

# Control de frecuencia de una microred operando en modo isla y con baja reserva rodante

## Frequency control of an isolated microgrid under low spinning reserve

Carrasquero, Mariany<sup>1</sup>; Muñoz, Juan Carlos<sup>\*2</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela

<sup>2</sup>Facultad de Ingeniería Eléctrica, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile

\*juancarlmunoz@ing.puc.cl

### Resumen

*Uno de los principales retos de las microredes operando en forma aislada es mantener la tensión y frecuencia en niveles aceptables ante variaciones normales de la demanda eléctrica, variaciones de fuentes intermitentes de energía (eólico y solar), y contingencias. En este sentido, en este artículo se presenta el diseño de un control para regular la frecuencia de una microred y garantizar niveles aceptables de frecuencia ante diferentes eventos tales como contingencias y variaciones de cargas. Para este diseño se ha utilizado una microred modelada en el programa MATLAB/Simulink® cuyo control de frecuencia se realiza mediante baterías de autos eléctricos que representan cargas bidireccionales para el sistema y también mediante un generador diésel. El esquema de control propuesto como alternativa en el presente artículo incluye baterías dedicadas que integran sistemas de generación eléctrica a partir de energía renovable. Este control con batería dedicada mejora el desempeño de frecuencia de la microred, especialmente cuando existe una baja reserva rodante de potencia si se compara con un control basado en autos eléctricos. Adicionalmente, el control propuesto permite crear una inercia ficticia en los generadores eólicos o solares, permitiendo un control rápido de frecuencia.*

**Palabras claves:** control de frecuencia, baterías, microredes, energía renovable.

### Abstract

*One of the main challenges of isolated microgrids is to maintain voltage and frequency at acceptable levels in the face of normal variations in electricity demand, variations in intermittent sources of energy (wind and solar), and contingencies. In this sense, this article presents the design of a control to regulate the frequency of an isolated microgrid and ensure acceptable levels of frequency regardless of the occurrence of events such as contingencies and load variations. For this design, we use a microgrid modeled in the MATLAB/Simulink software®, which includes a frequency control based on electric vehicles representing bidirectional loads. Alternatively to this frequency control, in this paper, we propose a frequency control scheme which includes dedicated batteries and integrates renewable generation. This control improves the frequency performance of the microgrid, specially when there are low power spinning reserves as compared to a frequency control based on electric vehicles. Moreover, the proposed control creates a fictitious inertia for wind and solar generators, which allows for a fast frequency control.*

**Keywords:** frequency control, battery, microgrids, renewable energy

### 1 Introducción

Con el avance de la generación distribuida se han originado dos nuevos conceptos en la generación de energía; las redes inteligentes y las microredes. Las redes inteligentes

buscan integrar eficazmente los consumidores y la generación, haciendo que los flujos de potencia sean bidireccionales y que el consumidor decida cuándo es económicamente factible conectarse o desconectarse de la red. Por otra parte, las microredes se podrían definir como la interconexión de un conjunto de generación de energía eléctrica local, sistemas de almacenamiento de energía eléctrica (baterías) y cargas de

consumo, comúnmente incluyendo generación eléctrica renovable. Las microrredes pueden estar conectadas a la red de distribución principal, o pueden funcionar de forma autónoma, es decir, desconectadas de la red, a esto se le denomina microrred aislada. Una de las principales ventajas del funcionamiento autónomo de una microrred es que ofrecen la posibilidad de llevar energía eléctrica a lugares remotos y a islas físicas. Por otro lado, una de las principales desventajas es la dificultad en mantener niveles aceptables de tensión y frecuencia ante eventos normales y contingencias. Este no es un problema para las microrredes conectadas a la red eléctrica, ya que los parámetros de voltaje y frecuencia están regulados por ésta. Evidentemente, para microrredes operando en forma aislada de la red, se hace necesario un control robusto para mantener estos parámetros dentro de límites aceptables y garantizar la estabilidad y calidad de energía para los consumidores. Este control debe funcionar especialmente al producirse variaciones de demanda, las cuales son comunes en los sistemas de distribución de energía eléctrica. También es muy importante que el control sea capaz de regular la frecuencia ante eventos que produzcan una baja reserva rodante de potencia, lo cual implica un estrés elevado en la microrred. Bajo estas condiciones, en éste artículo se propone un control de frecuencia que usa baterías dedicadas a dicho control. De esta forma, cuando exista una baja reserva rodante, la batería pueda garantizar la regulación necesaria de la frecuencia. Por otro lado, se propone el uso de un porcentaje de la energía producida por fuentes renovables para efectuar la carga de estas baterías. Esto permite crear una inercia ficticia que se traduce en una regulación rápida de la frecuencia. De igual forma es necesario que el control regule la carga y descarga de energía en las baterías debido a la intermitencia propia de las fuentes renovables de energía (solar y viento), considerando también la arquitectura propia de la microrred en estudio, y minimizando el desgaste prematuro de las baterías.

