

# Diferentes estrategias para sincronizar un nuevo Sistema de Almacenamiento con un horno de arco eléctrico

## *Different strategy to synchronize a new Storage System with an Electric Arc Furnaces*

Caridad Baserio González<sup>I</sup>, Julio Espinosa Domínguez<sup>II</sup>, Orly Ernesto Torres Breffe<sup>III, \*</sup>

<sup>I</sup>Academia Naval, “Granma”. La Habana, Cuba

<sup>II</sup>Transilvania University of Brasov. Brasov, Romania

<sup>III</sup>Universidad Tecnológica de la Habana, “José Antonio Echeverría”, Cujae. La Habana, Cuba

\* Autor de la correspondencia: [oetbreffe@yahoo.es](mailto:oetbreffe@yahoo.es)

Recibido: 8 de mayo de 2024

Aprobado: 21 de junio de 2024

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



### RESUMEN/ ABSTRACT

Mitigar las fuertes fluctuaciones de potencia activa en los hornos de arco eléctrico, durante el inicio y final de la fundición es crucial, pues amenaza la estabilidad de la frecuencia en Sistemas Eléctricos de Potencias débiles. El uso de un Sistema de Almacenamiento de Energía en Batería de baja capacidad energética puede ayudar a mitigar las fluctuaciones de potencia. Este documento tiene como objetivo presentar los resultados obtenidos sobre la aplicación de diferentes estrategias de sincronización con un Sistema de Almacenamiento de Energía en Baterías de baja capacidad energética bajo dos clasificaciones (i) en modo rampa y (ii), filtros suavizadores. Utilizando MATLAB/SIMULINK (con licencia académica 41037228) se modeló las diferentes estrategias de sincronización y se determinaron sus ventajas y desventajas. Se concluye que la sincronización a través de un filtro pasa bajo es la variante más favorable para reducir la variabilidad de la potencia activa.

**Palabras clave:** fluctuación de potencia; Horno de Arco Eléctrico; sincronización de un BESS y un HAE; Sistema de Almacenamiento de Energía en Batería.

*Mitigating large active power fluctuations in electric arc furnaces at the start and end of the melting process is critical as it threatens the frequency stability of low power electrical systems. The use of a low-capacity battery energy storage system can help to mitigate the power fluctuations. This paper aims to present the results obtained on the application of different synchronization strategies with a low energy capacity Battery Energy Storage System under two classifications (i) in ramp mode and (ii) smoothing filters. Using MATLAB/SIMULINK (academically licensed 41037228) the different synchronization strategies were modeled, and their advantages and disadvantages were determined. It is concluded that synchronization through a low-pass filter is the most favorable variant for reducing active power variability.*

**Keywords:** Battery Energy Storage System; Electric Arc Furnace; power fluctuation; synchronization of a BESS and a HAE.

### INTRODUCCIÓN

Alrededor de un cuarto de la producción mundial de acero se produce por el método de Horno de Arco Eléctrico (HAE), [1]. Existen varios tipos de Horno de Arco Eléctrico [2-4], pero en este trabajo solo se trata de los Horno de Arco Eléctrico trifásicos de corriente alterna. Los HAE debido a su funcionamiento afectan la calidad del suministro eléctrico de él, de la industria y al Sistema Eléctrico de Potencia que lo alimenta [5, 6].

Cómo citar este artículo:

Caridad Baserio González y otros. Diferentes estrategias para sincronizar un nuevo Sistema de Almacenamiento con un horno de arco eléctrico. Ingeniería Energética. 2024. 45 (2), mayo/agosto. ISSN 1815-5901.

Sitio de la revista: <https://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE/index>

Los problemas que estos introducen mencionados en la literatura son: armónicos [7, 8], fluctuaciones de tensión y desequilibrios de corriente y tensión, bajo factor de potencia en la industria del acero y fluctuaciones en la frecuencia. Estos problemas pueden incidir en la eficiencia de los otros subprocesos del proceso de fabricación del acero. Todos estos problemas han sido investigados y se continúan investigando para encontrar soluciones a cada uno de ellos. La mayoría de las soluciones consisten en la aplicación de las técnicas de electrónica de potencia [9]. Los SVC y otros controladores de reactivos se han venido aplicando en los hornos de arco eléctricos [10]. Los STACOM y otros convertidores más costosos y complejos igualmente se han venido aplicando [11-13]. Una posible solución integral se ha venido madurando que permitiría reducir todos impactos negativos del horno de arco eléctrico [14].

El uso del HAE puede quedar limitado en los lugares donde el sistema de potencia es débil con baja inercia y capacidad de regulación de frecuencia [15,16]. Esto es debido a que las variaciones rápidas de la demanda de potencia activa del HAE puede dar lugar a variaciones de la frecuencia, lo cual puede conducir a problemas de estabilidad. Las consecuencias que se pueden dar son, graves resonancias y disparos de las protecciones que conducen a un apagón del sistema de energía [15,16]. Una solución tecnológica empleada para mitigar dicha problemática consiste en que el HAE funcione en modo rampa. Esto hace ineficiente el proceso de fundición, pues trae consigo: más consumo de energía, daños en los electrodos y cestas, bajo factor de potencia acumulativo.

Los autores Espinosa, Rekola y otros [15], proponen un BESS con baja capacidad energética emulando una rampa en la entrada y salida del HAE, para resolver de manera integral todos los problemas causados al suministro eléctrico en una acería y al Sistema Eléctrico de Potencia. Esta propuesta se valida considerando que los picos de frecuencias ocurren con mayor magnitud al inicio y al terminar la fundición del HAE. Durante la fundición el BESS se dedicaría en el control del reactivo para mejorar los problemas de tensión y factor de potencia. También, se pudieran filtrar los armónicos. El inicio de la fundición puede ser complejo, provocando que un mecanismo de protección apague el HAE. Este proceso se puede repetir varias veces en lo que el horno está iniciando la fundición. Si el BESS está entregando potencia activa en el momento que se apaga el HAE, el sistema de potencia tiene un excedente de potencia activa, lo cual la frecuencia aumentaría.

En este caso el BESS no va amortiguar las fluctuaciones en la frecuencia, sino que incide en esta. El uso de un BESS de baja capacidad energética como solución integral a todos los problemas del suministro eléctrico los hornos de arco eléctrico, es solo posible, si se efectúa una correcta sincronización con el HAE. Es decir, cuando el horno comienza a fundir, el BESS comienza a emular la rampa de entrada y cuando el horno termina la fundición el BESS de comenzar a realizar la rampa de salida. Sobre este aspecto no existen referencias bibliográficas, pues las investigaciones existentes sobre las aplicaciones del BESS sincronizados se refieren más a los parques fotovoltaicos.

Este documento tiene como objetivo presentar los resultados obtenidos sobre la aplicación de diferentes estrategias de sincronización de un Sistema de Almacenamiento de Energía en Batería de baja de capacidad energética con un horno de arco eléctrico. Se analizan varias estrategias, pero estas se pueden clasificar en dos tipos, los BESS que usan rampas considerando el inicio y el fin de la fundición y los BESS que utilizan filtros seguidores de la potencia del horno. Primero se analiza el impacto de las variaciones de la potencia activa en la frecuencia del sistema de potencia. Seguido se explican las diferentes estrategias de sincronización de ambas categorías de control de las variantes de BESS utilizadas. Finalmente se analizan en detalles los BESS que utilizan rampas y luego los que utilizan filtros suavizadores.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

El Horno de Arco Eléctrico (HAE) es considerado uno de los consumidores de mayor variabilidad de potencia activa [14-16] y por tanto, uno de los que principalmente puede afectar al equilibrio entre la potencia activa consumida y generada en el sistema eléctrico de potencia. Esto puede impactar en la estabilidad de la frecuencia en los Sistemas Eléctricos de Potencia cuando este tiene baja capacidad de regulación [17, 18]. Las tecnologías de almacenamiento por baterías de DC (BESS) son una opción ya mencionada para la reducción de las fluctuaciones de la frecuencia [15, 19]. Esta se puede utilizar para mitigar el impacto del HAE en la estabilidad de la frecuencia en Sistemas Eléctricos de Potencia débil [15]. El principio de funcionamiento general de esta tecnología implementada con un HAE se muestra en la figura 1.

