



UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**DISEÑO DE UN ESQUEMA DE CONTROL PRIMARIO DE
UNA MICRORRED OPERANDO EN MODO ISLA.**

Br. Mariany Saray Carrasquero Ramírez

Mérida, Mayo 2018



UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**DISEÑO DE UN ESQUEMA DE CONTROL PRIMARIO DE
UNA MICRORED OPERANDO EN MODO ISLA.**

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

Br. Mariany Saray Carrasquero Ramírez

Tutor: PhD. Juan Carlos Muñoz

Mérida, Mayo 2018

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**DISEÑO DE UN ESQUEMA DE CONTROL PRIMARIO DE UNA MICRORED
OPERANDO EN MODO ISLA.**

Br. Mariany Saray Carrasquero Ramírez

Trabajo de Grado, presentado en cumplimiento parcial de los requisitos exigidos para optar al título de Ingeniero Electricista, aprobado en nombre de la Universidad de Los Andes por el siguiente jurado.

Prof. Juan Carlos Muñoz

Prof. Pedro Mora

Prof. Ernesto Mora

www.bdigital.ula.ve
A Diego y Ani, los amores de mi vida

AGRADECIMIENTOS

A Dios, la energía vital de mi existencia, estoy sumamente agradecida porque incluiste en mi vida el plan de hacer lo que me apasiona, y para compartir esa pasión pusiste en mi vida seres hermosos que me ayudaron a crecer.

A mi mami, la hermosa, la comprensiva, la cariñosa, los adjetivos buenos no me alcanzan para describirte, gracias mi bella por creer en mí, te amo infinitamente.

A mi papá, el Señor Diego, porque este viaje empezó a tu lado y gracias a los valores que tú me enseñaste hoy cumpla la primera de muchas metas, no hay un día que no te recuerde, espero que me estés viendo con una sonrisa, mi amor por ti es tan grande como el universo.

A mis hermanos gracias por confiar, apoyar y querer a su hermanita menor, espero poder retribuir tanto amor.

A mis sobrinos por ser especialistas en producir felicidad, en especial a Antonella, mi compañera de aventuras.

A mi tío Noé por convertirse en luz cuando todo estaba oscuro, gracias por compartir conmigo tanta nobleza.

A mi tía Lina y mis primos, por ser fuente de buena vibra, los quiero mucho.

A mis amigos de Chachopo, porque fueron aire fresco cuando los necesité y a mis amigos de Trujillo por adoptarme como una más, ustedes son mi familia en la Universidad.

Al Prof. Gamboa por recorrer conmigo todo el camino hasta hoy, gracias Profe por su paciencia.

Al Prof. Juan Carlos por guiarme en el proceso de trabajo de grado, gracias por compartir conmigo sus conocimientos.

Br. Mariany Saray Carrasquero Ramírez. DISEÑO DE UN ESQUEMA DE CONTROL DE UNA MICRORED OPERANDO EN MODO ISLA. Universidad de Los Andes. Tutor: Ph.D Juan Carlos Muñoz. Mayo 2018.

RESUMEN

El presente trabajo de grado documenta el estado de arte de las microredes; asimismo se encarga de analizar los distintos controles de frecuencia que se pueden aplicar para que las mismas proporcionen energía eléctrica de alta calidad. De igual manera documenta un modelo de microred que incluye el programa MATLAB/Simulink® y propone distintos escenarios de estudio en los cuales existen eventos que representan perturbaciones a la frecuencia, es decir, desvían a la misma de su valor nominal. La microred con la cual se desarrolló el presente trabajo de grado posee un mecanismo de regulación de frecuencia a través de un sistema de vehículos eléctricos que representan cargas bidireccionales, este control se estudió a fondo con el objetivo de diseñar un sistema de regulación alternativo para la microred. El esquema de control primario propuesto como alternativa en el presente trabajo incluye baterías que integran sistemas de generación de energía eléctrica a partir de energía renovable mejorando la confiabilidad de la microred, por otra parte se estudia el comportamiento del control diseñado ante escenarios que representan el patrón variable de los consumos, además de escenarios que simulan la intermitencia del recurso primario de generación al utilizar energía solar y eólica, se comprueba que éste tipo de controles representa una opción factible para regular frecuencia debido a que el tiempo transitorio para reponer la frecuencia a su valor nominal es pequeño y disminuye los valores de sobre y subfrecuencia alcanzados durante los eventos.

Descriptores: Control primario de frecuencia, control secundario de frecuencia, sistemas de almacenamiento, control frecuencia/potencia, cargas bidireccionales, reserva rodante.

ÍNDICE GENERAL

APROBACIÓN.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
RESUMEN.....	v
 INTRODUCCIÓN.....	 1
Capítulo	pp
1. GENERALIDADES.....	3
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	4
1.3 OBJETIVOS.....	5
1.3.1 General.....	5
1.3.2 Específicos.....	5
1.4 METODOLOGÍA.....	5
1.5 ALCANCE.....	7
1.6 LIMITACIONES.....	7
 2. MARCO TEÓRICO.....	 8
2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....	8
2.2 BASES TEÓRICAS.....	14
2.2.1 Generación distribuida.....	14
2.2.2 Sistemas de generación basados en energías renovables.....	14
2.2.3 Equilibrio entre demanda y generación.....	15
2.2.4 Límites de frecuencia permisibles.....	15
2.2.5 Microredes.....	16
2.2.6 Arquitectura típica de una microred.....	20
2.2.7 Convertidores.....	22
2.2.8 Control de las microredes.....	23

2.2.9 Aspectos significativos de las cargas.....	30
3. ANÁLISIS DE LA ARQUITECTURA DEL MODELO DE MICRORED: COMPONENTES, CONTROLES IMPLÍCITOS, EVENTOS QUE AFECTAN LA FRECUENCIA Y ESCENARIOS DE ESTUDIO.	32
3.1 EL PROGRAMA MATLAB®	32
3.1.1 Herramienta Simulink	32
3.1.2 Librería Simscape Power System	33
3.2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE LA MICRORED EN ESTUDIO.....	33
3.2.1 Sistema de generación Diesel.	34
3.2.2 Sistema de generación a partir de energía solar.....	35
3.2.3 Sistemas de generación a partir de energía eólica.....	36
3.2.4 Sistema de carga bidireccional: V2G	37
3.2.5 Sistema de cargas de la microred.....	39
3.3 EVENTOS QUE AFECTAN LA FRECUENCIA DE LA MICRORED	40
3.3.1 Inicio de la actividad industrial (arranque de la máquina asincrónica).....	41
3.3.2 Sombreado parcial en la granja solar	41
3.3.3 Desconexión del parque eólico.	42
3.4 CONTROLES IMPLÍCITOS Y ESCENARIOS DE ESTUDIO IMPLEMENTADOS EN LA MICRORED.....	42
3.4.1 Escenario 1: Con reserva rodante y penetración V2G	43
3.4.2 Escenario 2: Menor reserva rodante y penetración V2G	50
3.4.3 Escenario 3: Con reserva rodante y sin penetración V2G	56
3.4.4 Escenario 4: Menor reserva rodante y sin penetración V2G	61
4. DISEÑO DE ESQUEMA DE CONTROL DE FRECUENCIA A TRAVÉS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA EN BATERIAS.....	68
4.1 DESCRIPCIÓN DEL CONTROL INCLUIDO EN LA MICRORED AISLADA.	68
4.2 DESCRIPCIÓN DEL ESQUEMA DE CONTROL PROPUESTO.....	69
4.2.1 Dimensionamiento del sistema de almacenamiento.....	70

4.2.1 Esquema de control de frecuencia de la microred a través de almacenamiento de energía en baterías.	72
4.3 RESPUESTA DE FRECUENCIA DE LA MICRORED ANTE EL CONTROL IMPLEMENTADO.....	74
4.3.1 Balance de la respuesta de frecuencia de la microred con el esquema de control diseñado y sin la actuación del mismo.....	86
4.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	89
4.4.1 Análisis de resultados a través del uso de la matriz FODA	90
CONCLUSIONES.....	93
RECOMENDACIONES	96
REFERENCIAS.....	97

www.bdigital.ula.ve

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig		pp
1.1	Diagrama de bloques metodología de seguida para el diseño del esquema de control.....	6
2.1	Estrategia de control de sistema de almacenamiento de energía para soporte de frecuencia de una microred autónoma.....	13
2.2	Arquitectura de una microred.....	17
2.3	Arquitectura típica de una microred.....	20
2.4	Curvas de estatismo.....	26
2.5	Diagrama de bloques del gobernador del control <i>droop</i>	27
2.6	Característica $P-f$ con control <i>droop</i>	28
2.7	Esquema de una batería y su controlador.....	29
2.8	Comportamiento típico de las cargas residenciales.....	31
3.1	Microred utilizada para el desarrollo del control primario.....	34
3.2	Sistema de generación diesel.....	35
3.3	Perfil de irradiancia de la granja solar.....	36
3.4	Perfil de velocidad del viento.....	37
3.5	Carga bidireccional (V2G).....	38
3.6	Gestión de carga del sistema V2G.....	39
3.7	Perfil de carga residencial.....	40
3.8	Potencia de salida granja solar.....	41
3.9	Potencia de salida del parque eólico.....	42
3.10	Frecuencia de la microred, escenario 1.....	43
3.11	Potencia activa de la carga, escenario 1.....	44
3.12	Desviación de frecuencia producida por el evento 1, escenario 1.....	45
3.13	Desviación de frecuencia producida por el evento 1, escenario 1.....	45
3.14	Desviación de frecuencia producida por el evento 2 (inicio del sombreado parcial).....	46
3.15	Desviación de frecuencia producida por el evento 2 (fin del sombreado parcial).....	46
3.16	Potencia de la microred (inicio del sombreado parcial), evento 2.....	47
3.17	Potencia de la microred (fin del sombreado parcial), evento 2.....	47
3.18	Desviación de frecuencia producida por el evento 3 (desconexión del PE).....	48
3.19	Desviación de frecuencia producida por el evento 3 (reconexión del PE).....	48
3.20	Potencia de la microred (desconexión del PE), evento 3.....	49
3.21	Potencia de la microred (reconexión del PE), evento 3.....	49
3.22	Desviación de frecuencia producida por el evento 1.....	51
3.23	Potencia de la microred, evento 1.....	51
3.24	Desviación de frecuencia producida por el evento 2 (Inicio sombreado parcial).....	52

3.25	Desviación de frecuencia producida por el evento 2 (Fin sombreado parcial)	52
3.26	Potencia de la microred ante evento 2 (Inicio sombreado parcial).....	53
3.27	Potencia de la microred ante evento 2 (Fin sombreado parcial).....	53
3.28	Desviación de frecuencia producida por el evento 3 (Desconexión del PE)	54
3.29	Desviación de frecuencia producida por el evento 3 (reconexión del PE).....	54
3.30	Potencia de la microred ante evento 3 (Desconexión del PE).....	54
3.31	Potencia de la microred ante evento 3 (reconexión del PE).....	55
3.32	Desviación de frecuencia producida por el evento 1.....	56
3.33	Potencia de la microred, evento 1.....	56
3.34	Desviación de frecuencia producida por el evento 2 (Inicio sombreado parcial)	57
3.35	Desviación de frecuencia producida por el evento 2 (Fin sombreado parcial)....	57
3.36	Potencia de la microred ante evento 2 (Inicio sombreado parcial).....	58
3.37	Potencia de la microred ante evento 2 (Fin sombreado parcial).....	58
3.38	Desviación de frecuencia producida por el evento 3 (Desconexión del PE)	59
3.39	Desviación de frecuencia producida por el evento 3 (reconexión del PE).	59
3.40	Potencia de la microred ante evento 3 (Desconexión del PE).....	60
3.41	Potencia de la microred ante evento 3 (reconexión del PE).....	60
3.42	Desviación de frecuencia producida por el evento 1	62
3.43	Potencia de la microred, evento 1.....	62
3.44	Desviación de frecuencia producida por el evento 2 (Inicio sombreado parcial)	63
3.45	Desviación de frecuencia producida por el evento 2 (Fin sombreado parcial)...	63
3.46	Potencia de la microred ante evento 2 (Inicio sombreado parcial).....	64
3.47	Potencia de la microred ante evento 2 (Fin sombreado parcial).....	64
3.48	Desviación de frecuencia producida por el evento 3 (Desconexión del PE)	65
3.49	Desviación de frecuencia producida por el evento 3 (reconexión del PE).	65
3.50	Potencia de la microred ante evento 3 (Desconexión del PE).....	66
3.51	Potencia de la microred ante evento 3 (reconexión del PE).....	66
4.1	Diagrama de bloques del control incluido en la microred.....	68
4.2	Control de frecuencia implementado en la microred.....	69
4.3	Circuito equivalente de la batería de iones de litio.....	71
4.4	Esquema de control de frecuencia diseñado.....	73
4.5	Almacenamiento de energía del parque eólico en la batería.....	74

4.6	Selección de señal de potencia que se entregará a la microred.....	74
4.7	Comportamiento de la frecuencia de la microred.....	75
4.8	Comportamiento de la frecuencia ante el evento 1.....	76
4.9	Comportamiento de la potencia activa ante el evento 1.....	76
4.10	Comportamiento de la frecuencia, evento 2 (Inicio del sombreado parcial)	77
4.11	Comportamiento de la potencia activa, evento 2 (Inicio del sombreado parcial).	77
4.12	Comportamiento de la frecuencia, evento 2 (Fin del sombreado parcial)	78
4.13	Comportamiento de la potencia activa, evento 2 (Fin del sombreado parcial).....	78
4.14	Comportamiento de la frecuencia ante el evento 3 (Desconexión del PE).....	79
4.15	Comportamiento de la potencia activa ante el evento 3 (Desconexión del PE).....	79
4.16	Comportamiento de la frecuencia ante el evento 3 (Reconexión del PE)..	80
4.17	Comportamiento de la potencia activa ante el evento 3 (Reconexión del PE)	80
4.18	Estado de carga de la batería.	82
4.19	Voltaje de la batería.....	82
4.20	Voltaje en la carga ante evento 1.....	83
4.21	Voltaje en la carga ante evento 2, inicio sombreado parcial.....	84
4.22	Voltaje en la carga ante evento 2, fin del sombreado parcial.....	84
4.23	Voltaje en la carga ante evento 3, desconexión del PE.....	85
4.24	Voltaje en la carga ante evento 3, reconexión del PE.....	85
4.25	Comparación de respuesta de frecuencia ante el evento 1.....	86
4.26	Comparación de respuesta de frecuencia ante el evento 2 (inicio sombreado parcial)	87
4.27	Comparación de respuesta de frecuencia ante el evento 2 (fin del sombreado parcial)	87
4.28	Comparación de respuesta de frecuencia ante el evento 3 (desconexión del PE)	88
4.29	Comparación de respuesta de frecuencia ante el evento 3 (reconexión del PE)	88

INDICE DE TABLAS.