El resto de este artículo se divide de la siguiente forma: en la Sección 2, se describe y analiza la arquitectura de la microrred de Matlab usada como ejemplo. Adicionalmente se presentan los eventos que afectan la frecuencia de la microrred en estudio. En la sección 3 se presenta el esquema de control de frecuencia propuesto mediante el uso de fuentes de energía renovables y baterías, y se simulan los eventos descritos en la sección 2. En la sección 4 se analizan los resultados obtenidos, y finalmente en la Sección 5, se presentan las conclusiones y recomendaciones.

## 2 Arquitectura de la microrred

El diseño de esquemas de control para microrredes depende de la arquitectura de la misma; es decir, a partir de los componentes se diseña el control. Para este diseño se usó una microrred típica proporcionada por MathWorks (MathWorks, s.f). Esta microrred se divide en cuatro componentes importantes: un generador diésel actuando como generador base de potencia, una granja solar combinada con un parque eólico, un sistema V2G (vehículos a la red) instalado junto a una

carga que modela la demanda eléctrica de la microrred. El tamaño de la microrred representa aproximadamente una comunidad de mil hogares durante un día de bajo consumo en primavera o en otoño. Hay 100 vehículos eléctricos en el modelo base, lo que significa que hay una relación 1:10 entre los vehículos y las casas. Este es un escenario posible en un futuro previsible (MathWorks, s.f).

### 2.1 Sistema de generación diésel de la microrred

El generador diésel presente en la microrred posee una potencia nominal de 15 MW y tiene como objetivo equilibrar la potencia producida y la potencia consumida. También, el generador diésel actúa como generador de respaldo para balancear la microrred ante las variaciones de las fuentes intermitentes de energía. El modelo del generador diésel está compuesto por una máquina asincrónica, un motor diésel que incluye el regulador de velocidad y la excitación de la máquina. La velocidad de la máquina, que esta intrínsecamente ligada a la frecuencia, está determinada por la constante de inercia  $H$  y por la diferencia entre el par mecánico  $T_m$  que resulta de la potencia mecánica aplicada  $P_m$  y el par electromagnético interno  $T_e$ . La desviación de frecuencia del sistema se monitorea observando la velocidad del motor de la máquina asincrónica.

### 2.2 Sistema de generación a partir de energía solar.

La microrred incluye una granja fotovoltaica que produce energía eléctrica a partir de la irradiación solar. La producción de energía de esta granja depende de tres factores: el tamaño del área cubierta por los paneles solares, la eficiencia de estos, y los datos de irradiación. Estos datos se pueden introducir como variables en la configuración de la granja. Los datos de irradiación siguen un patrón de distribución normal, en donde la intensidad de irradiación más alta se alcanza al medio día. La granja posee una capacidad instalada de 8MW, una eficiencia del 10%, y un área cubierta de 80000 m<sup>2</sup>.

### 2.3 Sistema de generación a partir de energía eólica

El parque eólico incluido en la microrred posee una capacidad instalada de 4,5 MW, y es un modelo simplificado que genera energía utilizando una relación lineal entre la velocidad nominal del viento y la potencia nominal producida. El parque eólico cuenta con una protección que funciona cuando la velocidad del viento alcanza un valor máximo; es decir, cuando la velocidad del viento alcanza 15 m/s el parque eólico se desconecta de la microrred. Al igual que la granja solar, los datos de velocidad del viento son introducidos como un perfil de viento, siendo la velocidad nominal del viento 13,5 m/s.

### 2.4 Sistema de carga bidireccional: V2G

La microred modelada posee una carga bidireccional; es decir, una carga capaz de consumir y de aportar energía a la red. Esta carga es representada con los vehículos a la red (V2G). El sistema V2G tiene dos funciones en la microred: controlar la carga de las baterías conectadas, y utilizar la potencia disponible para regular la frecuencia cuando ocurre algún evento.

Cada auto eléctrico consume 40 kW, para un total de 4MW. Los autos que participan en la regulación de frecuencia de la microred deben tener un estado de carga de la batería de 95% y tienen capacidad de 85 kWh. En este sentido, siempre existe algún auto entregando potencia activa a la microred, participando así en la regulación de frecuencia. Por otra parte, la microred posee la opción de trabajar sin el sistema de V2G, en cuyo caso la regulación de frecuencia depende únicamente del sistema de generación diésel.