La potencia demandada al sistema eléctrico de potencia ( $P_{carga}$ ) es la diferencia entre la demanda real del HAE ( $P_{BESS}$ ) y la potencia generada o consumida por el BESS ( $\pm P_{BESS}$ ). La potencia de salida del BESS sigue el valor de referencia especificado para mitigar el problema de fluctuación de la potencia del HAE. El BESS se carga o descarga para limitar la variabilidad brusca de la potencia demandada por el HAE. Esta limitación permite suavizar la variabilidad de la potencia demandada por el HAE, lo cual contribuye a la estabilidad de la frecuencia. Para analizar del comportamiento del HAE y el BESS es necesario considerar un sistema eléctrico con una capacidad propia de reacción a los cambios de la potencia activa y las capacidades de regulación primaria y secundaria de la frecuencia en el sistema de potencia. En este análisis no se consideraron las respuestas de tensión del sistema de potencia a los cambios en la corriente para acelerar los tiempos de simulación. En la figura 1, se muestra un esquema del modelo usado en el estudio.

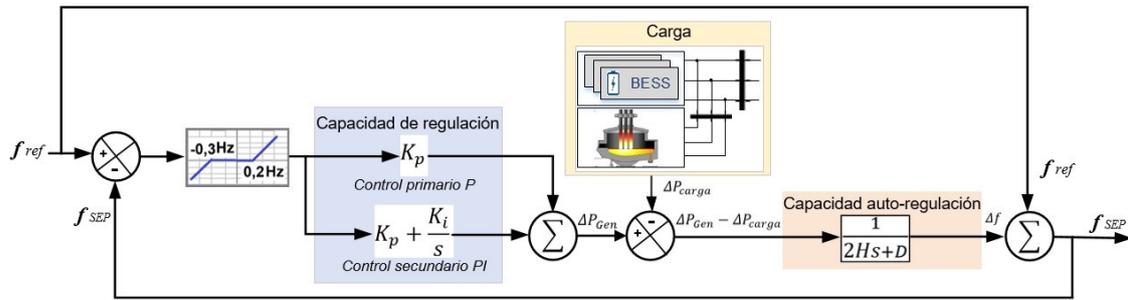


Fig. 1. Modelo concentrado del sistema eléctrico de potencia y sus controles

La potencia activa o diferencia de potencia que el sistema experimenta ( $\Delta P_{GEN} - \Delta P_{CARGA}$ ), pasa por el bloque que define las características propias del sistema. Las características propias son inercia ( $2H$ ) y el coeficiente de amortiguamiento ( $D$ ). El resultado de esta respuesta es una variación de la frecuencia ( $\Delta f$ ) debido a una fluctuación de potencia ( $\Delta P$ ), es sumado a la frecuencia de referencia ( $f_{ref}$ ). La diferencia entre la frecuencia actual del sistema eléctrico de potencia ( $f_{SEP}$ ) y la frecuencia de referencia, es la señal de error que informa al control del sistema de potencia para que este actúe si supera la banda muerta.

Esta señal de error, permite efectuar el control primario y el control secundario para la regulación de la potencia del sistema eléctrico de potencia. En la respuesta del control se considera la banda muerta establecida para Cuba, con 0,3Hz hacia abajo y 0,2Hz hacia arriba [15]. Las características del sistema de potencia y las respuestas de sus controles pueden ser modificadas para simular otra condición del sistema de potencia más o menos robusta. La demanda del horno de arco eléctrico puede ser modificada utilizando datos reales de cualquier condición de fundición. También y es el objetivo de este trabajo, se pueden modificar las estrategias que el BESS utiliza para ayudar a la acería a disminuir variabilidad de la potencia activa.

### Pautas consideradas en el diseño de estrategia de sincronización

Un BESS de baja capacidad energética emulando rampas puede mitigar la variación de potencia del HAE que impacta al Sistema Eléctrico de Potencia [15]. La sincronización entre ambos dispositivos es crucial para lograr tal propósito. En la figura 2, se muestra el flujograma que se utilizó con las restricciones que tendrían que cumplir las estrategias de sincronización que se diseñen.

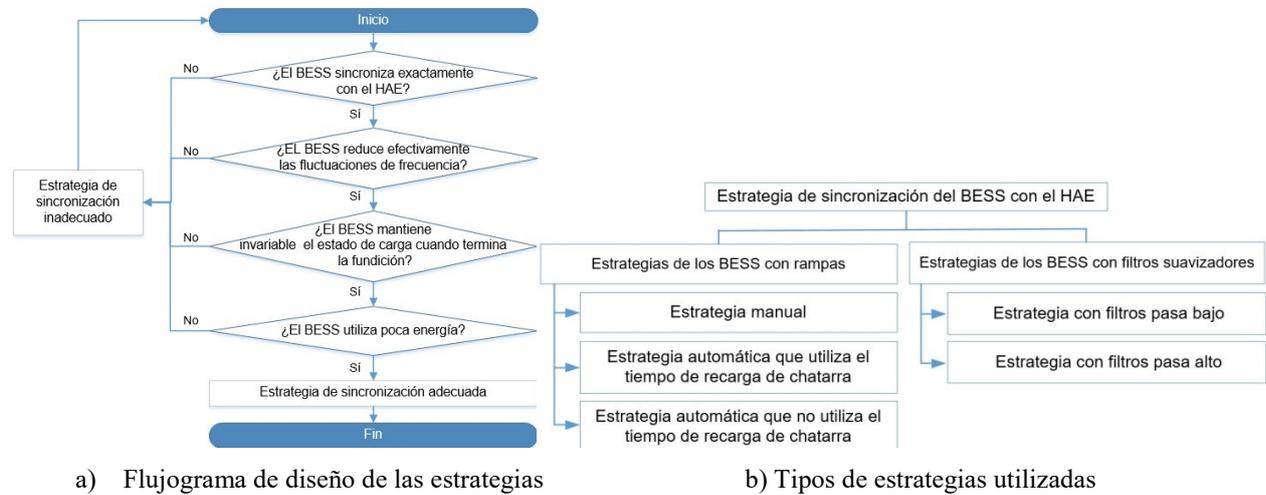


Fig. 2. Flujograma para el diseño de la estrategia de sincronización del BESS con el HAE

El punto de decisión de la figura 2a, se refiere al momento exacto en que debe comenzar la acción del BESS tanto al inicio como la del final de la fundición. Lo importante es que el BESS genere o consuma exactamente lo que necesita el horno de arco eléctrico, ni más ni menos. En el caso de la estrategia que usa rampas, el valor máximo y el momento en que se ejecute dicha rampa son los aspectos más importantes. El punto de decisión dos de la figura 2a, se refiere al objetivo principal de la utilización del BESS. Este tiene que reducir las fluctuaciones de la frecuencia en el sistema de potencia, durante la fundición.

Las fluctuaciones de la frecuencia del sistema no solo dependen de la variabilidad del HAE sino de las características del sistema y del balance entre el resto de cargas y la generación [16, 19]. De ahí la importancia del punto de decisión anterior, para que el BESS solo actúe cuando el HAE esté fundiendo. El punto de decisión tres del flujograma se basa en la necesidad de que el BESS mantenga la energía suficiente para realizar las operaciones en el inicio y final de la fundición.

Es decir, si la estrategia posee una rampa de generación y de consumo del BESS, estas rampas tienen que tener similar cantidad de energía, para que el BESS siga totalmente cargado para la próxima cesta. Cuando termine una cesta de fundición el BESS debe quedar con el mismo estado de carga de como cuando comenzó la cesta de fundición. El punto de decisión cuatro del mismo flujograma es un punto decisivo, pues el presente trabajo se enmarca en el uso de un BESS de baja capacidad energética. Es importante, que la estrategia se pueda efectuar con un BESS con esta característica. El uso de un BESS de baja capacidad energética está relacionado con aspectos económicos. Además la estrategia debe permitir que el C-Rated de la batería sea el adecuado.

