

DIMENSIONAMIENTO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA PARA MITIGAR EL EFECTO DE INTERMITENCIA EN LA SALIDA DE UN SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO



Hilmo Alejandro Correa Tamayo
Septiembre 2016

DIMENSIONAMIENTO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA PARA MITIGAR EL EFECTO DE INTERMITENCIA EN LA SALIDA DE UN SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO

Hilmo Alejandro Correa Tamayo

Trabajo de grado presentado como requisito
parcial para optar al título de
Ingeniero Electricista

Pereira, 2016
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
Programa de Ingeniería Eléctrica.



DIMENSIONAMIENTO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA PARA MITIGAR EL EFECTO DE INTERMITENCIA EN LA SALIDA DE UN SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO

©Hilmo Alejandro Correa Tamayo

Director: Andrés Escobar Mejía, PhD

Pereira, 2016

Programa de Ingeniería Eléctrica.

Universidad Tecnológica de Pereira

La Julita. Pereira(Colombia)

TEL: (+57)(6)3137122

www.utp.edu.co

Versión web disponible en: *http://recursosbiblioteca.utp.edu.co/tesisd/index.html*

*Dedicado a
mis padres.*

Agradecimientos

Primero que todo quiero agradecer a mi familia, en especial a Ofelia, Hilmo, Johán, Julián y Cristián que fueron las personas que me han acompañado en toda mi vida y siempre me brindan apoyo; Agradezco a mis compañeros de carrera Lucho, Pipe y El Negro; a mis amigos del cineclub La Caja, en especial a Camilo y Viviana (Quinaya); Y a todos aquellos profesores, compañeros, parceros y personas que solo compartieron conmigo pequeños momentos, pero de igual manera aportaron a mi vida y a este proceso de formación.

Resumen

Este trabajo de grado está dividido en 5 capítulos, de los cuales tres de estos contienen la fundamentación y el desarrollo del trabajo investigativo en su totalidad.

En el capítulo 1 se puede ver la introducción de este trabajo; en el capítulo 2 se muestra un estudio sobre los sistemas de almacenamiento de energía y las aplicaciones que tienen con los sistemas no convencionales de generación eléctrica; en el capítulo 3 se muestra una metodología para calcular un sistema de almacenamiento en un sistema solar fotovoltaico; en el capítulo 4 se muestra un ejemplo resuelto de dimensionamiento de un sistema de almacenamiento a un sistema fotovoltaico real; y en el capítulo 5 se muestran las conclusiones y los futuros trabajos que se pueden derivar de este trabajo de grado.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Planteamiento del problema	1
1.2. Justificación	3
1.3. Objetivos	3
1.3.1. Objetivo general	3
1.3.2. Objetivos específicos	3
1.4. Estado del arte	4
1.5. Alcance	5
1.6. Estructura del trabajo de grado	5
2. ESS para redes eléctricas de distribución	6
2.1. Introducción	6
2.2. Almacenamiento de energía en fuentes convencionales y no convencionales . .	6
2.3. Operación de los ESS	8
2.3.1. Operación de un ESS en términos de energía	8
2.3.2. Operación de un ESS en términos de potencia	8
2.3.3. ESS en un conjunto de paneles solares fotovoltaicos	9
2.4. Tecnologías usadas en el almacenamiento de energía	10
2.4.1. Embalses	10
2.4.2. Volantes de inercia	10
2.4.3. Ultracapacitores	11
2.4.4. Aire comprimido	11
2.4.5. Superconductores magnéticos	12
2.4.6. Baterías	12
2.5. Tipos de baterías	14
2.5.1. Ion de litio	14
2.5.2. Batería ácido de plomo	15
2.5.3. Batería de hierro-niquel	15

3. Dimensionamiento de sistemas de almacenamiento	16
3.1. Introducción	16
3.2. Desbalance de potencia	16
3.3. Análisis de la señal en el dominio de la frecuencia con la transformada discreta de Fourier	18
3.4. Descomposición de la señal por rangos de frecuencia	18
3.5. Cálculo de la energía a partir de la potencia	19
4. Análisis del caso de estudio	22
4.1. Introducción	22
4.2. Caso 1	23
4.2.1. Obtención de valor de referencia y función de desbalance	23
4.2.2. Obtención de la transformada discreta de Fourier de la función de desbalance de potencia	25
4.2.3. Descomposición de la señal por rangos de frecuencias	25
4.2.4. Cálculo del ESS utilizando ultracapacitores y baterías	26
4.2.5. Limitaciones del ESS en términos de potencia	26
4.2.6. Cálculo de energía del ESS	31
4.3. Caso 2	31
4.4. Resultados	33
5. Conclusiones	36
5.1. Futuros trabajos de investigación	37

Capítulo 1

Introducción

En la actualidad se buscan nuevas formas de generación de energía que no dependan de los combustibles fósiles con el fin de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera. Por esta razón se debe estudiar formas alternativas de generación de energía, como la energía solar fotovoltaica, la cual permite la obtención de energía a partir de la radiación solar. Otros ejemplos incluyen la energía eólica, la cual transforma la energía cinética del viento en energía de tipo eléctrico [1].

Estas formas de energía son amigables con el medio ambiente, pero ellas presentan inconvenientes: como una baja confiabilidad y la intermitencia que impide su conexión a la red eléctrica si se conectan con los sistemas convencionales de energía, como la energía hidráulica y térmica, por poner el caso local, afectaría la estabilidad del sistema de energía [2].

Las formas no convencionales tienen una baja confiabilidad porque presentan intermitencia en su salida, esto se debe a que su fuente de energía primaria no es controlable. Por ejemplo, en el caso de la energía solar fotovoltaica la salida de potencia se ve afectado por factores climáticos que son difíciles de predecir [2].

Este trabajo consiste en buscar una manera para lograr que las fuentes no convencionales de energía, en especial la energía solar fotovoltaica, sean confiables y puedan ser conectadas directamente a la red eléctrica de manera confiable. Como solución se requiere de la implementación de un sistema de almacenamiento de energía que logre compensar la energía generada con la demandada [1].

1.1. Planteamiento del problema

La implementación de paneles solares fotovoltaicos y turbinas eólicas para conectarlos a la red eléctrica de una forma confiable, demanda la utilización de elementos almacenadores

de energía debido a los problemas de intermitencia que son inherentes a este tipo de sistemas. En el caso de los sistemas fotovoltaicos, no se puede controlar el nivel de radiación solar que hay determinadas horas del día y se deben analizar los casos en los que el sol no brilla, como en días lluviosos. Por tal razón, a la hora de implementar este tipo de fuentes no convencionales de energía se debe tener en cuenta estrategias que permitan que las fuentes renovables sean despachables [2].

Los sistemas fotovoltaicos requieren de una unidad de almacenamiento de energía, ya que en la mayoría de los casos la energía generada por un arreglo fotovoltaico no corresponde con la demanda requerida, por lo tanto se requieren unidades que balanceen la generación con la demanda, por ejemplo cuando la unidad fotovoltaico no pueda suplir toda la demanda, lo restante debe ser suministrado por la unidad de almacenamiento de energía; en el caso de que la energía demandada sea menor a la generada, los excedentes de energía se usan para cargar las unidades de almacenamiento de energía [2].

Con lo anterior se puede decir que uno de los inconvenientes con las fuentes renovables es la intermitencia en la generación y la manera de solucionarlo es instalando sistemas de almacenamiento de energía que puedan mitigar este problema para suministrar energía de manera confiable independientemente de las variaciones de la carga [2].

El dispositivo más usado para el almacenamiento de energía en paneles solares son las baterías debido a que pueden retener grandes cantidades de energía, pero este dispositivo presenta un inconveniente adicional si se analiza en términos económicos junto con el tiempo de vida útil, respecto a lo primero las baterías presentan un alto costo; tienen un tiempo de vida útil y un número de ciclos de carga y descarga limitado. Si no se operan de una manera óptima su tiempo de vida se reduce, por ejemplo cuando no se manejan ciclos de carga y descarga adecuados; cuando hay un cambio brusco en la carga o descarga de la batería [3].

Una solución para mejorar el tiempo de vida útil y el costo en las baterías en un sistema de almacenamiento de energía es agregando otras fuentes de almacenamiento de energía que ayude a las baterías. En este trabajo también se estudiarán los ultracapacitores, porque a diferencia de las baterías, presentan un costo relativamente bajo, por tal razón se pueden reemplazar fácilmente; tienen un mayor número de ciclos de carga y descarga y la ventaja que más se puede aprovechar es que pueden entregar grandes cantidades de energía en intervalos cortos de tiempo [3]

1.2. Justificación

Un sistema de potencia se hace más robusto y confiable en la medida que sea capaz de garantizar en todo momento la demanda de energía que se le presente, una forma de hacerlo es aumentando la generación de energía en el sistema, una alternativa es aumentando el uso de las energías renovables no convencionales, entre las más usadas están la energía solar fotovoltaica y la energía eólica. Una ventaja que tiene la energía fotovoltaica es que puede ser implementada a niveles residenciales, permitiendo que los usuarios no dependan siempre de la red y generen su propia energía.

Las fuentes de energía no convencionales no generan emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera, lo cual permite que no se dependa mucho de los combustibles fósiles y puedan servir de respaldo para las centrales generadoras convencionales.

Actualmente hay muchos tipos diferentes de tecnologías que permiten almacenar energía para que las fuentes de energía no convencionales sean más confiables, para lograr esto, deben ser implementadas cada vez más, se invierte en investigación en este campo para poder desarrollar dispositivos que sean más eficientes y accesibles.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Definir una metodología que permita dimensionar la unidad de almacenamiento de energía, así como la mejor configuración requerida para reducir el efecto de la intermitencia en un sistema fotovoltaico.

1.3.2. Objetivos específicos

- Establecer el estado del arte en la materia.
- Establecer un caso de estudio.
- Analizar la curva de generación a la salida de un panel solar.
- Estudiar los diferentes tipos de dispositivos disponibles en el mercado para el almacenamiento de energía.
- Calcular el sistema de almacenamiento de acuerdo a los requerimientos establecidos en el caso de estudio.

- Validar resultados mediante simulaciones.

1.4. Estado del arte

En [1] plantean que en la actualidad se debe buscar e investigar diferentes alternativas de generación eléctrica que ayuden a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, entre las cuales se menciona la energía solar fotovoltaica que además es un fuente de energía no convencional.

En [2] plantean los inconvenientes al integrar fuentes de energía no convencionales, como energía solar fotovoltaica y energía eólica, a la red eléctrica. El principal inconveniente es la intermitencia, puesto que su fuente de energía primaria no se puede controlar. La solución que plantean los autores es implementar un sistema de almacenamiento de energía (ESS), donde las baterías son el principal componente a utilizar en estos sistemas debido a que pueden retener grandes cantidades de energía.

En [3], [4] y [5] muestran que pueden haber ESS híbridos, los cuales pueden constar de dos o más dispositivos diferentes para aprovechar las diferentes propiedades que tiene cada uno. En estos artículo plantean aprovechar las propiedades que tienen los ultracapacitores para mejorar un ESS que está compuesto solo de baterías y lograr incrementar su tiempo de vida útil y así aumentar el periodo de reemplazo y reducir el impacto económico porque las baterías tienen un costo elevado.

En [6] se ve un estudio sobre las diferentes formas, tecnologías y dispositivos que se usan en la actualidad para el almacenamiento de energía (ES); las ventajas y desventajas que cada uno tiene y las aplicaciones de cada uno.

