

Implementation of a Battery Energy Storage System for Frequency Control

Mauricio Castro, Josué Morales, Mayra Salgado, Jorge Martínez.

Departamento de Ciencias Energéticas y Fluidicas

Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas”

San Salvador, El Salvador

00255711@uca.edu.sv

00002311@uca.edu.sv

00049013@uca.edu.sv

anmartinez@uca.edu.sv

Abstract — The implementation of a control model for a BESS (Battery Energy storage system) is presented, it is incorporated into an electrical power system with two areas of control that include conventional generation and non-conventional renewable power generation in the form of photovoltaic and wind generators, and this is done to study the effects a BESS has on generation control.

The control models presented were simulated using Simulink® and from the results we can observe that the BESS helps to reduce the error in frequency of the power system; This improvement is determined by observing that the use of a BESS reduces the standard deviation and the integral square error of the variation in frequency of the control areas in the power system.

Keywords — BESS, frequency control, AGC, generation control models, renewable energy, energy storage, battery, power system, state of charge.

I. INTRODUCCIÓN

Se estudiará un sistema de almacenamiento de energía, de ahora en adelante llamado BESS por sus siglas en inglés (Battery Energy Storage System), que estará conectado a un sistema eléctrico de potencia (SEP) en el cual estarán representadas fuentes de generación de energía renovable no convencionales y convencionales.

Los efectos técnicos en el SEP debido a un BESS son el propósito del presente trabajo, en especial el control de frecuencia primario y secundario, que se refiere a un corto y mediano periodo de tiempo, mediante una serie de simulaciones que tomaran en cuenta distintos eventos (variación de carga y generación) para determinar el comportamiento del BESS ante estas variaciones respondiendo a sus periodos de carga y descarga.

Debido a que ciertos modelos de BESS representan una alta complejidad para realizar sus simulaciones de forma confiable, se

ha de considerar un modelo que nos permita tener resultados representativos y lograr un equilibrio entre precisión y complejidad.

A. Control de frecuencia

Existe la necesidad de establecer un modelo de generación eléctrica de potencia que permita controlar dos variables de calidad y confiabilidad importantes, la frecuencia del sistema de potencia, y el voltaje de la red, para ello existen dos lazos de control establecidos, control P-F y control Q-V.

El lazo de control Q-V (potencia reactiva-voltaje) hace referencia a establecer un grupo de acciones coordinadas para controlar la potencia reactiva en el SEP, para procurar lograr un perfil de voltaje de los distintos buses tal que se encuentren dentro de límites de operación que dicta el reglamento.

El lazo de control P-F (potencia real-frecuencia) modifica la potencia activa de las unidades generadoras en el SEP mediante la apertura y cierre de válvulas mecánicas que tiene como efecto ajustar la potencia entregada (o absorbida) por un generador.

El control que se estudia en esta investigación se refiere al lazo de control P-F.

B. Modelo de control para un SEP de dos áreas

El desarrollo expuesto a continuación sobre el control de generación primario y secundario de frecuencia para un sistema de potencia ha sido tomado de Elgerd [1].

La ecuación (1) define la variación de frecuencia en función de los componentes de potencia involucrados en compensar la diferencia de potencia entre la potencia de demanda y la de generación.

$$\Delta F = \left(\frac{K_P}{1 + s T_p} \right) * (\Delta P_g - \Delta P_d - \Delta P_{tie}) \quad (1)$$

Donde ΔP_g es la potencia de generación, ΔP_d es la potencia de demanda de la carga y ΔP_{tie} es la potencia de interconexión entre las dos áreas de control.

Las constantes K_p y T_p representan la inercia del sistema y el amortiguamiento por carga, se definen según las ecuaciones (2) y (3).

$$T_p = \frac{2H}{f^0 D} \quad (2)$$

$$K_p = \frac{1}{D} \quad (3)$$

Adonde H es la inercia del sistema, D es el amortiguamiento por la carga dependiente de la frecuencia y f^0 es la frecuencia nominal del sistema.

Existen dos tipos de control para frecuencia, primario y secundario.

El control primario se logra con una realimentación de la variación de frecuencia hacia el gobernador de las turbinas mediante un término llamado característica de regulación R que define la rapidez con la que las compuertas de la turbina responderán para evitar que el valor de frecuencia varíe sin control.