Tabla	pp
2.1	Límites permisibles de frecuencia.....	15
3.1	Número de usuarios para cada perfil.....	38
3.2	Valores de frecuencia en el escenario 1, ante los diferentes eventos....	50
3.3	Valores de frecuencia en el escenario 1, ante los diferentes eventos...	55
3.4	Valores de frecuencia en el escenario 1, ante los diferentes eventos...	61
3.5	Valores de frecuencia en el escenario 1, ante los diferentes eventos...	67
4.1	Valores de frecuencia ante el esquema de control de frecuencia propuesto	81
4.2	Valores de potencia ante el esquema de control de frecuencia propuesto.....	81
4.3	Comparación entre respuesta del control propuesto y el control preestablecido	89
4.4	Matriz FODA aplicada al esquema de control de frecuencia que incluye sistema de almacenamiento.....	91
4.5	Matriz FODA aplicada al esquema de control de frecuencia que incluye sistema V2G.....	92

www.bdigital.ula.ve

INTRODUCCIÓN.

La energía eléctrica se ha convertido en un recurso indispensable para la sociedad, sin embargo ésta ha evolucionado en muchos ámbitos y las redes eléctricas requieren apearse a esa evolución. Tradicionalmente la generación de energía eléctrica estaba desplazada a grandes centrales alejadas de los centros de consumo debido a la dificultad para encontrar fuentes de energía primaria, por ello era necesaria la existencia de un sistema de transmisión para llevar la energía generada hasta los consumidores, actualmente se ha desarrollado la aplicación de generación distribuida que consiste en generar electricidad cerca de los centros de consumo y a partir de generadores de pequeña capacidad, con lo que se plantea resolver problemas existentes en los sistemas de transmisión y hacer accesible la energía eléctrica a lugares que aun actualmente se consideran remotos.

Con el avance de la generación distribuida se han originado dos nuevos conceptos en la generación de energía; las redes inteligentes y las microrredes. 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 microrredes se podrían definir como la interconexión de un conjunto de generación de energía eléctrica local, sistemas de almacenamiento y cargas de consumo, normalmente las microrredes se basan en incluir generación eléctrica alternativa.

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 grandes ventajas del funcionamiento autónomo de una microrred es que hacen posible que la energía eléctrica llegue a lugares remotos y a islas físicas, claros

ejemplos de ello son la isla de Kodiak en Estados Unidos en donde opera una microred eléctrica que genera 28 MW a partir de energía eólica e hidráulica (ABB, 2014) o el poblado de Huatacondo donde opera la primera microred aislada de energías no convencionales de Chile, población que antes de la instalación de la microred no poseía energía eléctrica (Universidad de Chile, 2010).

Durante el tiempo que las microredes se encuentran conectadas a la red de distribución principal los parámetros voltaje y frecuencia están regulados por ésta; sin embargo al trabajar de forma aislada se hace necesario un control robusto para que estos parámetros se mantengan dentro de los límites aceptables y así poder garantizar estabilidad y calidad de energía para los consumidores, este control debe funcionar especialmente al producirse variaciones de carga las cuales son comunes en los sistemas de distribución de energía eléctrica, asimismo es necesario que el control regule el almacenamiento de energía en las baterías debido a que las fuentes de energía renovables no tienen un comportamiento predecible. En ese sentido el diseño de un control para una microred trabajando de forma autónoma se plantea como una de las prioridades en el desarrollo de la misma, resaltando que el diseño del control depende de la arquitectura propia de la microred en estudio y se hace posible a través del trabajo de los inversores aplicando electrónica de potencia. Un control diseñado de forma óptima hace que la microred sea capaz de aportar a las cargas elevada calidad de servicio y a su vez responda de forma eficiente ante los cambios bruscos en las mismas.

El trabajo de grado está compuesto por cinco capítulos; el capítulo I describe el problema en estudio, establece los objetivos, la metodología, el alcance y las limitaciones, el capítulo II describe los antecedentes de la investigación, además explica conceptos necesarios para el desarrollo del proyecto, el capítulo III describe el modelo utilizado, el mismo se encuentra en el entorno Simulink de MATLAB®, igualmente describe cada uno de los escenarios de simulación planteados y los eventos que afectan la frecuencia de la microred, tales como variaciones en la carga residencial o desconexión de las fuentes de energía renovables.

En el capítulo IV se describe el esquema de control primario diseñado, se muestran los resultados obtenidos ante cada uno de los eventos que afectan la frecuencia y se realizan comparaciones con los controles establecidos en la microred; por último se presentan las conclusiones y recomendaciones.

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los sistemas de potencia deben proporcionar energía al usuario cumpliendo diversos estándares, los cuales se verifican monitorizando los parámetros que definen el sistema, es decir, la tensión y la frecuencia; una desviación de estos parámetros implica disminución en la calidad de energía, compromete de forma seria la mayor parte de los artefactos de los consumidores y acorta la vida útil de las máquinas de generación. Tradicionalmente la frecuencia está relacionada con las grandes máquinas sincrónicas presentes en las centrales eléctricas, no obstante las microredes por estar conformadas (en su mayoría) por generación a pequeña escala y además obtenida de energías primarias no convencionales, no cuentan con la regulación de frecuencia impuesta por las máquinas sincrónicas, para ello se hace necesario el diseño de un control primario de la microred que mantenga los parámetros dentro de los límites normales de operación y que sea capaz de restablecer dichos parámetros una vez presentado un cambio en la carga o una perturbación en el sistema. Los valores dentro de los cuales se debe mantener la frecuencia están estandarizados en América Latina, por ejemplo en Colombia, el rango seguro de operación es entre 59,8 y 60,2 Hz (Tirado & Rivera, 2017).

Las microredes normalmente se diseñan con la capacidad de trabajar de forma aislada; en esta configuración es necesaria la intervención de un control jerárquico, es decir una progresión ordenada de controles que se encargan de las distintas funciones según su prioridad en la actividad de la microred, las funciones destacadas son regulación de frecuencia y tensión además de carga y descarga de baterías.

El control de frecuencia de las microredes se puede hacer a través de varias técnicas que se han ido estudiando conforme se desarrollan las mismas, debido a que la configuración de la microred depende de elementos como; el número de consumidores, el tipo de carga al cual proporcionará energía y las distintas fuentes de energía disponibles en la zona, en ese sentido una microred tendrá características distintas a otra aun cuando estén siendo diseñadas por la misma empresa.

1.2 JUSTIFICACIÓN.

El uso de microredes para la integración de fuentes distribuidas de energía impone varios desafíos en el control y protección de dichas microredes. Entre estos desafíos se tienen los flujos de potencia bidireccionales, oscilaciones locales, posibles efectos adversos en la estabilidad al pasar de modo interconectado al modo isla, complejidad de los modelos debido a la necesidad de usar redes desbalanceadas, inercia muy baja debido al uso de convertidores basados en electrónica de potencia para conectar fuentes distribuidas de energía, las incertidumbres asociadas a las cargas y las fuentes renovables no despachables. Estas incertidumbres pueden causar desviaciones en la frecuencia del sistema y tensiones inapropiadas, siendo este problema crítico cuando la microred trabaja en modo isla. Para evitar desviaciones inaceptables en la frecuencia y la tensión, la microred debe ser capaz de mantener el balance de potencia generada y potencia consumida, aun cuando las variaciones de la potencia de carga y de las fuentes intermitentes sean súbitas e impredecibles. El control primario juega un rol fundamental para mantener este balance mediante una actuación rápida de los gobernadores de las turbinas y de los reguladores de tensión para mantener la tensión en los niveles requeridos. La alta inercia que ofrecen los generadores sincrónicos conectados a los sistemas de potencia convencionales, evita cambios bruscos de la frecuencia ante cambios súbitos en las cargas. En el caso de las microredes operando en modo isla, con una baja inercia, la frecuencia puede presentar variaciones inaceptables. Es por ello que en este trabajo de grado se propone modelar un esquema de control primario que permita recuperar la frecuencia y los niveles de tensión ante variaciones súbitas de carga y de la potencia generado

por fuentes intermitentes manteniendo de esta forma el balance de potencia. En el diseño de este control, se aprovechará las ventajas ofrecidas por dispositivos de almacenamiento de energía basados en baterías.

1.3 OBJETIVOS.

1.3.1 General

- Modelar un esquema de control primario para una microred operando en modo isla.

1.3.2 Específicos

- Investigar las configuraciones típicas de las microredes operando en modo isla.
- Modelar una microred, usando sus componentes básicos tales como generadores diesel, generadores intermitentes, baterías y cargas.
- Establecer modelos estocásticos apropiados para las cargas y las fuentes intermitentes de energía asociadas a la microred.
- Proponer un esquema de control primario para mantener el balance de potencia de la microred operando en modo isla, y mantener la tensión en niveles aceptables.
- Modelar el esquema de control propuesto y verificar su funcionamiento.

1.4 METODOLOGÍA.

El desarrollo del diseño del control primario de una microred en modo isla parte de una investigación bibliográfica del estado del arte de las microredes incluyendo las configuraciones típicas y los distintos tipos de control. Para la implementación del control diseñado se empleará una microred cargada en el Simulink de MATLAB® a la cual se puede acceder escribiendo en la ventana de comandos *power_V2G*, en la misma se realizará un estudio de distintos eventos que afectan la frecuencia, una vez obtenida la desviación de frecuencia ante cada una de las perturbaciones del sistema se procederá al diseño y aplicación

del control, es preciso señalar que la microred modelada se encuentra aislada y contiene elementos como generadores diesel, generación alternativa, cargas residenciales, cargas industriales y cargas bidireccionales simuladas como vehículos eléctricos cuyas baterías entregan y consumen potencia de la microred.