### 2.5 Sistema de cargas de la microred

El sistema de cargas se compone de carga residencial y una máquina asincrónica que se utiliza para representar el impacto de una carga inductiva industrial (por ejemplo, un sistema de ventilación en la microred). La carga residencial sigue un perfil de consumo con un factor de potencia de 0.95, y un patrón típico similar al consumo familiar normal; es decir, el consumo es bajo durante el día, aumenta a un pico durante las 15 a 20 horas, y disminuye en la madrugada. El perfil de carga permite fijar una potencia nominal en este caso 10 MW, también es necesario especificar el intervalo de tiempo utilizado para los datos de consumo, los cuales están contenidos en un vector expresado en p.u.

La máquina asincrónica tiene una potencia nominal de 0,16 MVA y está controlada por una relación cuadrada entre la velocidad del rotor y el par mecánico.

## 3 Eventos que afectan la frecuencia de la microred

En las simulaciones se consideran tres eventos que afectan la frecuencia durante el tiempo de simulación correspondiente a 24 horas. Estos eventos se describen a continuación:

### 3.1 Inicio de la actividad industrial (arranque de la máquina asincrónica)

Las cargas industriales normalmente se activan durante las primeras horas del día. En las simulaciones se asume que la máquina asincrónica arranca a la tercera hora en la mañana, lo cual resulta en una disminución de la frecuencia del sistema con respecto de su valor nominal.

### 3.2 Sombrado parcial en la granja solar

La irradiación solar sigue un patrón de distribución normal

donde la irradiancia más alta se alcanza al medio día. Sin embargo, en este artículo se simula un sombreado parcial durante ese periodo de alta irradiancia solar. Este sombreado parcial crea un desbalance entre la generación y la demanda, afectando la frecuencia.

### 3.3 Desconexión del parque eólico

La velocidad del viento presenta una considerable variación durante el día. En este artículo se asume que en la hora 22 de simulación se supera la velocidad nominal establecida para el parque eólico. Esto provoca la desconexión de la granja eólica, causando desviaciones de frecuencia debido a la disminución de potencia activa que se entrega a la carga.

## 4 Descripción del sistema de control primario de frecuencia propuesto.

Tal y como se mencionó anteriormente, la microred presenta un esquema de control de frecuencia basado en generadores diésel y vehículos eléctricos. Estos controles son capaces de regular efectivamente la frecuencia ante eventos que no reduzcan considerablemente la reserva rodante de potencia en la microred. Sin embargo, cuando dicha reserva rodante se reduce significativamente, estos controles pierden efectividad. Para solventar esta situación, en este artículo se propone un control primario de frecuencia que incorpore sistemas de almacenamiento de energía, destinados a almacenar el 20% de la energía eléctrica producida por el parque eólico para regular la frecuencia ante los distintos eventos planteados.

Una granja eólica con almacenamiento de energía podría ser capaz de trabajar como actualmente lo hace una central convencional con fuentes de energía no renovables; es decir, podría ser capaz de proveer soporte de reserva rodante y contribuir con la regulación primaria y secundaria de frecuencia (Sarausa y col., 2008). Existen dos modos de control que incluyen sistemas de almacenamiento: el modo de control continuo, y el control ante contingencias severas. El modo de control continuo requiere una actuación permanente del dispositivo de almacenamiento para balancear los cambios continuos de demanda y contingencias leves. Por otro lado, el control ante contingencias requiere un grado menor de actuación del sistema de almacenamiento, pero los requerimientos de potencia y de respuesta dinámica son sensiblemente mayores. A este último se le llama también control de largo alcance que actúa como reserva rodante y reserva de regulación secundaria ante contingencias severas o cortes de viento (Sarausa y col., 2008).

### 4.1 Dimensionamiento del sistema de almacenamiento

El sistema de almacenamiento seleccionado para la regulación de frecuencia es una batería debido a que, en la actualidad, existen parques eólicos que ya incluyen este tipo de tecnologías. Un ejemplo del uso de baterías en generación

éolica es el parque eólico experimental en Navarra, España, que utiliza baterías de iones de litio con la capacidad de almacenar hasta 1MW de potencia proveniente de las turbinas eólicas (Factor Energía, s.f). Por otro lado, (Zhao y col., 2019) han demostrado mediante simulaciones, la efectividad de la regulación de frecuencia mediante el uso de baterías.