Utilizando el teorema del valor final se puede obtener para control primario el valor de frecuencia en estado estable se calcula según la ecuación (4).

$$\Delta f_{ss} = -\frac{\Delta P_d}{D + \frac{1}{R}} \quad (4)$$

El control secundario se encarga de eliminar el error de frecuencia y regresarlo a su valor nominal mediante una segunda realimentación de la variación de frecuencia hacia un integrador de primer grado con una ganancia integral negativa K_i , este integrado es conocido como AGC cuya la salida es la consigna de potencia que permite corregir el error discutido.

Para poder calcular la potencia de interconexión entre las áreas de control se toma la diferencia de variaciones de frecuencia y se multiplica por el coeficiente de sincronización que nos limita la cantidad máxima de potencia que puede existir en la interconexión, esto según la ecuación (5).

$$\Delta P_{tie12} = \frac{2\pi T_{12}^0}{s} (\Delta F_1 - \Delta F_2) \quad (5)$$

$$T_{12}^0 = P_{max,12} \cos(\delta_1^0 - \delta_2^0) \quad (6)$$

Los ángulos δ_1^0 y δ_2^0 son los ángulos fasoriales nominales de los voltajes de barra que unen ambas áreas y $P_{max,12}$ es la potencia máxima permitida en la interconexión.

Se debe definir además el error de control de área (ACE) el cual tiene dos términos

$$ACE_i = \Delta P_{tie,i} + B_i \Delta F_i \quad (7)$$

Adonde B_i es el bias de frecuencia que permite modificar la participación del error en la frecuencia en el error total de área.

Al unir las ecuaciones antes expuestas como bloques de control se tiene el modelo de control completo para un SEP de dos áreas de control como se muestra en la figura 1.

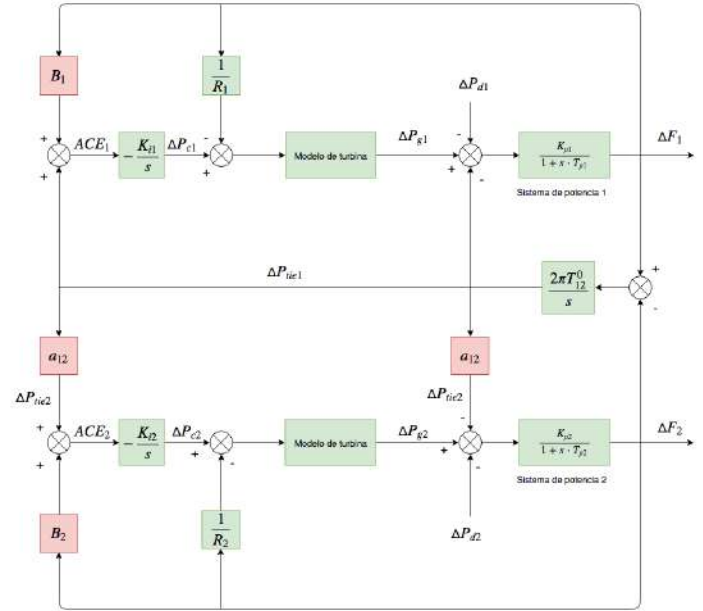


Fig.1 Modelo de control para SEP con dos áreas de control

C. Generador fotovoltaico

Un generador fotovoltaico consiste de múltiples celdas de silicio conectadas en paralelo-serie, las cuales al interactuar con la energía solar la convierten en energía eléctrica.

La potencia entregada por el generador puede ser expresada según la ecuación (8)

$$P_{fv} = \eta S \varphi [1 - 0.005(T_a + 25)] \quad (8)$$

Adonde:

η : eficiencia del panel solar

S : Area de superficie del panel

φ : irradiancia

T_a : Temperatura ambiente

Al desprestigiar las no linealidades del modelo se puede definir la función de transferencia de la ecuación (9) [2]

$$\frac{\Delta P_{fv}}{\Delta \varphi} = \frac{K_{fv}}{1 + s T_{fv}} \quad (9)$$

Adonde K_{fv} se obtiene con la ecuación (8) y T_{fv} es el retraso de tiempo de respuesta de esta generadora

D. Generador eólico

La potencia que entrega el generador eólico depende de la velocidad del viento y puede ser representada según la ecuación (10)

$$P_{TurbinaEólica} = \frac{1}{2} \rho A_r C_p V_{viento}^3 \quad (10)$$

Adonde:

- ρ : Densidad del aire
- A_r : Area util del aspa
- C_p : Coeficiente de potencia
- V_w : Velocidad del viento

Y se tiene entonces la función de transferencia

$$\frac{\Delta P_{eolico}}{\Delta V_{viento}} = \frac{K_{eolico}}{1 + s T_{eolico}} \quad (9)$$

Adonde K_{eolico} se obtiene con la ecuación (10) y T_{eolico} es el retraso de tiempo de respuesta para esta turbina.

