrial en subtransmisión (DIST) y demanda industrial en transmisión (DIT).

Para las tarifas que caen dentro de la primera categoría, la determinación de la demanda máxima es indirecta, por lo que no es posible utilizar un BESS para reducir esta componente. En las tarifas de la segunda categoría, se tiene una medición máxima mensual y en la tercera categoría es una medición en ciertas horas al mes. Para estas dos categorías es posible utilizar un BESS para reducir la factura eléctrica.

2.2 Arbitraje de energía

El arbitraje de energía se refiere a la gestión del consumo y el suministro de energía en un contexto de precios variables. Tradicionalmente, en un mercado liberalizado, los precios varían durante el día, reflejando el excedente o el déficit de generación de energía, así como otros factores, como la congestión de la red. Estas variaciones pueden tener una gran volatilidad. Por lo tanto, un BESS puede obtener beneficios o reducir los costos al consumir energía barata e inyectar energía cara. Esto también se traduce en una reducción del impacto de la volatilidad de los precios en los gastos de la empresa. Sin embargo, el controlador del BESS para carga y descarga es complejo, ya que las decisiones deben tomarse en función de los precios futuros previstos.

En el caso de los consumidores con tarifas mensuales fijas, el arbitraje de energía puede presentar un beneficio cuando dicha tarifa es por tiempo de uso (TOU). En estos casos puede haber dos o más precios durante el día en periodos fijos. La batería puede programarse para cargar durante el periodo de precio bajo y vender o reducir el consumo durante el periodo de precio alto. El control asociado a esta operación es mucho más sencillo que el asociado a los precios variables del mercado liberalizado, aunque normalmente las ganancias son menores.

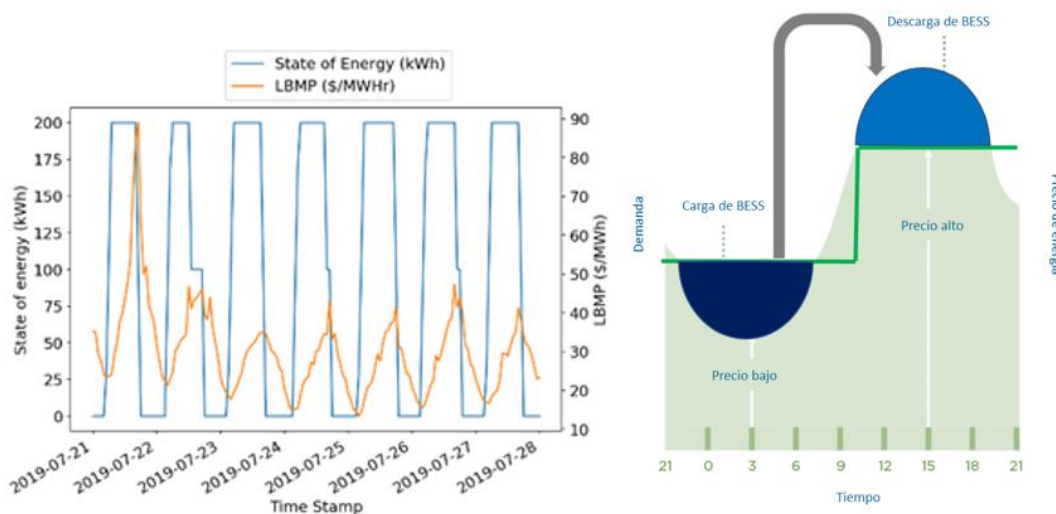


Figura 2. Comportamiento del sistema de almacenamiento de energía para el arbitraje de energía en un mercado liberalizado (izquierda) y tarifa TOU (derecha) [5].

Este concepto está representado en la Figura 2, la cual muestra una curva de demanda para un caso industrial, así como el costo de la electricidad para la hora del día, representado por la línea verde. El objetivo del BESS es cargarse mientras el costo de la electricidad es bajo y descargarse cuando el costo de la electricidad es alto.

Para analizar el potencial de esta aplicación, hay que considerar un perfil de precios. Los precios, para ambos casos, varían a lo largo del año y de la región. En el caso de un mercado liberalizado, los precios históricos pueden utilizarse para predecir cómo se comportarán en el futuro. Esto supone un riesgo debido a la incertidumbre intrínseca que conllevan los precios fijados por el mercado. Por otro lado, las tarifas reguladas se actualizan tradicionalmente con una cierta periodicidad, lo que permite que los usuarios finales conozcan de antemano cómo cambiarán estos precios a lo largo del año y de la región. Además, el riesgo de que los precios suban considerablemente es bajo en comparación con los precios de mercado.

Las PyMEs en México no pueden participar directamente en el mercado, por lo que están sujetas a tarifas reguladas. De las tarifas de suministro vigente sólo tres tienen diferentes precios de acuerdo a la hora del día: Tarifa de gran demanda media tensión horaria, tarifa de demanda industrial en subtransmisión y tarifa de demanda industrial en subtransmisión.

2.3 Respaldo de energía

En caso de apagones o cortes del sistema, el BESS puede utilizarse para proporcionar energía de respaldo al usuario final, manteniendo la continuidad del suministro y evitando detener la producción o los servicios ofrecidos. La frecuencia de los cortes depende de la confiabilidad de la red. Sin embargo, para ciertos procesos o servicios críticos es vital contar con energía de respaldo que tradicionalmente se proporciona mediante generadores diésel. En algunos casos, por ejemplo, en la industria, este respaldo puede ayudar a terminar el proceso de producción y apagar las máquinas correctamente para evitar que se pierda el producto o se produzcan daños en a las mismas. En otros casos, el respaldo debe cubrir toda la duración de la interrupción, como es el caso de los hospitales.

2.4 Aumentar el autoconsumo solar

Este servicio está disponible específicamente para sistemas híbridos, es decir, un BESS vinculado a un sistema de generación. El BESS BTM almacenará el exceso de energía solar fotovoltaica durante los periodos en los que la demanda sea inferior a la generación fotovoltaica y la entregará en los periodos en los que la demanda sea superior a la generación solar fotovoltaica, aumentando el autoconsumo local y proporcionando un ahorro en la factura de energía.

La Figura 3 muestra que, durante varias horas al día, la generación fotovoltaica supera el consumo. En México para la Generación Distribuida, el exceso de generación puede ser:

- Inyectado a la red bajo un esquema de medición neta: la energía inyectada a la red se valora por kWh, independientemente del precio durante el día. Por tanto, la red funciona como un tipo de batería en sí misma.
- Inyectado a la red bajo un esquema de facturación neta: la energía inyectada se valora a un precio determinado. Si este precio es superior al de los kWh comprados a la red, se obtiene un beneficio. En cambio, si el precio es inferior, la energía producida pierde valor.
- Vertida: en este caso la energía no se inyecta a la red, por lo que el exceso de energía no se valoriza.

Para los casos en los que el exceso de energía pierde valor, facturación neta y energía vertida, un BESS podría proveer un caso de negocio. Como se muestra en la Figura 3, el BESS se carga durante las horas en las que la generación es mayor que el consumo y se descarga cuando la generación es menor que el consumo.

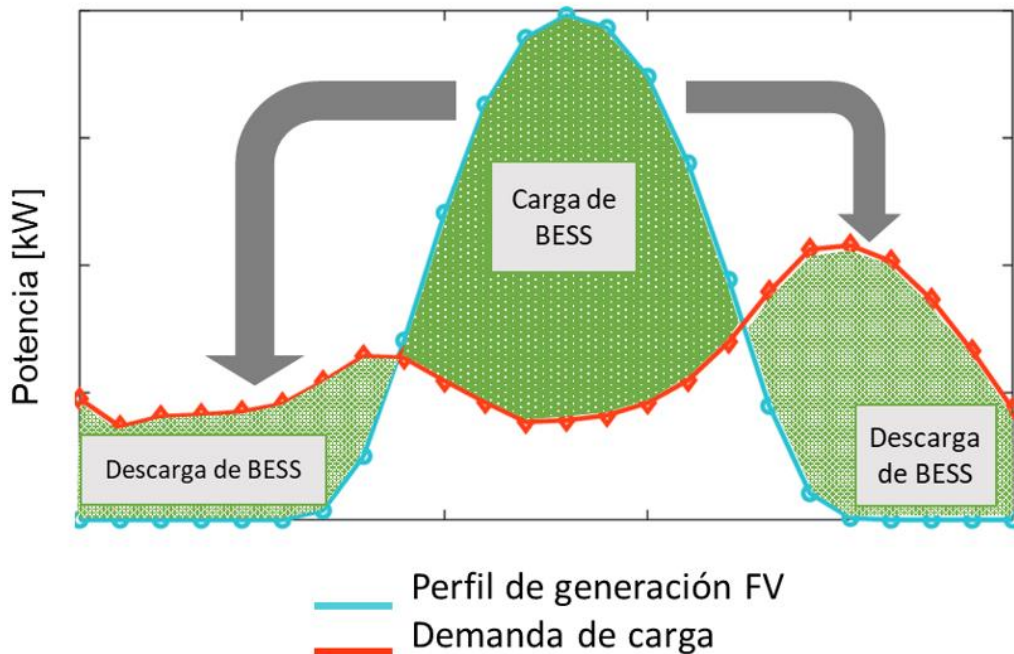


Figura 3. Carga del BESS en función de la energía fotovoltaica y la carga [6].

2.5 Combinación de casos de uso

Aunque los precios han ido bajando continuamente, la inversión inicial sigue siendo considerable, no obstante, la combinación de diferentes casos de uso del BESS permite mejorar su rendimiento financiero. En otros contextos internacionales, existen otras regulaciones locales, puede haber otros servicios que el BESS pueda proporcionar o regulaciones que el BESS pueda cumplir. Sin embargo, la estrategia de gestión de la energía debe elegirse con cautela para maximizar el beneficio de los diferentes casos de uso.

Las siguientes consideraciones son relevantes:

- No se recomienda combinar un BESS destinado al respaldo de energía con otras aplicaciones ya que podría poner en peligro la capacidad de la batería de rendimiento durante un apagón.
- Al combinar el arbitraje de energía y la reducción de picos, se debe considerar que la energía desplazada no aumente la demanda máxima de otro momento del día.
- Los requisitos obligatorios deben tener prioridad sobre los casos de negocio.
- Se recomienda revisar la estrategia de operación periódicamente, para asegurarse de que la batería está aprovechando la mayor parte de los beneficios disponibles.

3 Dimensionamiento

El tamaño de una batería se compone de la potencia máxima necesaria, así como de la cantidad de energía que debe almacenarse. Por consiguiente, la determinación de estos dos parámetros dependerá de la aplicación correspondiente. Para cada una hay que tener diferentes consideraciones y existen distintas estrategias de dimensionamiento. Las siguientes preguntas ayudarán a determinar el procedimiento correcto:

- ¿Es un sistema autónomo o híbrido?
- ¿Cuál es el perfil del consumidor por hora?
- ¿Cuáles son los precios históricos para el consumidor?
- ¿Tiene el consumidor una tarifa fija?
- ¿Cuál es la estructura de esa tarifa?