Para introducir una batería de iones de litio al modelo de microred es necesario realizar un dimensionamiento previo. El procedimiento que se sigue para dimensionar baterías parte del hecho de que la batería almacenará el 20% de la potencia producida por el parque eólico; es decir, 0,9MW. Para calcular la capacidad de una batería en A-h es necesario multiplicar la corriente en A que entrega la batería por el número de horas que entrega dicha corriente. El resultado obtenido es la medida de la cantidad de electricidad que puede almacenar la batería (Torres 2008). En este sentido, para el dimensionamiento de la batería a utilizar en el control, fue necesario partir de la potencia de carga disponible proveniente del parque eólico de la microred. Este parque eólico produce una potencia nominal de 4,5MW, y se asigna un 20% de esta potencia a la carga de la batería; es decir, 0,9MW (cuando el parque produce la potencia nominal). También se asigna una descarga máxima del 80% de la capacidad de la batería con el objetivo de alargar su vida útil, lo que corresponde a 720 kW. Adicionalmente, se estableció un régimen de descarga de 10 horas (tiempo durante el cual se descargará la batería. Considerando estos parámetros, se propone una batería con una capacidad de 7,2MWh, que para una tensión típica de 0,45kV DC (Sarausa y col., 2008), se corresponde con una capacidad de 16,67kA-h. Por último, es de suma importancia establecer la temperatura a la cual trabajará la batería, la cual se estableció en 20°C.

#### 4.1 Esquema de control de frecuencia de la microred a través de almacenamiento de energía en baterías

Un esquema de control primario debe ser capaz de detectar una desviación de frecuencia de su valor nominal. Una vez presente esta desviación, se deben tomar acciones para restablecer la frecuencia a 60Hz, o algún valor cercano en el cual la operación continua no cause daños.

El esquema de control propuesto está diseñado considerando condiciones de operación con poca reserva rodante en generación diésel. De esta forma, se busca que el control pueda regular la frecuencia bajo condiciones limitadas de control de frecuencia por parte del generador diésel. Esto se logra almacenando en una batería de iones de litio un porcentaje de la potencia producida por el parque eólico. Esta potencia es luego inyectarla a la microred para restablecer la frecuencia a su valor nominal ante cualquiera de los eventos que afectan a la microred. En la figura 1 se muestra un diagrama de bloques del control diseñado. Se parte de un  $\Delta f$  que es la diferencia entre la frecuencia del sistema y la nominal, y posteriormente esta señal pasa a través del control preestablecido como la potencia de regulación de la microred  $P_{reg}$ .

Esta potencia de regulación pasa a través de la primera entrada de un selector que se mantiene su primera entrada mientras no exista una diferencia grande en  $\Delta f$ , si el valor de  $\Delta f$  supera los límites de frecuencia establecidos como seguros, el selector pasa a su tercera entrada que es la suma de  $P_{reg}$  y  $P_{rva}$ , donde  $P_{rva}$  es la potencia proveniente de la batería. Por otra parte, del parque eólico se extrae un porcentaje de potencia que pasa a través de un convertidor de energía y es almacenado en la batería. Para entregar la potencia proveniente de la batería a la red, es necesario un administrador de energía que verifica el estado de carga de la batería; es decir, si la batería tiene 20% de carga no se entrega potencia a la microred y se debe esperar a que la batería cargue 45% para entregar potencia de regulación a la microred. Esto con el objetivo de alargar la vida útil de la batería y que la misma cumpla con los ciclos de carga y descarga.

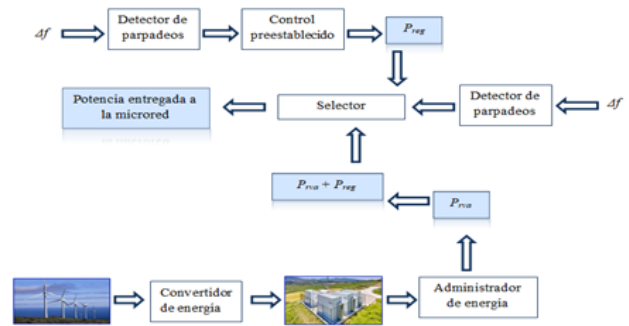


Fig. 1: Esquema de control de frecuencia diseñado.

El esquema de control de frecuencia propuesto fue modelado en el entorno MATLAB/Simulink en tres etapas. La primera etapa es el control preestablecido de la microred, el cual se muestra en la figura 2. Este control ha sido modificado para no limitar la potencia de salida con la potencia aportada por el sistema V2G. La segunda etapa corresponde a la extracción de potencia del parque eólico y almacenamiento de esta en una batería. Finalmente, la tercera etapa es el proceso de selección de la señal de potencia que se entregará a la microred.

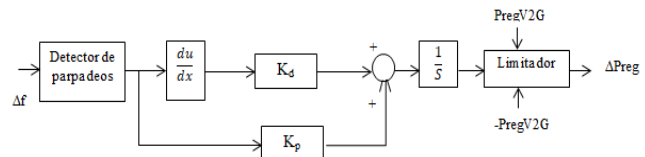


Fig. 2: Diagrama de bloques del control incluido en la microred.