E. Modelo de control para circuito de batería

El modelo de circuito para la batería del BESS se muestra en la figura 2 [3].

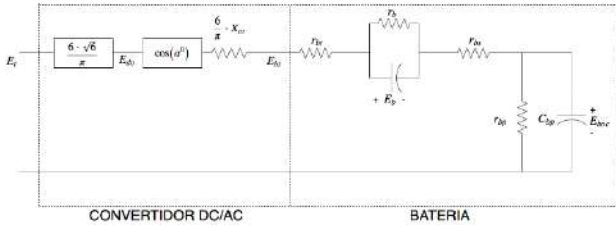


Fig.2 Modelo de circuito para batería

Desde el cual se obtiene que la potencia que entrega o absorbe el BESS depende de la corriente y el voltaje de terminales de la batería según la ecuación (11).

$$P_{bess} = \frac{6\sqrt{6}}{\pi} E_t I_{bess} \cos(\alpha^0) \quad (11)$$

Se construye un modelo de control a partir de este circuito y se muestra en la figura 3

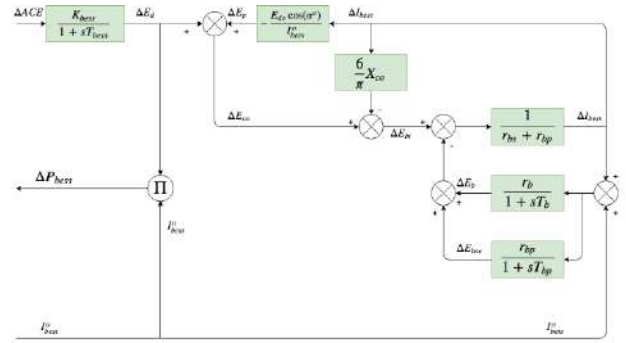


Fig.3 Modelo de control para circuito de batería

La señal de entrada para este modelo es el ACE y la salida es un voltaje que utiliza para multiplicarse a la corriente y poder obtener así la potencia según la ecuación (12)

$$\frac{\Delta P_{BESS}}{\Delta E_d} = \frac{K_{BESS}}{1 + s T_{BESS}} \quad (12)$$

F. Modelo de control para estado de carga de BESS

El estado de carga se modela como un integrador y dos modos de funcionamiento, el de carga y descarga

Para el modo de carga se introduce un término de eficiencia que representa las pérdidas térmicas de este proceso electroquímico.

$$\Delta SOC_{ch} = \left(\frac{\eta_{bess}}{3600 * W_{bess}} * \frac{1}{s} \right) * \Delta P_{bess} \quad (13)$$

Para el modo de descarga no se toma en cuenta la eficiencia por lo que se asume que no existen pérdidas de energía para este proceso.

$$\Delta SOC_{dch} = \left(\frac{1}{3600 * W_{bess}} * \frac{1}{s} \right) * \Delta P_{bess} \quad (14)$$

Se necesita definir un estado de carga inicial que para esta investigación se tomó como 0.5 para dar un margen superior e inferior.

$$\Delta SOC = SOC^0 + \Delta SOC_{ch} - \Delta SOC_{dch} \quad (15)$$

Cabe destacar que solo uno de los dos modos de operación puede estar funcionando a la vez por lo que se necesita de una estrategia de control [4].

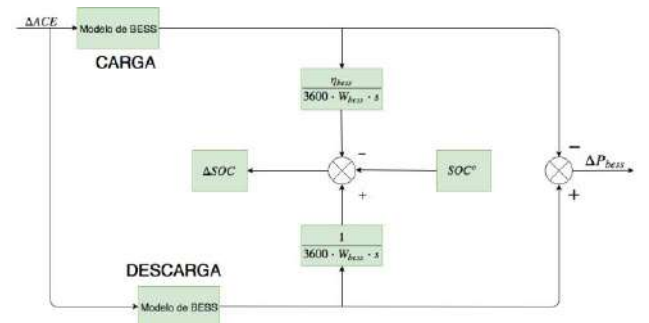


Fig.4 Modelo de control para carga y descarga

G. Estrategia de carga y descarga de BESS

La estrategia de carga y descarga se refiere a la selección del comportamiento del BESS dependiendo de que esté sucediendo en el SEP para ese momento, es decir, si se necesita que se inyecte o absorba energía; Se muestra esta estrategia en la figura 5