Cada una de las estrategias mencionadas en la figura 2b, debe cumplir con las restricciones que se señalan en la figura 2a. Existen dos tipos de estrategias generales, las que utilizan rampas o las que utilizan filtros. Como se podrá observar, existen 3 tipos de estrategias que utilizan rampas y dos estrategias que utilizan filtros. En el próximo tópico se explicarán en detalles cada una de las estrategias diseñadas para que el BESS se sincronice adecuadamente con el Horno de Arco Eléctrico. En todo caso las estrategias de rampas son estrategias de control predictivo. A partir del conocimiento del proceso de fundición se emulan rampas tanto al inicio de la función como al final. Las estrategias de filtros son muy similares a las utilizadas en los parques solares [19-21].

### Estrategias de los BESS que utiliza rampas

En la figura 2 anterior, se explican de forma general las estrategias para la sincronización del BESS con el horno de arco eléctrico. En este tópico se explicarán en detalles el principio de funcionamiento de cada una de estas estrategias de sincronización. En las estrategias que utilizan rampas el BESS solo trabaja en el momento inicial y final de la fundición, no trabajan durante la función. Las estrategias automáticas necesitan menos la acción del operador. No elimina al operador de la toma de decisiones, pero lo necesitan menos. En la estrategia manual el operador tomaba todas las decisiones y los errores en esa toma de decisiones pudieran hacer que esta estrategia no cumpla las restricciones exigidas en la figura 3. Las estrategias que utilizan Filtros cambian la óptica de operación y hacen que el BESS trabaje todo el tiempo no solo al principio y al final.

### Estrategia de sincronización manual

La estrategia manual consiste en hacer una rampa de inicio (rampa de generación) cuando el horno comienza a fundir y una rampa de parada (rampa de consumo) cuando el horno deja de funcionar para hacer otra recarga de chatarra. Al momento de comenzar la rampa, el valor de la potencia inicial de la rampa y el tiempo que durará la rampa son definidas por el operador. En la figura 3, se muestra el modelo empleado para la estrategia de sincronización manual.

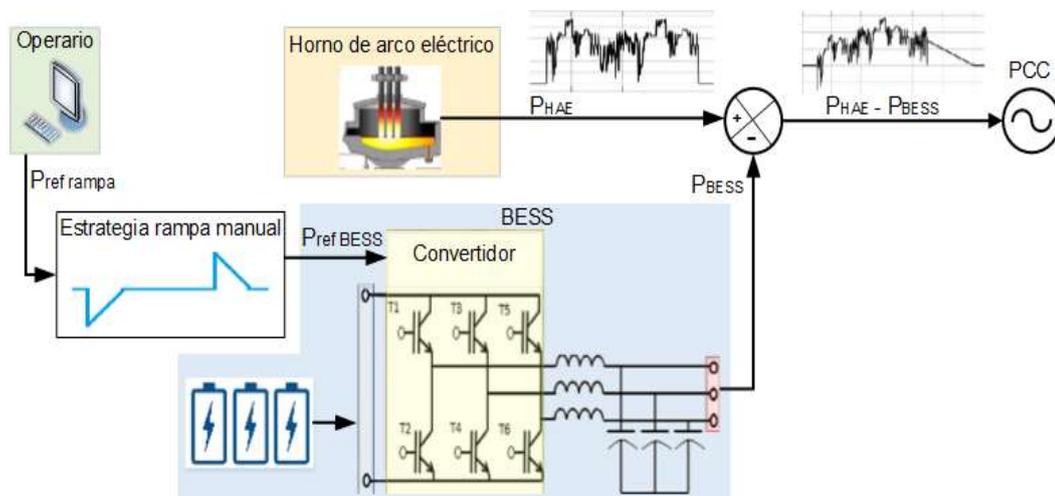


Fig. 3. Modelo empleado para la estrategia de sincronización manual

Esta estrategia posee dos entradas controladas por el operador. Las dos señales que entran al control de rampa son: el pulso de inicio de la rampa y la otra es la cantidad de potencia con que comienza la rampa ( $P_{ref\ rampa}$ ). Ambas señales debe definir las el operador. Lo mismo se repite con la rampa de salida. En el punto común de conexión (PCC) que obtiene la diferencia entre las potencias del horno de arco eléctrico y la generada o consumida por el BESS experimenta una entrada y salida en rampa de la potencia del horno sin que el horno haya hecho estas rampas.

El operador define el momento en donde el HAE comienza y termina de fundir a través de un programa del horno donde se configuran en una computadora dichos momentos. Además, define la cantidad de potencia de inicio de la rampa considerando los valores de potencia de inicio y final de fundición que aparecen en el programa. El programa de horno no da con exactitud el valor de potencia, pues no considera la variación que posee la tensión del sistema en el momento de la fundición. Otro factor que introduce errores en el establecimiento del momento adecuado de comenzar la rampa y su potencia inicial es la dinámica propia del movimiento de los electrodos.

La potencia activa que debe entregar el BESS siempre es una rampa con un tiempo definido por el operador y con una Potencia máxima igualmente definida por el operador. El operador igualmente decide el momento donde comienza a generar o consumir el BESS. A continuación se muestra la ecuación (1), que define el funcionamiento de dicha estrategia:

$$P_{BESS(t)} = \begin{cases} 0 & \text{si } t < t_{manual_1} \\ -P_{max} \left( 1 - \frac{1}{t_{rampa} \cdot 60} t \right) & \text{si } t_{manual_1} \leq t \leq t_{rampa} \text{ (generación)} \\ 0 & \text{si } (t_{manual_1} + t_{rampa}) \leq t \leq t_{manual_2} \\ P_{max} \left( 1 - \frac{1}{t_{rampa} \cdot 60} t \right) & \text{si } t > t_{manual_2} \text{ (consumo)} \end{cases} \quad (1)$$

Dónde:

$P_{max}$ : Potencia con que el operador decide que comienza la rampa (MW)

$t_{rampa}$ : Tiempo que el operador decide que debe durar la rampa (minutos)

$t_{manual_1}$ : Momento en que el operador decide que comienza la rampa de generación

$t_{manual_2}$ : Momento en que el operador decide que comienza la rampa de consumo

Cuando el operador no ha dado la orden de comenzar la rampa 1 o rampa de generación, la potencia del BESS es cero, ni se carga ni se descarga. Cuando el operador da la orden de comenzar la rampa de generación, lo cual ocurre en un tiempo igual a  $t_{manual_1}$ , la potencia del BESS comienza con una rampa de signo negativo que es la rampa de generación. Luego de que se cumpla el tiempo de la rampa, la potencia del BESS retorna a cero. Cuando el operador da la orden de comenzar la rampa de consumo, lo cual ocurre en un tiempo igual a  $t_{manual_2}$ , la potencia del BESS comienza con una rampa de signo positivo que es la rampa de generación. Luego de que se cumpla el tiempo de la rampa, la potencia del BESS retorna a cero.

#### Estrategia automática que utiliza el tiempo de recarga de chatarra

Esta estrategia que utiliza el tiempo de recarga de chatarra consiste en hacer una rampa de inicio (rampa de generación) cuando el horno comienza a fundir y una rampa de parada (rampa de consumo) cuando el horno deja de funcionar, para hacer otra recarga de chatarra. Esta estrategia es un seguidor de potencia, pues sigue el comportamiento de la potencia del HAE para determinar automáticamente los parámetros de la rampa. Es decir, determina automáticamente el momento y la potencia en que deben comenzar, así como el ajuste de los valores de potencia de la rampa según la demanda del horno. La demora o tiempo de cada rampa son seleccionada por el operador. En la figura 4, se muestra el modelo empleado para esta estrategia de sincronización.