Los principales resultados que hay que obtener con estas preguntas y un posterior análisis son:

- Perfil de la generación.
- Perfil de consumo con demanda máxima y energía media diaria identificada.
- Perfil y previsión de precios.

Con esta información, se pueden analizar los diferentes casos de uso para determinar si es económicamente viable tener un BESS para ese perfil en particular.

Además de la aplicación específica, hay que tener en cuenta los siguientes factores para dimensionar la batería:

- Eficiencia de carga.
- Eficiencia de descarga.
- Pérdidas del convertidor de potencia.
- Profundidad de descarga de la batería.
- Degradación.
- Margen de seguridad.

Esta guía se centra en las baterías de ion-litio, ya que son la tecnología dominante para las aplicaciones comerciales e industriales. Para este tipo de baterías, es común considerar una tasa C de 1. Esto significa que, por ejemplo, un BESS con una capacidad de 100 kWh se cargará o descargará en una hora. Esta velocidad de carga/descarga permite operar al BESS limitando su degradación.

En el Anexo 2, se presenta un ejemplo práctico para ilustrar el dimensionamiento de cada aplicación.

3.1 Afeitado de picos

En la reducción de picos, el parámetro dominante para el dimensionamiento del BESS es la cantidad de demanda que se quiere reducir, ya que éste determinará el potencial de ahorro. Para hallarlo, se sugieren los siguientes pasos, que se muestran en la Figura 4.

1. Determinar, con el perfil de consumo, la demanda máxima. Ésta se denominará demanda máxima original.
2. Determinar una demanda máxima que se desee alcanzar. Ésta se denominará demanda máxima deseada.
3. Calcular la diferencia entre la demanda máxima original y la demanda máxima deseada. Éste será el parámetro de potencia mínima requerida de la batería.
4. Con la consideración de tasa C de 1, calcular la capacidad energética correspondiente.
5. Con el perfil de consumo, calcular el área entre la demanda del perfil de consumo y la demanda máxima deseada para todo el periodo donde se rebase la demanda máxima deseada. Esta será la energía mínima requerida o la capacidad necesaria de la batería.
6. Con la consideración de tasa C de 1, calcular la capacidad de potencia correspondiente.
7. Si se comparan las capacidades determinadas en los puntos 4 y 5, la que sea mayor será la dimensión energética del BESS y la potencia correspondiente.
8. Aunque la potencia de la batería será la determinada en el punto 7, el inversor puede ser dimensionado según el punto 3.
9. En caso de tener perfiles con más de un pico de demanda, se pueden sumar las diferentes áreas determinadas en el punto 5.¹

Para encontrar la demanda máxima deseada, se puede utilizar una estrategia de optimización. Dicha estrategia dimensionará el BESS ponderando los ahorros por reducir el costo de demanda con el CAPEX y OPEX del BESS.

Una consideración importante al determinar la demanda máxima deseada es que el BESS debe cargarse antes de ser requerido y que se debe sumar la energía de carga al perfil de consumo. Al hacer este cambio debe mantenerse la restricción de la demanda máxima deseada. Sin embargo, para las tarifas GDMTH, DIST y DIT, esta consideración se puede relajar pues sólo se considera la demanda máxima medida en periodos punta.

¹ También es posible que la batería haga más de un ciclo diario y esto puede reducir el tamaño. Por ejemplo, si se tiene un proceso en el que una máquina genera un pico de consumo de algunos minutos cada hora, se puede reducir este pico de consumo en esos minutos y cargar por el resto de la hora. Esto será dependiente de cada caso.

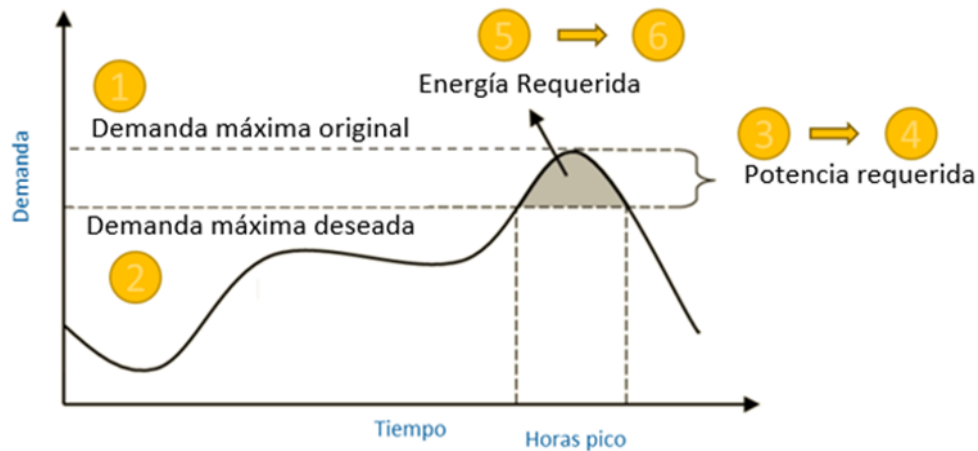


Figura 4. Pasos para dimensionar un BESS para el afeitado de picos [7].

3.2 Arbitraje de energía

Como se ha mencionado en la sección 2, el concepto de arbitraje consiste en cargar el BESS durante los periodos de precios bajos y descargarlo durante periodos de precios altos. Por lo tanto, para el arbitraje de energía el parámetro dominante para dimensionar la batería es la capacidad o energía por almacenar, ya que esto determinará directamente el potencial de ahorro. Para hallar este valor, se sugieren los siguientes pasos, que se muestran en la Figura 5.

1. Encontrar en el perfil del precio de energía los periodos de precios altos (horas punta) y de precios bajos (horas base).
2. Con el perfil del usuario, determinar la energía consumida en horas punta. Esto se denominará energía punta original.
3. Determinar la energía máxima que se consumirá en horas punta. Esto se denominará energía punta deseada.
4. Calcular la diferencia entre la energía máxima original y la energía punta deseada. Este será el parámetro de energía mínima requerida de la batería.
5. Con la consideración de tasa C de 1, calcular la capacidad de potencia correspondiente.
6. Distribuir la energía mínima del BESS entre las horas punta. Calcular la diferencia entre la demanda máxima original y la nueva demanda sin la contribución del BESS para todo el periodo de precios altos. Esta será la potencia mínima requerida del BESS. Si la distribución de energía se hace toda en una hora, entonces la potencia requerida será mayor a que si se distribuye uniformemente a lo largo del periodo.
7. Los valores determinados en los puntos 4 y 5, serán las dimensiones energéticas del BESS y la potencia correspondiente.
8. Aunque la potencia del BESS será la determinada en el punto 5, el inversor puede ser dimensionado según el punto 6.

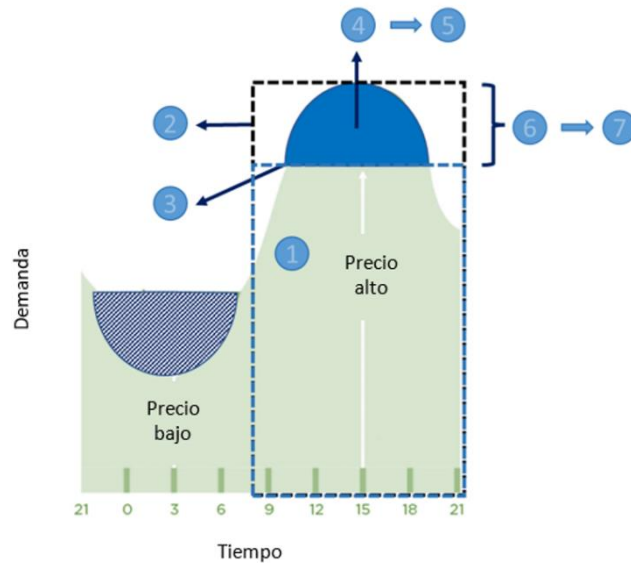


Figura 5. Pasos para dimensionar un BESS para el arbitraje energético.

Para encontrar la energía punta deseada, se puede utilizar una estrategia de optimización. Dicha estrategia dimensionará el BESS ponderando los ahorros por consumir energía barata en con el CAPEX y el OPEX del BESS.

Como se mencionó en la sección 2.2

3.3 Respaldo de energía

Con el respaldo de energía, el parámetro dominante, potencia o energía, dependerá de cada caso particular. Aunque en teoría un respaldo podría alimentar toda la carga durante toda la interrupción, hacerlo puede suponer un sobredimensionamiento y un aumento considerable de los costos. Para este caso, se pueden utilizar las siguientes preguntas para determinar el tamaño del BESS:

¿Qué cargas son críticas?

Para cada carga, deben considerarse los siguientes factores para clasificarla como crítica o no crítica [8] :

- ¿Puedo desconectar esta carga sin poner en peligro el proceso principal?
- Si se desconecta la carga, ¿cuánto supondrá esto en términos de pérdida de negocio, producción o productividad? ¿Qué impacto tendrá en el servicio al cliente?
- Si se desconecta la carga, ¿se producirán sanciones económicas?
- ¿Es necesaria esta carga para garantizar la calidad del producto/servicio? ¿Es necesaria para mantener la salud y la seguridad de los colaboradores o del entorno?
- ¿Esta carga es necesaria para evitar violaciones de la seguridad y/o la pérdida de control?
- ¿La desconexión de esta carga afectará negativamente a la reputación de la empresa y a la confianza de los interesados?

- ¿Durante cuánto tiempo debe alimentarse la carga?

La consideración de cuánto tiempo el BESS debe proporcionar energía durante una pérdida de suministro depende de la empresa en particular. Se sugiere considerar los siguientes factores:

- ¿Cuánto tiempo han durado las interrupciones?
- Para cada carga, ¿necesita mantener las operaciones durante toda la interrupción, por ejemplo, los servicios de telecomunicaciones o médicos, o sólo necesita un tiempo específico, por ejemplo, terminar un lote/proceso específico?
- ¿Es necesario que la batería cubra todo el apagón, o sólo se utilizará mientras entra en funcionamiento otro generador/combustible?
- ¿Cuál es la simultaneidad de esas cargas?

Para determinar el tamaño total de la batería, se proponen los siguientes pasos:

1. Identificar para cada carga seleccionada su potencia máxima, así como el tiempo de funcionamiento previsto.
2. Calcular el consumo máximo por carga, multiplicando la potencia y el tiempo.
3. Si se suman los consumos de todas las cargas, se determinará la energía necesaria o la capacidad requerida del BESS.

Para determinar la potencia necesaria del BESS, hay que tener en cuenta un perfil de consumo o un factor de simultaneidad, esto se refiere a cómo van a combinarse las cargas, desde una a la vez hasta todas al mismo tiempo. Si el objetivo es diseñar para el peor de los casos, la potencia necesaria se determinará por la suma de la potencia de todas las cargas. El factor de simultaneidad es específico para cada caso y tradicionalmente es inferior a uno.