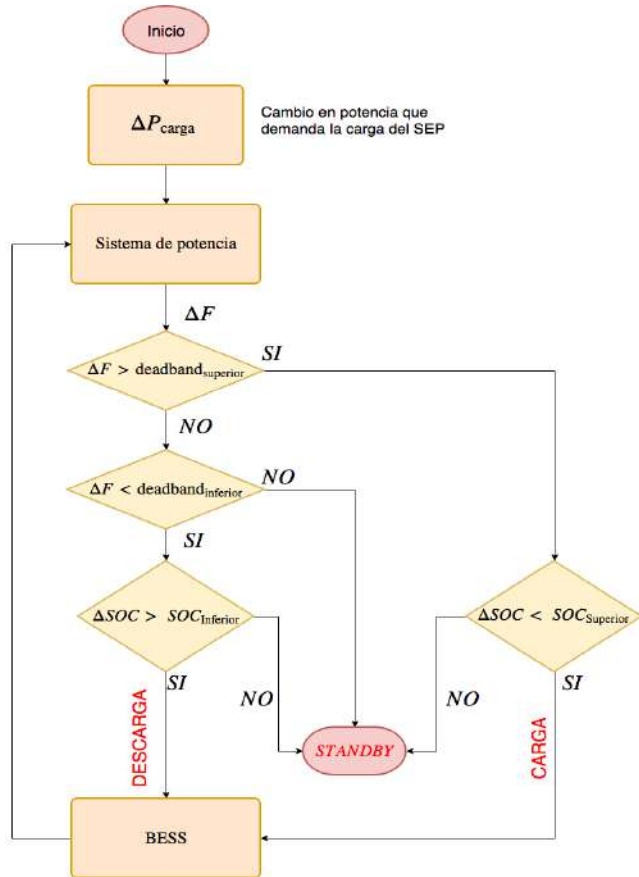


Fig.5 Estrategia de carga y descarga para BESS

Se introduce el concepto de banda muerta la cual se refiere a un intervalo de valores para los cuales el BESS no reacciona, este se definió como ± 1 mHz [4].

II. MATERIALES Y METODOS

Las medidas de desempeño estadístico que se utilizaron para medir los resultados de las simulaciones se definen a continuación

A. Error integral cuadrático

El error integral cuadrático (del inglés Integral Square Error-ISE) es una medida de desempeño para un sistema de control que acumula el cuadrado del error en el tiempo.

$$ISE = \int \Delta F^2 dt \quad (16)$$

Los sistemas de control diseñados para minimizar el ISE se optimizan de tal forma que los errores de gran magnitud se corrijan de forma rápida ya que son los que incrementan numéricamente este indicador [5].

Se evaluará el comportamiento de este indicador al compararlo en las simulaciones del SEP cuando está conectado el BESS y cuando no está conectado para poder determinar si el BESS ofrece una reducción a las variaciones de frecuencia, ya que si el error disminuye el ISE también disminuye.

Entre menor sea el ISE mejor será el desempeño del sistema.

B. Desviación estándar

Reconociendo de la ciencia estadística a la desviación estándar σ como indicador de la dispersión de una muestra poblacional con base en el promedio de la misma, siendo este último indicador de tendencia central, el valor de σ permite identificar que tanto se aleja un valor de una muestra del promedio para una distribución normal. Le permite a este trabajo observar si el BESS mejora el desempeño del sistema ya que una disminución en la desviación estándar de las muestras de error de frecuencia indicaría que esta se aleja menos de su valor nominal.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (x - \mu)^2} \quad (17)$$

Donde x es la frecuencia para cada segundo, μ es el promedio de la frecuencia y n es el número de muestras de desviación de frecuencia. [6]

C. Implementación en Simulink®

Al implementar el desarrollo teórico de los modelos presentados anteriormente obtenemos un programa que nos permite simular para distintos casos el funcionamiento del BESS.