La metodología aplicada para el desarrollo del esquema del control primario en modo isla se explica en el siguiente diagrama:

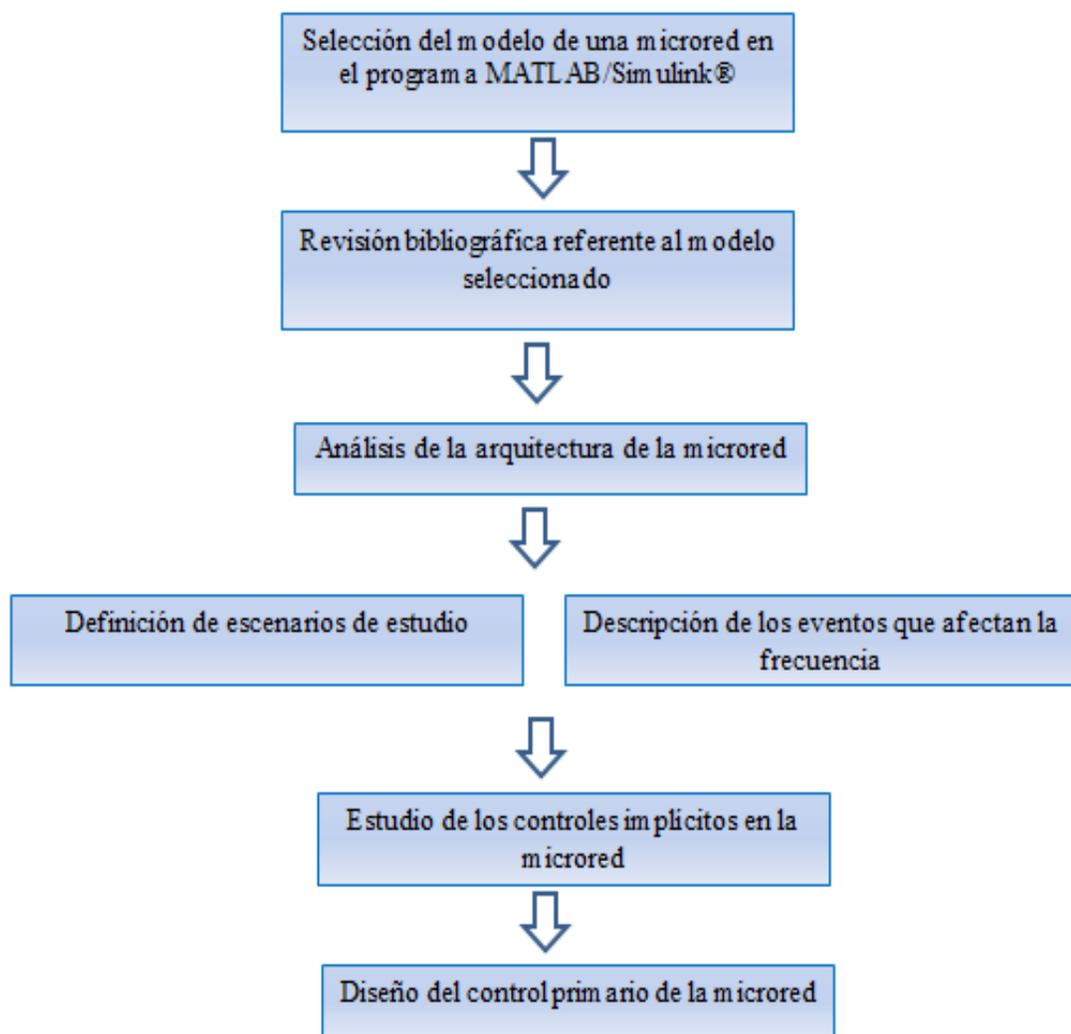


Figura 1.1: Diagrama de bloques metodología de seguida para el diseño del esquema de control.

1.5 ALCANCE.

Implementar un sistema de control primario en una microred trabajando en modo isla, que mantenga los parámetros de frecuencia dentro de los valores que garantizan calidad de energía para los consumidores.

El estudio se basará en simulaciones computacionales haciendo uso del programa Simulink de MATLAB®, el cual es versátil para estudiar este tipo de fenómenos debido a que incluye librerías para simular sistemas de potencia, facilitando el modelado de los componentes básicos de una microred y al mismo tiempo reproduciendo los eventos de demanda comunes en los sistemas de distribución. Se espera que el estudio tenga como resultado la implementación de un control adecuado para la arquitectura de la microred modelada, asimismo se espera que gestione la carga y descarga de los sistemas de almacenamiento presentes en la microred.

1.6 LIMITACIONES

Los controles jerárquicos se diseñan en base a la arquitectura de la microred, por lo tanto se considera ésta una limitación debida a que el control diseñado no podrá ser aplicado a las microredes como un diseño genérico.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

El presente capítulo es dedicado al marco teórico que consiste en una recopilación de conceptos y definiciones, asimismo posee una descripción de la investigación realizada por otros autores como antecedentes del estudio desarrollado.

2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.

A continuación se presentan investigaciones previas que se orientan en el control del modelo en estudio incluido en Simulink de MATLAB®, destacando que los autores se enfocaron de forma descriptiva en el mismo, asimismo se presentan investigaciones que exponen controles de frecuencia a partir de almacenamiento de energía para microrredes.

Rehman & Riaz (2017) realizaron un estudio enfocado en el control de frecuencia de una microrred a través de vehículos a la red (V2G), afirmando que los vehículos pueden ser utilizados para sistemas de suministro de energía y pueden proporcionar beneficios a los propietarios de automóviles. El enfoque del estudio fue alterar las cargas residenciales y los números de vehículos eléctricos, demostrando que el sistema que incluye el V2G proporciona una mejor regulación de frecuencia en microrredes aisladas. Los autores hacen énfasis en la importancia de la regulación de frecuencia, afirmando que las desviaciones de frecuencia pueden causar interrupciones en la velocidad continua del generador síncrono, desequilibrando el sistema de energía y también afectando la precisión del reloj eléctrico.

El modelo estudiado contiene una combinación de recursos de energía renovable, un generador diesel de 15 MW, carga residencial y el agregador EV (cada vehículo eléctrico consume 6,6 kW con una carga directa en el enchufe de 230 V AC), el generador diesel es la única fuente de alimentación que no sufre efectos de las condiciones climáticas y proporciona equilibrio entre carga y generación. La simulación tiene una duración de 24 horas, durante las cuales ocurren diferentes eventos que afectan la potencia de salida de las fuentes, el análisis realizado solamente toma en cuenta las variaciones de potencia en la salida de la granja solar, debido a que es la fuente de energía renovable más irregular de la microred modelada, el mayor porcentaje de irradiación ocurre durante el mediodía y existe un sombreado parcial durante ese periodo (modelado como una reducción del factor de irradiación incidente en los paneles).

El análisis se realizó variando el porcentaje de irradiación en la granja solar haciendo pruebas para cuando la misma proporciona 20%, 50% y 80% de su potencia nominal, la cantidad de vehículos eléctricos que funcionan como controladores de frecuencia primaria también sufrió variaciones utilizando 0, 100 y 200 vehículos para demostrar que a mayor penetración de tecnología V2G la regulación de frecuencia a través de este método es más factible. Tomando en cuenta que el objetivo principal del control es mantener estabilidad entre la demanda y la generación los autores simularon dos escenarios distintos, el primero con un margen de reserva rodante, es decir, cuando la potencia nominal de las cargas residenciales tiene un pico máximo de 10MW obteniendo como resultado que los vehículos eléctricos ayudan a mejorar desviaciones de frecuencia, sin embargo este servicio no es esencial en tanto persiste la frecuencia dentro de los límites permisibles. El segundo escenario es con menos reservas rodantes, es decir, se incrementó la potencia de la carga residencial un 33% que es 13,33 MW las desviaciones de frecuencia son más altas y el impacto de los vehículos eléctricos es más visible pero para estabilizar la frecuencia fue necesaria una flota de 200 V2G. Por último el autor realizó un estudio sin penetración de V2G y con pequeño margen de reserva rodante, obteniendo como resultado que el sistema es incapaz de restablecer su frecuencia a menos que los paneles fotovoltaicos restablezcan su potencia nominal.

Tirado & Rivera (2017) se enfocaron en el estudio de los vehículos eléctricos como controladores de frecuencia en una microred haciendo uso del modelo que, a modo de

ejemplo, proporciona MATLAB®, los autores analizaron la respuesta de frecuencia del sistema ante cada una de las perturbaciones que suceden durante las 24 horas de simulación, las cuales son; la entrada a la red de la máquina asincrónica que representa la carga industrial lo que causa una falla en el generador diesel , un sombreado parcial que afecta el porcentaje de irradiancia de la granja solar provocando una disminución en la producción de energía eléctrica y una desconexión del parque eólico debido a que la velocidad del viento supera la nominal.

Los autores se enfocaron en dos escenarios; sin los vehículos eléctricos y con ellos. Para el primer escenario donde no se tiene la regulación de frecuencia a través del sistema V2G solamente actúa el control del generador diesel restableciendo la frecuencia al valor nominal, sin embargo para este escenario se observan picos de frecuencia tanto por encima como por debajo que sobrepasan el rango estandarizado para Latinoamérica. En el segundo escenario se observa como resultado que existe una mejora en las fluctuaciones de frecuencia del sistema, dicha mejora se puede observar tanto en el tiempo transitorio como en la magnitud, concluyendo que el sistema V2G tiene una directa relación con la primera y segunda etapa de control de frecuencia AGC (*Automatic Gain Control*), la primera etapa de este control evita las posibles oscilaciones cuando aparece una falla mediante un control proporcional y la segunda etapa devuelve la frecuencia a su valor nominal mediante un control integral. Los autores demostraron que el sistema V2G hace más robusto el sistema para soportar grandes fallas o perturbaciones funcionando como pequeñas subestaciones de compensación de potencia activa.

El presente trabajo de grado se enfoca en el diseño de un control primario para el caso de estudio donde no está disponible la regulación a través de vehículos eléctricos y no existe una reserva rodante tomando en cuenta cada una de las perturbaciones ocurridas durante las 24 horas de simulación, para ello se toma parte de la potencia generada por el parque eólico y se almacena en baterías con el objetivo de proporcionar ésta potencia ante los distintos eventos que ocurren durante las 24 horas de simulación, para el diseño de éste control se indagó en el diseño de controles para microredes a través de almacenamiento de energía en baterías, las investigaciones relevantes se presentan a continuación:

Agelidis, Hredzak & Morstyn (2015) realizaron una investigación denominada: “Estrategias de control para microredes con sistemas de almacenamiento de energía: una visión general”, en la misma definieron los niveles que constituyen el diseño de un control jerárquico, siendo el control primario el responsable del reparto de carga entre las fuentes de las microredes, con el objetivo de mantener la estabilidad y el funcionamiento autónomo (con escalas de tiempo de 10 a 100ms). El nivel de control secundario opera en una escala de tiempo más lenta (1 a 10s) y restaura los valores de frecuencia y voltaje, por último el flujo de potencia óptimo (OPF) de la microred se gestiona a partir de un control terciario, calculando referencias para las fuentes basadas en objetivos económicos. Por otra parte los autores resaltan que introducir sistemas de almacenamiento, representa un desafío, debido a que los niveles de carga (SoC) de los sistemas deben coordinarse a largo de las escalas de tiempo. Las estrategias de control para microredes con sistemas de almacenamiento se pueden dividir en tres categorías, basadas en su arquitectura, descentralizada, centralizada y multiagente distribuida.

Las estrategias de control descentralizadas para sistemas de almacenamiento distribuido se han enfocado en modificaciones del control *droop* de la microred en función de los niveles de carga de los sistemas, el control *droop* estándar no es adecuado para microredes que incluyen sistemas de almacenamiento debido a que no tiene en cuenta los niveles de carga, bajo una estrategia de reparto de carga proporcional a la capacidad de potencia los sistemas de almacenamiento que comienzan un nivel de carga inferior se agotan prematuramente, esto en particular afecta la vida útil de los sistemas de almacenamiento como las baterías. En busca de la solución de éste problema se propone un control *droop* de ponderación de estado de carga, el cual garantiza que ninguno de los sistemas de almacenamiento se quede sin energía prematuramente, este método hace que los sistemas de almacenamiento ajusten la tensión y frecuencia nominal en función de sus niveles de estado de carga, sin embargo este control tiene dos limitaciones; la primera es que los sistemas de almacenamiento con un estado de carga inferior no utilizan todas sus capacidades de potencia, mientras que los sistemas de almacenamiento con un estado de carga alto pueden sobrecargarse en condiciones de estado de carga elevada. En segundo lugar, como todos los sistemas de almacenamiento alcanzan un nivel bajo de estado de carga, todos los coeficientes del control *droop* aumentan y la regulación de voltaje y frecuencia en la microred sufren. Una tercera opción de control

descentralizado es haciendo uso del control droop para sistemas de almacenamiento heterogéneos, partiendo de que las tecnologías de sistemas de almacenamiento se pueden dividir entre aquellas adecuadas para el máximo respaldo y la regulación de la calidad de energía y las adecuadas para el cambio de energía y reserva rodante, se proponen controles con sistemas de almacenamiento híbridos como por ejemplo ultracapacitores y baterías, los primeros responden al control droop paso alto, suministrando la carga de alta frecuencia mientras que las baterías funcionan bajo el control droop convencional y suministran la carga de baja frecuencia.

Los autores también exponen las estrategias de control centralizado, el mismo es utilizado para monitorear y controlar individualmente los sistemas de almacenamiento de la microred, se puede dividir en secundario y terciario. Las estrategias de control con objetivos de control transitorio, como regulación de calidad de energía son secundarias, mientras que el flujo óptimo de potencia basado en generación y las predicciones de carga se describen como terciarias. El control secundario centralizado es diseñado para mejorar la calidad de energía corrigiendo los desplazamientos de voltaje y frecuencia introducidos por el control droop primario, de igual manera existen controles secundarios que corrigen desequilibrio de tensión, compensación de armónicos y mejoran la compartición de potencia reactiva. Por otra parte, dentro de una microred, el modelo de control jerárquico tradicional asigna el problema del flujo óptimo de potencia al control terciario, que a su vez genera referencias para el control primario y el secundario. Cuando se dispone de la conexión a la red, el control terciario puede utilizarse para optimizar los flujos de potencia entre la microred y la red principal (con objetivos tales como la maximización de beneficios o la prestación de servicios auxiliares). Cuando se está en modo autónomo, un objetivo natural es minimizar el consumo de energía en la microred mientras se hace pleno uso de la generación renovable disponible.