3.4 Aumentar el autoconsumo solar

Para esta aplicación también es necesario el perfil de generación fotovoltaica. El parámetro dominante para dimensionar la batería es la energía por almacenar, ya que esto determinará directamente el potencial de ahorro. Para hallar este valor, se sugieren los siguientes pasos, que se muestran en la Figura 6:

1. Combinar el perfil de consumo y el perfil de generación fotovoltaica.
2. Determinar la energía necesaria o la capacidad requerida del BESS como un área continua en la que la generación supera la carga.
3. Con la consideración de tasa C de 1, calcular la capacidad de potencia correspondiente al área determinada en el punto 2.
4. Calcular la diferencia entre la curva de generación fotovoltaica y el perfil de consumo para cada uno de los periodos en los que la generación supera la carga. El valor mayor determinará la potencia máxima del inversor.
5. La potencia del BESS será la determinada en el punto 3, el inversor puede ser dimensionado según el punto 4.

Para encontrar la energía necesaria, se puede utilizar una estrategia de optimización. Esto dimensionará el BESS ponderando los ahorros por incrementar el consumo de generación

fotovoltaica y reducir el de la red, contra el CAPEX y el OPEX del BESS. Para los casos donde se tiene facturación neta, los ahorros son calculados de manera similar al arbitraje de energía, mientras que para los casos donde existe vertimiento, el ahorro corresponde a la energía vertida.

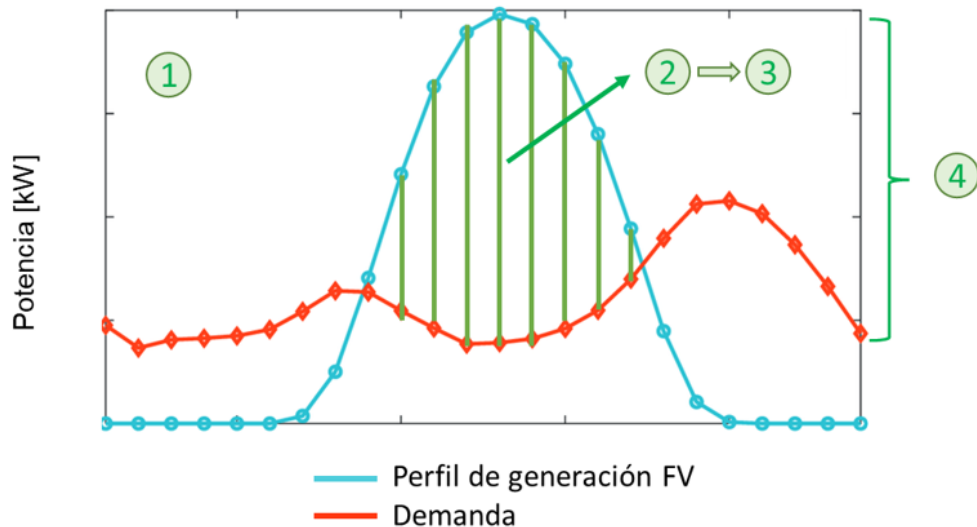


Figura 6. Pasos para dimensionar un BESS para aumentar el autoconsumo solar.

3.5 Costo de un BESS

En la Figura 7, se esbozan los diferentes componentes del costo de inversión de un BESS autónomo. Aunque la batería de ion-litio es la que más contribuye al valor total, el resto de los componentes del sistema suman más que el costo de la batería.

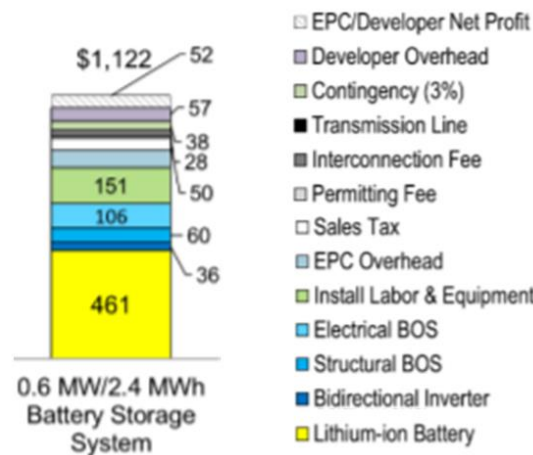


Figura 7. Costos estimados de un BESS comercial/industrial [9].

Como ya se ha mencionado en esta sección, el tamaño elegido de la batería influye en el costo de la inversión considerablemente. Para esta guía, se ha utilizado la línea de base tecnológica anual de 2021 del Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL por sus siglas en inglés).

El CAPEX de una batería depende tanto del parámetro de energía como del de potencia, y para calcular dicho valor de una BESS se sugiere la siguiente ecuación como aproximación:

$$\begin{aligned}
 & \text{Costo Total del Sistema [USD]} \\
 & = \text{Capacidad de almacenamiento de la batería [kWh]} \\
 & \quad * \text{Costo específico de energía de la batería } \left[\frac{\text{USD}}{\text{kWh}} \right] \\
 & + \text{Capacidad de potencia de la batería [kW]} \\
 & \quad * \text{Costo específico de potencia de la batería } \left[\frac{\text{USD}}{\text{kW}} \right] \\
 & + \text{Constante de costos de la batería [USD]}
 \end{aligned} \tag{1}$$

Tabla 2. Costos de un BESS de ion-litio.

Escenario 2021	CAPEX de energía [USD/kWh]	CAPEX de potencia [USD/kW]	Constante de la batería [USD]	O&M promedio [USD/kW año].
Avanzado	186	337	209,076	37
Moderado	217	425	266,754	44
Conservador	243	442	273,629	48

La siguiente sección pretende dar algunas pautas sobre cómo optimizar el tamaño de una batería teniendo en cuenta estos costos.

4 Optimización del tamaño de BESS

La optimización puede definirse como el proceso de hacer que algo sea lo más eficiente posible [10]. En el caso de esta guía, puede interpretarse como el proceso de hacer que el tamaño de un BESS sea lo más eficiente posible desde el punto de vista financiero. En la Figura 8, se muestra un esquema de un proceso de optimización. Como entrada, hay que proporcionar los parámetros, ecuaciones y restricciones que describen el BESS y su estrategia de gestión. El proceso de optimización consistirá entonces en probar diferentes combinaciones de las variables de decisión con el objetivo del "mejor caso de negocio". Una vez encontrada esta combinación, la salida del proceso dará los valores de dichas variables de decisión.



Figura 8. Diagrama que representa el proceso de optimización.

Lo ideal es que el proceso de optimización se realice con un software de optimización. Éste puede, por ejemplo, darnos el tamaño del BESS que maximiza el Valor Presente Neto (VPN) de una gama de tamaños de BESS. También puede permitir una fácil combinación de diferentes aplicaciones. Sin embargo, la principal desventaja es que el software de optimización no es tan asequible ni fácil de usar, y se necesitan algunos conocimientos de programación.

También existe la posibilidad de utilizar herramientas cotidianas como Excel, para buscar manualmente una solución óptima dentro de un rango de variables. Esto puede llevar más tiempo, pero se puede realizar a través de un programa que es de fácil acceso y uso.

En los siguientes apartados se describirán los principales elementos que se utilizarán para la optimización. Las aplicaciones consideradas serán:

- Afeitado de picos.
- Arbitraje de energía.
- Aumentar el autoconsumo solar.
- Combinación de todos los casos.

En el Anexo 2, se muestra un ejemplo práctico para ilustrar una forma de hacer optimización al tanteo.

4.1 Función objetivo y variables de decisión

La función objetivo a maximizar suma todos los ingresos y resta todos los egresos. Estos comprenden principalmente los costos de inversión, de reemplazo de equipos, y de operación y mantenimiento.

Matemáticamente, la función objetivo es:

$$\text{Maximizar } x = -CAPEX - \sum_{y=1}^{y=n} OPEX_y + \sum_{y=1}^{y=n} Ahorros_y - CAPEX_{reemplazo} \quad (2)$$

Las variables de decisión que deben evaluarse en este caso son la potencia y la energía del BESS. Si se necesitan valores iniciales, se pueden utilizar los valores históricos del perfil del consumidor.

4.2 Parámetros

Los parámetros son necesarios para proporcionar las características específicas que son válidas para todos los diferentes casos. Los principales parámetros son:

Consumo de carga por hora². Los valores de la carga durante todo el año.

Generación fotovoltaica horaria³. Los valores de la generación fotovoltaica durante todo el año.

Valores de la tarifa horaria⁴. Los valores de la tarifa en cada hora de un año.

DoD. La característica técnica específica de la tecnología BESS considerada. También puede utilizarse un promedio para diferentes tecnologías. Normalmente se indica en %.

Eficiencia. La característica técnica específica de la tecnología BESS considerada. También puede utilizarse un promedio de diferentes tecnologías. La eficiencia puede darse como eficiencia de ida y vuelta, o como dos parámetros: eficiencia de carga y de descarga. Sin embargo, las eficiencias de ida y vuelta suelen considerar los procesos de conversión AC/DC/AC.

Degradación. Este parámetro técnico es específico de cada sistema, aunque también se encuentran valores en la literatura. Generalmente se da por número de ciclos, por lo que es necesario suponer el número de ciclos por año para determinar el tiempo de vida de un proyecto y la necesidad de reemplazo del paquete de batería.

² Se recomienda disponer de valores horarios o de mayor granularidad para tener un dimensionamiento más preciso y, por tanto, un menor sobredimensionamiento. En el caso de que sólo se disponga de valores globales, es decir, diarios o mensuales, habrá que tomar medidas adicionales para considerar los peores escenarios. Cuanto menor sea la granularidad temporal, más riesgos tendrá el proyecto.

³ Ídem

⁴ Ídem

Crecimiento previsto del consumidor. Este parámetro da información sobre cuánto se espera que crezca el consumidor en el tiempo de ejecución del proyecto. Puede ser un crecimiento total o un crecimiento específico para la energía y otro para la potencia.

Inflación. Aumento generalizado de los precios de los bienes y servicios en un país determinado. Se aplica a los costos y ahorros anuales. Las tarifas tienden a incrementarse año con año al menos a este valor.

Tasa de descuento. Tasa a la que se descuentan los valores financieros para poder comparar diferentes flujos anuales. Se aplica a los costos y ahorros anuales.

Años del proyecto. Cuánto tiempo se espera que dure el proyecto. Puede estar vinculado a la vida útil del BESS considerando su degradación y reemplazo.

CAPEX específico. Costo de la inversión de un BESS por unidad de energía y/o unidad de potencia.

OPEX específico. Costo anual de funcionamiento y mantenimiento del BESS por porcentaje de CAPEX, por unidad de energía o por unidad de potencia. En algunos casos se tienen Valores de OPEX fijos por año.

Tasa C deseada. La tasa C de una batería representa la relación de potencia y energía de una batería, para las aplicaciones de potencia esta tasa suele ser superior a 1 MW/MWh, mientras que para una aplicación de energía suele ser inferior a 1 MW/MWh. En estos casos se recomienda utilizar una tasa C de 1 para asegurar la vida útil del BESS.