#### 4.2 Respuesta de frecuencia de la microred ante el control propuesto

El esquema de control diseñado se simuló considerando un escenario sin penetración V2G y con una baja reserva rodante. Esta baja reserva rodante se logra incrementando la demanda en un 20%. Los resultados muestran que la respuesta de frecuencia del control ante los eventos simulados

se mantiene entre los límites seguros de operación, con una respuesta temporal suficientemente pequeña. Estos resultados se describen a continuación:

**Efecto del evento 1:** El primer evento en afectar la frecuencia es el arranque de la máquina asíncrona a la tercera hora en la mañana, lo cual provoca una disminución en la frecuencia debido al aumento de la potencia activa consumida por la carga. En la figura 3 se puede observar la actuación del control ante este evento.

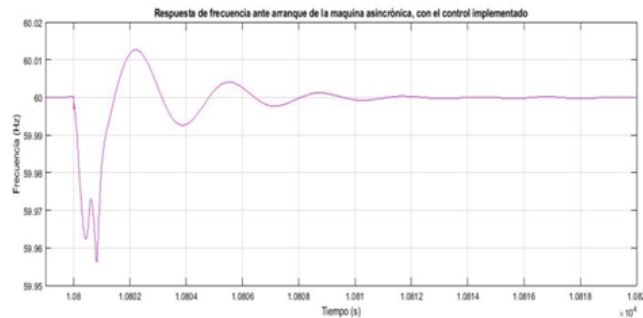


Fig. 3: Restablecimiento de la frecuencia ante el evento 1.

**Efecto del evento 2:** El segundo evento es un sombreado parcial que dura cinco minutos en despejarse y paraliza la producción de energía eléctrica a partir de energía solar. El sombreado disminuye el valor de frecuencia (inicio del sombreado) debido a que la potencia producida es menor que la consumida por la carga, y aumenta la frecuencia debido a que, al despejarse el sombreado, se produce la potencia nominal de la granja solar. La respuesta de frecuencia se puede observar en las figuras 4 y 5.

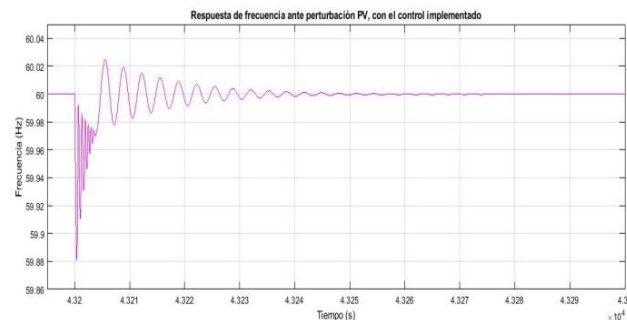


Fig. 4: Restablecimiento de la frecuencia ante el evento 2 (Inicio del sombreado parcial)

**Efecto del evento 3:** El evento 3 se basa en la desconexión del parque eólico debido a una excesiva velocidad del viento. Este evento, al igual que el caso del sombreado parcial, disminuye la frecuencia en el instante de la desconexión y la aumenta al presentarse la reconexión (Figuras 6 y 7). Para mantener la frecuencia dentro de los límites aceptables, el generador diésel y la batería entregan potencia a la microred durante la desconexión. Sin embargo, durante la reconexión del PE, solamente el generador diésel entrega potencia debido a que la batería comienza a cargarse.

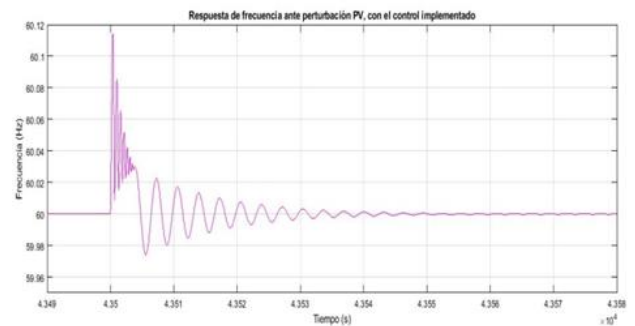


Fig. 5: Restablecimiento de la frecuencia ante el evento 2 (Fin del sombreado parcial).

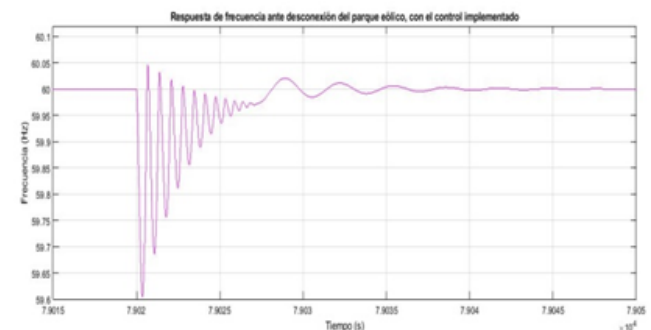


Fig. 6: Restablecimiento de la frecuencia ante el evento 3 (Desconexión del PE).