La referencia [7] y [8] los autores plantean dividir la operación de los ESS en términos de potencia y energía, los cuales dependen de las variaciones de potencia y las cantidades de energía a requerir. Para cada una de estas operaciones hay dispositivos que trabajan mejor en una de estas dos operaciones.

Los autores de [9] muestran un estudio que se hizo para implementar un parque eólico. En la parte del dimensionamiento del ESS usaron una metodología que consiste en descomponer la señal de desbalance de potencia en cuatro rangos de frecuencias por medio de la transformada discreta de Fourier (DFT) y ver como es el comportamiento que tienen estas componentes en el dominio del tiempo utilizando la transformada inversa de Fourier (IDFT).

1.5. Alcance

Este trabajo consiste en dimensionar un sistema de almacenamiento de energía para un sistema solar fotovoltaico. El sistema de almacenamiento está compuesto por baterías y ultracapacitores. Se emplean datos reales de niveles de radiación para el dimensionamiento del sistema de almacenamiento [10].

1.6. Estructura del trabajo de grado

En el desarrollo de este trabajo de grado se realizaron tres capítulos: En el capítulo 2 se muestra lo referente a los sistemas de almacenamiento de energía, qué son, las tecnología que se usan, cómo deben ser operados y la implementación de éstos en un sistema solar fotovoltaico; en el capítulo 3 se presentan los pasos que se utilizan para determinar y dimensionar el sistema de almacenamiento de energía y cómo descomponer la señal de desbalance de potencia según las componentes de frecuencia; en el capítulo 4 se muestran los casos de estudio, la solución que se le va a dar con las restricciones de cada uno.

Capítulo 2

ESS para redes eléctricas de distribución

2.1. Introducción

Un sistema de almacenamiento de energía o *energy storage system* (ESS) es un conjunto de elementos utilizados para retener energía de cualquier tipo (no necesariamente tiene que ser energía de tipo eléctrico) con el fin de tener una reserva de energía. En el caso de los sistemas de potencia, la energía que entregan a la carga es suministrada en parte o totalmente por esta reserva de energía, de esta manera se asegura la confiabilidad del sistema porque siempre se garantiza energía a todas las horas del día, valores aceptables de potencia [6]. En la figura 2.1 se muestra un esquema básico de un ESS, en ésta se aprecia que la energía entregada a la carga, se hace por medio del ESS y/o el panel solar.

2.2. Almacenamiento de energía en fuentes convencionales y no convencionales

Las fuentes convencionales de energía son la principal forma de obtención de energía que se usan actualmente, esto se debe principalmente a la capacidad que poseen de almacenar grandes cantidades de energía. Algunos ejemplos: en Colombia la fuente principal de energía es la hidráulica la cual mediante un embalse retiene una gran cantidad de masa de agua con el fin de almacenar energía potencial para lograr una caída de agua considerable que transforme la energía potencial a cinética para mover la turbina del generador eléctrico. Otra manera de generar electricidad en la actualidad es por medio de generadoras térmicas, en este caso el almacenamiento de energía se da gracias a las grandes reservas de petróleo o de combustibles fósiles que la tierra se encargó de retener bajo la superficie terrestre hace miles de millones de años para regular la temperatura del planeta. Esta fuente de generación de energía presenta

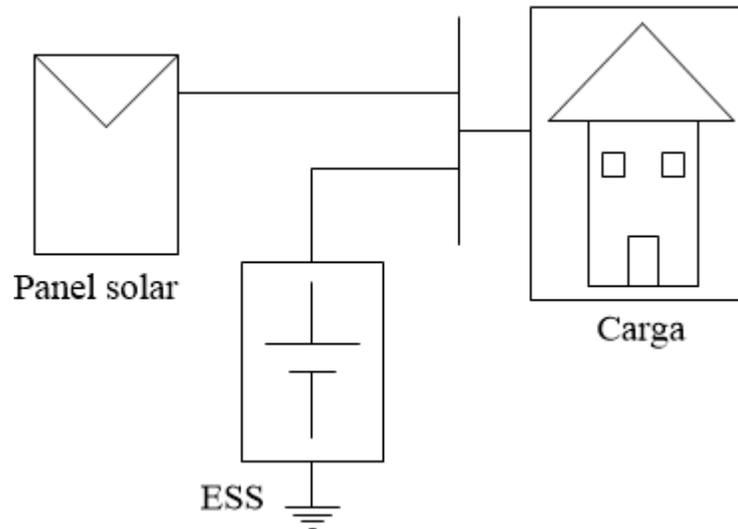


Figura 2.1: Esquema básico de un ESS.

inconvenientes en el largo plazo: primero porque estos materiales son recursos no renovables y actualmente hay una alta dependencia de estos, segundo porque el hombre extrae los combustibles, los utiliza en los procesos productivos (sea generación de energía) y por último los desecha a la atmósfera, lo cual presenta un daño ambiental porque los gases que se emiten a la atmósfera son de efecto invernadero, los que causan el calentamiento global [2], [6].

Las fuentes no convencionales de energía no tienen una fuerte acogida en el mercado energético por la baja confiabilidad debido a que este tipo de generación presenta intermitencia con su fuente de energía primaria, razón por la cual se debe de buscar nuevas alternativas que permitan que estas fuentes de generación sean confiables [3]. La diferencia principal que tiene las fuentes convencionales, descritas anteriormente y las fuentes no convencionales como la generación eólica, energía generada por el viento, y la energía solar fotovoltaica, es la capacidad de almacenar energía, por ejemplo, por tomar los casos anteriores, no existe una manera en la actualidad de almacenar el viento o la radiación solar. Una alternativa que se plantea para hacer que las fuentes no convencionales se vuelvan confiables y puedan despachar energía a la red teniendo en cuenta los criterios de la estabilidad del sistema, es diseñando un ESS que permita retener energía en un dispositivo, de manera análoga como lo hace un embalse o las reservas de combustibles, pero en este caso el almacenamiento de energía se da después de haber convertido la energía solar o eólica, dependiendo el caso, en energía eléctrica y este tipo de energía sí se puede almacenar en dispositivos como baterías y ultracapacitores [2].

2.3. Operación de los ESS

El diseño de un ESS puede ser clasificado según la operación, que depende de factores como: la cantidad de energía, la duración de la potencia a entregar y si se hace en un periodo de tiempo largo o corto. La operación de un ESS según las características descritas anteriormente se clasifica en términos de potencia y energía [7].

Los requerimientos en términos de potencia y energía de los ESS dependen en gran parte de la aplicación que se desee; de las características de la generación y la demanda, por ejemplo, en la energía solar fotovoltaica se presentan casos donde los niveles de potencia cambian rápidamente, en este caso el sistema de almacenamiento debe ser operado en términos de potencia. Para cada uno de las operaciones hay dispositivos que trabajan en una o ambas [7].

En la tabla 2.1 se muestran diferentes dispositivos y tecnologías usadas en el almacenamiento de energía.

Tabla 2.1: Tecnologías usadas en el almacenamiento de energía y sus aplicaciones

Tecnología	Aplicación
Baterías	Energía y potencia
Ultracapacitores	Potencia
Volantes de inercia	Energía
Aire Comprimido	Energía
Superconductores magnéticos	Potencia
Embalses	Energía y potencia

2.3.1. Operación de un ESS en términos de energía

La operación de un ESS en términos de energía se refiere a la absorción y entrega de grandes cantidades de energía en periodos prolongados de tiempo. En la red eléctrica esta operación ayuda a reducir picos en los generadores [7].

2.3.2. Operación de un ESS en términos de potencia

A lo que refiere a la operación de un ESS en términos de potencia, a diferencia de la operación en energía, la absorción y entrega de energía se hace por periodos cortos de tiempo, la aplicación de este tipo de operación permite regular la frecuencia del sistema y también

permite un mayor control en la variación de la generación de la red eléctrica [7].

En la operación de ESS en términos de potencia se requieren dispositivos que tengan un tiempo de respuesta rápido para su carga y descarga, actualmente se usan los embalses y centrales de aire comprimido para esta operación, pero todavía hay tecnologías en desarrollo que pueden hacer este trabajo y lo pueden hacer de una manera más rápida y eficiente. Una de las aplicaciones en potencia de un ESS es lo que tiene que ver con el control de frecuencia; para mantener los valores de voltajes en la parte de transmisión dentro de sus límites se requiere de inyección y absorción de grandes niveles de potencia reactiva; otro aplicación para ESS en términos de potencia son las oscilaciones del ángulo del par de las máquinas síncronas las cuales ocurren cuando hay grandes pérdidas en las líneas de transmisión o una alta penetración de energías renovables porque sus niveles de potencia son variables, para esto se podrían utilizar dispositivos almacenadores de energía que manejen niveles de potencia altos para que detecten y corrijan estas oscilaciones durante los primeros milisegundos para que otro generador pueda mitigar estas oscilaciones [8].

2.3.3. ESS en un conjunto de paneles solares fotovoltaicos

Un sistema de generación fotovoltaico es aquel que transforma la energía proveniente de la radiación solar a energía de tipo eléctrico, esta conversión se logra gracias a unos paneles fabricados de un material semiconductor donde circulan corrientes eléctricas cuando se encuentra bajo la interacción de la luz solar. Este tipo de tecnología tiene la ventaja que no genera emisiones de gases a la atmósfera, pero el inconvenientes es tener siempre un valor de potencia constante debido a las características fluctuantes que presenta la radiación solar porque depende mucho de factores externos que no se pueden controlar u otras veces no se puede predecir, como es el caso del clima, este tipo de factores hacen la generación fotovoltaica poco confiable, criterio necesario a la hora de despachar energía. Una alternativa para garantizar niveles de potencia admisibles en un sistema de potencia es que la energía no sea toda entregada en su totalidad por los paneles, sino por medio de un conjunto de elementos que conforman un ESS y los propios paneles [2].

Un ESS para generación fotovoltaica puede constar de un conjunto de baterías que compensen la generación obtenidas por los paneles, es decir que se carguen o descarguen cuando la generación solar sea menor o mayor respectivamente. Las baterías son la manera más viables para el almacenamiento de energía en una granja solar por la alta densidad de energía, pero si se mira en términos económicos, el valor de éstas en el mercado son relativamente altos y uno de los objetivos es que su tiempo de vida útil no se vea muy afectado, por ejemplo las baterías presentan gran desgaste cuando se someten a grandes esfuerzos en sus ciclos de carga y descarga, como en las ocasiones de cambio repentino en la generación, como sería el caso de una nube que tapa el sol. Si se desea un ESS que tenga como criterio de diseño maximizar el tiempo de vida útil del banco de baterías, sería diseñando un sistema de al-

macenamiento de energía que se denominaría híbrido, es decir que en este caso el sistema estaría compuesto por más de un elemento diferente a la batería, otro elemento a utilizar sería el ultracapacitor que serviría de apoyo para minimizar el desgaste en la batería porque responden bien a variaciones repentinas de la generación por la alta densidad de potencia que manejan; la cantidad de ciclos de carga y descarga son mucho mayores a la del banco de baterías y son más económicos [3], [4].

Un componente adicional a tener en cuenta en el ESS es la parte relacionada con toda la electrónica de potencia, como son los convertidores, parte encargada del flujo de energía entre los paneles, banco de baterías y ultracapacitores. Los tipos de convertidores y la cantidad a usar depende de criterios económicos y niveles de potencia a manejar [4].

2.4. Tecnologías usadas en el almacenamiento de energía

2.4.1. Embalses

Por este medio se puede almacenar energía potencial, el cual consiste en represar un río para crear un lago artificial. El objetivo que se tiene con un embalse es lograr una caída de agua significativa para transformar la energía potencial almacenada en el embalse, a energía cinética que mueva el rotor de un generador eléctrico [6].