El modelo para el circuito de batería se muestra en la figura 6

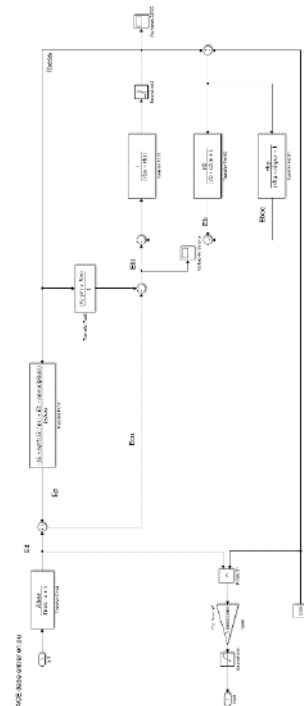


Fig.6 Modelo Simulink® para circuito de batería

El modelo completo de todo el sistema a simular se muestra en la figura 7.

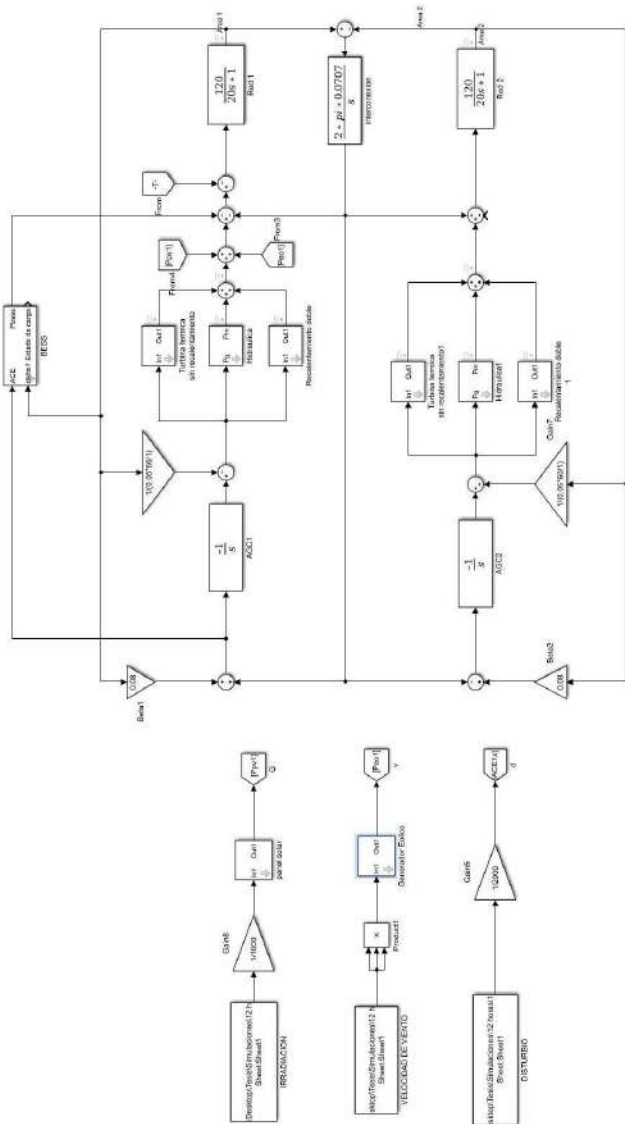


Fig.7 Modelo Simulink® para SEP con BESS y generadoras renovables no convencionales