4.3 Ecuaciones y restricciones

Las ecuaciones son necesarias para describir las relaciones entre los parámetros. Las principales relaciones que hay que describir para la optimización del tamaño del BESS son:

Factor de sobredimensionamiento

Factor por el que hay que multiplicar el tamaño del BESS para tener en cuenta la degradación, las pérdidas de eficiencia, el DoD y el crecimiento de los consumidores. Ejemplo:

$$Factor = \frac{(1 + \text{degradación}) * (\text{Crecimiento de carga})}{(1 - \text{pérdidas de eficiencia en la descarga}) * DoD} \quad (3)$$

CAPEX total

La ecuación describe cómo se relaciona el parámetro o los parámetros de CAPEX específicos con el importe del CAPEX total. Se aplican fórmulas similares para los CAPEX de reemplazo.

$$Total\ CAPEX = CAPEX\ específico \left[\frac{\$}{kWh} \right] * \text{Tamaño de la energía BESS [kWh]} \quad (4.1)$$

$$Total\ CAPEX = Total\ CAPEX\ específico \left[\frac{\$}{kW} \right] * Tamaño\ de\ la\ potencia\ BESS\ [kW] \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned}
 Total\ CAPEX &= CAPEX\ específico\ de\ energía \left[\frac{\$}{kWh} \right] \\
 &* Tamaño\ de\ la\ energía\ BESS\ [kWh] \\
 &+ CAPEX\ específico\ de\ potencia \left[\frac{\$}{kW} \right] \\
 &* Tamaño\ de\ la\ potencia\ BESS\ [kW]
 \end{aligned} \quad (4.3)$$

OPEX total

La ecuación describe cómo se relaciona el parámetro de OPEX específico con el importe de OPEX anual; también debe tenerse en cuenta la tasa de descuento. El OPEX puede incluir los costos de operación, como el costo de la energía utilizada para cargar el BESS, el costo de la energía perdida durante la carga y la descarga, y el costo de mantenimiento en función del uso. Si se tiene una componente de OPEX fijo debe también incluirse.

$$\begin{aligned}
 OPEX_y &= Requerimientos\ energéticos\ diarios\ [kWh] * Tarifa_{baja} \left[\frac{\$}{kWh} \right] \\
 &* número\ de\ días\ operativos + Costo\ de\ mantenimiento \left[\frac{\$}{año} \right]
 \end{aligned} \quad (5)$$

Ahorro anual

El ahorro es particular para cada aplicación como se muestra a continuación:

- Afeitado de picos

$$Ahorros_y = Potencia_{BESS} * Tarifa_{capacidad} * número\ de\ periodos\ por\ año \quad (6)$$

- Arbitraje de energía

$$Ahorros_y = Energía\ producida_{BESS} * Tarifa_{alta} * días\ al\ año \quad (7)$$

- Aumentar el autoconsumo solar

$$Ahorros_y = Energía\ vertida_{anual} * Tarifa_{baja} \quad (8)$$

- Combinación de casos.

$$\text{Ahorros}_y = \text{Ahorros afeitado de picos} + \text{Ahorro arbitraje energético} + \text{Ahorro de autoconsumo solar} \quad (9)$$

Energía útil anual

La energía útil anualmente considerará la energía que se descargue del BESS y que esté lista para utilizarse durante todos los ciclos del año. Por lo tanto, esta ecuación tendrá en cuenta las pérdidas de carga, descarga y conversión. También se debe considerar la degradación anual.

$$\begin{aligned} \text{Energía útil}_{\text{anual}} &= \text{Capacidad de energía BESS} * (1 + \text{degradación}) \\ &* (1 + \text{crecimiento de carga}) \end{aligned} \quad (10)$$

Requerimiento anual de energía

Esta ecuación describirá la cantidad de energía cuantificable como costo, que considera la energía utilizada para la carga del BESS, así como la energía perdida en el proceso. Esto se debe hacer para todos los ciclos en el año.

$$\begin{aligned} \text{Requerimiento de Energía}_{\text{anual}} &= \frac{\text{Tamaño de la energía BESS} * (1 + \text{degradación}) * (1 + \text{crecimiento de carga})}{(1 - \text{pérdidas totales de eficiencia})} \end{aligned} \quad (11)$$

Las restricciones garantizan el cumplimiento de determinadas condiciones, que pueden ser financieras o técnicas. Algunas de las principales restricciones para la optimización son:

Proyección de consumo

Esta restricción garantiza que el BESS no superará la demanda del cliente, es decir, que no proporcionará energía que no pueda utilizarse. La restricción también puede tener en cuenta el crecimiento de consumo del usuario.

$$\text{Consumo}_{\text{día,año}} = \text{Consumo}_{\text{día,1}} * (1 + \text{crecimiento de carga} * \text{año}) \quad (12)$$

Valores máximos de energía y potencia

El BESS debe operar en un rango que esté por debajo de los valores máximos de energía y potencia del usuario. Esta restricción puede relajarse mediante un factor que tenga en cuenta las variaciones de los consumidores.

$$\text{Energía Max BESS}_{\text{día}} = \text{Consumo}_{\text{día}} * (1 + \text{crecimiento de carga}) \quad (13)$$

$$Potencia\ Min\ BESS_h = Consumo_h * (1 + crecimiento\ de\ carga) \quad (14)$$

Energía almacenada máxima y mínima

Esta restricción garantiza que el BESS no se cargará más allá de su capacidad ni se descargará más allá de lo debido. Es decir que garantiza que el BESS se deba cargar antes de descargarse y que el DoD se mantenga.

$$\begin{aligned} \text{Energía Max BESS}_{día} \\ = \text{Max Energía}_{BESS} * (1 + crecimiento\ de\ carga) * (1 - DoD) \end{aligned} \quad (15)$$

$$Potencia\ Max\ BESS_h = \text{Max Potencia}_{BESS} * (1 + crecimiento\ de\ carga) \quad (16)$$

Anexo 1. Ejemplos internacionales de BESS detrás del medidor

Introducción

En este anexo se describen algunos proyectos de BESS detrás del medidor que resultan rentables en diferentes contextos internacionales. Una visión general de los casos presentados en esta sección puede encontrarse en la Tabla 3. Aunque el ahorro es muy específico de cada proyecto, estos ejemplos dan una idea del potencial de ahorro de baterías en diferentes contextos.

Tabla 3. Experiencias internacionales de BESS detrás del medidor.

Nombre del proyecto, ubicación	Capacidad de la batería	Servicios prestados
Calle Pecan, Texas	45 kW (múltiples unidades)	<ul style="list-style-type: none"> ● Reducción de picos
Universidad de Queensland, Australia	1.1 MW/2.15 MWh	<ul style="list-style-type: none"> ● Arbitraje energético ● Reducción de picos ● Contingencia FCAS ● Contrato de límite virtual
Más de 300,000 unidades en hogares alemanes	Normalmente, de 2 a 6 kW/ de 5 a 12 kWh	<ul style="list-style-type: none"> ● Gestión de la factura eléctrica con energías renovables
Hogares en varios países de la Unión Europea (por ejemplo, Alemania, Reino Unido, Suiza)	10 a 20 kW (varias unidades agregadas)	<ul style="list-style-type: none"> ● Respuesta primaria a frecuencia ● Optimización del autoconsumo fotovoltaico

El costo nivelado de la electricidad (LCOE) de los sistemas detrás del medidor para diferentes tecnologías de baterías, se comparó para diferentes tamaños y aplicaciones en [2]. Los resultados indicaron que el LCOE de los sistemas autónomos comerciales/industriales es aproximadamente tres veces mayor que el LCOE de un sistema híbrido (FV-Batería) de la misma capacidad energética (Figura 9).

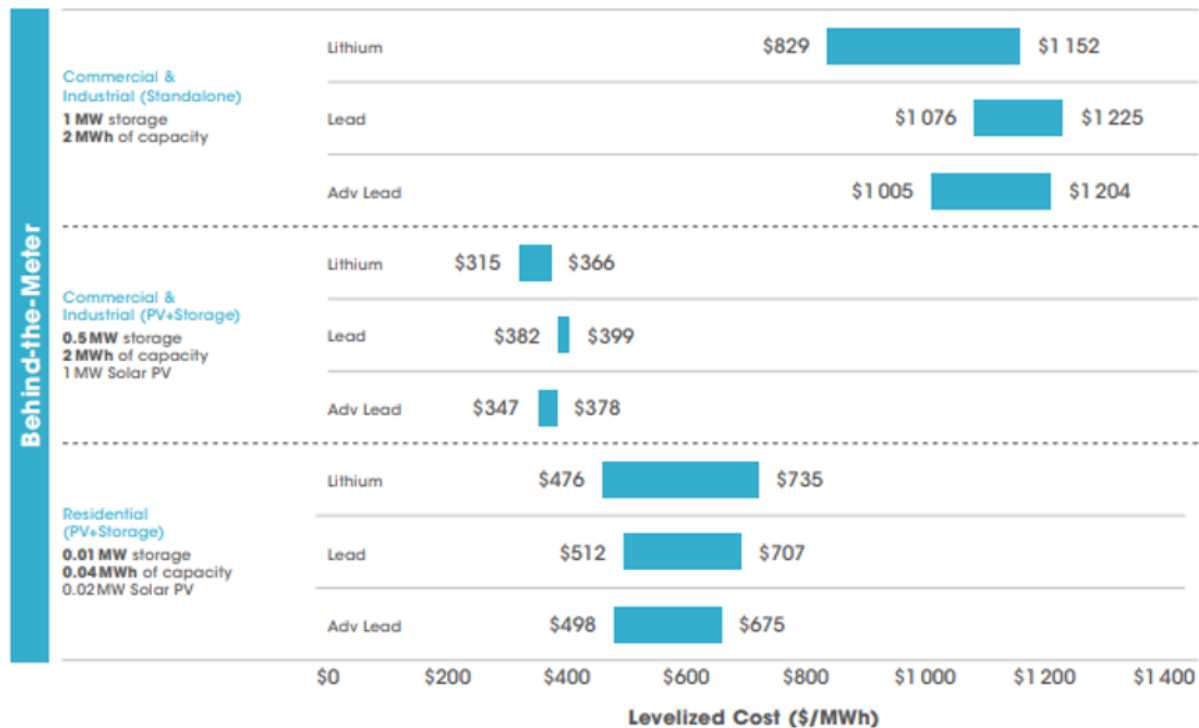


Figura 9. Comparación del costo nivelado del almacenamiento [USD/MWh] [2] IRENA (fuente original: LAZARD, 2018).

Almacenamiento detrás del medidor en Texas

Cada mes, a los consumidores de Texas se les aplica un cargo basado en la cantidad de electricidad consumida durante un periodo definido del año anterior en el que la demanda de electricidad en la red fue máxima. Este cargo está relacionado con la media de la demanda del consumidor en cada uno de los cuatro días de máxima carga del sistema, entre los meses de junio y septiembre (meses de máxima carga en Texas). El cargo resultante se aplica mensualmente durante el año siguiente en la factura del consumidor.