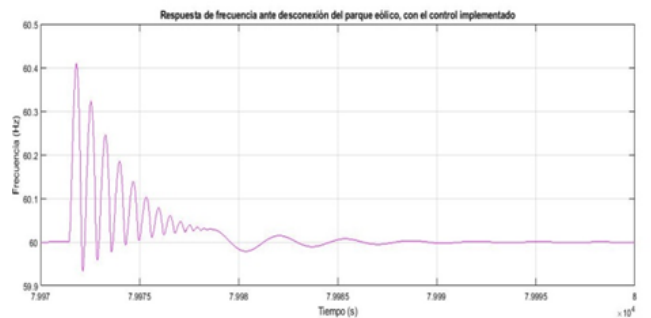


Fig. 7: Restablecimiento de la frecuencia ante el evento 3 (Reconexión del PE).

En la tabla 1 se listan los valores de sobrefrecuencia y subfrecuencia alcanzados debido al efecto de cada evento, incluyendo el tiempo que toma el control en reponer la frecuencia a su valor nominal. De igual manera, en la tabla 2, se puede observar los valores de potencia activa que aportan a la regulación de frecuencia el generador diésel y la batería. En esta tabla también se puede observar el consumo de potencia activa por parte de la carga, además de la potencia generada por el parque eólico y la granja solar.

**Tabla 1:** Valores de frecuencia ante el esquema de control de frecuencia propuesto.

Evento	Subfrecuencia (Hz)	Sobrefrecuencia (HZ)	Tiempo transitorio (s)
Arranque máquina asincrónica	59,96	60,01	10
Inicio del sombreado	59,9	59,99	40
Fin del sombreado	60,02	60,11	30
Desconexión PE	59,62	60,02	20
Reconexión PE	59,95	60,41	20

**Tabla 2:** Valores de potencia activa ante el esquema de control de frecuencia propuesto.

Evento	Potencia carga (MW)	Potencia GD (MW)	Potencia PE (MW)	Potencia GS (MW)	Potencia batería (MW)
Arranque máquina asincrónica	7,214	4,988	2,360	0	0,276
Inicio del sombreado	8,974	2,190	4,000	2,870	0,476
Fin del sombreado	13,11	5,367	3,846	4,020	0,225
Desconexión del parque eólico	0,003	0,244	0	0	0,317
Reconexión del parque eólico	17,160	12,86	4,360	0	0,225

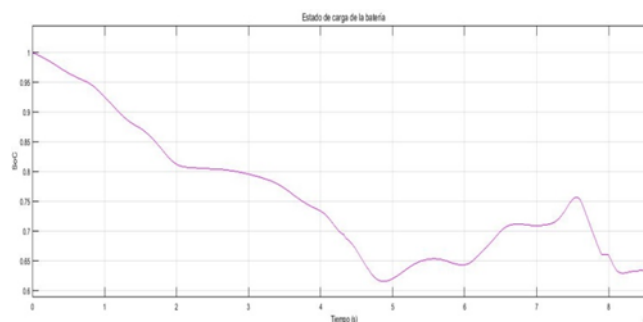
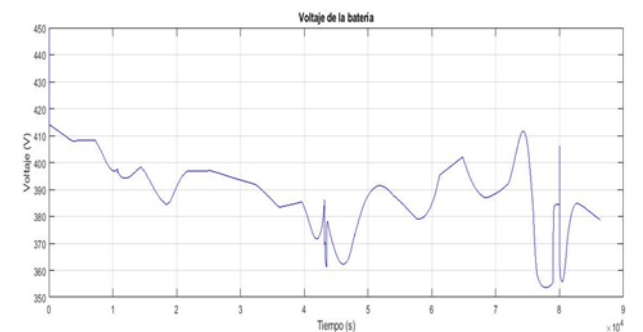
Cabe hacer notar que en el control propuesto se verifica el estado de carga de la batería para garantizar que entregue potencia para regulación únicamente cuando tiene un estado de carga mayor al 45%. Similarmente, el control limita la descarga de la batería a un mínimo de 20% de su valor nominal. La figura 8 muestra el estado de carga de la batería en el periodo de simulación considerado. Nótese en esta figura que el estado de carga de la batería en el instante inicial equivale al 100% de la carga. Por otro lado, Las fluctuaciones del voltaje de la batería durante los periodos de carga y descarga para un tiempo de simulación de 24 horas se pueden observar en la figura 9. Dicho voltaje depende de la corriente de entrada a la misma, la cual a su vez depende de la potencia producida por el parque eólico. Sin embargo, se puede observar que el voltaje de la batería en la mayor parte del tiempo es bastante cercano al valor nominal (0,45kV).