2.4.2. Volantes de inercia

Es un dispositivo, como su nombre indica, que permite adicionar una inercia adicional al sistema porque puede almacenar energía cinética en un disco rotorio. El proceso de carga de una volante de inercia se puede hacer mediante un motor acoplado al mismo y la descarga se hace cuando el volante disminuye su velocidad, funcionando como generador, entregando energía eléctrica al sistema [6].

Los volantes de inercia tienen ciertas ventajas puesto que tienen un tiempo de vida útil relativamente alto, de unos veinte años aproximadamente; no presentan emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera; tienen un tiempo de respuesta alto; no tienen componentes tóxicos para el medio ambiente. Entre las desventajas que presenta una volante de inercia están: los costos de adquisición son altos; almacenan bajas cantidades de energía y si no se utiliza la energía que poseen, la volante tiende a descargarse por si misma. En la figura 2.2 se muestra una volante de inercia con sus respectivas componentes [6].



Figura 2.2: Volante de inercia y sus componentes [6].

2.4.3. Ultracapacitores

Este dispositivo, a diferencia de los capacitores convencionales, puede llegar a tener valores de capacitancia del orden de los faradios y comparándolos con las baterías tienen una mayor cantidad de ciclos de carga y descarga y su tiempo de vida útil es mucho mayor; los ultracapacitores tienen una densidad de potencia alta, esto quiere decir que pueden retener grandes cantidades de energía por periodos cortos de tiempo [8], [5].

2.4.4. Aire comprimido

El almacenamiento de energía de aire comprimido o *compressed air energy storage* (CAES), es una manera de almacenar energía que consiste en comprimir aire y almacenarlo en una pipa, después se calienta el aire para seguir con un proceso de expansión y mover la turbina de un generador eléctrico. En el proceso de compresión se genera calor, si este calor se logra almacenar, puede ser utilizado en proceso de expansión para que todo el proceso sea mucho más eficiente [6]. En la figura 2.3 se muestra un proceso convencional de aire comprimido.

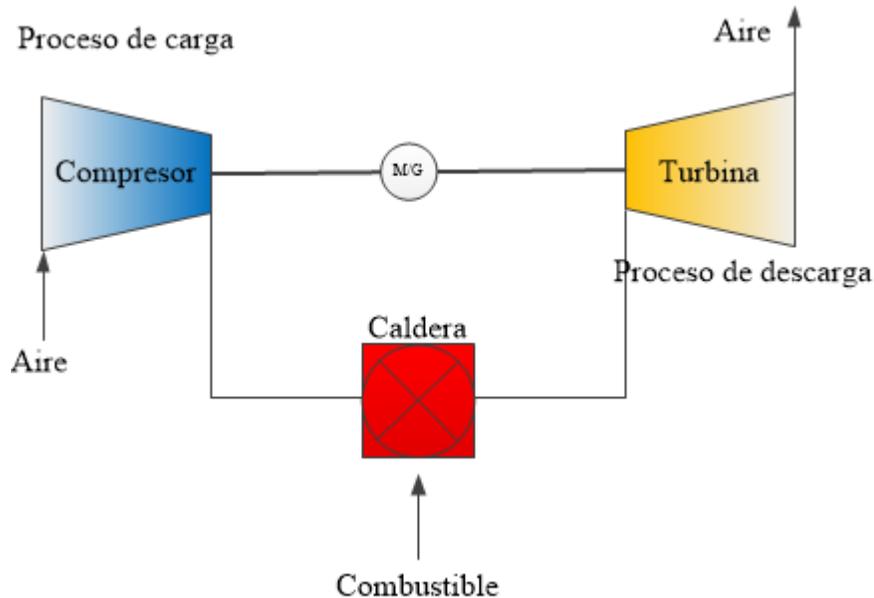


Figura 2.3: Proceso convencional de aire comprimido.

2.4.5. Superconductores magnéticos

Los sistemas de almacenamiento de superconductores magnéticos o *Superconducting magnetic storage system* (SMES) es una forma de ES el cual consiste en almacenar la energía en un campo magnético, esta tecnología cuenta con tres componentes principales, un alambre superconductor, un sistema de refrigeración y una etapa de acondicionamiento de potencia [6], [8].

La etapa de acondicionamiento de potencia es la encargada de transferir o entregar la energía del alambre superconductor al sistema de potencia; Para que el alambre tenga las propiedades de superconductor se debe enfriar a temperaturas muy bajas, además cuando se trabaja con temperaturas bajas las pérdidas en el alambre serían bajas, haciendo el sistema más eficiente, la etapa de refrigeración es la encargada de que el alambre alcance las temperaturas bajas, cerca de los -253°C [20K], dependiendo del material refrigerante que se use [8]. En la figura 2.4 se muestra un esquema de un SMES.

2.4.6. Baterías

En síntesis, una batería es un dispositivo que posee energía química y la convierte en energía eléctrica, también hace el proceso inverso, lo cual hace que pueda almacenar energía eléctrica [6].

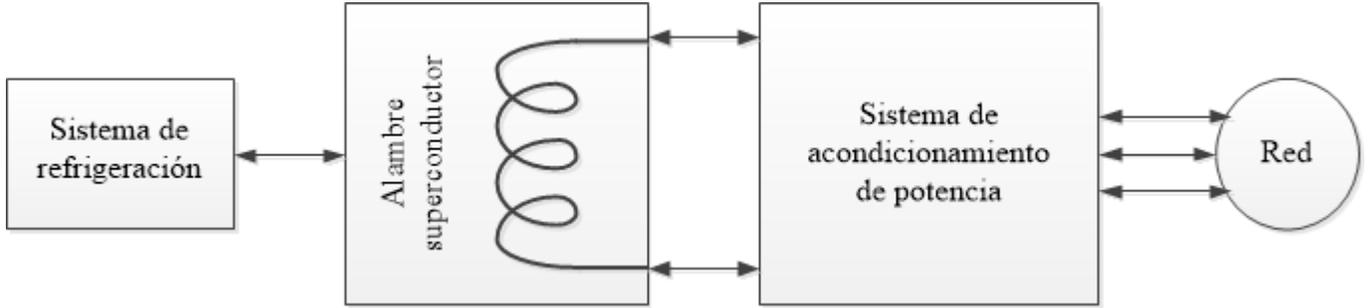


Figura 2.4: Esquema de un SMES.

Una batería consta de dos terminales, uno positivo, conocido como ánodo, y uno negativo, conocido como cátodo, además, dentro del dispositivo hay un material que se le conoce con el nombre de electrolito, que es el que permite que los iones se muevan del cátodo al ánodo o viceversa. Según los materiales que se empleen en la construcción de una batería, pueden variar los costos de éstas, la eficiencia y/o su vida útil [6].

Una batería es un dispositivo, que a partir de un proceso electroquímico llamado oxidación-reducción, en donde un componente (ánodo o cátodo) cede electrones y otro gana electrones o viceversa, esto depende si la batería está en estado de carga o descarga. En la figura 2.5a se muestra como se mueven los electrones del cátodo hacia el ánodo durante la carga; En la figura 2.5b se muestra como se mueven los electrones de ánodo hacia el cátodo durante la descarga del dispositivo [6].

En las ecuaciones 2.1a y 2.1b se muestra la carga y descarga respectivamente en un banco de batería para un intervalo de tiempo [11].

$$C(t+1) = C(t) + \Delta t * \frac{P_t^{e,c}}{\eta_c} \quad (2.1a)$$

$$C(t+1) = C(t) - \Delta t * \frac{P_t^{e,d}}{\eta_d} \quad (2.1b)$$

De las ecuaciones anteriores se tiene:

$$\Delta t * P_t^{e,c} = \Delta E_{e,c} \quad (2.2a)$$

$$\Delta t * P_t^{e,d} = \Delta E_{e,d} \quad (2.2b)$$

Donde:

- $C(t+1)$ es la energía en el banco de batería en hasta el periodo de tiempo que se desea calcular.

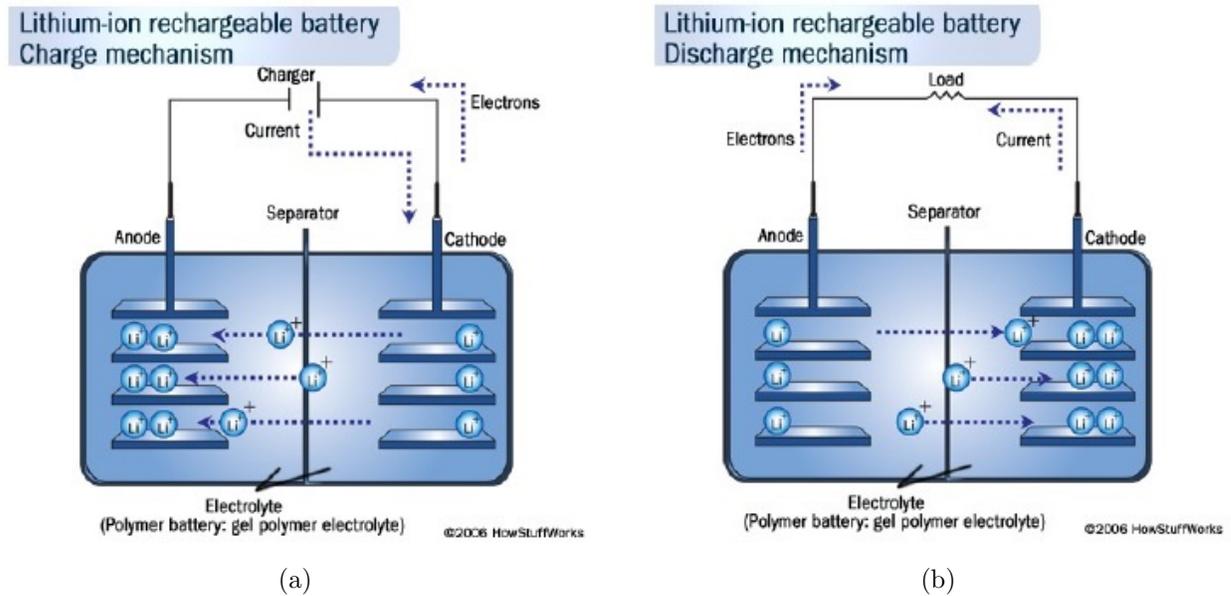


Figura 2.5: Carga (2.5a) y descarga (2.5b) de una batería [6].

- $C(t)$ es la energía en el banco de batería en hasta un periodo de tiempo anterior al que se desea calcular.
- $P_t^{e,c}$ es la potencia durante el proceso de carga.
- $P_t^{e,d}$ es la potencia durante el proceso de descarga.
- Δt es la variación de tiempo desde un periodo anterior al que se desea calcular la energía y el periodo al que se le va a calcular.
- $\Delta E_{e,c}$ es la variación de energía en el proceso de carga.
- $\Delta E_{e,d}$ es la variación de energía en el proceso de descarga.

2.5. Tipos de baterías

2.5.1. Ion de litio

Este tipo de batería, el ánodo está compuesto de litio, el cátodo de grafito y el material electrolítico es una sal de litio. Se caracterizan por poseer una alta densidad de energía, es decir que pueden almacenar más energía que las baterías convencionales; puede tener en terminales voltajes altos; tiene bajas pérdidas. La contraparte de estas baterías, principalmente es el costo; la vida útil se puede ver muy afectada por los ciclos de carga y descarga, también

si no se usan se les reduce su vida útil; hay que tener cuidado porque el litio es un material inflamable a la humedad del medio ambiente, por eso, a la hora de diseñarlos, también hay que tener en cuenta criterios de seguridad para no generar daños materiales y humanos [6].