Bottrell, Green, Xu, Yang & Zhao (2015) desarrollaron un control para una microred de medio voltaje que trabaja en modo isla ubicada en Dongao – China, haciendo énfasis en que por la naturaleza aislada de la misma resulta más complejo diseñar el control de frecuencia, por lo cual plantearon una estrategia de control que utiliza almacenamiento de energía como soporte del *control droop*, debido a que el mismo presenta inconvenientes en el rendimiento

dinámico del sistema al utilizar ganancias bajas, por otra parte el margen de estabilidad se reduce al utilizar ganancias altas.

El control propuesto por el autor se basa en compensar las oscilaciones de frecuencia y potencia introduciendo una señal de control denominada ΔP_{scl} que se genera a partir de la característica f/P del *control droop*, la señal de compensación es producida a partir del termino derivado de la frecuencia y se usa para inyectar una señal de potencia de amortiguación en la salida del lazo de control droop lo que provee una respuesta rápida de compensación de frecuencia ante perturbaciones, por otra parte el autor estableció límites máximos de carga y descarga para el sistema de almacenamiento de energía para alargar la vida útil del mismo.

El sistema de control propuesto en el artículo se muestra en la figura a 2.1 cada una de las ganancias de los controles se seleccionaron a partir de procesos de simulación en el programa MATLAB/Simulink®.

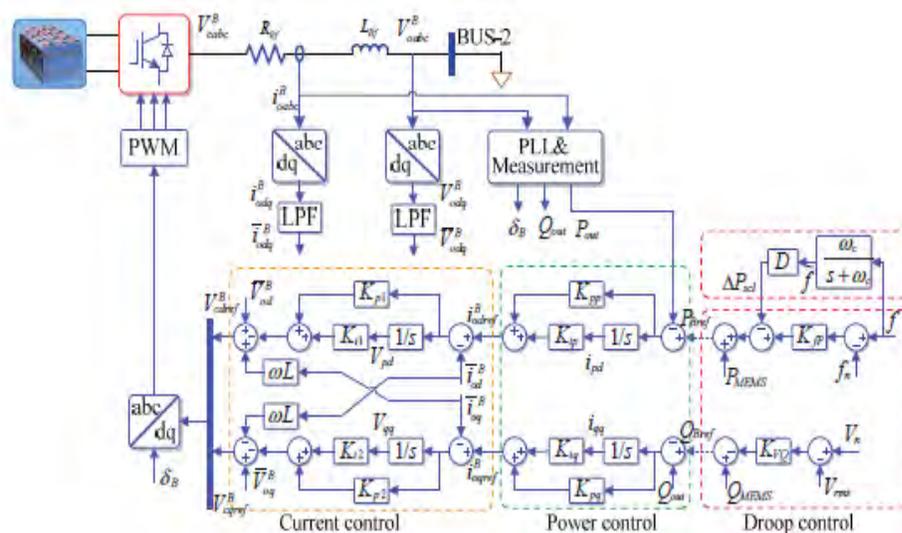


Figura 2.1: Estrategia de control de sistema de almacenamiento de energía para soporte de frecuencia de una microrred autónoma.

Como se puede observar en la figura los autores proponen que la potencia de referencia entregada al control de potencia se dirija por la siguiente ecuación:

$$P_{ref} = P_{MEMS} + K_{fp}(f - fn) - K_{scl} \cdot \frac{d\tilde{f}}{dt} \quad (2.1)$$

Donde K_{fp} es la ganancia de la curva f/P que proviene a partir del control droop, f es la frecuencia monitorizada de la microred, fn es la frecuencia de referencia, K_{scl} es la ganancia del control suplementario y \tilde{f} es la frecuencia proveniente de un filtro paso bajo.

2.2 BASES TEÓRICAS.

2.2.1 Generación distribuida

La generación de electricidad convencional ha evolucionado con el fin de mejorar la calidad de energía entregada al usuario, esta evolución la ha hecho incluyendo la generación de energía eléctrica más cerca de los centros de consumo. Fehland (2012) define la generación distribuida como la incorporación de pequeñas unidades de generación a nivel local en redes de distribución. También se podría decir que las empresas del sector eléctrico han cambiado a un modelo de generación con capacidad más pequeña que la tradicional (más de 5kW y menos de 5MW), un modelo que no es centralmente operado, con características menos contaminantes y ubicadas lo más cerca posible del consumidor (González, 2004).

2.2.2 Sistemas de generación basados en energías renovables.

La generación de energía eléctrica se ha apegado a las políticas que proponen reducir las emisiones de gases que aceleran el cambio climático, por lo tanto ha popularizado la generación de electricidad a partir de energías renovables. Mora (2013) define la energía renovable como la que no desaparece al transformar su energía útil, entre ellas se tiene: agua almacenada (energía hidráulica), el sol (energía solar), el viento (energía eólica), la biomasa, las mareas (energía mareomotriz), las olas.

Se han desarrollado distintas tecnologías que pretenden aprovechar esta energía primaria para producir energía eléctrica cerca de los centros de consumo y cumpliendo las regulaciones que pretenden reducir el impacto ambiental.

2.2.3 Equilibrio entre demanda y generación

La energía eléctrica entregada al usuario tiene que cumplir con los estándares de calidad; para ello los parámetros como frecuencia y voltaje tienen que mantenerse dentro de los valores nominales, estos parámetros están ligados a la generación de energía pero también a la demanda. La frecuencia de un sistema eléctrico está estrechamente relacionada con el equilibrio entre generación y carga, en régimen permanente los generadores funcionan en sincronismo (la frecuencia de giro de los generadores multiplicada por el número de pares de polos es la frecuencia eléctrica del sistema), si existe un aumento en la carga (potencia eléctrica demandada) aumenta el par electromagnético de los generadores (comienzan a frenarse) y la frecuencia disminuye progresivamente (Ledesma, 2008).

2.2.4 Límites de frecuencia permisibles.

Las desviaciones de frecuencia se producen cuando ocurre un desequilibrio entre la carga y la generación; estas desviaciones pueden ocurrir a causa de dos escenarios, el primero es cuando la carga es superior a la generación, en este caso la frecuencia disminuye y el segundo es el caso contrario, es decir, cuando la generación es superior a la carga y la frecuencia aumenta, tanto los valores de sobrefrecuencia como los de subfrecuencia acortan la vida útil de la maquina creándole fatiga; en la tabla 2.1 se puede observar los valores que se recomiendan respetar para los límites de operación de frecuencia fuera del valor nominal (Berdy & Brown 1974).

Tabla 2.1: Límites permisibles de frecuencia (Berdy & Brown 1974).

Rango de frecuencia (Hz)	Tiempo máximo de exposición (Minutos)
59,4 -60,6	Operación continua
58,5-61,5	30
58,2-61,7	10

Rango de frecuencia (Hz)	Tiempo máximo de exposición (Minutos)
58,0-62,0	4
57,7-62,2	2
57,4-62,6	0,5

El tiempo de exposición es acumulativo, es decir, si se opera dentro del segundo rango 2 minutos solo le quedarían a lo largo de la vida útil de la maquina 28 minutos para operar dentro de ese rango.

2.2.5 Microredes.

Una microred se podría considerar como una porción de la red de distribución, generalmente en baja tensión, ubicada a continuación de una subestación y contiene un conjunto de cargas de energía eléctrica, generación distribuida de distintos tipos, sistemas de almacenamiento distribuido con características y capacidades distintas (Medina, s.f).

La definición dada por el *Microgrid Exchange Group (MEG)* (s.f) es que la microred es un conjunto de cargas o recursos energéticos distribuidos, dentro de los límites eléctricos definidos, que actúan como una sola entidad controlable respecto a la red. Una microred puede conectarse y desconectarse para permitirle operar conectado a la red o en modo isla. El punto de conexión a la red se denomina punto de acoplamiento común (PAC) (Medina, s.f). Además una microred puede proporcionar tanto energía eléctrica como calor a su área local (Dulce, 2015). En la figura 2.2 se detalla la arquitectura de una microred, incluyendo la generación distribuida, las cargas, el punto de acoplamiento común y la subestación que conecta a la microred con la red de energía pública (Katiraei, Irvani, Hatziargyriou & Dimeas, s.f).

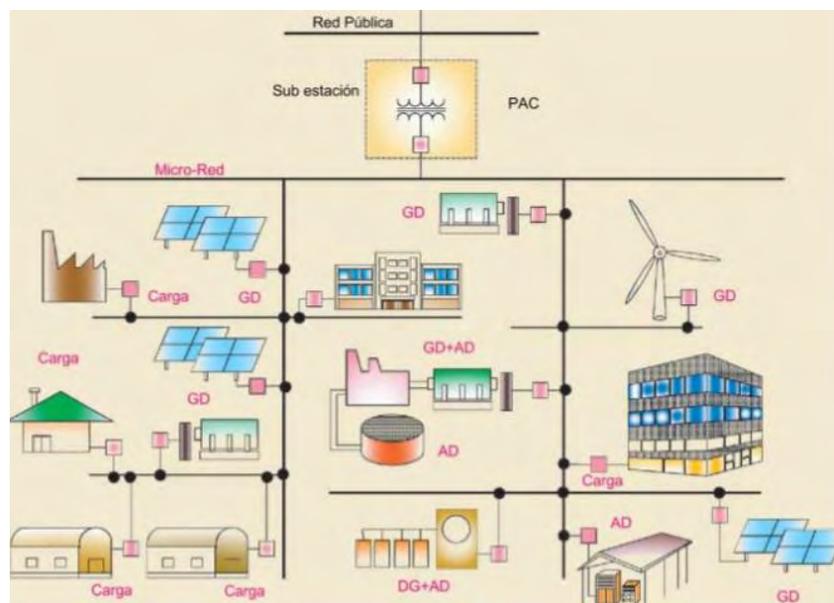


Figura 2.2: Arquitectura de una microred (Katiraei, Iravani, Hatziargyriou & Dimeas, s.f).

Entre los objetivos de implementar una microred resaltan (Medina, s.f):

- Aprovechar las fuentes energéticas disponibles en la zona de emplazamiento.
- Servir las cargas con altos parámetros de calidad y al menor costo posible.
- Definir los puntos de interconexión con la red y dotarlos de capacidad de sincronización.
- Establecer los contratos con el operador de la red para la compra y venta de energía además de proveer servicios complementarios a la red.
- Responder de forma dinámica y eficiente ante los cambios que se presenten en los parámetros del sistema.
- Ubicar y dimensionar los sistemas de almacenamiento de energía.

El uso de microrredes eléctricas trae consigo grandes ventajas como lo son:

- Versatilidad en sus modos de operación (conectado a la red o en modo isla). Las microredes pueden abastecer las cargas conectadas en su área de cobertura durante periodos en los cuales la red no puede hacerlo (Medina, s.f).
- Haciendo uso de las microredes se puede entregar energía mejorando sus estándares de calidad. Según Fosatti (2011) al tener electrónica de potencia mejora la calidad de energía eléctrica (voltaje, frecuencia, estabilidad de la tensión, suministro de la potencia reactiva y corrección del factor de potencia).
- En la implementación de las microredes se incluyen distintos tipos de generación, en su mayoría a partir de energías renovables. La microred permite la entrada de diversos tipos de generación en la red, esto además de aumentar la energía disponible amplía la matriz energética permitiendo mayor confiabilidad y continuidad en la generación (Medina, s.f). Se aumenta la independencia respecto a la incertidumbre del precio del petróleo (Fosatti, 2011).
- Las microredes pueden incluir almacenamiento de energía, para asegurar la disponibilidad de energía ante los cambios propios de las fuentes de energía renovable. El almacenamiento de energía asegura la alimentación de las cargas críticas de la red (Fosatti, 2011).
- Las microredes hacen que la energía eléctrica llegue a los consumidores de manera más eficiente reduciendo pérdidas en la transmisión y reutilizando el calor residual para distintas aplicaciones. El residuo en forma de calor se puede utilizar en aplicaciones industriales, comerciales y residenciales (Fosatti, 2011).

Las microredes al ser una tecnología que aún está en crecimiento tienen distintos problemas asociados que se describen a continuación:

- Necesidad de un control robusto para proporcionar energía eléctrica con parámetros dentro de los valores nominales. Existe un déficit inercial debido a la baja presencia de máquinas rotatorias conectadas a la microred (Barrera, 2016), lo que implica la necesidad de un control en los inversores.
- Alta variabilidad del viento tanto en proporción como en tasa de cambio y alta variabilidad de la energía solar (Ramírez, 2014).

- Existe una descoordinación de protecciones del sistema debido a que la microred tiene un circuito equivalente distinto cuando se encuentra en modo conectado o desconectado de la red (Medina, s.f).
- Es necesario un sistema de comunicación entre agentes de la red, debido a que las acciones de control se toman en tiempo real y en base a las mediciones (Medina, s.f).