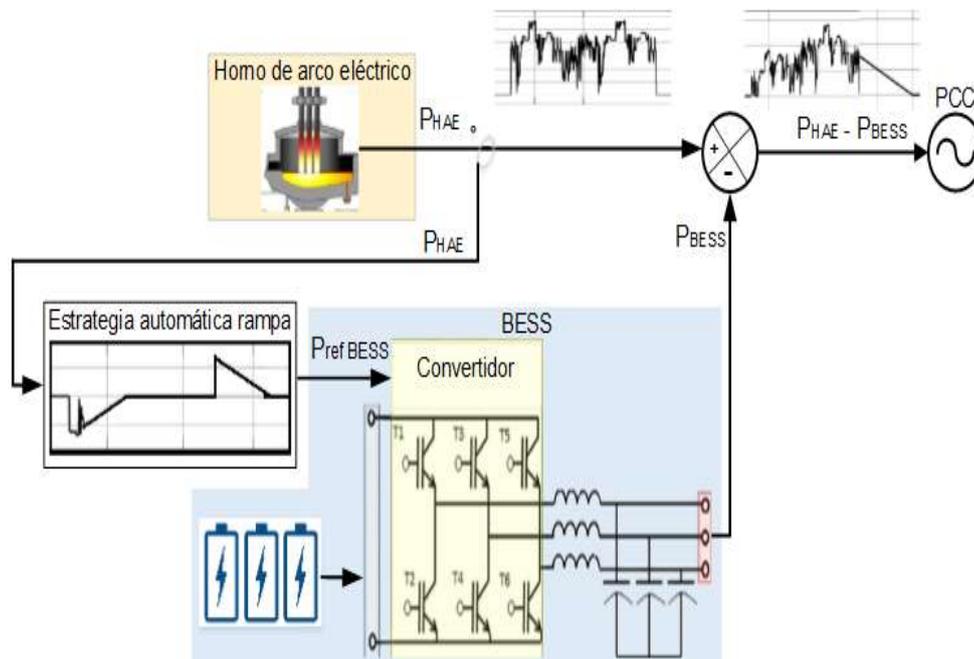


Fig. 4. Modelo de la estrategia automática que utiliza el tiempo de recarga de chatarra

En la figura 4, se puede observar como la estrategia se basa en tomar mediciones de la potencia activa del horno para establecer el momento y la potencia adecuada para comenzar la rampa de inicio y al final de la fundición. Este seguidor utiliza una ventana de medición de alrededor de 5 segundos para decidir la potencia media del horno de arco eléctrico antes de comenzar la rampa. Es decir, cuando la rampa va comenzar, posee calculado un valor anterior medio de la potencia del horno y con esa comienza la rampa. Se puede observar como la potencia de referencia del BESS ( $P_{ref\ BESS}$ ) durante el comienzo de la fundición es una rampa que no es constante, pues se adapta a las variaciones de potencia del HAE que ocurren en este periodo.

Al terminar la fundición la  $P_{ref\ BESS}$  es una rampa constante pues los electrodos se retiran para la recarga de chatarra y ya el HAE no está fundiendo. En esta estrategia el operador no decide en qué momento comienza la rampa, solo el valor máximo de dicha rampa y su duración. Igualmente, la rampa no comenzará en el valor máximo especificado por el operador, porque el BESS siempre entregará el valor mínimo entre el valor de la rampa y la potencia del horno en cada instante que dure la rampa. El comportamiento de la potencia del BESS en esta estrategia de sincronización se muestra en las ecuaciones (2-4):

$$t_{manual_1} \neq 0 \quad si \quad \frac{1}{T_G} \int_0^{T_G} P_{HAE(t)} dt > P_{max} \quad (2)$$

$$t_{manual_2} \neq 0 \quad si \quad \frac{1}{T_C} \int_0^{T_C} P_{HAE(t)} dt > P_{max} \quad (3)$$

$$P_{BESS(t)} = \begin{cases} 0 & si \ t < t_{manual_1} \\ \min \left[ -P_{max} \left( 1 - \frac{1}{t_{rampa} \cdot 60} t \right), P_{HAE(t)} \right] & si \ t_{manual_1} \leq t \leq t_{rampa} \quad (generación) \\ 0 & si \ (t_{manual_1} + t_{rampa}) \leq t \leq t_{manual_2} \\ \min \left[ P_{max} \left( 1 - \frac{1}{t_{rampa} \cdot 60} t \right), P_{HAE(t)} \right] & si \ t > t_{manual_2} \quad (consumo) \end{cases} \quad (4)$$

Dónde:

$t_G$ : Ventana de tiempo para el cálculo del valor medio del comienzo de la rampa de generación

$t_C$ : Ventana de tiempo para el cálculo del valor medio del comienzo de la rampa de consumo

$P_{HAE(t)}$ : Potencia del horno de arco eléctrico en cada momento (t) que dure la rampa.

El BESS está calculando un valor medio de la potencia del Horno de arco eléctrico, de una ventana de tiempo  $T_G$ . Cuando este valor medio es superior a una potencia inicial, la rampa de generación comienza de forma automática. De la misma forma, cuando el valor medio calculado con una ventana de tiempo  $T_C$  se reduce, es que el Horno ha dejado de fundir y comienza automáticamente la rampa de consumo. En este caso, el BESS siempre está observando que la potencia del BESS nunca sea mayor a la potencia del Horno, por eso siempre está comparando el valor mínimo de ambos.

### Estrategia automática que no utiliza el tiempo de recarga de chatarra

La estrategia automática que no utiliza el tiempo de recarga de chatarra se diseñó para evitar que se pierda la sincronización, al coincidir la rampa de salida con la rampa de inicio de la próxima cesta a fundir. Es decir, esta estrategia no tendría que ajustar el tiempo de la rampa al tiempo de recarga de chatarra como las otras estrategias explicadas en este trabajo.

La estrategia consiste en hacer dos rampas de generación dentro del proceso de fundición. Durante la fundición el BESS utilizaría la variabilidad de la potencia del horno para cargarse. Esta estrategia es un seguidor pues sigue el comportamiento de la potencia del HAE para determinar automáticamente los parámetros de la rampa y controlar la carga del BESS. La rampa de salida comienza bajo una señal manual por parte del operador. En la figura 5 se muestra el modelo empleado para la estrategia de sincronización automática que no utiliza el tiempo de recarga de chatarra.

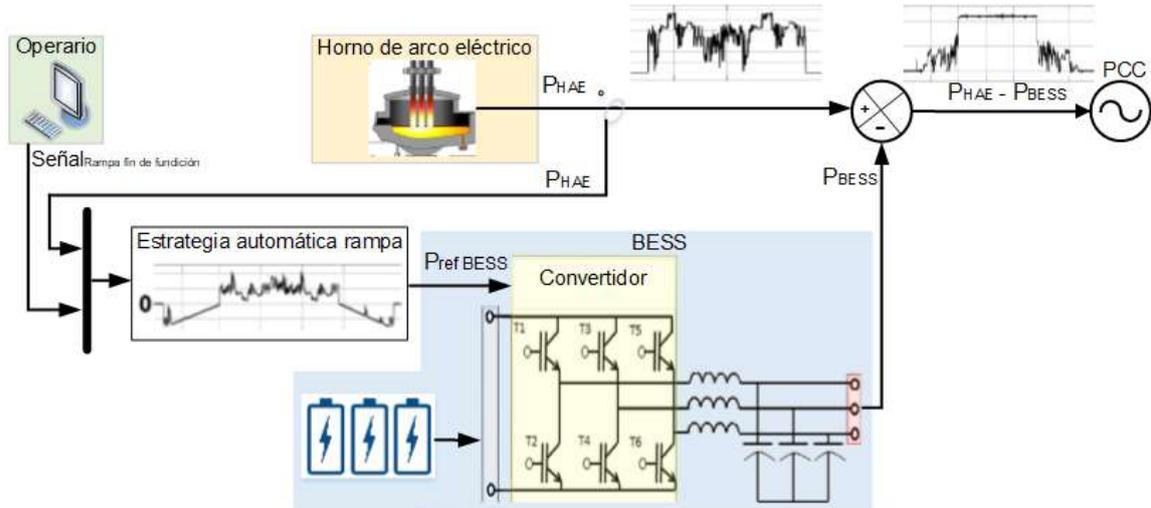


Fig. 5. Modelo de la estrategia automática que no utiliza el tiempo de recarga de chatarra