2.5.2. Batería ácido de plomo

Se componen de dos electrodos de plomo, cuando se tiene completamente descargada la batería, se tiene tando en ánodo como en cátodo sulfato de plomo. Para realizar el proceso de carga, el sulfato de plomo se transforma en metal de plomo en el cátodo, al mismo tiempo en el ánodo se produce la formación de óxido de plomo. [12].

Las baterías de ácido de plomo se utiliza mayormente para suministrar energía a los automóviles y sistemas informáticos, también es empleado en reserva de energía para motores y generadores eléctricos. Es accesible y fácil de fabricar, además de tener una alta tasa de descarga [12].

2.5.3. Batería de hierro-niquel

Baterías utilizadas antiguamente, conformadas de tubos compuestos de acero niquelado, éstas poseían hidróxido de níquel, el polo positivo contenía acero niquelado con material de óxido ferroso. Poseían un bajo costo y podían sobrecargarse o descargarse sin perder sus capacidades de potencia [13].

Es una batería con grandes prestaciones de potencia para su uso en aplicaciones de mucho tiempo, aproximadamente 20 años, debido a su bajo consumo de energía y el alto costo de fabricación ha sido reemplazado desde finales del siglo anterior [13].

Su uso fue extendido en las operaciones de minería o en cualquier otro tipo de trabajo donde se requería resistencia a vibraciones y altas temperaturas, en los últimos años ha recobrado importancia por su implementación en los sistemas de generación de energía eólica y solar [13].

Capítulo 3

Dimensionamiento de sistemas de almacenamiento

3.1. Introducción

En este capítulo se estudia la manera de determinar un sistema de almacenamiento de energía, analizando el espectro y las componentes en frecuencia de una señal que corresponde a los requerimientos en potencia del sistema de almacenamiento para compensar la generación fotovoltaica de energía con una demanda constante.

La parte que corresponde al análisis en el dominio de la frecuencia se hace utilizando la transformada discreta de Fourier o *Discrete Fourier Transform* (DFT). Con la obtención de DFT se analiza esta en rangos de frecuencias para dividir la señal en componentes y ver el comportamiento que se obtiene retornando la señal a estudiar al dominio del tiempo con la transformada inversa de Fourier, IDFT.

3.2. Desbalance de potencia

En las ecuaciones 3.1 y 3.2 se muestra la señal $P(t)$ y t equivalentes a un vector de datos obtenidos en un intervalo de tiempo definido, donde $P(t)$ corresponde a potencia y t a tiempo. En la figura 3.1 se muestra en color azul la señal que se requiere compensar en el sistema de almacenamiento; en color rojo se muestra el valor de referencia correspondiente a la demanda, como se dijo anteriormente, se supone constante.

$$P(t) = [P_1, P_2, \dots, P_n] \tag{3.1}$$

$$t = [t_1, t_2, \dots, t_n] \tag{3.2}$$

Donde:

- $P(t)$ es el vector de los valores de potencia
- t es el vector de los valores de tiempo.
- n es el número total de datos.

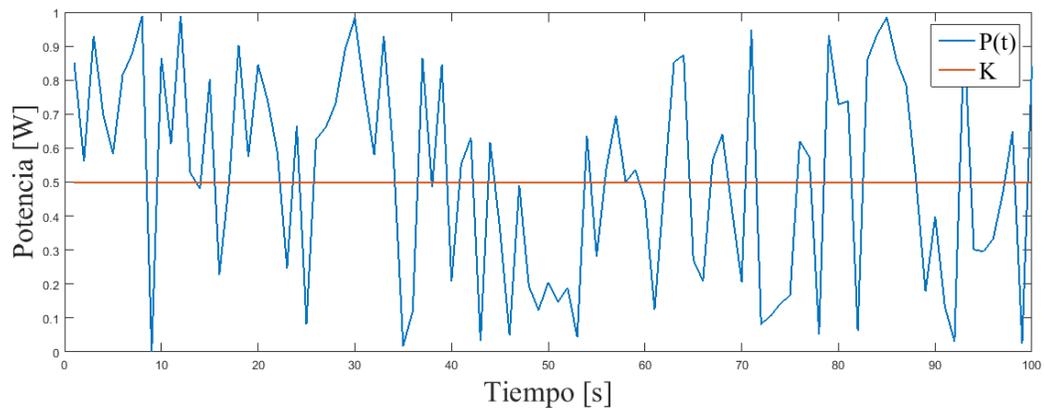


Figura 3.1: Gráfica de potencia y potencia de referencia.

En la figura 3.1 se observa que la potencia en algunos casos llega a alcanzar el valor de referencia, pero se requiere que se mantenga en ese valor, por tal razón cuando la potencia esté por debajo del valor de referencia, el sistema de almacenamiento de energía debe descargarse para compensar la demanda; cuando la potencia esté por encima del valor de referencia, el sistema de almacenamiento se debe cargar para almacenar la energía sobrante. Teniendo en cuenta lo anterior se obtiene la gráfica del desbalance de potencia la cual corresponde a:

$$D(t) = P(t) - K \quad (3.3)$$

Donde:

- $D(t)$ corresponde al vector de desbalance.
- K corresponde a la potencia de referencia para la carga.

3.3. Análisis de la señal en el dominio de la frecuencia con la transformada discreta de Fourier

Con la obtención del desbalance de potencia se hace el cálculo de la transformada discreta de Fourier (DFT), la cual se muestra en la ecuación 3.4:

$$DFT = X(j) = \sum_{k=1}^{N-1} x(k)e^{-i\frac{2\pi}{N}jk}; 0 \leq k \leq N \quad (3.4)$$

Donde:

- j y k son número naturales.
- $X(j)$ es el vector de la DFT en el dominio de la frecuencia, el cual corresponde a un vector con componentes complejas.
- $x(j)$ es el vector al cual se le va a calcular la DFT, el cual está en el dominio del tiempo, para este caso sería la función de desbalance.
- N es la cantidad de valores que va a tener la DFT.

Obtenida la transformada de la función del desbalance de potencia, se cambia el dominio del tiempo por el de la frecuencia y el rango de ésta depende de la frecuencia de muestreo (ecuación 3.5), según el teorema de Nyquist, el valor máximo de frecuencia que se puede calcular es la mitad de la frecuencia de muestreo. En la figura 3.2 se muestra una gráfica de la magnitud de la potencia en el dominio de la frecuencia de la función desbalance de la figura 3.1.

$$f_s = \frac{\text{Número de muestras}}{\text{Intervalo de tiempo}} \quad (3.5)$$

3.4. Descomposición de la señal por rangos de frecuencia

Con el espectro de la señal de desbalance en el dominio de la frecuencia se procede a descomponer esta señal por medio de un filtro pasabanda, como se muestra en la figura 3.3, esto significa que solo se toma la señal en ciertos rangos de frecuencias y los valores que estén por fuera de este rango, se hacen cero.

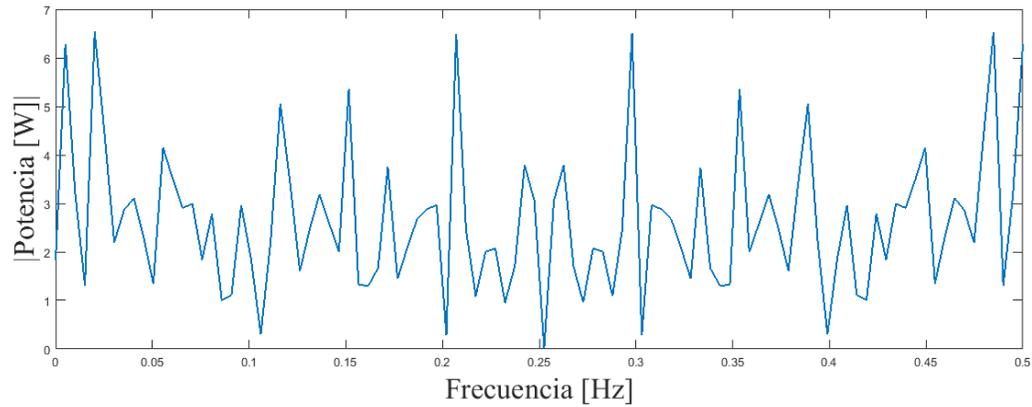


Figura 3.2: Gráfica de transformada de Fourier del desbalance de potencia.

La descomposición de la señal de desbalance por rangos de frecuencia se hace con el fin de ver como se comporta la señal en el dominio del tiempo en diferentes rangos de frecuencia, dicho esto, cuando se descompone la señal por frecuencias y se retorna al dominio del tiempo, pero por componentes de frecuencia, se hace utilizando la transformada inversa de Fourier (ecuación 3.6), donde $X(j)$ es la señal en dominio de la frecuencia haciéndola pasar por el filtro pasabanda.

$$IDFT = x(k) = \sum_{j=1}^{N-1} X(j)e^{i\frac{2\pi}{N}jk}; 0 \leq j \leq N \quad (3.6)$$

En la figura 3.4a se muestra la componente de la señal en el dominio de tiempo a bajas frecuencias; la figura 3.4b las componentes de frecuencias medias y la figura 3.4c muestra la señal pero con las componentes de alta frecuencia.

3.5. Cálculo de la energía a partir de la potencia

Con la descomposición de la señal de desbalance por rangos de frecuencia y en el dominio del tiempo se calcula la energía, la cual se define como la integral de la potencia (Ecuación 3.7a). En la ecuación 3.7b se muestra la variación de potencia en un intervalo de tiempo.

$$\Delta E_i = \int_{t_{i-1}}^{t_i} P(t)dt \quad (3.7a)$$

$$E(t) = \int_{t_0}^t P(t)dt + E_0 \quad (3.7b)$$

Donde:

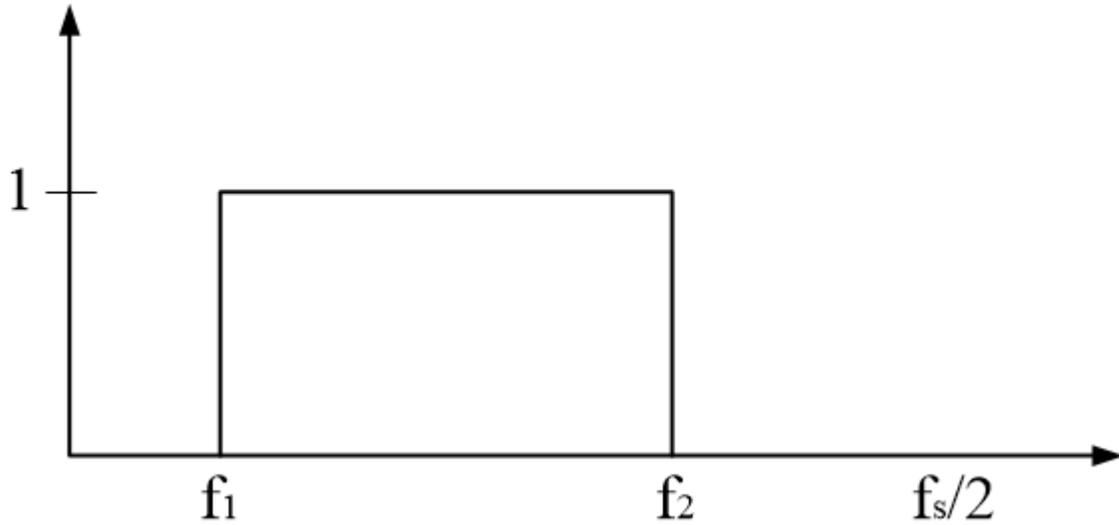


Figura 3.3: Filtro pasabanda para la descomposición de la señal.