Los participantes en el Programa 4CP tienen la oportunidad de reducir voluntariamente su consumo de energía en estos cuatro días de máxima carga, informados de antemano, y, por tanto, reducir los cargos por costo de servicio de transmisión en su factura de electricidad. El Consejo de Confiabilidad Eléctrica de Texas (ERCOT) considera los intervalos de 15 minutos con los cuatro picos de carga más altos de junio, julio, agosto y septiembre.

Motivado por el Programa 4CP, Pecan Street instaló siete baterías de dos horas y 5 kW y vehículo eléctrico bidireccional V2G de cuatro horas (EV) a lo largo del alimentador de Austin Energy con más generación solar, lo que dio como resultado un total de 45 kW de capacidad de almacenamiento detrás del medidor. Los activos instalados presentaban una oportunidad ideal para reducir la carga de la compañía eléctrica durante estos intervalos.

Durante estos periodos de carga alta, cada kW se valora en aproximadamente 60 USD, lo que equivale a un ahorro de 2,700 USD para Austin Energy si los sistemas de baterías se despliegan correctamente. La Tabla 4 proporciona la reducción potencial de carga y real y el ahorro para los activos residenciales en el verano de 2019.

Tabla 4. Capacidad total y desplegada y valor aportado en días de muestra de 2019 [11].

	19 de junio	30 de julio	12 de agosto	6 de septiembre
Capacidad residencial total [kW]	35	35	35	45
Capacidad residencial desplegada [kW]	30	-13	0	10
Ahorro potencial de costos si se despliega la capacidad total [USD]	2,100	2,100	2,100	2,700
Ahorro real realizado [USD]	1,800	-780	0	600

En junio y septiembre, los sistemas respondieron a las señales del operador y redujeron 30 kW y 10 kW, respectivamente. En julio, los sistemas no se cargaron completamente a tiempo para el evento de máxima demanda. En agosto, la batería estuvo fuera de servicio debido al caluroso verano de Texas. En conclusión, si se hubiera utilizado toda la capacidad del sistema para los cuatro eventos de máxima demanda, el ahorro producido habría cubierto los costos de dos de los sistemas [11]. Esto también muestra los riesgos asociados a la operación del BESS, pues una mala planeación de la operación o una falla reduce los ahorros considerablemente o se puede caer incluso en penalizaciones.

Sistema de almacenamiento con baterías de la Universidad de Queensland

El sistema de almacenamiento con baterías de la Universidad de Queensland es un BESS de ion-litio suministrado por Tesla con una capacidad de descarga de 1.1 MW y una capacidad de almacenamiento de energía de 2.15 MWh. El BESS se puso en marcha en noviembre de 2019 y se utiliza para obtener ingresos de la combinación de cuatro servicios: arbitraje, reducción de picos, Servicios Auxiliares de Control de Frecuencia (FCAS por sus siglas en inglés), de contingencia y contrato de límite virtual⁵. Los ingresos de la batería en sus cuatro servicios durante el primer trimestre de 2020 fueron de 73,938 AUD. La mayor parte (62%) fue debido al FCAS, seguida por 26% por parte del contrato de límite virtual y, por último, 12% correspondiente al arbitraje [12].

Hogares alemanes

Hay más de 300,000 sistemas de almacenamiento con baterías instalados en los hogares alemanes, que comprendió una capacidad de almacenamiento total de más de 1.4 GWh en 2019 (véase Figura 10). Las capacidades promedio de instalación aumentaron ligeramente con el tiempo, y los nuevos sistemas instalados en 2019 tenían un tamaño promedio de unos 4 kW/8 kWh, los cuales se basaron casi exclusivamente en tecnología de ion-litio.

⁵ En este servicio, el BESS replica la función de gestión del riesgo realizada por un contrato de límite financiero, al menos parcialmente. La batería descarga la energía almacenada durante los intervalos en los que los precios se disparan por encima de un umbral establecido.

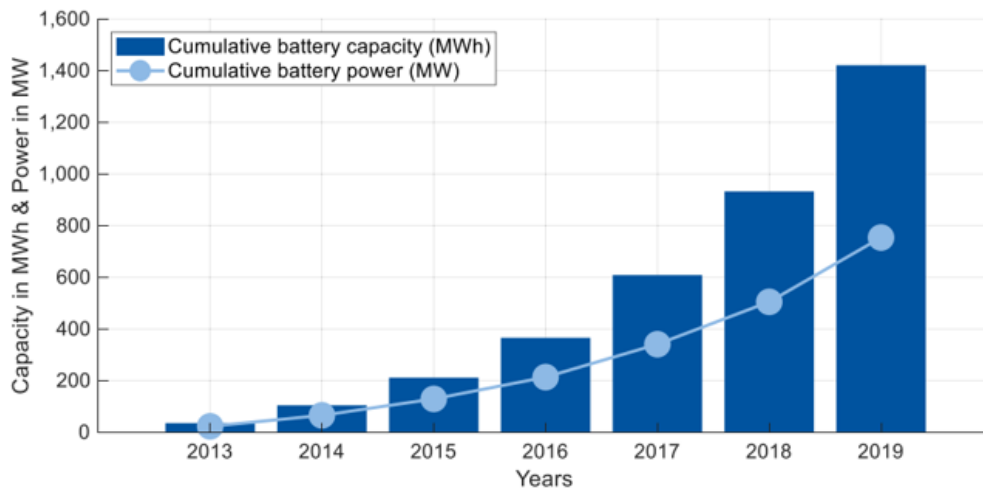


Figura 10. Capacidad acumulada de las baterías y potencia de las baterías de los sistemas de almacenamiento detrás del medidor en Alemania [13].

Los costos de instalación han disminuido gradualmente con un promedio aproximado del 12% anual, con reducciones de costos más rápidas para los sistemas de baterías más grandes, alcanzando valores medios por debajo de los 1,000 €/kWh en 2019, como se muestra en la Figura 11.

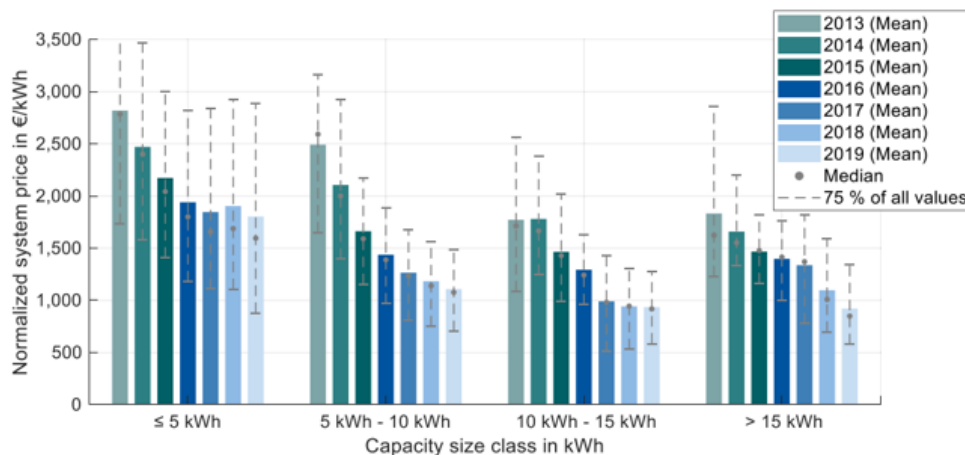


Figura 11. Evolución de los precios de venta al público (incluido el 19% de IVA) de los sistemas de baterías de ion-litio para uso detrás del medidor de diferentes clases de capacidad en Alemania [13].

La razón principal para la instalación de baterías fue el aumento del autoconsumo de la generación fotovoltaica en los techos y los incentivos favorables para la instalación de baterías. De este modo, los sistemas fotovoltaicos con baterías para uso doméstico han alcanzado la paridad de red en 2018, aunque la instalación de un sistema fotovoltaico sin batería sigue resultando normalmente más rentable, como se muestra en la Figura 12.

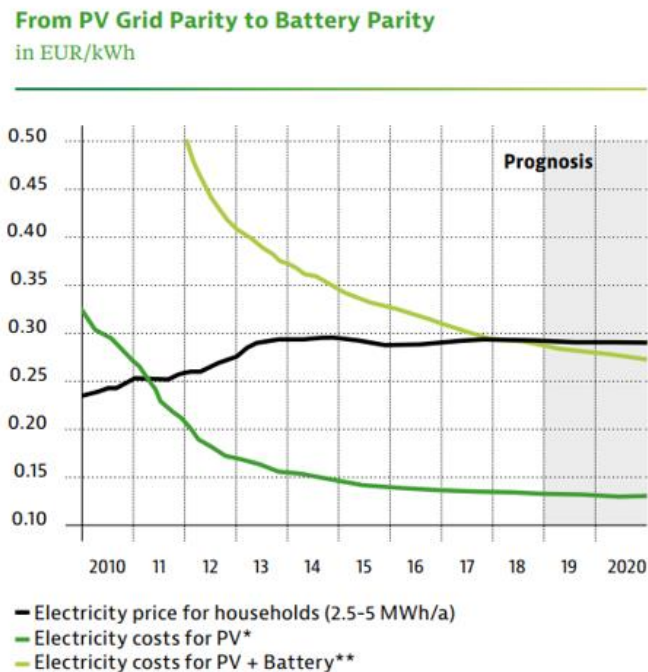


Figura 12. Costos de la electricidad de los sistemas FV y FV-batería comparados con el precio promedio de la electricidad para los hogares [14].

Aplicaciones de centrales eléctricas virtuales a partir de baterías detrás del medidor

Hoy en día, los sistemas de almacenamiento con baterías detrás del medidor se implementan en varios países para proporcionar servicios de soporte al sistema como una central eléctrica virtual. En algunos países europeos hay varias empresas que agregan las capacidades de las baterías de varios miles de sistemas de almacenamiento con baterías domésticas para participar en los mercados de regulación de frecuencia (particularmente la provisión de regulación primaria de frecuencia también conocida como reserva de contención de frecuencia). Los sistemas de baterías utilizados para este servicio suelen tener una potencia instalada de entre 10 kW y 25 kW.

Esto ofrece una doble oportunidad de comercialización, ya que la batería se utiliza tanto para optimizar el autoconsumo fotovoltaico como para proporcionar el servicio de respuesta a la frecuencia. Algunas empresas sólo ofrecen esta opción para sus propias baterías, mientras que otras ofrecen la conexión de baterías de diferentes fabricantes. Entre los ejemplos de empresas activas en Alemania, Reino Unido, Suiza y otros países de la UE, que agregan estas capacidades de baterías como una central eléctrica virtual se encuentran:

- Next Kraftwerke⁶
- Sonnen⁷

⁶ <https://www.next-kraftwerke.de/virtuelles-kraftwerk/stromspeicher/batteriespeicher>

⁷ <https://sonnengroup.com/>

- Fenecon⁸
- Peeeks⁹

Otros ejemplos de BTM BESS y servicios prestados

Tabla 5. Ejemplos de aplicaciones de BESS detrás del contador y ahorros para los consumidores obtenidos por la prestación del servicio [2].