Se puede observar en la figura 5, como la potencia de referencia del BESS ( $P_{ref\ BESS}$ ) durante tanto al inicio como al final de la fundición es una rampa de generación no es constante, es decir se adapta a las variaciones de potencia del HAE. Durante la fundición la  $P_{ref\ BESS}$  pone a cargar el BESS considerando una potencia activa máxima fijada, la cual varía según la  $P_{HAE}$  medida. Cuando el HAE tenga un descenso de la potencia activa, la potencia en el punto de conexión común (PCC), no lo verá pues el BESS se estaría cargando. En esta estrategia el operador decide el momento cuando comienza a efectuarse la segunda rampa de generación y además decide la potencia máxima que puede alcanzar la rampa y el tiempo de dicha rampa. Pero no decide el tiempo en que comienza la rampa de generación, eso se selecciona automáticamente. En esta estrategia se están efectuando dos rampas de generación. Desde la ecuación (5-7), se muestra el comportamiento de la BESS en esta nueva estrategia de sincronización:

$$t_{manual_1} \neq 0 \quad si \quad \frac{1}{T_G} \int_0^{T_G} P_{HAE(t)} dt > P_{max} \quad (5)$$

$$t_{manual_2} \neq 0 \quad definido \ por \ el \ operador \quad (6)$$

$$P_{BESS(t)} = \begin{cases} 0 & si \ t < t_{manual_1} \\ \min \left[ -P_{max} \left( 1 - \frac{1}{t_{rampa} \cdot 60} t \right), P_{HAE(t)} \right] & si \ t_{manual_1} \leq t \leq t_{rampa} \quad (generación) \\ P_{HAE(t)} - P_{CARGA} & si \ (t_{manual_1} + t_{rampa}) \leq t \leq t_{manual_2} \\ \min \left[ -P_{max} \left( 1 - \frac{1}{t_{rampa} \cdot 60} t \right), P_{HAE(t)} \right] & si \ t > t_{manual_2} \quad (consumo) \end{cases} \quad (7)$$

Donde:

$P_{carga}$ : Potencia de carga del BESS establecida por el operador (MW).

El momento de inicio de la rampa se calcula de la misma forma que en la rampa anterior. La rampa de salida la comienza el operador y es igualmente una rampa de consumo. Durante el proceso de fundición se está intentando mantener una potencia constante igual a un valor determinado por el operador  $P_{carga}$ . Esto provoca que el BESS se cargue.

### Estrategias de los BESS que utiliza filtros suavizadores

A diferencia de las estrategias que utilizan rampas, las que utilizan filtros trabajan en todo momento que dura la fundición. Las estrategias que utilizan filtros intentan que en todo momento el sistema de potencia perciba menos variabilidad de la potencia activa y con ello, intentan reducir las fluctuaciones de la frecuencia. Se utilizan dos tipos de estrategias que emplean filtros: filtros pasa bajo y filtros pasa altas.

### Estrategia con filtros pasa bajo

La estrategia con filtros pasa bajo consiste en un BESS que entregue continuamente la diferencia entre la potencia activa que genera el horno de arco eléctrico ( $P_{HAE}$ ) y un valor de potencia media ( $P_{med}$ ) que tiene menor variación. La estrategia es un suavizador no es un seguidor como lo que hacían las estrategias de rampas. La potencia del horno pasa por una función transferencial que calcula el valor medio de una ventana de tiempo “ $T_{ao}$ ”. Mientras mayor sea la ventana de tiempo, las variaciones de la potencia del horno se verán menos. En la figura 6, se muestra el modelo de esta estrategia. El filtro que utiliza esta estrategia es un filtro integrador. Donde la constante de tiempo provoca que el filtro deje pasar menos variabilidad.

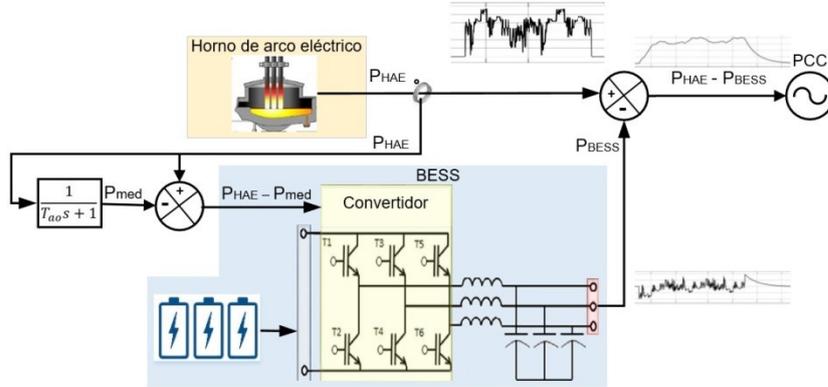


Fig. 6. Modelo de la estrategia con filtros pasa bajo

La potencia activa que entrega el BESS es ( $P_{HAE} - P_{med}$ ), por tanto, la potencia en el punto de conexión común es la  $P_{med}$ . Esto deja al sistema con una potencia activa poco variable que es el objetivo. La constante “ $T_{ao}$ ” define la  $P_{med}$ , por tanto, se debe determinar considerando las características del sistema eléctrico de potencia (SEP). En SEP débil la constante de tiempo  $T_{ao}$  debe ser mayor y si el SEP es más fuerte, en términos de regulación de la frecuencia, la constante  $T_{ao}$  debe ser menor. Con  $T_{ao}$  mayores, el BESS tendrá que asumir mayor cantidad de energía.

### Estrategia con filtros pasa alto

En este caso, el filtro deja pasar la variabilidad de alta frecuencia de la potencia activa del horno de arco eléctrico e intenta que el BESS siga dicha potencia resultante y la entregue con signo contrario. Es decir, el BESS entrega parte de la potencia del HAE. En la figura 7, se muestra el diagrama de esta estrategia.

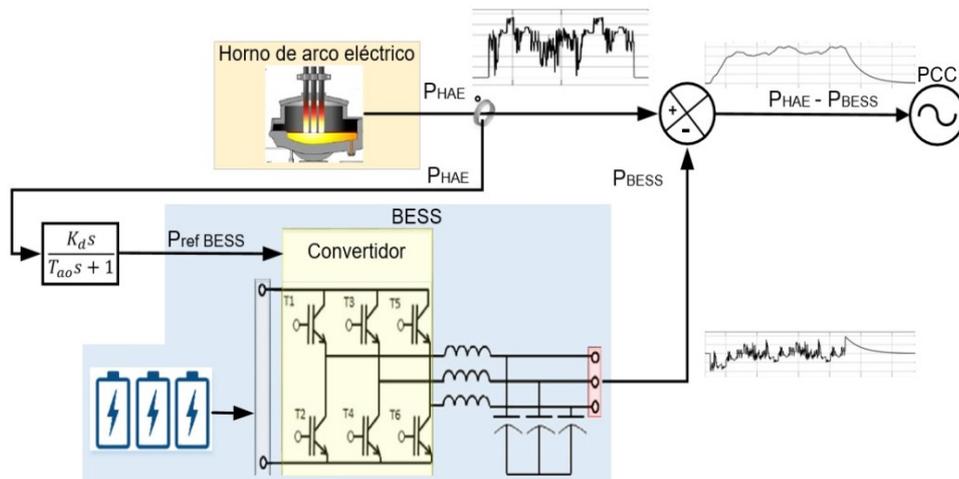


Fig. 7. Modelo de la estrategia con filtros pasa alto

El filtro usado es un filtro derivativo – integrador. La constante de tiempo derivativa permite que pasen mayor o menor magnitud de la potencia que debe entregar el BESS ( $P_{BESS}$ ). La constante “ $T_{ao}$ ” disminuye o aumenta la ventana que deja de pasar la potencia del horno ( $P_{HAE}$ ). La combinación adecuada de la constante de tiempo derivativa ( $K_d$ ) y la constante de tiempo integradora ( $T_{ao}$ ) deja al sistema con una potencia activa poco variable que es el objetivo. La selección de estos parámetros se debe efectuar considerando las características del sistema eléctrico de potencia (SEP). Como conclusión la utilización de filtros pasa bajo o pasa alto de manera adecuada, resultaría en una potencia activa con mucho menos variaciones circulando por el sistema de potencia. Si se reducen las variaciones de la potencia activa, las variaciones de la frecuencia en el sistema de potencia serán menores, aspecto que se detallará en el próximo epígrafe.