- ΔE_i es la variación de energía en un intervalo de tiempo i .
- $P(t)$ es la potencia de la señal en el dominio del tiempo.
- $E(t)$ es la energía de la señal en el dominio del tiempo.
- E_0 es la energía inicial.

El valor de E_0 , correspondiente al valor inicial de la energía, se calcula dependiendo del o los dispositivos encargados de hacer el almacenamiento de energía, como es el caso de la profundidad de la descarga.

La profundidad de la descarga o *Deep of discharge* (DOD) es el valor que indica en porcentaje el valor de energía mínima al que puede llegar el ESS y el valor máximo de energía que puede alcanzar el ESS [14].

En las figuras 3.5 se muestra el perfil de energía en joules que requiere el sistema de almacenamiento de energía de la figura 3.1, según las diferentes componentes de frecuencia.

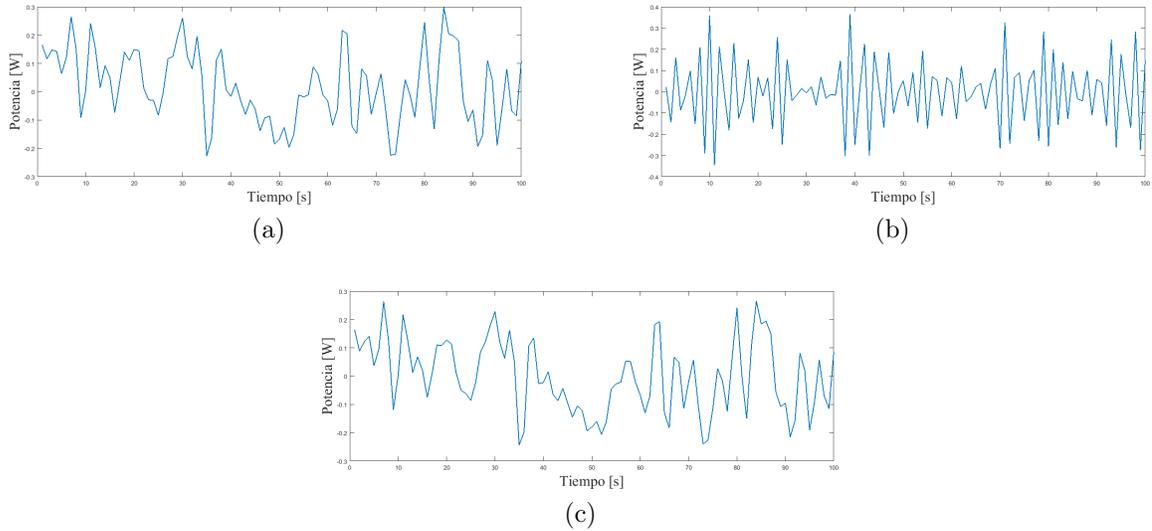


Figura 3.4: Componente de la señal de desbalance a bajas ($f < 0,17Hz$: 3.4a), medias ($0,17Hz \leq f < 0,34Hz$: 3.4b) y altas frecuencias ($f \geq 0,17Hz$: 3.4c).

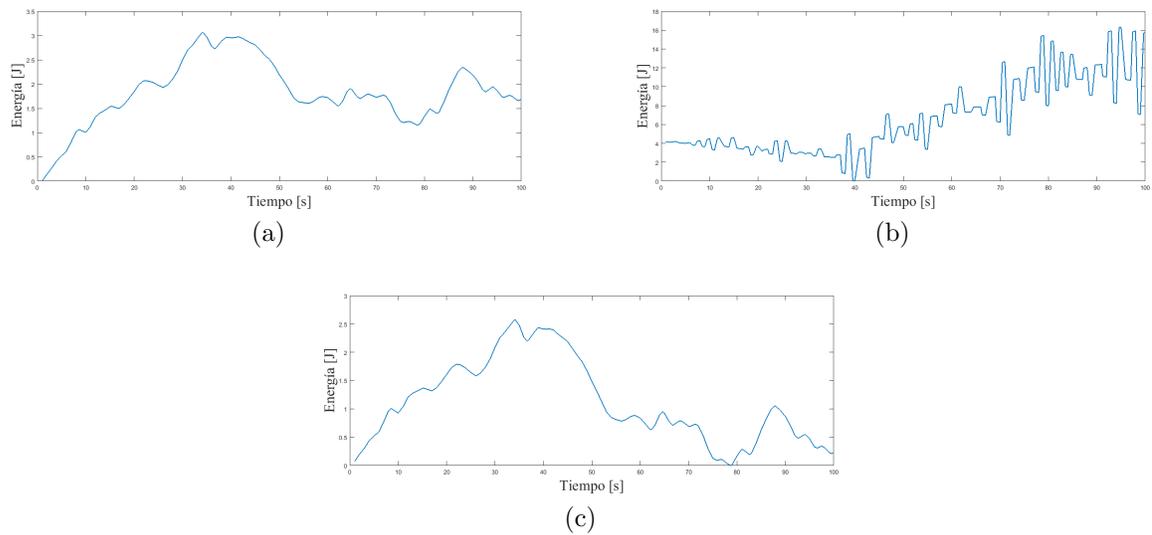


Figura 3.5: Energía de la señal de desbalance a bajas ($f < 0,17Hz$: 3.5a), medias ($0,17Hz \leq f < 0,34Hz$: 3.5b) y altas frecuencias ($f \geq 0,17Hz$: 3.5c).

Capítulo 4

Análisis del caso de estudio

4.1. Introducción

El objetivo de este trabajo es calcular el tamaño del sistema de almacenamiento de energía que se requiere para conectar un panel solar a la red y entregar energía de manera confiable, para esto se cuenta con los datos de potencia presentados en un periodo de 12 horas en la salida de un panel solar, desde las 6 y 18 horas. Dichos datos fueron tomados por el grupo de investigación de electrónica de potencia de la Universidad Tecnológica de Pereira [10], utilizando un panel solar modelo KC40T, con una capacidad de 43W [15], pero en el análisis de este trabajo de grado se supone que se tiene un conjunto de 100 paneles, donde cada uno presenta los mismos niveles de potencia. En la figura 4.1 se muestra una gráfica, donde el eje vertical corresponde a la potencia del panel descrito anteriormente; el eje horizontal es el tiempo.

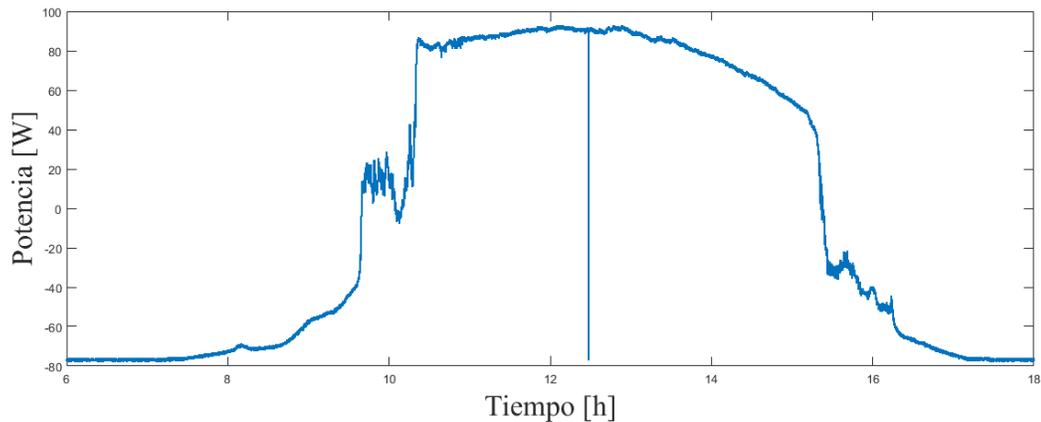


Figura 4.1: Potencia contra tiempo a la salida del panel solar como caso de estudio.

El ESS que se estudia en este trabajo va a ser uno que consta de baterías y ultracapacitores. En el análisis y resultados se muestra como reaccionan las baterías cuando se añade al ESS ultracapacitores, todo esto teniendo en cuenta las restricciones que tenga cada uno de estos dispositivos.

4.2. Caso 1

4.2.1. Obtención de valor de referencia y función de desbalance

En el capítulo 3 se muestra la metodología que se va a seguir para calcular el ESS, para eso es necesario tener la señal de desbalance de potencia, la cual muestra lo requerimientos en potencia del ESS y para tener la señal de desbalance es necesario un valor de referencia que en este caso va a ser un valor constante que corresponde al valor promedio de la potencia mostrada en la figura 4.1. El valor promedio una señal continua se calcula usando la ecuación 4.1.

$$P_{prom} = \frac{1}{t_f - t_0} \int_{t_0}^{t_f} P(t) dt \quad (4.1)$$

Donde:

- P_{prom} es la potencia promedio de la señal.
- $P(t)$ es la potencia de la señal.
- t_f es el valor del tiempo final, es decir hasta que punto se va a calcular el promedio de la potencia.
- t_0 es el valor del tiempo inicial desde cuando se empieza a medir el valor promedio e la señal de potencia.

$P(t)$ es la señal de potencia a la cual se le va calcular el valor promedio, t_0 y t_f son el tiempo inicial y el tiempo final respectivamente. Teniendo en cuenta que la señal que se tiene es una serie de puntos, esto quiere decir que es una señal de tipo discreto, el promedio de la señal se calcula con las áreas que hay entre dos puntos consecutivos, suponiendo que entre puntos consecutivos hay una línea recta, tal como se muestra en la figura 4.2.

Partiendo de la suposición que se dijo anteriormente, que dos puntos consecutivos los une una línea, en la figura 4.2 se puede observar que el área que hay entre dos puntos corresponde a trapecios, partiendo de esto, se tiene que la integral de la señal de potencia para el cálculo del valor promedio, el cual va a ser el valor de referencia que corresponde a la demanda. En

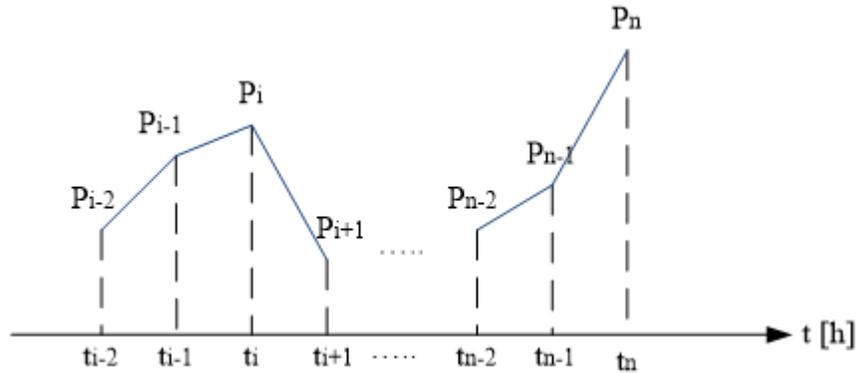


Figura 4.2: Distribución de los puntos de potencia y tiempo.

la ecuación 4.2 se muestra el cálculo de la potencia promedio.

$$P_{prom} = \frac{1}{t_n - t_1} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{(P_i + P_{i+1})(t_{i+1} - t_i)}{2} \quad (4.2)$$

- P_{prom} es la potencia promedio de la señal.
- n corresponde al número de datos que para este trabajo son 863515.
- P_i es el valor de potencia del i -ésimo elemento de la sumatoria.
- t_i es el valor de tiempo del i -ésimo elemento de la sumatoria.