## 5 Discusión de los aspectos claves en los resultados obtenidos

Los resultados de las simulaciones haciendo uso del entorno simulink/MATLAB® evidencian el desempeño adecuado del esquema de control primario propuesto para una microrred operando en modo isla. Este control está basado en el uso de baterías que almacenan un porcentaje de la potencia producida por un parque eólico presente en la microrred. La

energía almacenada en las baterías es luego utilizada para regular la frecuencia ante los eventos considerados. Como se puede observar en los resultados presentados en la sección anterior, el control propuesto es capaz de regular la frecuencia en forma satisfactoria. De hecho, las desviaciones de la frecuencia respecto a la frecuencia nominal son relativamente pequeñas, registrándose máximos de 0,68% por encima y de 0,63% por debajo de La frecuencia nominal, lo cual demuestra que el agregar baterías como parte de la reserva rodante, se mejora la respuesta de frecuencia ante contingencias.

Al comparar los resultados obtenidos con el control propuesto y los obtenidos mediante el control basado en V2G, las desviaciones de frecuencia para este último control son considerablemente mayores, alcanzando 1,83% por encima y 1,24% por debajo de la frecuencia nominal. El tiempo transitorio para reestablecer la frecuencia también aumenta considerablemente para el control basado en V2G, alcanzando los 70s. Estos resultados, indican que el aporte de reserva rodante del sistema V2G para ésta microrred es insuficiente para una regulación efectiva de la frecuencia. Se infiere por lo tanto que una mayor cantidad de vehículos eléctricos conectados a la microrred podría mejorar la respuesta del control V2G.

**Fig. 8:** Estado de carga de la batería.**Fig. 9:** Voltaje de la batería.

## Conclusiones

Las microrredes operando en forma aislada requieren controles de frecuencia y tensión para garantizar que sus niveles se mantengan en valores adecuados en condiciones normales de

operación y cuando se presentan contingencias. El diseño de estos controles para una microred depende básicamente de la arquitectura de la misma. Específicamente, los parámetros relevantes para llevar a cabo estos diseños son la potencia nominal total que es capaz de aportar la microred, además de cómo se distribuye ésta potencia entre fuentes despachables de energía, principalmente diésel, y fuentes intermitentes. También es fundamental conocer el tipo y patrón temporal de los consumos de los niveles de demanda eléctrica y hacer predicciones de demandas futuras.

El control diseñado debe aportar potencia activa que se encuentra en forma de reserva rodante en la microred. En este sentido, los controles pueden implementarse a través de máquinas rotatorias que se encuentran en las pequeñas centrales de generación, sistemas de almacenamiento de distinta naturaleza que involucren fuentes de energía renovable, o sistemas de cargas bidireccionales que pueden aportar o consumir potencia activa de la microred.

Para la microred en estudio, se propuso un esquema de control capaz de detectar la desviación de frecuencia en un periodo de tiempo pequeño (control primario). También el control es capaz de restablecer la frecuencia a su valor nominal con un tiempo transitorio que evita daños en las máquinas del sistema y en los artefactos de los usuarios de la microred (control secundario). Este control se lleva a cabo a través del uso de una batería que almacena energía proveniente del parque eólico. No obstante, dicho control se puede diseñar almacenando energía proveniente de la granja solar o utilizando otro tipo de sistema de almacenamiento como un súper capacitor o un volante de inercia. Esto debido a que las microredes se caracterizan por incluir dispositivos de electrónica de potencia como inversores y convertidores los cuales permiten una gama de opciones para controlar los parámetros eléctricos fundamentales.

En éste artículo se demostró que los controles que poseen baterías de suficiente capacidad representan un control robusto, especialmente ante eventos que involucren una baja reserva rodante proveniente de fuentes convencionales de potencia. Para ello es fundamental el correcto dimensionamiento de la batería a partir del cálculo de la capacidad, la tasa de descarga, y sus niveles de tensión. Adicionalmente, se debe maximizar la vida útil de la batería evitando su descarga total y estableciendo límites de carga para regulación de frecuencia mediante un administrador de energía.

Un análisis económico de la implementación del control diseñado basado en baterías con respecto a otras opciones disponibles es necesario para complementar éste estudio. Dicho análisis se deja para una futura investigación.

### Agradecimiento

Juan C. Muñoz agradece el financiamiento por parte de la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica Conicyt/Fondap/15110019.