Formas de operación de una microred: las microredes tienen distintas formas de operación según su diseño y las necesidades del consumidor al cual prestará servicio, dichas formas de operación son (De los Santos, Rodríguez & Visairo, 2015):

- *Tipo I: Microred aislada sin sistema de almacenamiento:* sólo se tienen las fuentes de generación y las cargas. En ésta configuración sólo es necesario controlar la potencia que suministran las fuentes.
- *Tipo II: Microred aislada con sistema de almacenamiento:* este tipo de sistemas está conformado por fuentes de generación, un sistema de almacenamiento y cargas. Además del control de la energía proveniente de las fuentes de generación es necesario controlar la carga y descarga del sistema de almacenamiento.
- *Tipo III: Microred con conexión a la red eléctrica sin sistema de almacenamiento:* Se mantiene la microred conectada al sistema eléctrico de potencia. El control utiliza el nivel de voltaje en la barra para determinar si se realiza una conversión de CA-CD de la red eléctrica hacia la barra, o una conversión CD-CA de la barra hacia la red.
- *Tipo IV: Microred con conexión a la red eléctrica con sistema de almacenamiento:* Además de estar conectado a la red el sistema posee un sistema de almacenamiento, por lo tanto amerita un control centralizado con un sistema de comunicación con el que el control reúne la información del estado del sistema y administra la energía de manera eficiente.

Regulaciones: las microredes requieren un marco legal para poder participar del mercado en el cual se conectan ya que pueden ofrecer servicios a la red (Medina, s.f). En la actualidad, la reglamentación internacional, en general, no incluye específicamente el concepto de microredes. Si bien se tiene que el estándar IEEE 1547 2003 incluye algunos tópicos, se habla principalmente de generación distribuida (Barrera, 2016).

2.2.6 Arquitectura típica de una microred

Una microred está conformada por distintos elementos capaces de generar, distribuir, almacenar y consumir energía eléctrica.

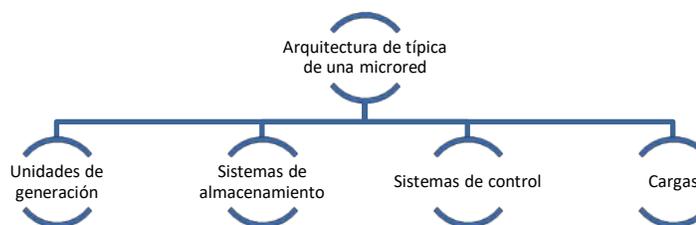


Figura 2.3: Arquitectura típica de una microred.

Unidades de generación: La mayoría de las microredes son sistemas híbridos, es decir, incluyen generación renovable y generación convencional. A continuación se definen los componentes que típicamente se encuentran como generación en las microredes (Sanchez, s.f):

- *Motores de combustión alterna:* Estas máquinas, quemar combustibles fósiles con el objeto de obtener energía mecánica a partir de energía química. Pistones hacen girar el eje de un generador para convertir la energía mecánica en energía eléctrica. Los motores pueden ser del tipo de ignición por chispa, consumiendo gas natural, propano o gasolina, o bien de ciclo diesel, quemando en este caso combustible diesel o aceite pesado. El generador eléctrico es generalmente de tipo síncrono, estando directamente acoplado a la red de distribución en el caso de sistemas de gran potencia.
- *Turbina de gas:* Las turbinas de gas mezclan combustibles fósiles junto con aire, con el objetivo de crear energía térmica. Los gases procedentes de la combustión a alta temperatura y alta presión, se expanden en la turbina permitiendo la conversión de la energía calorífica en energía mecánica por medio del giro del eje de la turbina. El

acoplamiento entre el eje de la turbina y el del generador se realiza por medio de engranajes reductores.

- *Microturbinas:* Estos dispositivos pueden funcionar con una amplia variedad de combustibles tales como gas natural, gasolina, diesel, keroseno, nafta, alcohol, propano, metano, entre otras. Disponen de un generador de imán permanente girando a alta velocidad (80.000 rpm), generando corriente alterna a muy alta frecuencia.
- *Sistemas fotovoltaicos:* Transforman energía solar en energía eléctrica. Producen electricidad en corriente continua deben conectarse un inversor a su salida.
- *Sistemas eólicos:* Los sistemas de generación eólicos transforman energía del viento en energía eléctrica. Existen tres tecnologías distintas:
 - Generador de inducción. La turbina está directamente conectada al eje de un generador de inducción con rotor tipo jaula, conectado a la red de distribución directamente (sin inversor).
 - Generador de inducción asíncrono doblemente alimentado. Están conectados a la red mediante un inversor.
 - Generador síncrono de imán permanente. Proporciona energía eléctrica con frecuencia variable con la velocidad del viento. Un inversor de corriente es conectado a la salida, haciendo de interfaz entre el generador y la red.

Sistemas de almacenamiento: consiste en elementos que permiten almacenar energía eléctrica en diversas formas (química, magnética, cinética). Sin embargo los dispositivos que principalmente se utilizan en las microrredes son (Sánchez, s.f):

- *Sistemas de baterías:* Almacenan energía eléctrica en forma de energía química. Son fuentes de corriente continua por lo que es necesario el empleo de un inversor para la generación de corriente alterna.

- *Sistemas de volantes de inercia (flywheel)*: Un motor eléctrico hace girar el volante proporcionando energía al sistema, al cual está acoplado un generador para convertir energía cinética en eléctrica. Este generador está conectado a un inversor que hace interfaz con la red de distribución.

Sistemas de control: Debido a la inclusión de componentes de distinta naturaleza es necesario en las microredes la presencia de un sistema de control jerárquico, es decir, con distintos niveles y con distintos objetivos dentro de la microred. Esto se hace mediante la configuración de los inversores de electrónica de potencia utilizados para hacer la conexión de los distintos componentes.

Cargas: las microredes pueden servir cargas eléctricas o térmicas; residenciales, industriales o comerciales, la idea es que sirvan la mayor cantidad al menor costo (Medina, s.f). Las cargas en una microred pueden clasificarse en función del nivel de control que se tiene sobre ellas, en ese sentido existen cargas controlables que pueden recibir consignas del control central de la microred, cargas no controlables que son aquellas que no aceptan consignas de control por lo cual su consumo es arbitrario (Sánchez, s.f). Existen otro tipo de cargas como lo son los vehículos eléctricos específicamente los denominados V2G que se pueden comportar como carga o como fuente de energía que regula parámetros de la microred (Rehman & Riaz ,2017).

2.2.7 Convertidores.

Una de las prioridades al realizar trabajo con microredes es el uso de la electrónica de potencia, específicamente los convertidores, debido a que se incluyen en su diseño distintos tipos de generación que ameritan un tratamiento especial que permita su interconexión con la red y con las cargas. La IEEE define con convertidor a una máquina o equipo que transforma energía eléctrica de una forma a otra, como por ejemplo de corriente continua a alterna o viceversa, o de un valor de frecuencia o voltaje a otro (IEEE, 2000). Existen distintos tipos de convertidores: convertidores DC-DC, que pasan de corriente continua a corriente continua,

convertidores de frecuencia, que cambian el valor de la frecuencia de la onda, rectificadores, que transforman corriente alterna en corriente continua; e inversores, que transforman corriente continua en corriente alterna (Ahumada,2013).

2.2.8 Control de las microredes.

Las microredes al estar constituidas por distintos tipos de generación y tener como objetivo entregar al consumidor energía con altos estándares de calidad amerita el uso de controles, que mantengan la onda de voltaje dentro de los valores normalizados. Pizano, Guzmán, Zamora, Estrada, & Lozano (s.f) especifican los objetivos del control de una microred:

- Mantener los voltajes y frecuencias en las cargas finales.
- Asegurar la optimización energética de la microred.
- Proveer las coordinaciones de protección e informar acerca de la potencia y voltaje requeridos.
- Operar de modo autónomo, con equipo adecuado para la intervención manual cuando sea necesario.

Control jerárquico: Normalmente en las microredes se implementa un control jerárquico, es decir, un control con distintos niveles que dependen de la prioridad de la acción de control y de los dispositivos a controlar. Típicamente este control es de tres niveles sin embargo como el control depende de la arquitectura de la microred es criterio del diseñador los niveles del control y algunas veces se incluye un cuarto nivel.

Control primario o local: El control primario se encarga de compartir carga entre los inversores manteniendo el voltaje y la frecuencia del sistema dentro de rangos aceptados (Ahumada, 2013). Es el control utilizado para los generadores distribuidos (Dulce,2015) y es el control con actuación más rápida (Arrizubieta, 2015).

Control secundario o central: el control secundario se encarga de (Arrizubieta, 2015):

- En modo isla, fija los parámetros de tensión y corriente.
- Conectado a la red, compensa las desviaciones de tensión y frecuencia.

- Calcula el factor de restauración para la tensión y la frecuencia de cada inversor a partir de las referencias del control terciario.
- Sincronismo de la microred con la red.
- Equilibra tensión ante desequilibrios.
- Compensación de armónicos.

Control terciario: El control terciario se encarga de establecer las referencias de la tensión y frecuencia para el control secundario, como consecuencia del control de potencia activa y reactiva, a partir de las medidas de potencia de la red principal, de cada salida de convertidor y de las consignas recibidas desde el control cuaternario. En caso de trabajar en isla la tensión y la frecuencia serán fijas (Arrizubieta, 2015).

Control cuaternario: Se encarga de mantener la microred en su punto óptimo de operación, para ello tiene las siguientes tareas (Arrizubieta, 2015):

- Previsión de la demanda.
- Gestión de los sistemas de almacenamiento.
- Gestión económica de los sistemas de operación
- Definición de los elementos: Generadores / Almacenadores.

Control mediante curvas de estatismo: el control mediante curvas de estatismo permite que varios generadores participen en el control primario de frecuencia dentro de un mismo sistema, aplicando a cada uno de ellos una característica frecuencia – potencia (negativa) en régimen permanente (Mora, 2013).

Este método se aplica de forma análoga en las microredes; al ser un método de control distribuido permite compartir carga entre los inversores sin el uso de comunicación (De Vicuña, Berbel, Guerrero, Matas & Sosa, 2005). Al aumentar la potencia activa entregada por inversores decrece la frecuencia, así emula el comportamiento de las máquinas sincrónicas en las redes eléctricas convencionales (Ahumada, 2013).

Para aplicar éste método de control en microredes existen ecuaciones que relacionan la potencia activa y reactiva con las tensiones del inversor y de la barra común (De Vicuña, Castilla, Berbel, Guerrero & Matas, 2015):

$$S = P + jQ \quad (2.2)$$

$$P = \frac{EV}{Z} \cos(\theta - \phi) - \frac{V^2}{Z} \cos(\theta) \quad (2.3)$$

$$Q = \frac{EV}{Z} \sin(\theta - \phi) - \frac{V^2}{Z} \sin(\theta) \quad (2.4)$$

La ecuación (2.2) es la potencia aparente en la barra de la microred, las ecuaciones (2.3) y (2.4) son las potencias activa y reactiva respectivamente; en donde E es el voltaje del inversor, V es el voltaje en la barra común, ϕ el ángulo de la potencia, Z y θ magnitud y ángulo de la impedancia de salida de la máquina (en las microredes ésta impedancia depende de la impedancia interna de los inversores y de la impedancia de la línea de transmisión). La impedancia en líneas de transmisión de alta tensión es altamente inductiva, sin embargo en líneas de baja tensión esta impedancia es resistiva, por lo tanto el control se debe ajustar a la impedancia con la cual se trabaja. Si la impedancia es inductiva, el ángulo θ se aproxima a 90° , lo que hace que las ecuaciones (2.3) y (2.4) se reduzcan a las ecuaciones (2.5) y (2.6), donde X es la reactancia de salida del inversor (Ahumada, 2013).

$$P = \frac{EV}{X} \sin(\phi) \quad (2.5)$$

$$Q = \frac{EV \cos(\phi) - V^2}{X} \quad (2.6)$$

En las ecuaciones (2.5) y (2.6) se puede observar que la potencia activa depende del ángulo ϕ y la potencia reactiva depende del voltaje en la barra común. En la figura 2.4 se pueden apreciar las curvas de estatismo, y de ellas se logra deducir las ecuaciones (2.7) y (2.8) que describen el método de control.

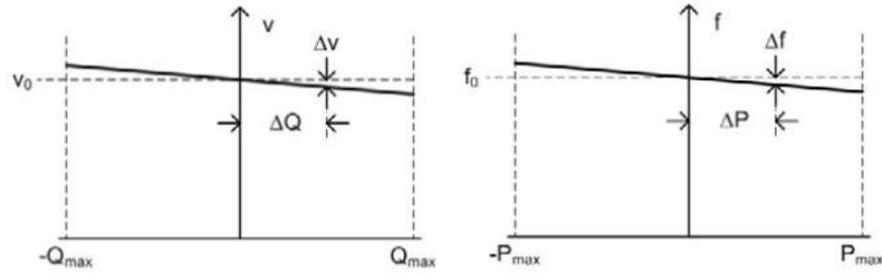


Figura 2.4: Curvas de estatismo (Ahumada, 2013).

$$\omega = \omega_r - m(P - P_r) \quad (2.7)$$

$$E = E_r - n(Q - Q_r) \quad (2.8)$$

En la ecuación (2.7): ω es la frecuencia de salida, ω_r es el valor de referencia, P y P_r son la potencia activa y su valor de referencia análogamente en la ecuación (2.8) E y E_r son la tensión de salida y su valor de referencia, mientras que Q y Q_r son la potencia reactiva y su valor de referencia, ambas ecuaciones describen las rectas mostradas en la figura 2.4. Las pendientes m y n responden a las ecuaciones (2.9) y (2.10).

$$m = \frac{(\omega_{max} - \omega_{min})}{P_{max}} \quad (2.9)$$

$$n = \frac{(E_{max} - E_{min})}{Q_{max}} \quad (2.10)$$

En las ecuaciones (2.9) y (2.10), ω_{max} y ω_{min} son los valores máximos y mínimos de la frecuencia, E_{max} y E_{min} son los máximos y mínimos permitidos para la tensión de salida, y P_{max} y Q_{max} son los valores máximos de potencia activa y reactiva capaz de entregar la microred (Ahumada, 2013).