Teniendo en cuenta lo anterior para este caso de estudio, la potencia promedio es:

$$P_{prom} = 77,8845 W.$$

La función de desbalance en este caso es:

$$D(t) = P(t) - 77,8845 W$$

Donde:

$P(t)$ es la función de potencia que se muestra en la figura 4.1.

4.2.2. Obtención de la transformada discreta de Fourier de la función de desbalance de potencia

Siguiendo la metodología indicada en el capítulo anterior, después de tener la señal de desbalance de potencia, se procede a calcular la transformada discreta de Fourier, mostrada en la ecuación 3.5 y como se dijo en el capítulo 3 el rango de frecuencias en el cálculo de la DFT va hasta la mitad de la frecuencia de muestreo, donde:

$$f_s = 9,9945Hz$$

En la figura 4.3 se muestra la gráfica de la transformada de Fourier de la señal de desbalance, donde el eje y corresponde a la magnitud de la potencia de la señal de desbalance y en el eje x es la frecuencia.

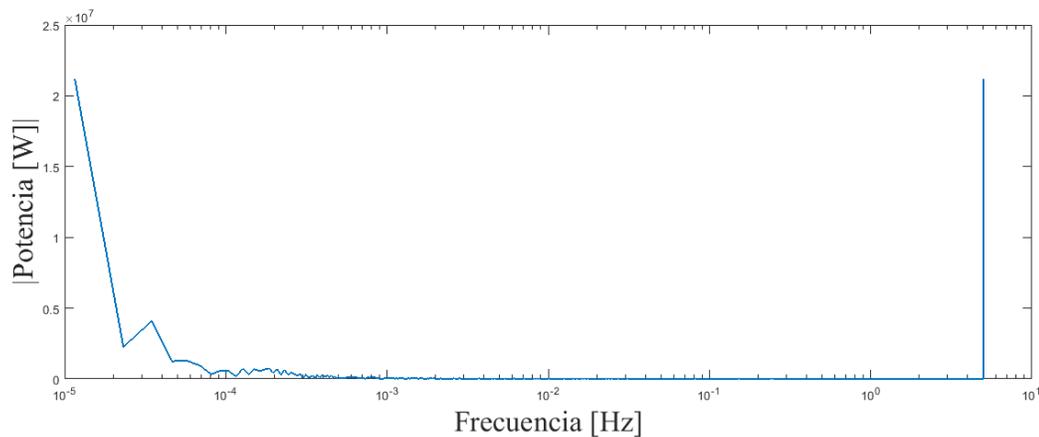


Figura 4.3: Gráfica de la transformada discreta de Fourier de la función de desbalance.

4.2.3. Descomposición de la señal por rangos de frecuencias

Con la señal de desbalance en el dominio de Fourier, se mira el comportamiento de esta señal, pero en el dominio del tiempo por rangos de frecuencias. En cada rango de frecuencia que se va estudiar, se tiene una componente de la señal de desbalance. En este caso la señal se descompone en cuatro componentes, las cuales se denominan: *intra-week*, *intra-day*, *intra-hour* y *real time*. En la tabla 4.1 se muestra los intervalos de frecuencia de la descomposición de la señal de desbalance [9].

En la figura 4.4 se muestra las componentes de la señal de desbalance con los rangos de frecuencia mostrado en la tabla 4.1. la figura 4.4a corresponde a la componente *intra-week*;

Tabla 4.1: Rangos de frecuencias con sus respectivos de periodos de las componentes de la señal de desbalance en el dominio del tiempo [9].

Componente	f_1 [Hz]	f_2 [Hz]	Periodo de f_1	Periodo de f_2
<i>Intra-week</i>	0	$1,15710^{-5}$	Infinito	24 horas
<i>Intra-day</i>	$1,157 \cdot 10^{-5}$	$1,388 \cdot 10^{-4}$	24 horas	2 horas
<i>Intra-hour</i>	$1,388 \cdot 10^{-4}$	0,082	2 horas	2 minutos
<i>Real time</i>	0,082	4,997	2 minutos	0,2 segundos

la figura 4.4b corresponde a la componente *intra-day*; la figura 4.4c corresponde a la componente *intra-hour* y la figura 4.4d corresponde a la componente *real time*.

4.2.4. Cálculo del ESS utilizando ultracapacitores y baterías

Con las componentes de la función de desbalance, se puede observar que presentan una variación mayor en los niveles de potencia, las componentes que corresponden al *intra-day* e *intra-hour*, estas componentes tienen un mayor requerimiento del ESS en términos de potencia, es decir que se requiere de un dispositivo que maneje altas densidades de potencia y para este caso el dispositivo que se va a usar en la simulación, son los ultracapacitores, los cuales van a servir de apoyo a las baterías para que reduzcan el esfuerzo de éstas y aumentar su tiempo de vida útil.

4.2.5. Limitaciones del ESS en términos de potencia

En este caso de estudio, se va a asumir que los dispositivos para el ES son ideales, por tal razón la eficiencia de la red, de las baterías y ultracapacitores son del 100 %; no hay pérdidas debido al almacenamiento, ni en la red y se asume que los dispositivos tienen una profundidad de la descarga del 100 %. En la ecuación 4.3 se muestra la potencia total necesaria en el ESS.

$$P_{total} = P_{bat} + P_{uc} \quad (4.3)$$

Donde:

- P_{total} es la potencia total, la cual corresponde a la potencia de las componentes obtenidas del desbalance.
- P_{bat} es la potencia en las baterías.

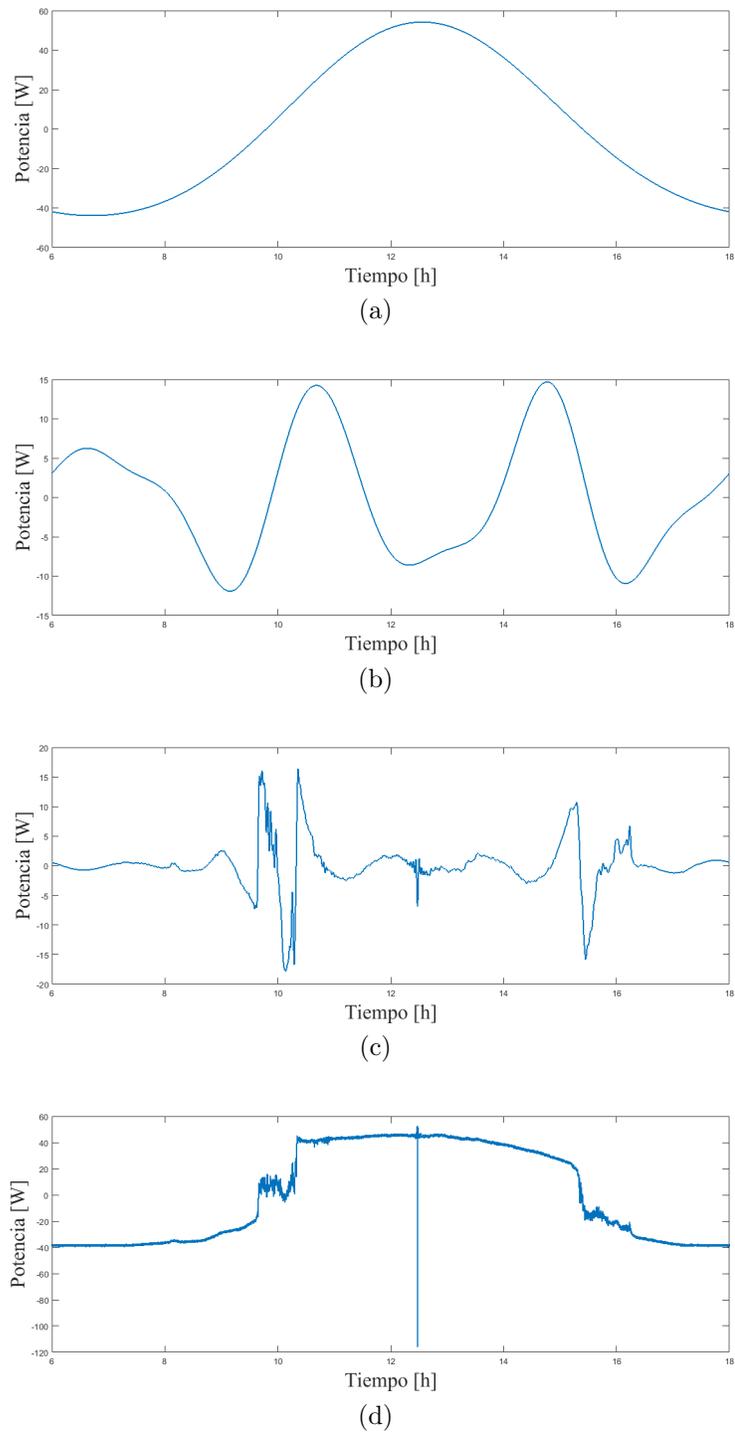


Figura 4.4: Componentes de la señal de desbalance: *Intra-week* (4.4a); *intra-day* (4.4b); *intra-hour* (4.4c); *Real time* (4.4d).

- P_{uc} es la potencia requerida en los ultracapacitores.

De igual se aplica para la energía.

$$E_{total} = E_{bat} + E_{uc} \quad (4.4)$$

Donde:

- E_{total} es la energía total, la cual corresponde a la potencia de las componentes obtenidas del desbalance.
- E_{bat} es la energía en las baterías.
- E_{uc} es la energía requerida en los ultracapacitores.

Los ultracapacitores entran a operar cuando la potencia en la función de desbalance sea mayor al límite que se establece de variación de potencia, Después se establece el rango de tiempo en el cual van a funcionar los ultracapacitores.

En el ESS, las baterías estarán operando todo el tiempo, mientras que los ultracapacitores operan en un rango de tiempo, solo para el caso de las componentes *intra-day* e *intra-hour*. En el caso de la componente *intra-day* los ultracapacitores operan desde las 8 horas, hasta las 17,72 horas; en la componente *intra-hour* los ultracapacitores operan desde las 8,05 horas, hasta las 16,33 horas. En el caso de las baterías que operan en estos rangos se establece un valor de variación máxima de potencia con respecto al tiempo.

La variación máxima se asume mirando todos los valores de variación de potencia con respecto al tiempo que hay en todos los puntos de las componentes del desbalance de potencia que tiene cada una de las gráficas y se observa que los valores de variación que más se repiten en las gráficas del *intra-day* e *intra-hour*, se tomó como referencia los valores de variaciones entre puntos consecutivos los de las componente *intra-day*, esto se puede ver en la gráfica 4.5. Los valores que se encuentran entre -8,3738 W/h y 8,3738 W/h.