III. RESULTADOS Y DISCUSION

Las pruebas realizadas se organizaron según la figura 8

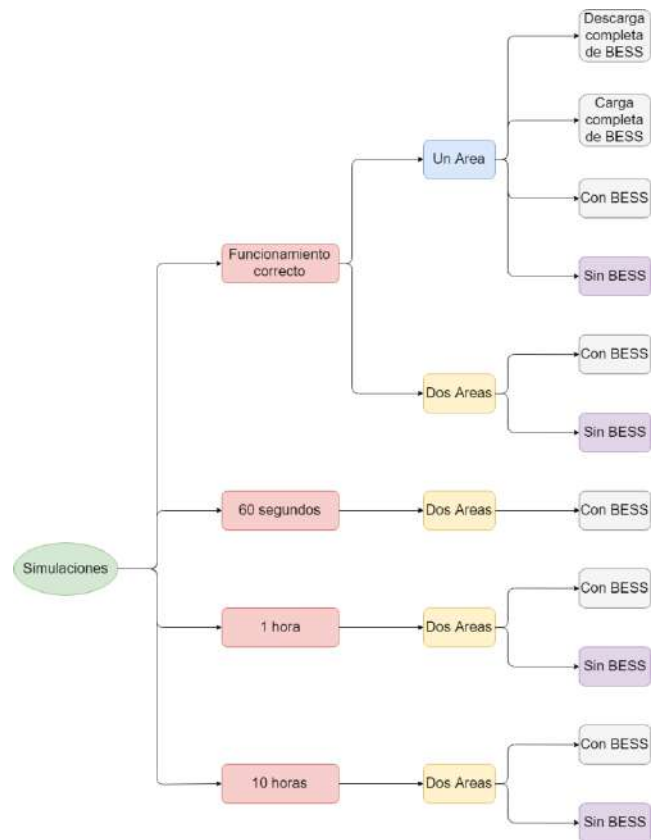


Fig.8 Estructura de pruebas realizadas

Las pruebas de funcionamiento correcto nos permiten evaluar que el comportamiento del BESS sea coherente con lo planteado en la teoría.

Para la prueba de funcionamiento correcto con una área con BESS se puede observar que responde entregando potencia para contrarrestar el ACE según la figura 9.

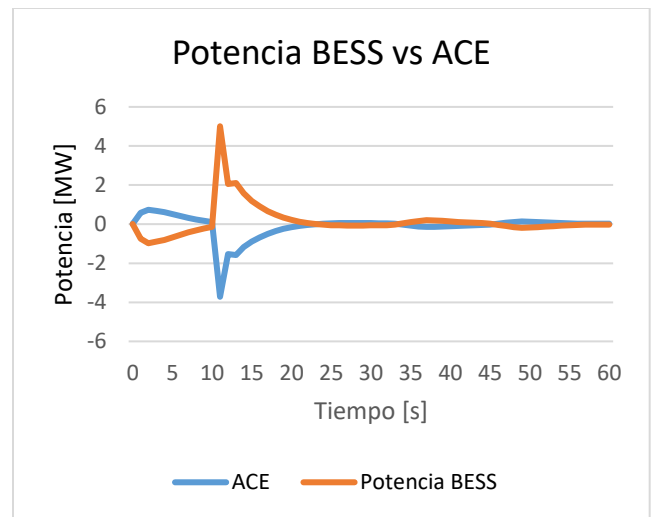


Fig.9 Potencia BESS vs ACE

Se observa también que el estado de carga varía según la potencia que entrega o consume el BESS según la figura 10

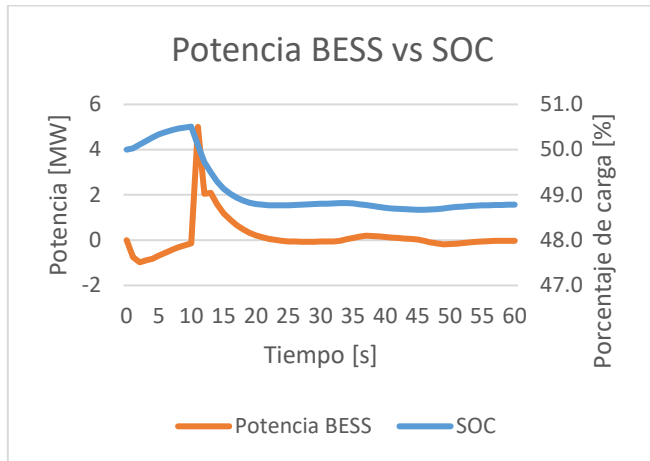


Fig.10 Potencia BESS vs ACE

Con lo que se comprueba que el funcionamiento del BESS está dentro de lo esperado.

Para la prueba de 1 hora se puede observar la mejora en reducción de variación de frecuencia al utilizar el BESS con los resultados mostrados en la tabla I.

TABLA I. Comparación de sistema, prueba de 1 hora

	Promedio del ΔF	Desviación Estándar	ISE
Sin BESS	5.72143E-06	0.0005103	0.0009378
Con BESS	5.94455E-06	0.0003747	0.0005058
Porcentaje de mejora	-	26.56%	46.06%

Luego para la prueba de 10 horas se tienen los resultados de la tabla II

TABLA II. Comparación de sistema, prueba de 10 horas

	Promedio del ΔF	Desviación Estándar	ISE
Sin BESS	2.80262E-07	0.0005023	0.0090839
Con BESS	3.29348E-07	0.0003750	0.0050634
Porcentaje de mejora	-	25.34%	44.25%

De forma gráfica se puede observar que existe una reducción en la variación de frecuencia la utilizar el BESS