### Referencias

- Aguado M, Casado S, Garde R, García G, Pellejero I, (s.f) Modelado y caracterización de una batería de ión-litio en una microred, Departamento de integración de la red CENER, España.
- Ahumada C, 2013, Diseño de estrategias de control predictivas para microredes mediante curvas de estadismo. Tesis de MSc, Universidad de Chile, Santiago de Chile.
- Andreu J, Kortabarria I, Ibarra E, 2011, Método Droop: análisis del control wireless para la conexión en paralelo de convertidores de potencia, Universidad del País Vasco, Bilbao.
- Arrizubieta L, 2015, Sistema de control jerárquico de una microred en Conferencia en el Simposio CEA de Ingeniería de Control y las diversas formas de Energía.
- Barrera F, 2016, Control primario con pendiente variable aplicado en microredes aislada. Trabajo de grado no publicado. Universidad de Chile, Santiago de Chile.
- Belmans R, Brabandere K, Bolsens B, Driesen J, Prodanovic M, Van den Keybus J, 2005, Small signal stability of grid with distributed low-inertia generators taking into account line phasor dynamics, en CIREN 18th International Conference on Electricity Distribution.
- Berbel N, Castilla M, De Vicuña L, Guerrero J, Matas J, Miret J, 2015, Output impedance of parallel – connected ups inverter with wireless load-sharing control, IEEE transactions on industrial electronics, Vol. 52, No. 4
- Berbel N, De Vicuña L, Guerrero J, Matas J, Sosa J, 2006, Wireless – control strategy for parallel operation of distributed generation inverters en IEEE International symposium on Industrial Electronics, Dubrovnik.
- Blaabejerg F, Luna A, Rodríguez P, 2012, Control of power Converters in AC Microgrids, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 27, No. 11.
- Bottrell N, Green T, Yang P, Xu Z, Zhao Z, 2015, Control strategy of energy storage system for frequency support of autonomous microgrid en 18th Conference on Electrical Machines and System, Pattaya.
- Cui H, Gao C, Li P, Wang H, Wang W, 2010, A droop control method of microsources based on divided self-adjusting slope coefficient, en International Conference on Power System Technology.
- Deltavolt (s.f), Baterías para sistemas solares y eólicos, Disponible: [deltavolt.pe/energia-renovable/baterias](http://deltavolt.pe/energia-renovable/baterias)
- De los Santos A, Rodríguez E, Visairo N, 2015, Modelado, control y simulación de los elementos básicos que componen una microred CD. Pistas Educativas, Instituto Tecnológico de Celaya, Vol. 112.
- Dimeas A, Hatziargyriou N, Irvani R, Katiraei F, 2008, Microgrid management, Power and Energy Magazine, IEEE, vol.6.
- Dingkun L, Shengkui P, Yaoquin J, 2011, Improved droop control of parallel inverter system in standalone microgrid en 8th International Conference on power electronics. ECCE Asia.

Domínguez C, 2012, Control jerárquico de potencias en microrredes aisladas. Trabajo de grado no publicado. Universidad de Sevilla, Sevilla.

Dulce F, 2015, Modelamiento y control de una microrred en modo isla. Trabajo de grado no publicado. Universidad De Los Andes, Bogotá.

Estrada H, Guzmán B, Lozano J, Pizano A, Zamora E, (s.f), Control de generación de una microrred eléctrica conformada por fuentes renovables de energía. Trabajo de grado no publicado. Universidad de Guanajuato, Guanajuato, México.

Factor energía: Por fin hay otra luz, 2017, Parque eólico con almacenamiento en baterías, pionero en Navarra. Disponible en: [www.factorenergia.com/es/blog/noticias/parque-eolico-baterias-energias-renovables/](http://www.factorenergia.com/es/blog/noticias/parque-eolico-baterias-energias-renovables/)

Fehlandt S, 2012, Desarrollo de simulador integrado de microrredes inteligentes. Trabajo de grado no publicado. Universidad de Chile, Santiago de Chile.

Zhao H, Hong M, Lin W, Loparo K, 2019, Voltage and Frequency Regulation of Microgrid With battery Energy Storage Systems, IEEE Transactions on smart grid, Vol.10, No.1.

**Recibido:** 10 de noviembre de 2020

**Aceptado:** 05 de marzo de 2021

**Muñoz, Juan Carlos:** Ph.D. en ingeniería Eléctrica y de Computación, University of Waterloo, ON, Canadá, 2013. Post-doctorado, University of Waterloo, 2015. Postdoctorado Pontificia Universidad Católica de Chile, 2019-presente. Santiago-Chile.

**Carrasquero, Mariany:** Ingeniero electricista, Universidad de Los Andes, Venezuela 2018. Correo electrónico: [mca-rasq@chilquinta.cl](mailto:mca-rasq@chilquinta.cl)