Debido a que el control con curvas de estatismo se basa en compartir la carga, las pendientes deben tomar valores que satisfagan las ecuaciones (2.11) y (2.12), en donde S_i es la potencia aparente del inversor i (Ahumada, 2013).

$$m_1 S_1 = m_2 S_2 = \dots = m_n S_n \quad (2.11)$$

$$n_1 S_1 = n_2 S_2 = \dots = n_n S_n \quad (2.12)$$

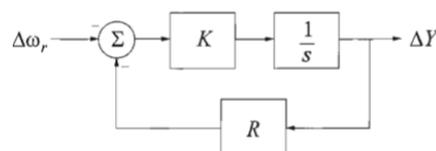
En las ecuaciones (2.13) y (2.14) se puede observar la forma de variación de la potencia y frecuencia de todo el sistema donde P_i es la variación de potencia del inversor i e m_i es la pendiente de la curva P - f del inversor (Madureira, Moreira & Peças, 2016).

$$\Delta P = \sum_{i=1}^n \Delta P_i \quad (2.13)$$

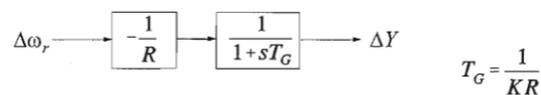
$$\Delta \omega = m_i \Delta P_i \quad (2.14)$$

El método de control por estatismo presenta algunas desventajas; por ejemplo se debe adaptar a las microrredes donde las impedancias son resistivas, y si las impedancias de línea están desbalanceadas y las cargas no son lineales el contenido armónico de la red no es compensado y se pierde estabilidad.

Método de control droop: Moller (2012) explica que el control droop se caracteriza porque un cambio en la potencia de la salida de la fuente de generación es proporcional a la variación de frecuencia. Para un correcto funcionamiento del control *droop* es necesario la conexión en paralelo de los generadores, debido a que si funcionan por separado cada uno de ellos trataría de controlar la frecuencia hacia su valor de referencia. En la figura 2.5 se plantea un controlador que hace que la velocidad disminuya a medida que aumenta la carga (Kundur, s.f).



(a) Diagrama de bloques con retroalimentación en estado estacionario



(b) Diagrama de bloques reducido

Figura 2.5 Diagrama de bloques del gobernador del control *droop* (Kundur, s.f).

El valor de R determina la velocidad en estado estacionario versus la característica de carga de la unidad de generación, y se determina con la ecuación (2.15), donde ω_v es la frecuencia de vacío, ω_{pc} es la frecuencia a plena carga y ω_o es la frecuencia nominal. Y la característica principal del gobernador es ser un controlador proporcional con ganancia $1/R$.

$$\%R = \frac{\omega_v - \omega_{pc}}{\omega_o} \quad (2.15)$$

Kundur (s,f) dice a modo de ejemplo que un 5% de regulación significa un 5% de desviación de frecuencia, provocando un cambio del 100% en la salida de potencia. En la figura 2.6 se puede observar la característica $P-f$ donde ω_{NL} es la frecuencia de vacío, ω_{FL} es la frecuencia a plena carga y ω_o es la frecuencia nominal.

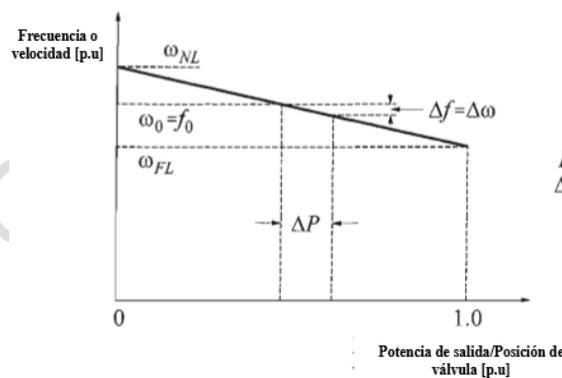


Figura 2.6 Característica $P-f$ con control *droop* (Kundur, s.f).

Control en microredes a través de sistemas de almacenamiento de energía: El control de los parámetros como frecuencia y potencia en microred se puede hacer a partir de la energía almacenada, realizando ajustes al control *droop* tradicional, debido a que es necesario tomar en cuenta el estado de carga de los sistemas de almacenamiento (SoC), en la figura 2.7 se muestra el esquema de una batería y su controlador, en el mismo se observa que el sistema de almacenamiento aplica un control *droop* para efectuar el control sobre la potencia absorbida o inyectada en el punto de conexión, asimismo se observa que la potencia de referencia que sake de este bloque participa en el control de la potencia activa de la microred (Moller, 2012)

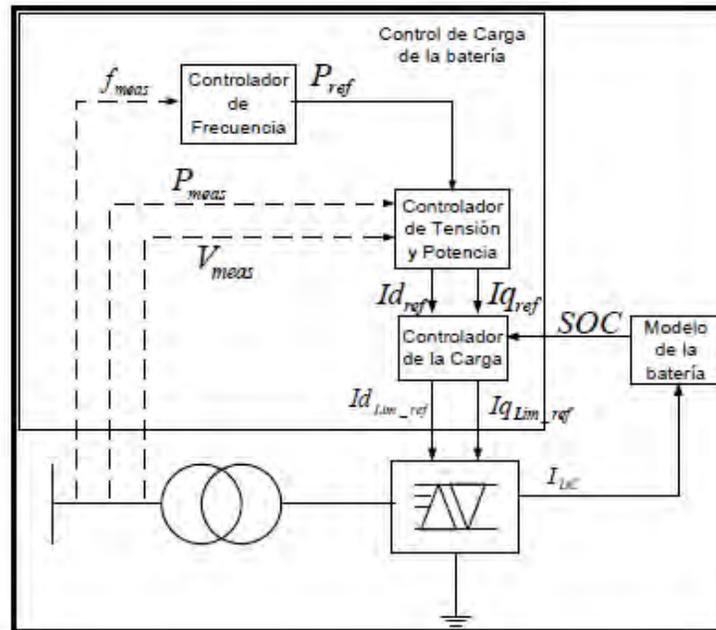


Figura 2.7 Esquema de una batería y su controlador (Moller, 2012)

Control en microredes a través de la tecnología V2G (vehículo a la red): Tirado & Rivera (2017) exponen el sistema V2G como vehículos que representan una carga bidireccional, es decir no solo son capaces de consumir electricidad sino que pueden devolver a la red energía no utilizada y almacenada en el auto, partiendo de éste concepto es posible regular la frecuencia de microredes a través de los V2G con un proceso similar al utilizado con los sistemas de almacenamiento.

Hitesh & Yogesh (2016) proponen un el esquema de control de frecuencia utilizando V2G, en el cual la referencia de frecuencia se introduce a un sistema que toma en cuenta la desviación de los parámetros, el estado de carga de las baterías y el número de vehículos en regulación, éste último dato es de vital importancia debido a que se ha demostrado que a mayor penetración de tecnología V2G mejor regulación de frecuencia se obtiene debido a que se tiene mayor cantidad de potencia activa disponible para entregar a la microred en el caso de existir eventos que representen estrés para la frecuencia desviándola de su valor nominal.

2.2.9 Aspectos significativos de las cargas.

El consumo de energía eléctrica por parte de los usuarios ha sido ampliamente estudiado, dando paso a clasificación de las cargas, curvas con patrones de consumo y estimación de la demanda, aspectos relevantes a estudiar al implementar nuevas tecnologías como lo son las microredes.

Clasificación de las cargas: según Juárez Cervantes (1995) las cargas pueden clasificarse de diversas formas, por su categoría o sensibilidad respecto a la interrupción del servicio, por el tipo de usuarios que tiene la energía eléctrica, por las tarifas entre otros.

- *Clasificación de las cargas por los tipos de usuarios:* Las cargas se pueden clasificar en residenciales, comerciales e industriales. Las cargas residenciales tiene como característica que son de baja tensión, poca potencia y, en la mayoría de los casos, monofásicas. Las cargas comerciales normalmente son trifásicas y de potencias medianas. Las cargas industriales pueden ser de alta tensión con niveles hasta de 85,115 o incluso 230 KV.
- *Clasificación de las cargas por categorías:* la categoría indica el grado de sensibilidad respecto a la interrupción del servicio eléctrico en ese sentido, una carga sensible es aquella que ante una interrupción del servicio eléctrico puede causar graves daños; tales como hospitales, industrias en las cuales la materia prima o maquinaria sufre daños e instituciones ligadas al protocolo de gobierno. En las cargas poco sensibles se encuentran las empresas industriales que dejan de producir por la interrupción del servicio eléctrico, por último las cargas normales son aquellas que una interrupción de media hora de servicio no causa ningún daño, por ejemplo los usuarios domésticos.

Comportamientos típicos de las cargas: El comportamiento de las cargas es monitorizado por las empresas de suministro eléctrico, debido a esto se tienen gráficos con predicciones del comportamiento según el tipo de carga.

Las cargas residenciales tienen un patrón de consumo con un pico normalmente en las últimas horas del día, periodo durante el cual la mayor parte de los consumidores está

haciendo uso de la energía eléctrica, sin embargo este comportamiento puede variar en función de la época del año en la que se encuentre.

La figura 2.8 muestra una curva de carga con el comportamiento típico de una carga de tipo residencial, en las abscisas se representa el tiempo y en las ordenadas la potencia eléctrica demandada, el área que está por debajo de la curva formada, es la energía demandada.

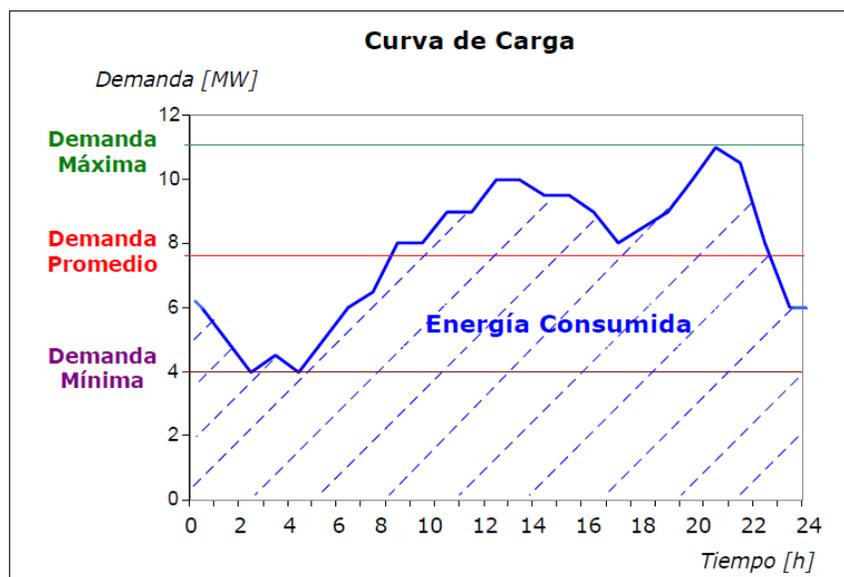


Figura 2.8: Comportamiento típico de las cargas residenciales, Universidad Nacional de Tucumán (s,f)

CAPÍTULO III

ANÁLISIS DE LA ARQUITECTURA DEL MODELO DE MICRORED: COMPONENTES, CONTROLES IMPLÍCITOS, EVENTOS QUE AFECTAN LA FRECUENCIA Y ESCENARIOS DE ESTUDIO.

El capítulo III tiene como objetivo describir a fondo el modelo de microred al cual se le realizará el control de frecuencia asimismo explica de forma breve la plataforma de simulación utilizada para tal fin.

3.1 EL PROGRAMA MATLAB®

MATLAB® es un lenguaje diseñado para la computación técnica. El nombre MATLAB® proviene de MATrix LABoratory, dado que el tipo de dato básico que gestiona es una matriz (array). MATLAB® puede ser utilizado en computación matemática, modelado y simulación, análisis y procesamiento de datos, visualización y representación de gráficos, así como para el desarrollo de algoritmos (Gilat, s.f). El software fue desarrollado por MathWorks, Inc, en USA.

3.1.1 Herramienta Simulink

MathWorks describe a simulink como un entorno de diagramas de bloque para la simulación multidominio y el diseño basado en modelos. Admite el diseño y la simulación a nivel de sistema, la generación automática de código, la prueba y verificación continuas de

los sistemas embebidos. Simulink ofrece un editor gráfico, bibliotecas de bloques personalizables y solucionadores para modelar y simular sistemas dinámicos.