Grupo	Ahorro	Sistema instalado	Principales servicios prestados
Distrito Escolar Unificado de Poway, California, Estados Unidos.	1.4 millones de USD en 10 años.	6 MWh	Reducción de la carga- Servicio a los consumidores.
Instalaciones de clientes en Vermont, Estados Unidos.	Entre 2 y 3 millones de USD a lo largo de la vida del programa - servicio a los consumidores; 500,000 USD en julio de 2018 para el servicio de afeitado en horas punta.	2000 x Tesla Powerwall2	Energía de reserva y apoyo a la red.
Proyecto de baterías para Morgan Stanley, realizado por Advanced Microgrid Solutions, Estados Unidos.	20% de reducción de picos. Las tarifas máximas de los consumidores industriales y comerciales de EE.UU. representan hasta el 50% de su factura de electricidad.	Varios sistemas Tesla Powerpack de 500 kW y 1000 kWh	Reducción de picos.
Proyecto de baterías para la Universidad Estatal de California, realizado por Advanced Microgrid Solutions, Estados Unidos.	Ahorro de costos energéticos máximos de 3.3 millones de dólares.	Sistema de almacenamiento de 2 MW/12 MWh dividido en tres locaciones.	Reducción de picos.
BESS en las oficinas de San Francisco, operadas por Stem (proveedor de electricidad en EEUU).	Aproximadamente 255 600 USD a lo largo de 10 años.	162 kW/180 kWh BESS	Aplicación prevista de los servicios de gestión de la demanda de Adobe y de los servicios de respuesta a la demanda para el operador del sistema.

⁸ <https://fenecon.de/>

⁹ <https://peeeks.energy/>

Anexo 2. Ejemplo cálculo del dimensionamiento de un BESS

A continuación, se presenta un ejemplo sobre el cálculo del dimensionamiento de un BESS siguiendo el procedimiento de la sección 3 para las siguientes aplicaciones: afeitado de picos, arbitraje de energía y autoconsumo solar. Como dato de entrada se tiene un perfil de consumo horario, como se muestra en la Figura 13. Se asume que este perfil es el mismo para todos los días del año.



Figura 13. Perfil de consumo horario.

Afeitado de picos

De acuerdo con la sección 3.1, en el afeitado de picos, el parámetro que más influye en el dimensionamiento del BESS es el tamaño del pico que se quiere reducir. Para calcular dicho valor, se realiza el siguiente procedimiento.

1. De acuerdo con la Figura 13, se observa que la demanda máxima es de 591.16 kW.
2. Para este ejemplo, se evaluó primero el caso de demanda máxima deseada igual a 400 kW.
3. Para hallar el valor de la potencia mínima del BESS, se obtiene la diferencia entre la demanda máxima original y la demanda máxima deseada, por lo tanto, se tiene 191.16 kW.
4. Con la regla general de la tasa C de 1, se obtiene que la capacidad energética es de 191.16 kWh.
5. Calculando el área entre la demanda durante la hora punta del perfil de consumo y la demanda máxima deseada para todo el periodo de horas punta, se halla que el valor de la energía mínima requerida o la capacidad necesaria de la batería es de 400.11 kWh. (Ver Figura 14).¹⁰

¹⁰ Para este caso se tienen dos picos de consumo, y existe un valle entre ambos picos. Se puede evaluar la posibilidad de tener dos ciclos por día, sin embargo, esto depende de que el valle de consumo sea lo suficientemente bajo para poder cargar el BESS sin superar el límite de la demanda máxima.

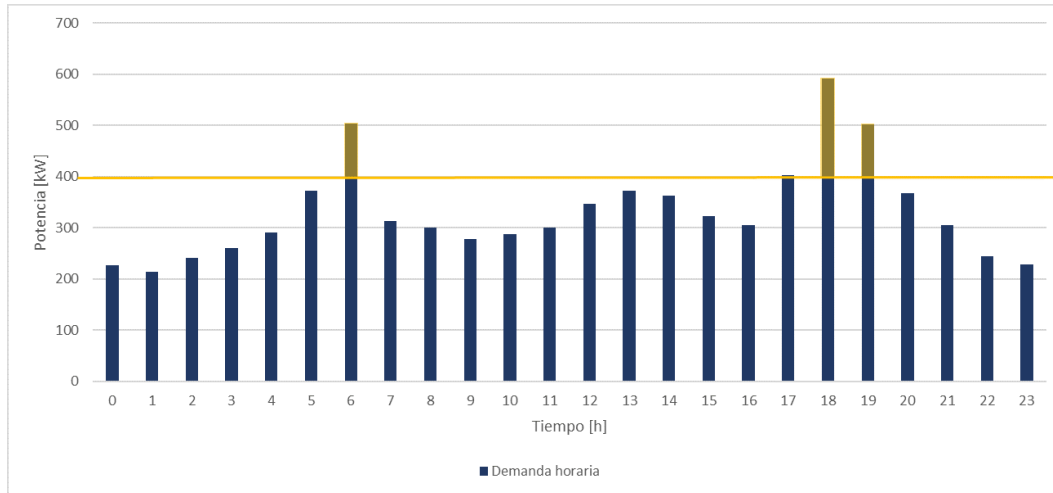


Figura 14. Capacidad necesaria de la batería para el afeitado de picos con perfil de consumo horario.

6. La capacidad de potencia correspondiente es 400.11 kW, y se determinó con la consideración de tasa C de 1.
7. Finalmente, la dimensión del BESS es de 400.11 kWh/400.11 kW. Mientras que el inversor es de 191.16 kW.

Los valores hallados se presentan en la Tabla 6 y el nuevo perfil de consumo considerando el afeitado de picos se muestra en la Figura 15. Se puede observar que, durante las 0 h y las 5 h, el consumo aumenta debido a la carga de la batería.

Tabla 6. Variables para determinar la dimensión energética de la batería para afeitado de picos.

Demanda máxima original [kW]	591.16
Demanda máxima deseada [kW]	400
Dimensión energética [kWh]	400.11
Potencia del inversor [kW]	191.16

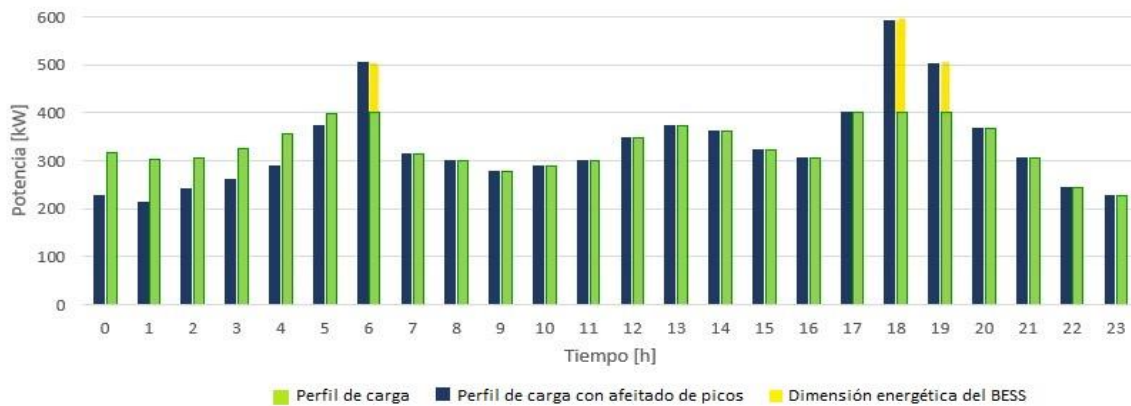


Figura 15. Perfil de consumo original vs. Perfil de consumo con afeitado de picos.

Arbitraje de energía

Como se menciona en la sección 3.2, en el arbitraje de energía el parámetro más importante para dimensionar la batería es su capacidad energética. Para encontrar dicho valor, se realiza el siguiente procedimiento.

1. Se considera que entre las 18 h y las 21 h son las horas punta.
2. Se determina que se quiere reducir el 15% de la energía punta original.
3. Con el perfil de consumo, se determina que la energía punta original es 1,767.6 kWh (Ver Figura 16) y la energía punta deseada es de 1502.5 kWh.

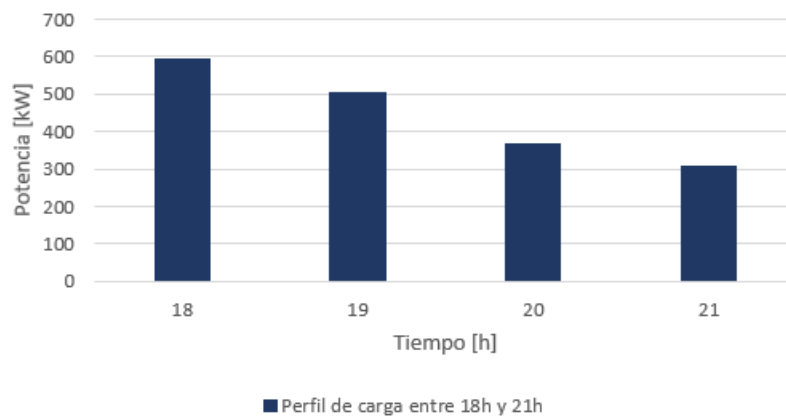


Figura 16. Energía punta original entre las 18h y 21h.

4. Con la diferencia entre la energía punta original y la energía punta deseada, se obtiene la energía mínima requerida de la batería, la cual es de 265.14 kWh.
5. Considerando la tasa C de 1, se obtiene una potencia de 265.14 kW.
6. Se hizo una distribución de la contribución de la batería de manera que se tenga un perfil plano como se puede observar en la Figura 17.

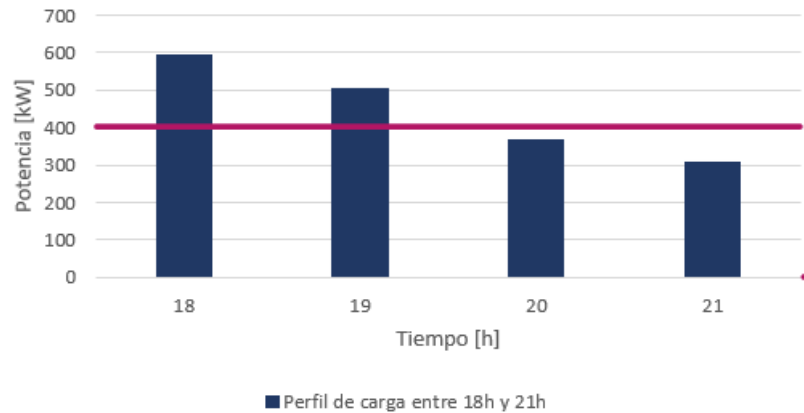


Figura 17. Energía punta deseada para el arbitraje de energía.

7. A partir de la diferencia entre la demanda máxima original y el nuevo perfil de carga se obtiene una potencia de 191.16 kW.

En la Tabla 7, se resumen los valores de las variables encontradas.