En esta estrategia el filtro está enviando la potencia media medida con una constante de tiempo  $T_f$ , menos la potencia que esté enviando el HAE en ese momento. Las siguientes ecuaciones (8 y 9), caracterizan a ambos filtros:

$$P_{BESS(s)} = \frac{1}{T_f s + 1} P_{HAE(s)} - P_{HAE(s)} \quad (8)$$

$$P_{BESS(s)} = \frac{T_f}{T_f s + 1} P_{HAE(s)} \quad (9)$$

Donde

$T_f$ : Es la constante de tiempo del filtro

Ambas estrategias se comportan de la misma manera, así que a partir de ahora se les denominará como las estrategias que utilizan filtros. Las altas frecuencia son exportadas por el BESS y por tanto, al sistema solo pasan las variaciones lentas de la potencia del horno de arco eléctrico o un valor medio basado en una constante de tiempo  $T_f$ .

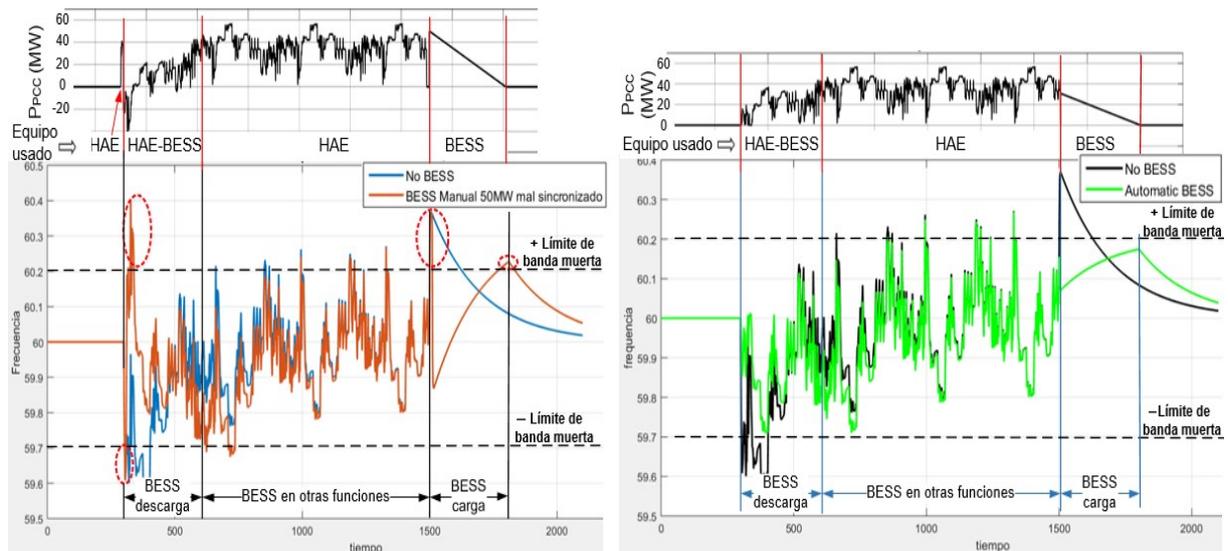
## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las estrategias mencionadas tienen como objetivo reducir las variaciones de la potencia activa que produce el horno de arco eléctrico, provocando que el BESS entregue una potencia de signo contrario que reduzca dicha variación. Las estrategias en rampa lo hacen al principio y al final de cada fundición. Las estrategias de filtros lo hacen todo el tiempo o durante todo el tiempo que se ejecuta la fundición. La comprobación de que funcionan las estrategias de operación propuestas para el BESS y el análisis de cuál de ellas es la de mejor comportamiento, es necesario modelar el comportamiento del sistema para cuando se le presentan las variaciones resultantes. El modelo matemático del sistema se explicó en el tópic 2 y se podrá encontrar en la figura 1.

A continuación, se muestran los principales resultados obtenidos con datos reales de las variaciones de potencia activa del horno de arco eléctrico de la Industria de Antillana de Aceros, en la Habana, Cuba. Los parámetros del sistema de potencia que se emplearon son la constante de inercia  $50 \text{ MW}/(\text{Hz s}^2)$  el coeficiente de amortiguamiento de la carga  $50 \text{ MW}/\text{Hz}$ , que corresponden con un sistema eléctrico de potencia de baja capacidad de regulación de frecuencia.

### Estrategias de los BESS que utiliza rampas

Las estrategias de sincronización que utilizan rampa que fueron analizadas en el presente trabajo poseen similar filosofía. Es decir, hacen una rampa de generación (BESS se descarga) en el inicio de la fundición y otra rampa de consumo (BESS se carga) al terminar la fundición. La diferencia radica en que una se ejecuta de manera manual y otra automática. En la figura 8, se muestra la respuesta de la frecuencia con el uso de ambas estrategias con un HAE de 55MW de potencia máxima.



Estrategia de sincronización manual con 50MW máximo y sincronizado con 10 segundos de retardo.

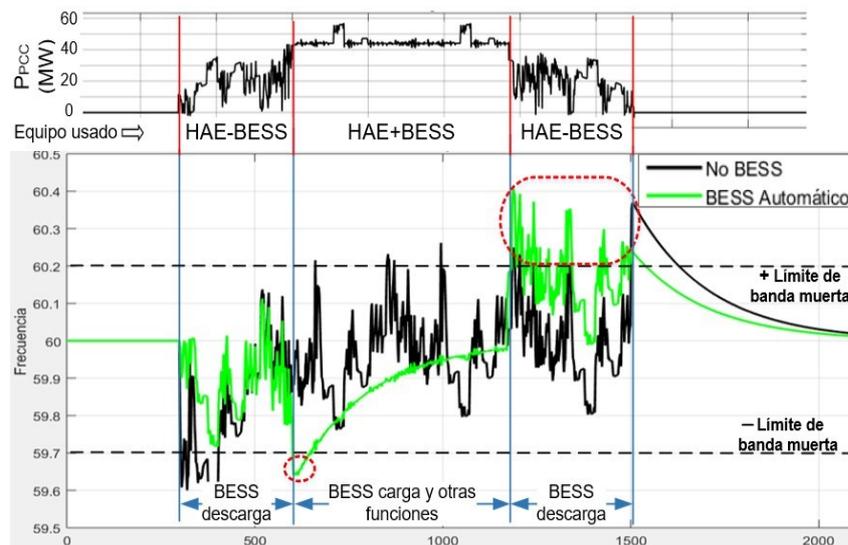
Estrategia de sincronización automática que utiliza el tiempo de recarga de chatarra.

**Fig. 8.** Respuestas de frecuencia de un sistema eléctrico de potencia normal con un HAE de 55MW de potencia máxima con el uso o no de un BESS que funciona mediante rampas

En la figura 8, se puede observar que la estrategia de sincronización manual no evita los picos de frecuencia iniciales que se salen de la banda muerta con una mala sincronización (una potencia máxima mal calculada de 50MW y rampa iniciada con 10 segundos de demora). Esta problemática es común que ocurra pues la complejidad del manejo del HAE hace que el operador no pueda definir el momento exacto de comenzar la rampa, ni el valor de potencia máxima de la rampa. En el caso de la estrategia de sincronización automática que utiliza el tiempo de recarga de chatarra se puede observar que permite una mejor respuesta de frecuencia del sistema. La frecuencia apenas sale de la banda muerta así que el sistema tiene capacidad para controlarla.