Se integra con MATLAB[®], lo que permite incorporar algoritmos de MATLAB en los modelos y exportar los resultados de la simulación a MATLAB para llevar a cabo más análisis.

3.1.2 Librería Simscape Power System

Simulink posee distintas librerías para una gran gama de aplicaciones, para el desarrollo de la microred se utilizó Simscape Power System debido a que proporciona componentes y herramientas de análisis, para modelar y simular sistemas de energía eléctrica, por otra parte tiene la capacidad para desarrollar sistemas de control probando el rendimiento del nivel del proyecto. Simscape Power Systems fue desarrollado en colaboración con Hydro-Québec de Montreal (MathWorks, s.f).

3.2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE LA MICRORED EN ESTUDIO

El diseño de esquemas de control para microredes depende de la arquitectura de la misma, es decir, a partir de los componentes se diseña el control, para el presente trabajo de grado se escogió una microred proporcionada por MathWorks y su selección se basó en que el modelo posee sistemas de generación de energía eléctrica a partir de energías renovables, sistemas de cargas bidireccionales y cargas residenciales con patrones variables, además de ofrecer la posibilidad de incluir elementos de control y simular distintos escenarios.

La microred se divide en cuatro partes importantes: un generador de diesel, actuando como generador de base de potencia; una granja solar combinada con un parque eólico para producir energía renovable; un sistema V2G instalado junto a la última parte del sistema que es la carga de la red. El tamaño de la microred representa aproximadamente una comunidad de 1 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).

En la figura 3.1 se puede observar la microred y cada uno de los elementos que la componen, es importante resaltar que la misma posee dos niveles de tensión; 25 KV para generación y 600V para la carga.

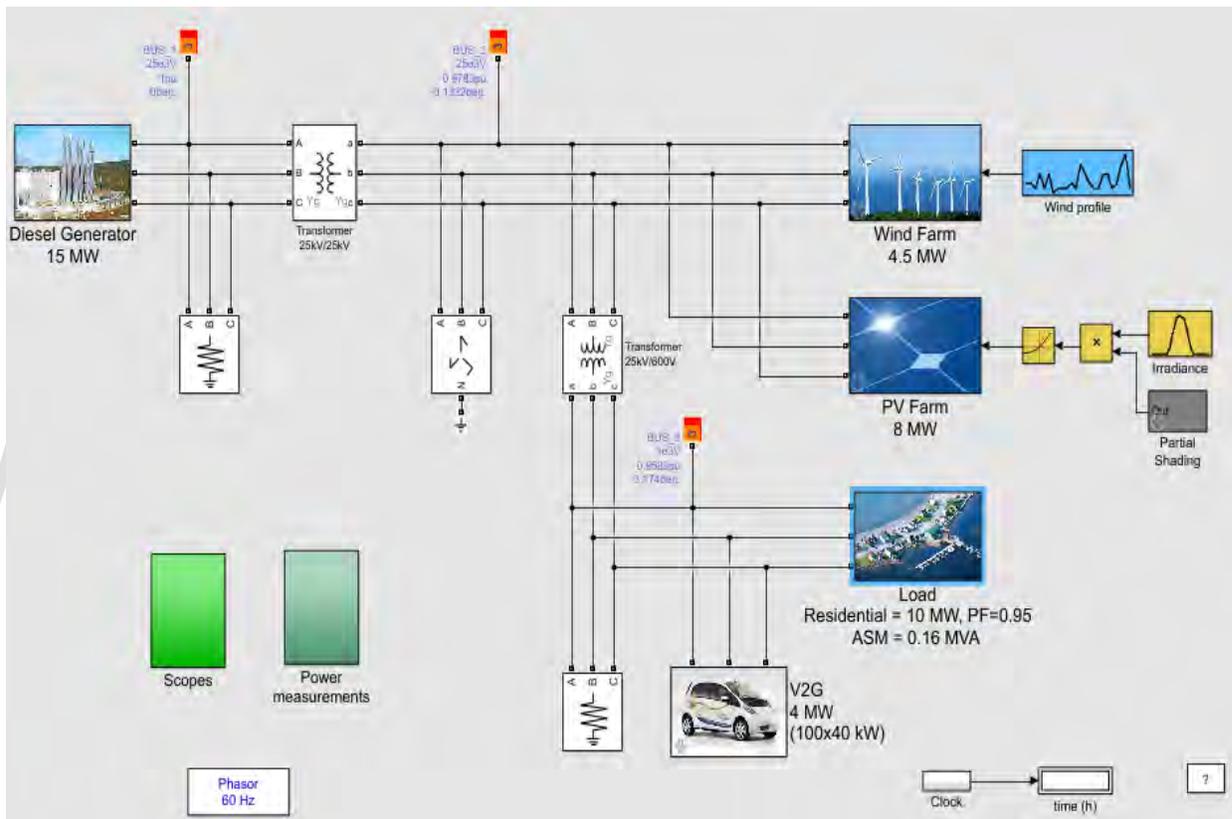


Figura 3.1: Microred utilizada para el desarrollo del control primario (MathWorks, s.f)

3.2.1 Sistema de generación Diesel.

El generador diesel presente en la microred posee una potencia nominal de 15 MW y tiene como objetivo equilibrar la potencia producida y la potencia consumida, asimismo es el generador de respaldo ante las fuentes intermitentes de energía renovable. En la figura 3.2 se

puede observar que el modelo está compuesto por una máquina asincrónica, un motor diesel 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.

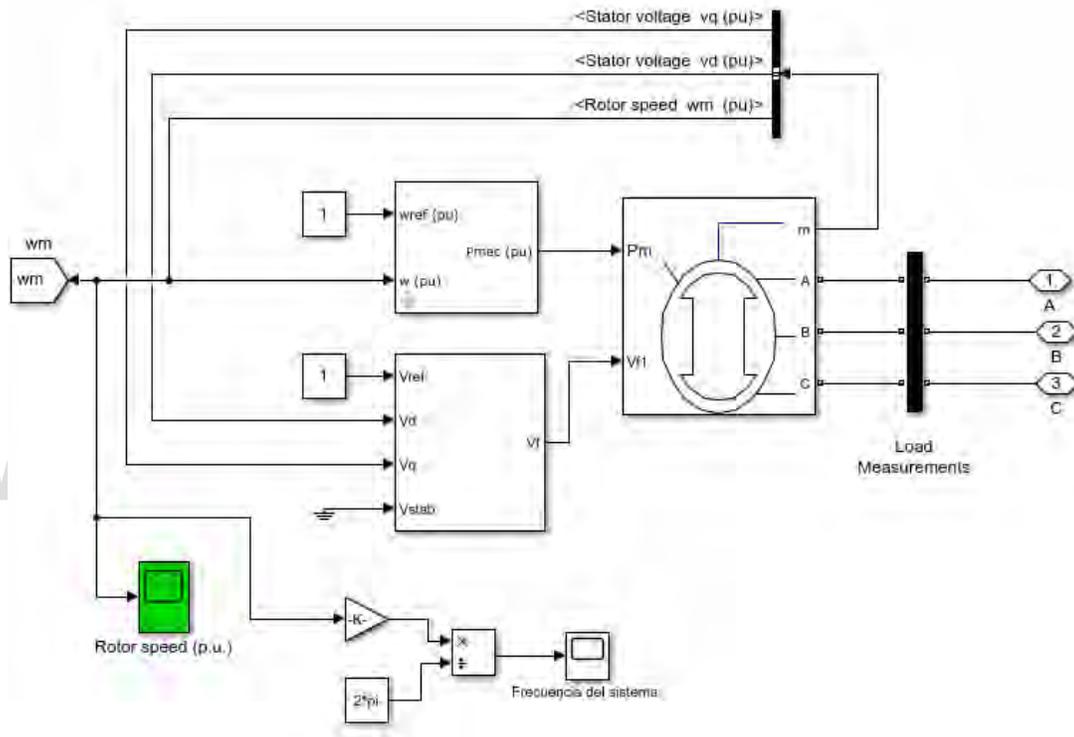


Figura 3.2: Sistema de generación diesel.

3.2.2 Sistema de generación a partir de energía solar

En el modelo se incluye una granja fotovoltaica que produce energía eléctrica a partir de energía eólica, su producción depende de tres factores; el tamaño del área cubierta por los paneles solares, la eficiencia de los mismos 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 donde la intensidad más alta se alcanza a medio día.

En la figura 3.3 se puede observar los datos de irradiancia con los cuales funciona el modelo, la granja posee una capacidad instalada de 8MW, la eficiencia de los paneles se estableció en un 10% y el área cubierta son 80000 m².

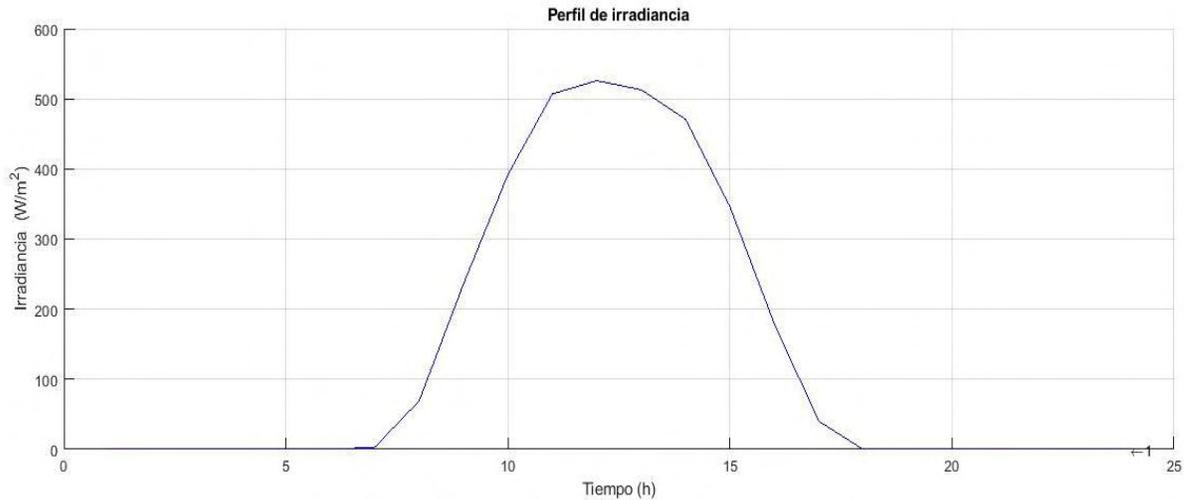


Figura 3.3: Perfil de irradiancia de la granja solar.

3.2.3 Sistemas de generación a partir de energía eólica

El parque eólico incluido en el modelo 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 microred. 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.



Figura 3.4: Perfil de velocidad del viento.

3.2.4 Sistema de carga bidireccional: V2G

La microrred 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 microrred: controlar la carga de las baterías conectadas y utilizar la potencia disponible para regular la frecuencia cuando ocurre algún evento. Se establecen cinco perfiles de usuarios de autos eléctricos:

Perfil N°1: las personas que van a trabajar con la posibilidad de cargar su automóvil en el trabajo.

Perfil N°2: las personas que van a trabajar con la posibilidad de cargar su automóvil en el trabajo pero con un viaje más largo.

Perfil N°3: las personas que van a trabajar sin la posibilidad de cargar su automóvil en el trabajo.

Perfil N°4: personas que se quedan en casa.

Perfil N°5: personas que trabajan durante el turno de la noche.

Tabla 3.1: Número de usuarios para cada perfil

Perfil N°1	Perfil N°2	Perfil N°3	Perfil N°4	Perfil N°5	Total
35	25	10	20	10	100

Cada auto eléctrico consume 40 kW, en total se tiene una capacidad de 4MW, todos estos parámetros están predeterminados, sin embargo se pueden modificar por el usuario de la microred. 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 diesel.