La limitación que tiene la operación de los ultracapacitores es que trabajan con altas densidades de potencia, por esta razón la energía que tienen debe ser entregada, no deben quedar con excedentes de potencia, es decir que la energía que almacenan deben ser igual a la entregada, sin tener en cuenta las pérdidas. Con la variación máxima para las baterías entre -8,3738 W/h y 8,3738 W/h, los ultracapacitores quedan con un excedente de energía, por esta razón se trabaja con un valor máximo de variación de potencia en los intervalos de tiempo donde las baterías se cargan, es decir, cuando la potencia en la función desbalance es positiva. Estos valores están entre -11,9509 W/h y 11,9509 W/h en la componente del

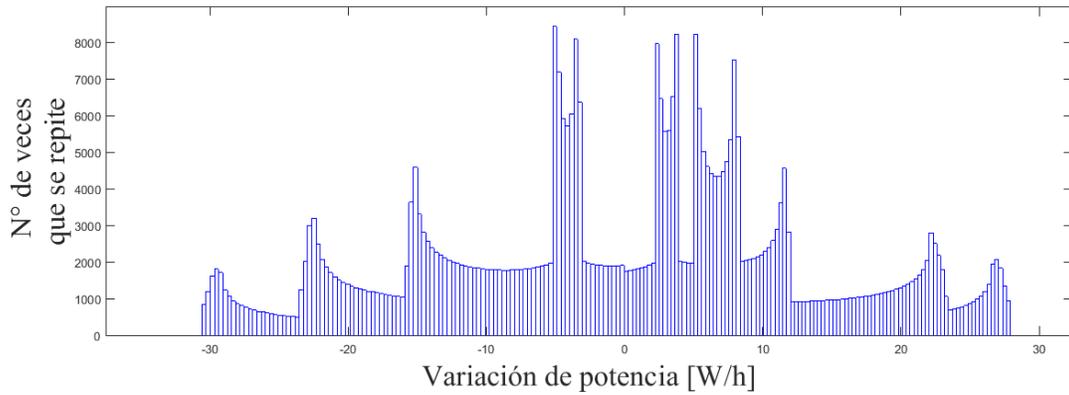


Figura 4.5: Repetición de los valores de variación de potencia.

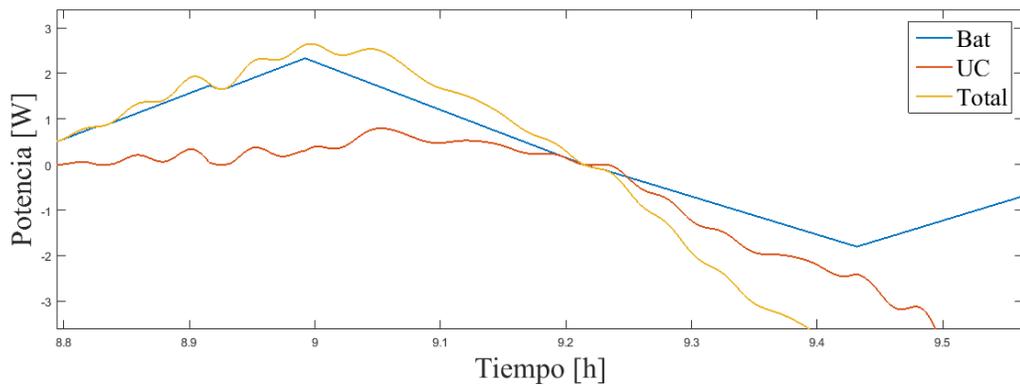
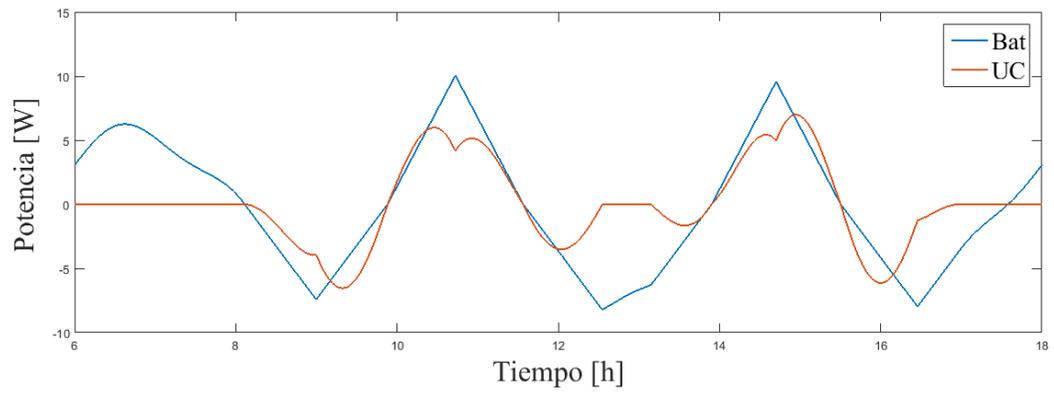


Figura 4.6: Límite de la operación de las baterías y los ultracapacitores.

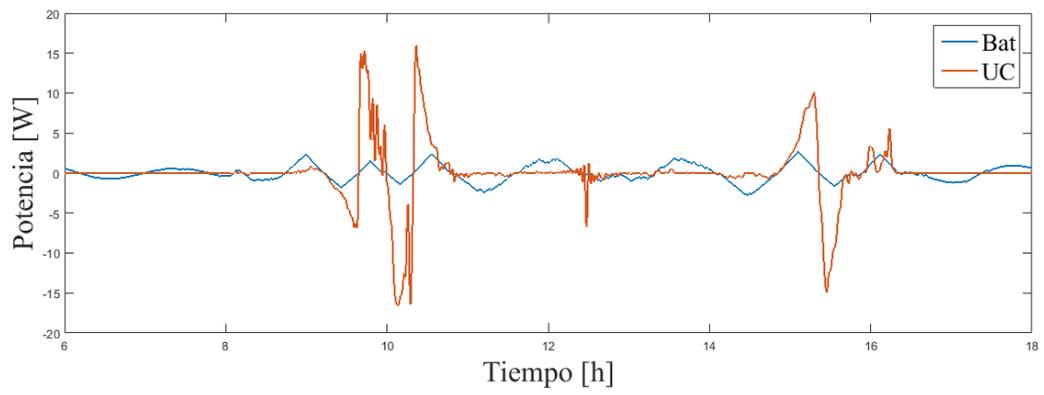
intra-day y $-10,5111$ W/h y $10,5111$ W/h para la componente *intra-hour*.

En la figura 4.6 se muestra en color azul la potencia de las baterías con las restricciones que se dijeron anteriormente; en color amarillo se muestra la potencia total, la cual corresponde a la potencia de la señal de la componente desbalance; con la ecuación 4.3 se calcula la potencia en los ultracapacitores (color rojo).

En la figura 4.7 se muestran la potencia del banco de baterías (Bat) y el banco de ultracapacitores (UC) de las componentes de la función de desbalance *intra-day* e *intra-hour*.



(a)



(b)

Figura 4.7: Potencia de los bancos de baterías y ultracapacitores de la componente *intra-day* (4.7a) y la componente *intra-hour* (4.7b)

4.2.6. Cálculo de energía del ESS

En el cálculo de la energía, como se definió en el capítulo 3, es el área bajo la curva de las curvas de potencia, que para este caso corresponden a las componentes de la función de desbalance. Como se dijo anteriormente, las componentes *intra-week* y *real time* utilizan en el ESS baterías, en cambio las componentes *intra-day* e *intra-hour* utilizan baterías e ultracapacitores.

El cálculo de la energía se hace utilizando las ecuaciones 4.5 porque los datos tienen una característica discreta.

$$\Delta E_i = \frac{(P_i + P_{i-1})(t_i - t_{i-1})}{2} \quad (4.5a)$$

$$E(t) = E_0 + \sum_{i=1}^{n-1} \Delta E_i \quad (4.5b)$$

Teniendo en cuentas las ecuaciones anteriores, la energía según las componentes de frecuencia se muestran en la figura 4.8. Las figuras 4.8b y 4.8c muestran dos gráficas, la de color azul y rojo corresponden a la energía de las baterías y ultracapacitores respectivamente. Las gráficas 4.8a y 4.8d solo trabajan con baterías.

4.3. Caso 2

Igual que en el primer caso de estudio, las componentes que presentan una mayor variación en los niveles de potencia son las componentes del *intra-day* e *intra-hour*, por esta razón el ESS para estas componentes va a estar compuesto por baterías y ultracapacitores. En este caso los componentes también son ideales, no hay pérdidas en ESS y la profundidad de la descarga es del 100 %; la potencia que se requiere en la demanda va a ser igual al promedio de la potencia generada por los paneles, por esta razón las componentes de energía y potencia del *intra-week* y *real time* son iguales a las mostradas en el caso anterior.

En este segundo caso de estudio se cambia las limitaciones para el banco de baterías, se asume una variación máxima para la carga de 10,8462 W/h y 9,1408 W/h en las componentes de *intra-day* e *intra-hour* respectivamente; en la descarga se toma un valor de variación mínima de -8,3738 W/h para las dos componentes. En la figura 4.9 se muestran muestra la potencia y energía de estas componentes para el banco de baterías (línea azul) y banco de ultracapacitores (línea roja). Donde las figuras 4.9a y 4.9b corresponden a la potencia de las componentes *intra-day* y *intra-hour* respectivamente; las figuras 4.9c y 4.9d corresponden a

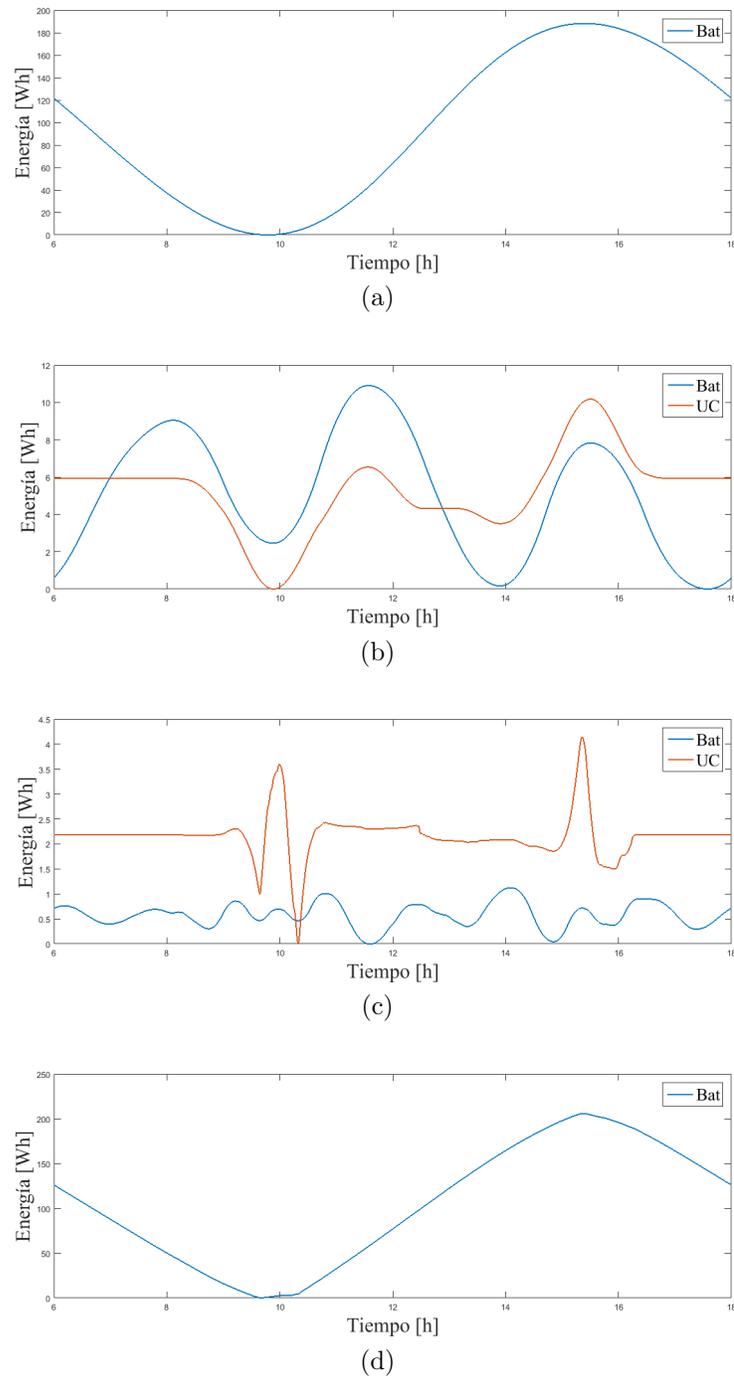


Figura 4.8: Energía de las componentes de frecuencia de la función de desbalance: *intra-week* (4.8a); *intra-day* (4.8b); *intra-hour* (4.8c); *real-time* (4.8d).

la energía de las componentes *intra-day* y *intra-hour* respectivamente.