Esto se debe a que la estrategia de sincronización automática es un seguidor que define de manera automática la potencia inicial de las rampas y el momento en que debe comenzar, sin la intromisión del operador. Mientras menos potencia tenga el horno de arco eléctrico menos impacto tiene en la frecuencia. En fin, esta estrategia es superior a la estrategia de control manual que si no le calculan bien las características de las rampas puede traer mayores fluctuaciones a la frecuencia. Ambas estrategias al terminar la fundición dejan la frecuencia elevada. Esta condición favorece la próxima cesta a fundir. Las estrategias mostradas en la figura 8, utilizan el tiempo en que el horno deja de fundir para introducir chatarra nuevamente, proceso que se repite hasta tener el horno lleno de acero líquido.

La cantidad de energía que se necesita en ambas rampas, (la rampa de generación y la de consumo) en la estrategia de control manual, son iguales. La estrategia de control manual, con un BESS de 50MW de capacidad, la cantidad de energía que se necesita en ambas rampas es de 2,08MWh. Esta igualdad es importante, y no depende si la sincronización fue bien o mal hecha, sino de la potencia inicial que pueda dar la rampa. La estrategia de control automático que utiliza el tiempo de chatarra, en la rampa inicial de generación utilizó 1,23MWh, mientras que la rampa de consumo tuvo 1,28MWh. Esta diferencia no es un problema porque el BESS puede ser limitado para que su estado de carga no supere el 90%, por tanto, tendría un margen para efectuar la rampa de salida. En el caso del uso de la estrategia de sincronización automática que no utiliza el tiempo de recarga de chatarra no mostró una buena respuesta de frecuencia del sistema eléctrico de potencia. En la figura 9, se puede observar el comportamiento de la frecuencia con el uso de esta estrategia.



**Fig. 9.** Respuestas de frecuencia de un sistema eléctrico de potencia normal con un HAE de 55MW de potencia máxima con el uso o no de un BESS que funciona mediante rampas que no utiliza el tiempo de recarga de chatarra y establece una potencia mínima de 54,5MW

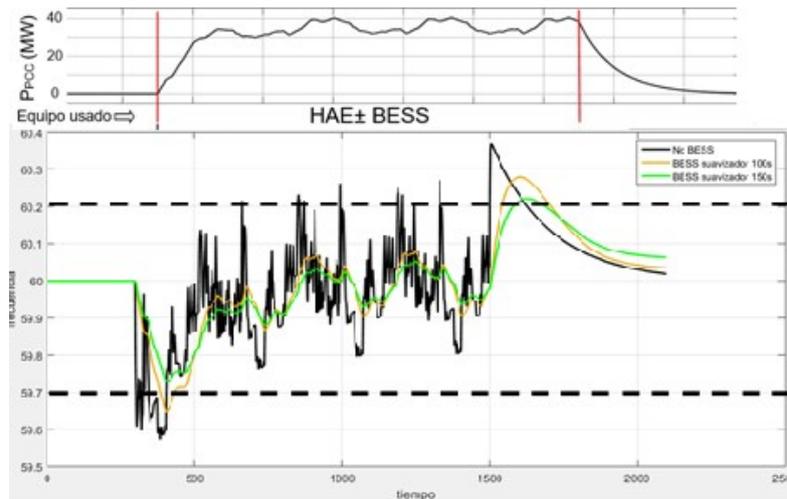
En la figura 9, se puede observar como en toda la rampa de salida se provocan picos adicionales a la frecuencia que no son tolerables. Esta situación se debe al cambio brusco de potencia que ocurre al comenzar hacer la rampa de salida. También, se puede observar como durante intervalos, la frecuencia tuvo peor comportamiento que sin utilizar el BESS, saliendo de la banda muerta durante la fundición. La estrategia de sincronización automática que no utiliza el tiempo de recarga de chatarra necesita cargarse durante la fundición para poder hacer las rampas de generación de entrada y salida. Se consideraron dos potencias mínimas de carga del BESS para analizar la cantidad de energía necesaria.

Si la potencia mínima es de 44MW, entonces se utiliza 2,8MWh para generar y consume 1,29MWh. Estos resultados significan que el BESS no se pudo cargar completamente, por tanto, no estará con la carga necesaria para afrontar la fundición de la próxima cesta. En fin, este BESS necesitaría a cerca de los 9MWh para afrontar una fundición de 6 cestas. Si la potencia mínima se mantiene en 54 MW puede que el BESS logre cargar los 2,8MWh que utiliza en las descargas de ambas rampas. Este es un cálculo bastante complejo de realizar, el cual puede traer consigo errores y diferencias entre la energía de carga y descarga del BESS.

### Estrategias de los BESS que utiliza filtro

La estrategia con filtros pasa alto o pasa bajo, basan su funcionamiento en no dejar pasar las altas variaciones de la potencia activa hacia el sistema de potencia. Es decir, estas estrategias poseen un similar comportamiento en la potencia que entrega o consume el BESS. Ambas producen menos variaciones de la frecuencia con respecto a las demás. En la figura 10, se muestra la respuesta de la frecuencia con el uso de estrategia con un HAE de 55MW de potencia máxima.

En la figura 10, se puede observar como el uso de filtro permite que los valores de frecuencia no salgan de la banda muerta. Además, la frecuencia dentro de la banda muerta no varía bruscamente, es decir cambia suavemente. Ambas estrategias están orientadas a suavizar las variaciones de potencias del HAE con el uso de un BESS. La cantidad de energía que se necesita para la generación y consumo son similares. El BESS genera 2,16MWh y consume 2,15MWh. Esto genera una descarga de 0,01MWh, que se puede resolver con facilidad. Además, tampoco utilizan mucha potencia, menos del 20MW (valor máximo), por tanto, permite al BESS realizar otras tareas, como la regulación de la potencia reactiva.



**Fig. 10.** Respuestas de frecuencia de un sistema eléctrico de potencia normal con un HAE de 55MW de potencia máxima con el uso o no de un BESS que funciona mediante filtros

El objetivo principal de este artículo es discutir la aplicación de diferentes estrategias de sincronización de un Sistema de Almacenamiento de Energía en Batería de baja capacidad energética con un horno de arco eléctrico para reducir la variabilidad de la potencia activa en hornos de arco eléctrico. Las estrategias con rampas automáticas que usa tiempo de recarga de chatarra y la que usan filtro son las que mejor cumplen con las exigencias para el control de la frecuencia, reducción de la capacidad de almacenamiento y efectucción de alguna tarea más. La mejor de todas son las estrategias que utilizan los filtros. Las estrategias con filtro son la que mostraron mejor adaptación a los cambios del sistema eléctrico de potencia. Debido a su similitud, solo se explica la estrategia con filtro pasa bajo.

Si el sistema es muy débil se puede adaptar el filtro pasa bajo para reducir más las variaciones, que eviten las fluctuaciones de la frecuencia. Esto hace que el BESS suba la capacidad de energía desde 2,16 a 2,57MWh, que no es mucho. Es decir, las estrategias que utilizan filtro son la que con mayor facilidad se adaptaría a los cambios del sistema de potencia y de las condiciones de operación del propio horno. En próximos trabajos se tiene que investigar en que constante de tiempo aplicar según las capacidades o condiciones del sistema de potencia cuando se esté realizando la fundición.

### CONCLUSIONES

El trabajo arroja las siguientes conclusiones:

- Se puede sincronizar los sistemas de almacenamiento de baja capacidad de energía utilizando rampas sincronizadas con el horno de arco eléctrico o utilizando filtros pasa o baja variabilidad.
- Los BESS de baja capacidad de almacenamiento de energía disminuye las variaciones de potencia activa para reducir las fluctuaciones de frecuencia, y al mismo tiempo, deben mantener el estado de carga luego de cada cesta.
- Los sistemas de almacenamiento con rampa manual, pueden generar problemas en lugar de soluciones si la rampa no es bien sincronizada con el horno.
- Los sistemas de almacenamiento que emplean la rampa automática luego de que el horno termina de fundir, introducen un estrés al maestro hornero porque no puede reducir el tiempo entre cesta y cesta.
- Los sistemas de almacenamiento que emplean la rampa automática antes de que el horno termina de fundir, no son capaces de recargarse y quedar con el mismo estado de carga luego de su utilización.