Tabla 7. Variables para determinar el dimensionamiento de la batería para arbitraje de energía.

Energía punta original [kWh]	1,767.59
Energía punta deseada [kWh]	1,502.46
Energía mínima BESS [kWh]	265.14
Potencia mínima inversor [kW]	191.16

En la Figura 18, se muestra el nuevo perfil de consumo con el arbitraje de energía durante los periodos de horas punta. Se observa que entre las 0 h y las 4 h la carga aumenta ya que durante estos periodos de precios bajos se recarga la batería.

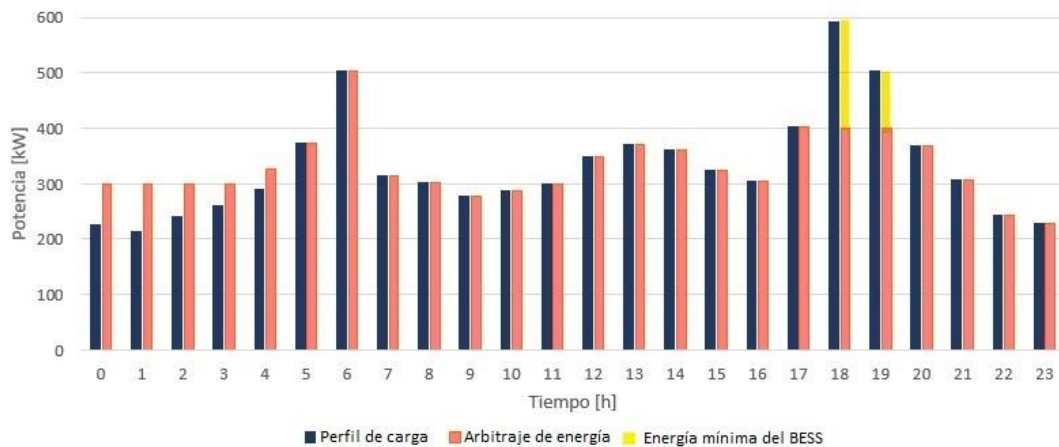


Figura 18. Perfil de consumo original vs. Perfil de consumo con arbitraje de energía.

Autoconsumo solar

Para esta aplicación, es necesario el perfil de generación fotovoltaica. En este ejemplo se proponen dos casos ilustrados en la Figura 19 y Figura 20 . Por otro lado, el parámetro dominante para dimensionar la batería es la cantidad de energía a almacenar y se asume que hay vertimiento.

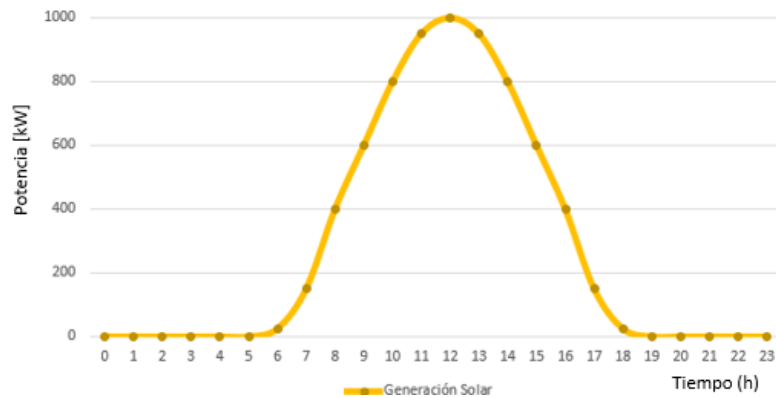


Figura 19. Perfil 1 de generación fotovoltaica.

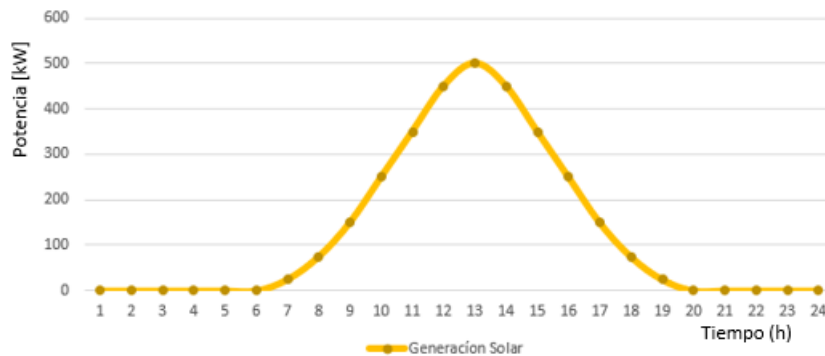


Figura 20. Perfil 2 de generación fotovoltaica.

A continuación, se describe el procedimiento para determinar el dimensionamiento de la batería para cada caso.

1. Teniendo en cuenta el perfil de consumo de la Figura 13 y los perfiles de generación fotovoltaicos, al calcular el área continua en la que la generación supera la carga, se obtiene que la capacidad de energía requerida de la batería para cada uno de los casos es:
 - Caso 1. 3,623.07 kWh (Ver Figura 21)
 - Caso 2. 441.94 kWh (Ver Figura 22)

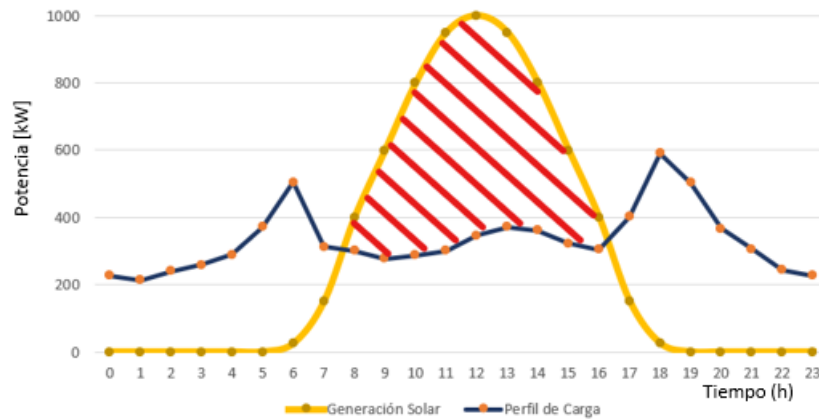


Figura 21. Capacidad requerida de energía de la batería para el caso 1.

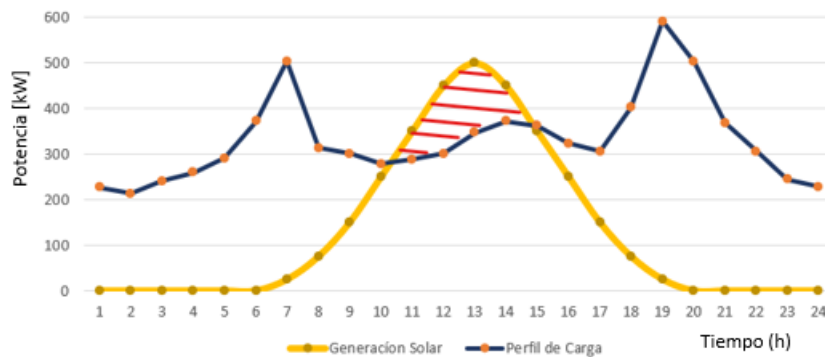


Figura 22. Capacidad requerida de energía de la batería para el caso 2.

1. Con la consideración de tasa C de 1, se obtiene que la capacidad de potencia correspondiente es:
 - Caso 1. 3,623.07 kW
 - Caso 2. 441.94 kW
2. Para determinar la potencia máxima del inversor, se calcula la diferencia entre la curva de generación fotovoltaica y el perfil de consumo para cada uno de los periodos en los que la generación supera la carga, y se toma el valor más grande.
 - Caso 1. 652.47 kW (Ver Figura 23)
 - Caso 2. 152.47 kW (Ver Figura 24)

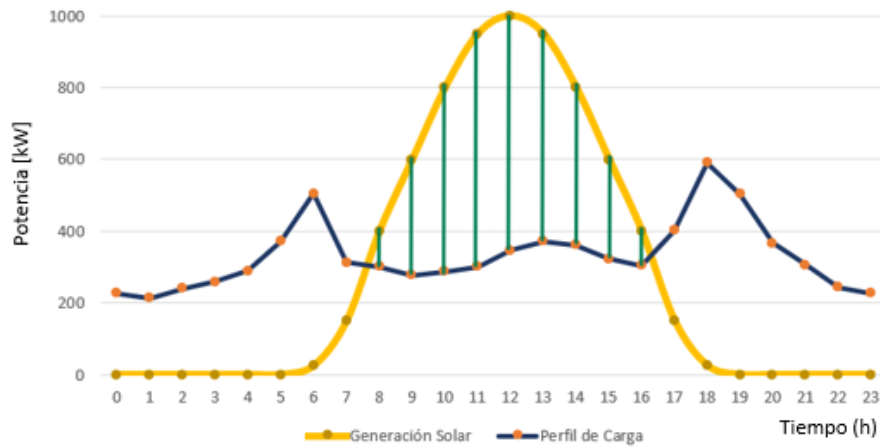


Figura 23. Potencia máxima del inversor caso 1.

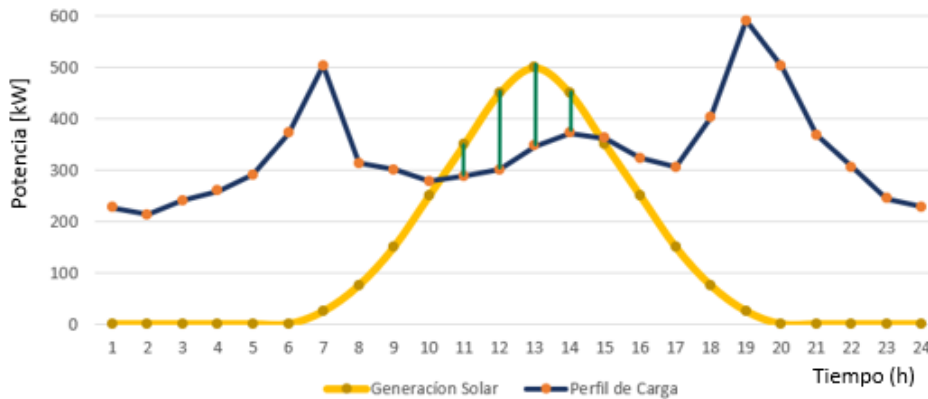


Figura 24. Potencia máxima del inversor caso 2.

- Finalmente, la potencia del BESS será la determinada con los valores obtenidos en el punto 2 y el inversor se dimensiona según los datos obtenidos en el punto 3.

Tabla 8. Potencia del inversor caso autoconsumo solar 1 y 2.