4.4. Resultados

En la tabla 4.2 se muestra los valores requeridos de energía que deben almacenar las baterías y ultracapacitores del caso 1. En la quinta columna se muestra la reducción en el dimensionamiento de las baterías cuando se utilizan ultracapacitores.

Tabla 4.2: Requerimientos de energía del ESS de las componentes presentadas en el caso 1.

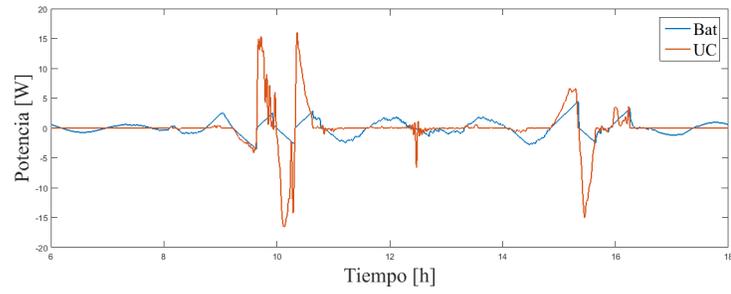
Componente	Energía baterías [Wh]	Energía ultracapacitores [Wh]	Energía Total [Wh]	Reducción en el tamaño de baterías [%]
<i>Intra-week</i>	3,08928	—	188,2362	—
<i>Intra-day</i>	10,9049	10,1751	15,5444	65,4
<i>Intra-hour</i>	1,1232	4,1433	4,4011	94,1
<i>Real time</i>	205,9327	—	205,9327	—

En la tabla 4.3 se muestra los valores requeridos de energía que deben almacenar las baterías y ultracapacitores del caso 2. En la quinta columna se muestra la reducción en el dimensionamiento de las baterías cuando se utilizan ultracapacitores.

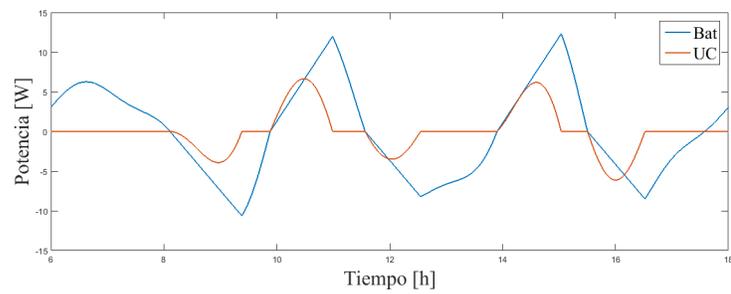
Tabla 4.3: Requerimientos de energía del ESS de las componentes presentadas en el caso 2.

Componente	Energía baterías [Wh]	Energía ultracapacitores [Wh]	Energía Total [Wh]	Reducción en el tamaño de baterías [%]
<i>Intra-week</i>	188,2362	—	188,2362	—
<i>Intra-day</i>	11,5393	6,7405	15,5444	43,4
<i>Intra-hour</i>	1,3518	3,7639	4,4011	85,5
<i>Real time</i>	205,9327	—	205,9327	—

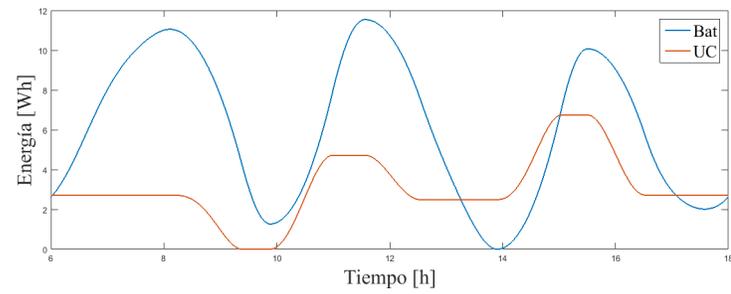
En la tabla 4.4 se muestra la energía total que requieren las baterías y los ultracapacitores del caso 1 y 2. Las cantidades de energía que se muestran en esta tabla se obtienen sumando todas las energías de las cuatro componentes de la señal desbalance.



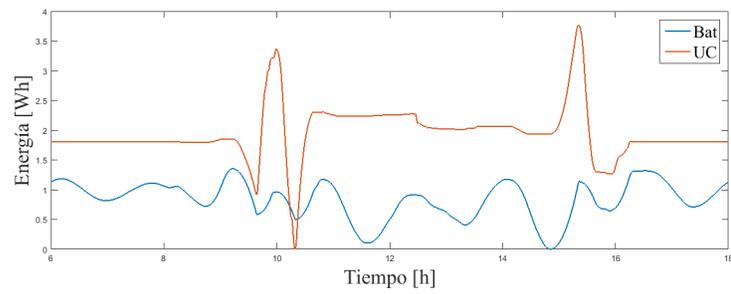
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.9: Potencia de los bancos de baterías y ultracapacitores: *intra-day* (4.9a); *intra-hour* (4.9b). Energía de los bancos de baterías y ultracapacitores: *intra-day* (4.9c); *intra-hour* (4.9d)

Tabla 4.4: Requerimientos de energía del ESS de las componentes presentadas en el caso 1 y 2.

Componente	Energía baterías [Wh]	Energía ultracapacitores [Wh]	Energía Total [Wh]	Reducción en el tamaño de baterías [%]
Caso 1	399,2290	12,7718	411,8364	3,10
Caso 2	402,5102	9,5849	411,8364	2,33

Capítulo 5

Conclusiones

- Los ultracapacitores de gran utilidad para reducir la cantidad de energía que requieren las baterías y tienen un mayor impacto en la reducción de la cantidad de energía cuando hay mayores variaciones en la potencia con respecto al tiempo, tal como se aprecia en la componente *intra-hour*, la cual tuvo una reducción en las baterías de más del 80 % para ambos casos de estudio.
- El caso 1 tuvo un impacto mayor en la reducción del dimensionamiento de las baterías porque los ultracapacitores podían operar en todo el intervalo de operación, mientras en el caso 2 los ultracapacitores solo operaban cuando la variación de potencia con respecto al tiempo era positiva en los periodos de carga y negativa en las periodos de descarga.
- La reducción en el dimensionamiento de las baterías fue bajo porque los ultracapacitores se implementaron solo para las componentes *intra-day* e *intra-hour* y estas dos componentes no tenían tanta información de las señal de desbalance, como sí lo tenían las componenetes *intra-week* y *real time*. Esto se puede apreciar en el espectro en frecuencia de la señal de desbalance (gráfica 4.3) donde a bajas y altas frecuencias la magnitud de la señal en el dominio de Fourier es mayor que a frecuencia medias, las cuales tienen toda la información de las componentes *intra-day* e *intra-hour*.
- La componente *intra-hour* tuvo una mayor reducción en el tamaño de la baterías que la componente *intra-day* porque tenía mayores requerimientos en términos de potencia, es decir que habían mayores variaciones en la energía, esto sucede porque esta componente trabajaba con frecuencias más altas, lo cual se puede traducir en mayores variaciones en la energía, por lo tanto los ultracapacitores pueden trabajar más, esto se observa en las tablas 4.2 y 4.3.
- Como se observa en la tabla 4.4 la reducción en el dimensionamiento de las baterías fue bajo, pero si se mira a largo plazo aumenta el tiempo de reemplazo de éstas, lo cual se puede tradacir en un menor costo de implementación.

5.1. Futuros trabajos de investigación

Los trabajos futuros que se pueden derivar de este trabajo de grado podrían ser:

- Hacer el problema más complejo teniendo en cuenta las pérdidas de energía durante los procesos de carga y descarga.
- Resolver el problema usando un transformada diferente a la de Fourier debido a que esta considera que la señal de desbalance es periódica, lo cual no es cierto porque cada día los niveles de potencia en un panel solar siempre serán diferentes.
- Solucionar el problema implementando más de un panel, considerando que todos no tendrán siempre los mismos niveles de radiación.
- Considerar otras fuentes y tecnologías para el almacenamiento de energía.
- Analizar como cambia el procedimiento cuando se tiene una carga variable.
- Tener en cuenta para el dimensionamiento del ESS criterios económicos.

Bibliografía

- [1] D. I. Doukas, K. Papastergiou, P. Bakas, and A. Marinopoulos, “Energy storage sizing for large scale pv power plants base-load operation - comparative study amp; results,” in *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2012 38th IEEE*, June 2012, pp. 000 570–000 574.
- [2] B. J. Szymanski, K. Kompa, L. Roslaniec, A. Dmowski, and J. Szymanski, “Operation of photovoltaic power systems with energy storage,” in *2011 7th International Conference-Workshop Compatibility and Power Electronics (CPE)*, June 2011, pp. 86–91.
- [3] E. Schaltz, A. Khaligh, and P. O. Rasmussen, “Influence of battery/ultracapacitor energy-storage sizing on battery lifetime in a fuel cell hybrid electric vehicle,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 58, no. 8, pp. 3882–3891, Oct 2009.
- [4] S. M. Schoenung and W. V. Hassaenzahl, “Long vs shor-term energy storage technologies analysis a life-cycle cost study a life-cycle cost study,” *Sandia Report*, 2003.
- [5] G. L. Bullard, H. B. Sierra-Alcazar, H. L. Lee, and J. L. Morris, “Operating principles of the ultracapacitor,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 25, no. 1, pp. 102–106, Jan 1989.
- [6] A. Orbehorfer, “Energy storage technologies & their role in rewable integration,” *Global Energy Network Institute*, 2012.
- [7] D. Manz, J. Keller, and N. Miller, “Value propositions for utility-scale energy storage,” in *Power Systems Conference and Exposition (PSCE), 2011 IEEE/PES*, March 2011, pp. 1–10.
- [8] M. Farhadi and O. Mohammed, “Energy storage systems for high power applications,” in *Industry Applications Society Annual Meeting, 2015 IEEE*, Oct 2015, pp. 1–7.
- [9] U. S. D. of Energy, “Energy storage for power systems applications: A regional assesment for the northwest power pool (nwpp),” *Pacific Northwest National Laboratory*, 2010.
- [10] Universidad Tecnológica de Pereira. [Online]. Available: www.utp.edu.co

- [11] S. X. Chen, H. B. Gooi, and M. Q. Wang, “Sizing of energy storage for microgrids,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, no. 1, pp. 142–151, March 2012.
- [12] Capítulo 5. la batería de plomo-Ácido. [Online]. Available: http://www.olajedatos.com/documentos/baterias_plomo.pdf
- [13] T. Guerrero. (2012, Jun.) El grafeno ‘resucita’ la batería níquel-hierro de edison. El mundo. [Online]. Available: <http://www.elmundo.es/elmundo/2012/06/26/ciencia/1340708043.html>
- [14] T. Blank, J. Badeda, J. Kowal, and D. U. Sauer, “Deep discharge behavior of lead-acid batteries and modeling of stationary battery energy storage systems,” in *Intelec 2012*, Sept 2012, pp. 1–4.
- [15] Kyocera, *KC40T Hight efficiency multicrystal photovoltaic module*.