- El empleo de filtros pasa bajas como estrategia de control de la variabilidad de la potencia activa es el mismo que si se usaran filtros altas.

## REFERENCIAS

- [1] Ramírez Torres J.A., *et al.* “Desoxidación primaria del metal líquido durante el vertido del Horno de Arco Eléctrico a la cuchara y proceso de ajuste y afino de Horno Cuchara”. *Innovación tecnológica*. 2021, vol. 27, n. 11, p.1-10. ISSN 1025-6504. Disponible en: <http://portal.amelica.org/ameli/jatsRepo/442/4422091007/index.html>
- [2] Enríquez-Berciano JL, *et al.* “Monografías sobre Tecnología del Acero”. Parte I: Acería Eléctrica. Universidad Politécnica de Madrid, Inc. Creative Commons, 2009. Disponible en: <https://oa.upm.es/1929/>
- [3] Thomas García C. “Tema 5. Introducción al proceso electrometalúrgico”. Universidad de Cantabria, Inc. Creative Commons, 2019. Disponible en: [https://ocw.unican.es/pluginfile.php/1992/course/section/1705/tema\\_05.pdf](https://ocw.unican.es/pluginfile.php/1992/course/section/1705/tema_05.pdf)
- [4] Astigarraga Urquiza J. “Horno de arco para fusión de acero”. Teoría, cálculo y aplicaciones: McGRAW-HILL; 1995. ISBN 84-481-1728-X. Disponible en: <https://ekoizpen-zientifikoa.ehu.es/documentos/64f76a3d2a81967cfc61b70d>
- [5] Issouribehere PE, *et al.* “Aspectos de calidad de servicio en hornos de arco eléctrico como cargas en los sistemas de distribución”. *CIER*. 2009, n. 52, p. 87-94. ISSN 0142-0615. Disponible en: [http://sg.cier.org.uy/Publicaciones/Revista.nsf/0a293b20eacdf8a903257133003ea67d/b55406873a6e7fbc8325764e00638747/\\$FILE/11\\_AspectosdeCalidad.pdf](http://sg.cier.org.uy/Publicaciones/Revista.nsf/0a293b20eacdf8a903257133003ea67d/b55406873a6e7fbc8325764e00638747/$FILE/11_AspectosdeCalidad.pdf)
- [6] Łukasik Z, Olczykowski Z. “Estimating the impact of arc furnaces on the quality of power in supply systems”. *Energies*. 2020; vol. 13, n. 6, p. 1462. DOI 10.3390/en13061462. ISSN 1996-1073. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/6/1462>
- [7] Srivastava A, Singh A. “Harmonics generated by Electric Arc Furnace in Electric Power System - A Review”. *SAMRIDDHI: A Journal of Physical Sciences, Engineering and Technology*. 2019, vol. 11, n. 1, p. 57-62. DOI 10.18090/samriddhi.v11i01.8. ISSN 2454-5767. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/336827936\\_Harmonics\\_generated\\_by\\_Electric\\_Arc\\_Furnace\\_in\\_Electric\\_Power\\_System\\_-\\_A\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/336827936_Harmonics_generated_by_Electric_Arc_Furnace_in_Electric_Power_System_-_A_Review)
- [8] Pérez Donsión M, *et al.* “Harmonics and Flicker in an Iron and Steel Industry with AC arc furnaces”. *Renewable Energy and Power Quality*. 2019, vol. 17, p. 417-422. ISSN 2172-038 X Disponible en: <https://www.donsion.org/investigacion/trabajos/329-19-donsion.pdf>
- [9] Baltasar A, *et al.* “Utilización de dispositivos FACTS en acerías para mejorar su comportamiento técnico económico”. *Ingeniería Energética*. 2010, vol. 31, n. 2, p. 18-25. ISSN 1815-5901. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=329127744003>
- [10] Bharath Singh J., *et al.* “Power Quality Enhancement in Electric Arc Furnace Using Matrix Converter and Static VAR Compensator”. *Electronics*. 2021, vol. 10, n. 9, p. 1125. ISSN 2079-9292. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2079-9292/10/9/1125>
- [11] Virulkar VB, Aware MV. “Modeling and Control of DSTATCOM with BESS for Mitigation of Flicker”. *Asian Power Electronics Journal*. 2010, vol. 4, n. 1, p. 8-15. ISSN 1995-106X. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/228783102>
- [12] Brandão D. A. L., *et al.* “Electric Arc Furnace Reactive Compensation System using True Power Factor - Reactive Compensator Converter”. In 2021 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS). IEEE. 2021 p. 1–8. DOI 10.1109/IAS48185.2021.9677261. ISSN 2576-702X. ISBN 978-1-7281-6401-4. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9677261>
- [13] Abdelmohsen A. M., *et al.* “Comparative Study of SVC and STATCOM Performance on Reactive Power Compensation in Hot Strip Mill”. In 2023 IEEE Conference on Power Electronics and Renewable Energy (CPERE). IEEE. 2023. p. 1-7. DOI 10.1109/CPERE56564.2023.10119542. ISBN 978-1-6654-5233-5. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10119542>
- [14] Torres Breffe O. E., *et al.* “Una solución integral para los problemas de suministro eléctrico de Antillana de Acero”. *Ingeniería Energética*. 2020, vol. 41, n. 2, p. 1-11. ISSN 1815-5901. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=329127744003>
- [15] Espinosa Dominguez J, *et al.* “Use of Battery Energy Storage with Electric Arc Furnace to Improve Frequency Stability of Weak Power System”. *IEEE*. 2021, vol. 21. ISSN 978-1-6654-4875-8. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9640151>
- [16] Hierro C.D., Cepeda J. “Caracterización y simulación de fenómenos dinámicos relacionados con la actuación de un horno de arco eléctrico conectado al sistema eléctrico de potencia de Ecuador”. *Revista Técnica energía*. 2021, vol. 17, n. 2, p. 8-17. ISSN 2602-8492. Disponible en: [http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2602-84922021000100008](http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2602-84922021000100008)
- [17] Martínez I., Guerra L. “Análisis de la regulación primaria de la frecuencia con motores fuel oil y centrales termoeléctricas”. *Ingeniería Energética*. 2008, vol 29, n. 3, p. 26–30. ISSN 1815-5901. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/3291/329127739004.pdf>
- [18] Alayi R., *et al.* “Optimal Load Frequency Control of Island Microgrids via a PID Controller in the Presence of Wind Turbine and PV”. *Sustainability*. 2021, vol. 13, n. 19, p. 10728. ISSN 2071-1050. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/19/10728>

- [19] Sukumar S., *et al.* “Ramp-rate control smoothing methods to control output power fluctuations from solar photovoltaic (PV) sources—A review”. *Journal of energy storage*. 2018, vol. 20, p. 218-229. ISSN 2352-152X. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352152X18302366>
- [20] Brahmendra Kumar G. V., *et al.* “Analysis of control strategies for smoothing of solar PV fluctuations with storage devices”. *Energy Reports*. 2023, vol. 9, p. 163-177. ISSN 2352-4847. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484722025641>
- [21] Abdalla A. A., *et al.* “A Novel Adaptive Power Smoothing Approach for PV Power Plant with Hybrid Energy Storage System”. In *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2023, vol. 14, n. 3, p. 1457-1473. DOI 10.1109/TSTE.2023.3236634. ISSN 1949-3037. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10016214>

### CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses

### CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

**Caridad Baserio González:** <https://orcid.org/0000-0002-4004-9488>

Participó en la ejecución de los trabajos, el análisis de los resultados, la redacción del borrador del artículo, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.

**Julio Espinosa Domínguez:** <https://orcid.org/0000-0003-0696-5009>

Participó en el análisis de los resultados, redacción del borrador y aprobación final del artículo.

**Orlys Ernesto Torres Breffe:** <https://orcid.org/0000-0001-7781-2611>

Diseño de la investigación. Participó en la ejecución de los trabajos, el análisis de los resultados, la redacción del borrador del artículo, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.