Dimensiones	Caso 1	Caso 2
Tamaño del BESS [kWh]	3,623.07	441.94
Potencia del inversor [kW]	652.47	152.47

Como se muestra en la Figura 25 y la Figura 26, las regiones sombreadas con rojo representan el momento en que se recarga la batería, mientras que durante el periodo de tiempo en el que se descarga está sombreado con verde. Asimismo, se puede ver que la capacidad de la batería no es suficiente para cubrir toda la demanda cuando la generación fotovoltaica es menor a la carga, por lo que depende del usuario decidir en qué momento conviene descargar el BESS o comprar

energía de la red. Si existe una diferencia horaria de precios el mayor beneficio se obtendrá en los periodos de precios altos.

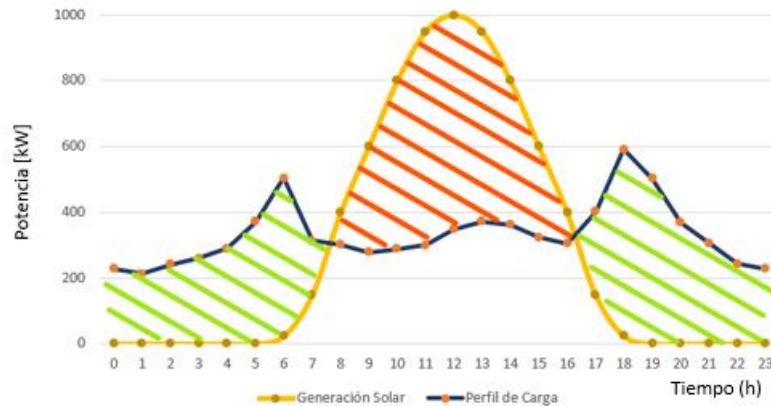


Figura 25. Perfil de autoconsumo solar caso 1.

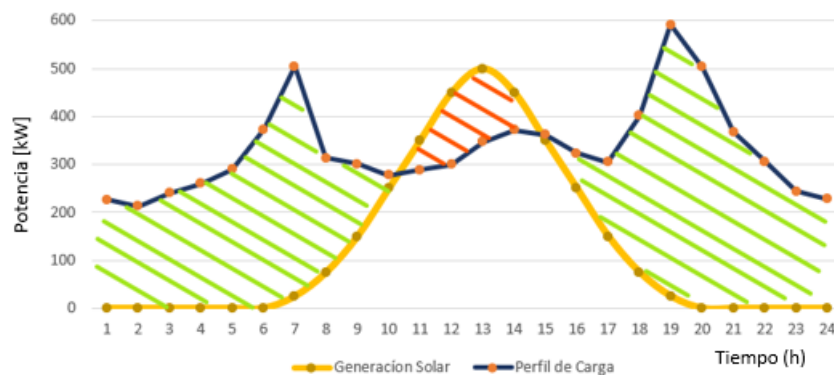


Figura 26. Perfil de autoconsumo solar caso 2.

Comparación de casos

Para poder ilustrar la optimización del dimensionamiento, se hizo una optimización con Excel. Para ello, se desarrolló una herramienta que considera todos los aspectos de la sección 3 y se cambiaron manualmente los tamaños objetivos de acuerdo a la aplicación. De esta manera se puede iterar varias veces el proceso hasta conseguir los mayores beneficios. Para los costos se consideraron los valores del escenario moderado.

Tabla 9. Costos de la batería de ion-litio para el perfil de consumo horario según el tipo de aplicación (caso base).

Perfil de consumo horario	Capacidad de la batería [kWh]	Capacidad de potencia [kW]	Costo total del sistema moderado [MXN]
Afeitado de picos	400.12	400.12	10,472,620.80

Arbitraje de energía	293.92	293.92	9,108,961.44
Autoconsumo solar 1	3,623.07	3,623.07	51,855,234.60
Autoconsumo solar 2	441.94	441.94	11,009,525.40

Costos de operación y mantenimiento

Teniendo en cuenta la ecuación (1) y los valores de la Tabla 2, se pueden determinar los costos de operación anuales de cada una de las aplicaciones. Para ello se asumió la operación de un ciclo diario y se utilizó el valor de la tarifa baja de GDMTH para los costos. A partir de los datos obtenidos en el ejemplo anterior, se tienen los siguientes valores.

Tabla 10. Costos operativos y de mantenimiento para cada una de las aplicaciones con un perfil de consumo horario.

Perfil de consumo horario	Requerimientos energéticos diarios [kWh]	Costo de O&M moderado [MXN]
Afeitado de picos	400.12	108,966.21
Arbitraje de energía	293.92	80,277.44
Autoconsumo solar 1 y 2	-	880

Ahorro anual para cada una de las aplicaciones

En la Tabla 11, se presentan los ahorros anuales de cada una de las aplicaciones de los ejemplos anteriores, los cuales fueron calculados a partir de las ecuaciones (6), (9) y (10) Es importante mencionar que para realizar este procedimiento se tuvieron en cuenta los valores de la tarifa para GDMTH.

Tabla 11. Ahorros para cada una de las aplicaciones con perfil de consumo horario.

Aplicación	Variables		Ahorro anual [MXN]
Afeitado de picos	Potencia BESS [kW]	400.11	1,618,313.22
	Número de periodos por año	12	
	Capacidad [MXN/kW]	337.05	
Arbitraje de energía	Tarifa alta [MXN/kWh]	1.6687	179,017.03
	Energía producida BESS [kWh]	293.91	
	Número de días al año	365	
Autoconsumo solar 1	Energía restringida anual [kWh]	1,322,418.73	978,722.10
	Tarifa baja [MXN/kWh]	0.7401	
	Energía restringida anual [kWh]	161,306.28	119,382.77

Autoconsumo solar 2	Tarifa baja [MXN/kWh]	0.7401	
----------------------------	-----------------------	--------	--

Otros ejemplos

Con el fin de realizar una comparación más detallada entre los costos y los ahorros del BESS, se realizó el mismo procedimiento a lo largo de este anexo, pero con diferentes valores de potencia máxima deseada. A continuación, en la Tabla 12 y la Tabla 13, se presentan los costos totales del sistema, los costos de operación y mantenimiento anuales y los ahorros anuales encontrados a partir del perfil de consumo horario de la Figura 13 para la aplicación de afeitado de picos y arbitraje de energía respectivamente.

Tabla 12. Costos vs. Ahorros afeitado de picos con diferentes valores de potencia máxima deseada para un perfil de consumo horario.

Potencia máxima deseada [kW]	340	380	400	420
Capacidad de la batería [kWh]	761.82	480.12	400.12	337.94
Capacidad de potencia [kW]	761.82	480.12	400.12	337.94
Costo total del sistema moderado [MXN]	15,116,835.96	11,499,782.28	10,472,620.80	9,674,280.96
Costo O&M moderado [MXN]	206,675.12	130,577.13	108,966.21	92,171.01
Ahorros anuales [MXN]	3,081,253.13	1,941,881.22	1,618,313.22	1,366,848.30

Tabla 13. Costos vs. Ahorros arbitraje de energía con diferentes valores de potencia máxima deseada para un perfil de consumo horario.

Potencia máxima deseada [kW]	150	200	300	400
Capacidad de la batería [kWh]	1,167.60	967.60	567.60	293.92
Capacidad de potencia [kW]	1,167.60	967.60	567.60	293.92
Costo total del sistema moderado [MXN]	20,327,038.32	17,759,038.32	12,623,038.32	9,108,961.44
Costo O&M moderado [MXN]	316,290.84	262,263.54	154,208.94	80,277.44
Ahorros anuales [MXN]	711,155.34	589,340.24	345,710.04	179,017.03

Asimismo, teniendo en cuenta el perfil de consumo de la Figura 13 y aplicando el afeitado de picos y el arbitraje de energía con diferentes valores de potencia máxima deseada y de energía punta deseada, respectivamente, los costos totales del sistema, los costos de operación y mantenimiento anuales y los ahorros anuales se encuentran en la Tabla 12 y en la Tabla 13.

Como es de esperarse, el valor de la potencia máxima deseada es inversamente proporcional al valor de la capacidad de la batería. Además, a medida que el tamaño de la batería aumenta, los costos y los ahorros también son mayores.

Por otra parte, para la aplicación de afeitado de picos, se puede ver que la diferencia entre los ahorros anuales y los costos del sistema no es tan significativa como en el caso del arbitraje de energía, donde dicha diferencia es mucho más notoria. Por lo que a pesar de que el costo inicial es grande, se esperaría que anualmente los ahorros justifiquen la inversión.

Referencias

- [1] D. K. Kim, S. Yoneoka, A. Z. Banatwala, Y.-T. Kim, and K.-Y. Nam, *Handbook on Battery Energy Storage System*, no. December. 2018. [Online]. Available: <https://www.adb.org/publications/battery-energy-storage-system-handbook>
- [2] IRENA, *Behind-the-meter batteries innovation landscape brief*. 2019. Accessed: Nov. 20, 2019. [Online]. Available: www.irena.org
- [3] W. C. Turner, *Energy Management Handbook*, Fifth Edit. School of Industrial Engineering and Management Oklahoma State University, 2005. doi: <https://dx.doi.org/10.1201/9781003151364>.
- [4] G. Karmiris and T. Tengné, "PEAK SHAVING CONTROL METHOD FOR ENERGY STORAGE," pp. 1–6, 2013.
- [5] E. Abramova and D. Bunn, "Optimal daily trading of battery operations using arbitrage spreads," *Energies*, vol. 14, no. 16, 2021, doi: 10.3390/en14164931.
- [6] Stabl, "Increase in self-consumption," 2021. <https://stabl.com/en/applications/self-consumption/>
- [7] G. Strbac, I. Konstantelos, and P. Djapic, "Analysis of Integrated Energy Storage Contribution to Security of Supply," 2016.
- [8] Riello ups, "WHAT'S THE DIFFERENCE BETWEEN A CRITICAL AND NON-CRITICAL LOAD?" <https://www.riello-ups.com/questions/38-what-s-the-difference-between-a-critical-and-non-critical-load>
- [9] C. Augustine and N. Blair, "Storage Futures: Study Storage Technology Modeling Input Data Report," 2021. [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/78694.pdf>.
- [10] Merriam-Webster Dictionary, "Optimization." <https://www.merriam-webster.com/dictionary/optimizatio> (accessed Feb. 03, 2022).
- [11] Pecan Street, "Behind the Meter Storage and 4CP in Texas," 2021. <https://www.pecanstreet.org/4cp/> (accessed Apr. 19, 2021).
- [12] University of Queensland, "The business case for behind-the-meter energy storage," 2020. Accessed: Apr. 21, 2021. [Online]. Available: <https://sustainability.uq.edu.au/files/11868/EPBQtyRptq12020.pdf>
- [13] J. Figgner *et al.*, "The development of stationary battery storage systems in Germany – status 2020," *J. Energy Storage*, vol. 33, 2021, doi: 10.1016/j.est.2020.101982.
- [14] A. Bräutigam, T. Rothacher, H. Staubitz, and R. Trost, "The Energy Storage Market in Germany," p. 6, 2017, [Online]. Available: https://www.gtai.de/GTAI/Content/EN/Invest/_SharedDocs/Downloads/GTAI/Fact-sheets/Energy-environmental/fact-sheet-energy-storage-market-germany-en.pdf?v=9