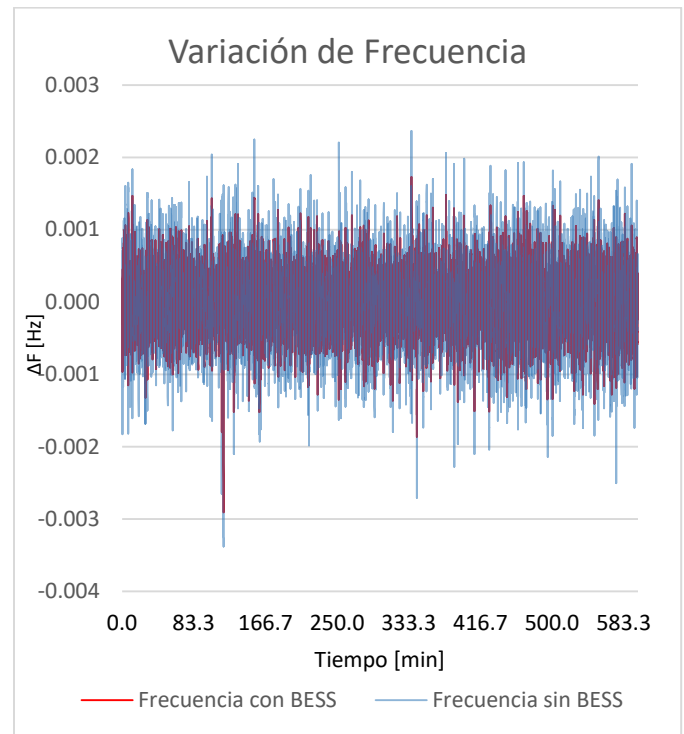


Fig.11 Variación de frecuencia en prueba de 10 horas

Se observa también que el estado de carga tiende hacia la descarga

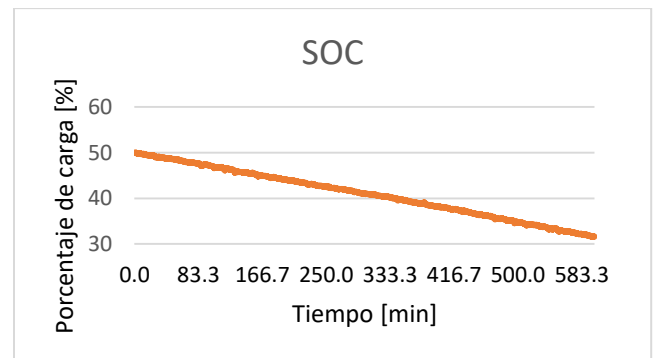


Fig.12 Estado de carga en prueba de 10 horas

IV. CONCLUSIONES

- El modelo propuesto del BESS responde correctamente al ACE por lo que se confirma que el modelo puede ser usado para pruebas y simulaciones.
- El análisis estadístico realizado muestra que el BESS si aporta una mejora a la regulación de frecuencia del Sistema, llegando a alcanzar un 25.34% en reducción de desviación estándar y 44.25% en reducción de ISE.
- El estado de carga del BESS tiende a la descarga debido a que la carga es ineficiente a comparación de la descarga.

- Se propone para futuras investigaciones incorporar un lazo de control al estado de carga para poder mantenerlo al 50%, además profundizar en factores de modelado y dimensionamiento para poder determinar cuáles son los valores óptimos tomando en cuenta factores económicos para la selección y compra de estos sistemas.

REFERENCIAS

- [1] O. I. Elgerd, *Electric Energy Systems Theory: An Introduction*, New York: McGraw-Hill, 1971.
- [2] R. Prakash, M. Soumya y K. Nand , *Small-signal analysis of autonomous hybrid distributed generation systems in presence of ultracapacitor and tie-line operation*, India, 2010.
- [3] S. Aditya, «Battery energy storage for load frequency control of an interconnected power system,» West Bengal, 2001.
- [4] S. Singh, S. Chanana, M. Singh y D. Raveendhra, «Operation and control of hybrid wind, diesel, battery energy system connected to microgrid,» dehradun, 2015.
- [5] «Measures of controlled system performance,» 14 junio 2018. [En línea]. Available: http://www.online-courses.vissim.us/Strathclyde/measures_of_controlled_system_pe.htm.
- [6] R. A. Johnson, *Probabilidad y estadística para ingenieros*, Mexico: Pearson, 2012.