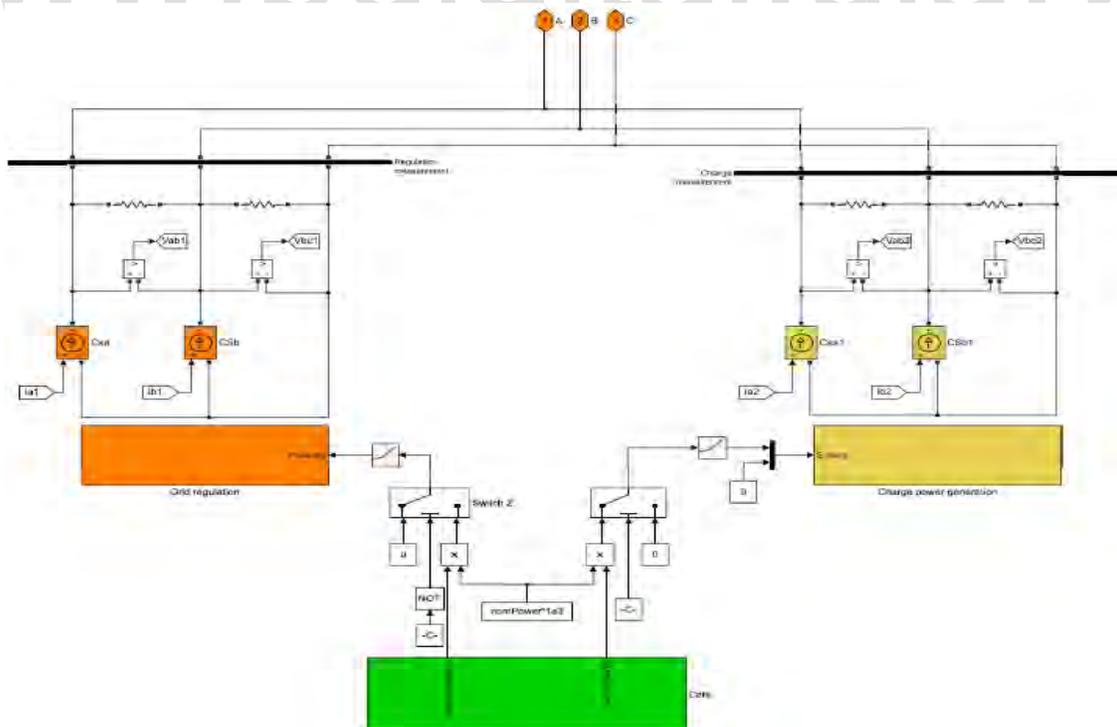


Figura 3.5: Carga bidireccional (V2G).

En la figura 3.5 se puede observar la naturaleza bidireccional de la carga, es decir, existe cierta cantidad de autos participando en la regulación (entregando energía a la microred) y cierta cantidad de autos en modo de carga (consumiendo energía de la microred), la cantidad de autos que participa en cada una de las actividades es gestionado en el subsistema denominado vehículos (cars) el cual se muestra en detalle en la figura 3.6.

En dicho subsistema se obtiene información como la cantidad de autos que se encuentra en cada perfil, su estado de carga y la potencia que pueden consumir o entregar a la microred, en el estado de carga un valor negativo significa que el automóvil está en carretera o no está enchufado.

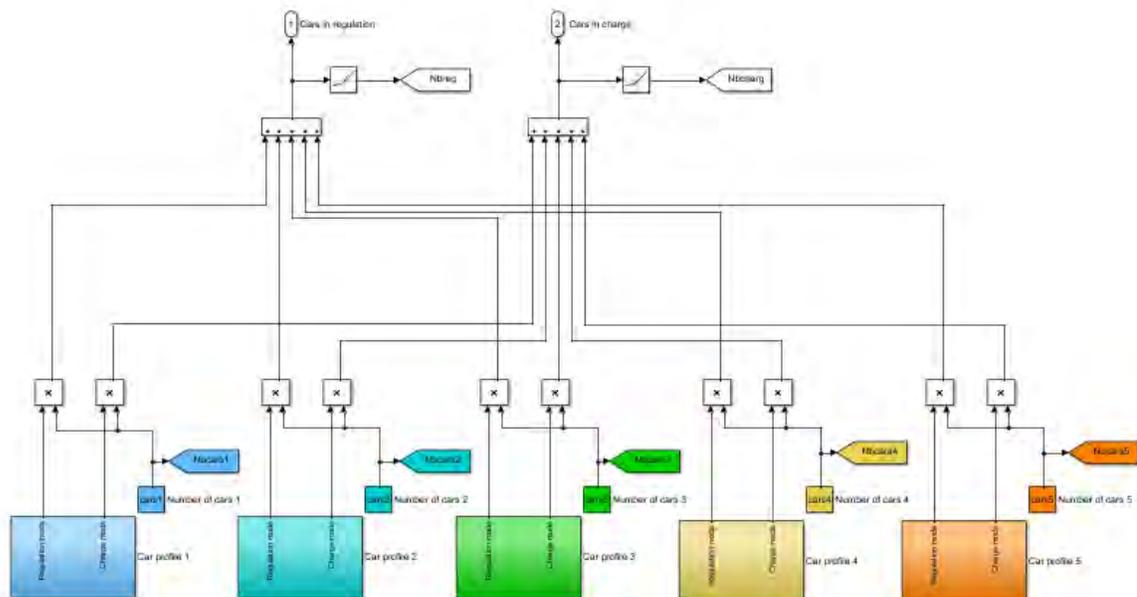


Figura 3.6: Gestión de carga del sistema V2G.

3.2.5 Sistema de cargas de la microred.

El sistema se compone de carga residencial y una máquina asincrónica que se utiliza para representar el impacto de una carga inductiva industrial (como 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 la noche y disminuye en la madrugada, el perfil de carga permite fijar una potencia nominal y un factor de potencia, también es necesario especificar el intervalo de tiempo utilizado para los datos de consumo, los mismos 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.

En la figura 3.7 se puede observar el consumo de la carga residencial, siendo su pico entre las 15 y 20 horas; es importante resaltar que la carga tiene una potencia nominal de 10 MW, es decir el pico de consumo es aproximadamente ese valor.

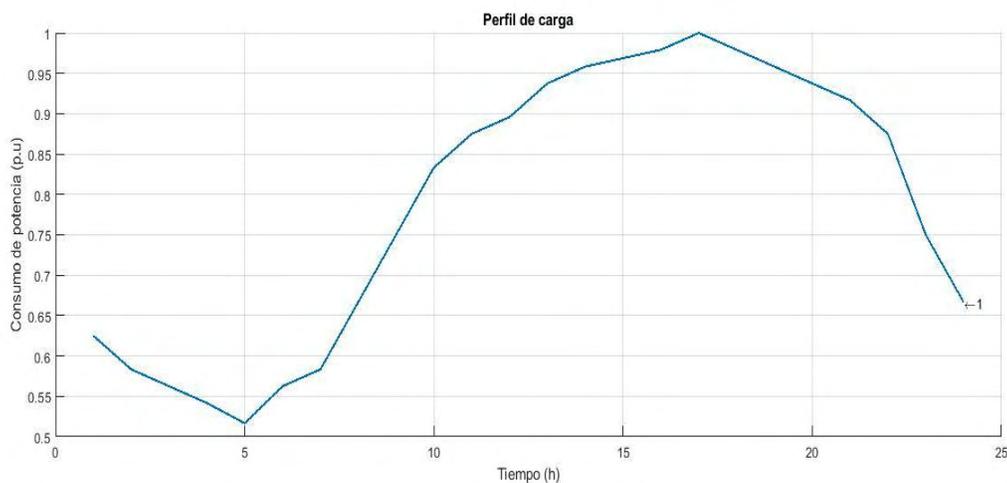


Figura 3.7: Perfil de carga residencial.

3.3 EVENTOS QUE AFECTAN LA FRECUENCIA DE LA MICRORED

La simulación dura 24 horas, sin embargo para plantear un estudio realista es necesario introducir perturbaciones que afecten el comportamiento de la frecuencia; en ese sentido existen tres eventos que desvían la frecuencia de su valor nominal.

3.3.1 Inicio de la actividad industrial (arranque de la máquina asincrónica)

Las cargas industriales normalmente tienen un comportamiento activo durante las primeras horas del día; la máquina asincrónica arranca a la tercera hora en la mañana, lo cual se ve reflejado en disminución de la frecuencia del sistema con respecto de la nominal.

3.3.2 Sombreado parcial en la granja solar

La intensidad solar sigue un patrón de distribución normal donde la irradiancia más alta se alcanza al medio día, sin embargo existe un sombreado parcial durante ese periodo que inhabilita la producción de energía eléctrica a partir de energía solar. En la figura 3.8 se observa la potencia de salida de la granja solar, en la cual se aprecia el efecto del sombreado parcial.

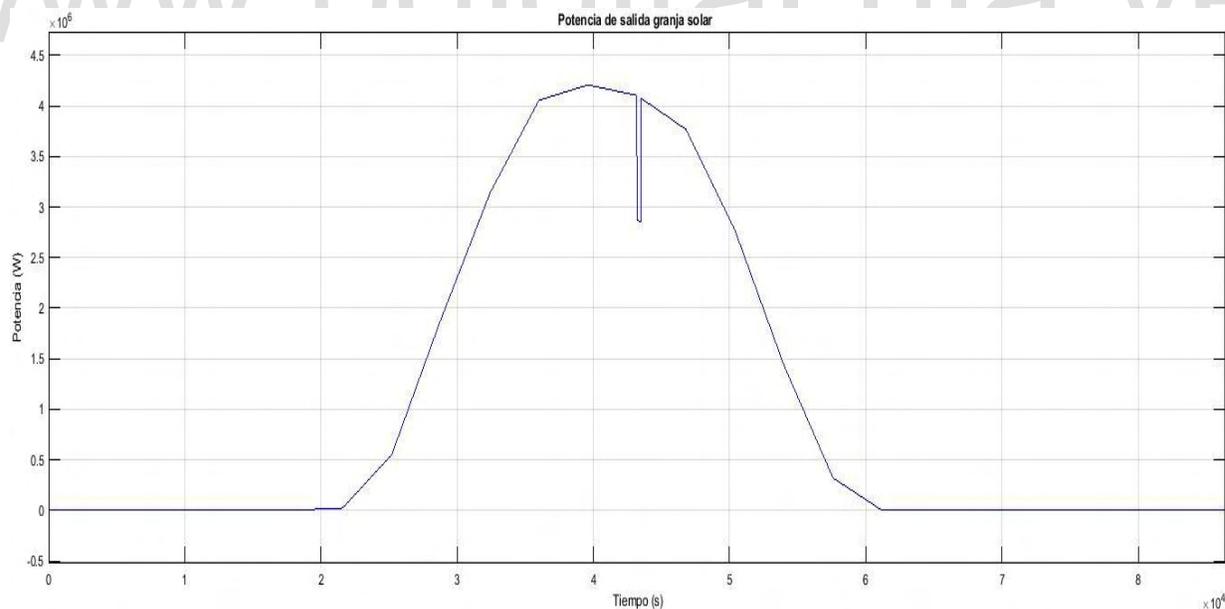


Figura 3.8: Potencia de salida granja solar

3.3.3 Desconexión del parque eólico.

El viento sufre múltiples altibajos durante el día y a las 22 horas de simulación supera la velocidad nominal establecida para el parque eólico lo que provoca una desconexión del mismo, causando desviaciones de potencia debido a la disminución de potencia activa para entregar a la carga. En la figura 3.9 se puede apreciar la potencia que entrega el parque eólico a la microred.

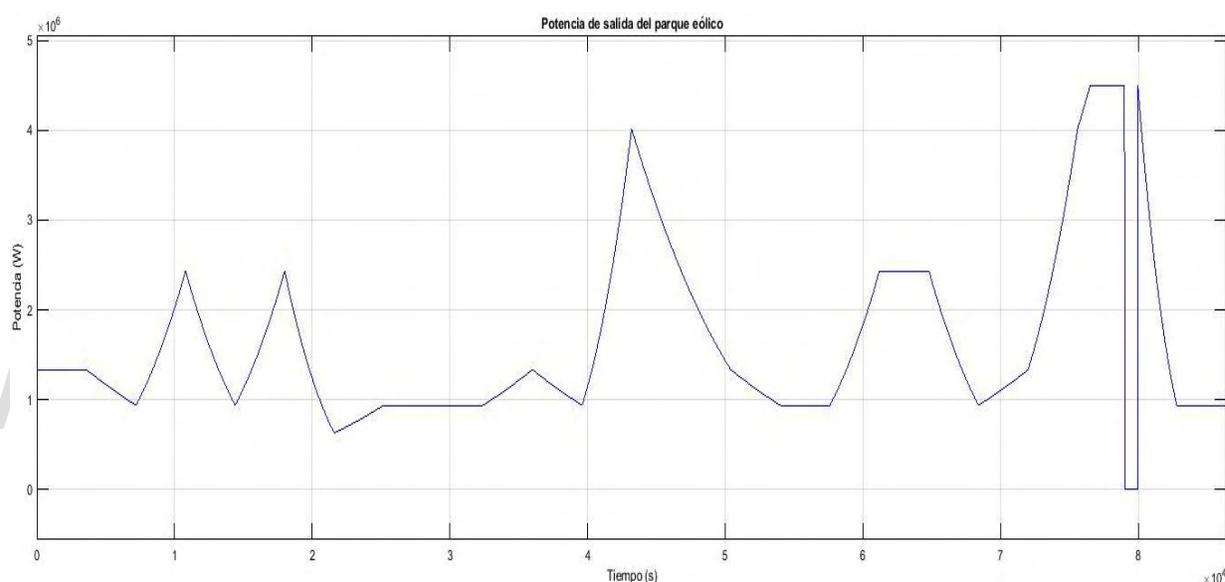


Figura 3.9: Potencia de salida del parque eólico.

3.4 CONTROLES IMPLÍCITOS Y ESCENARIOS DE ESTUDIO IMPLEMENTADOS EN LA MICRORED.

La frecuencia de la microred en estudio es regulada a través del generador diesel y la potencia aportada por las baterías de los vehículos eléctricos; por lo tanto los escenarios de estudio se definirán en función de la presencia de éstos dos elementos; esencialmente se realizarán variaciones en la reserva rodante con la cual cuenta la microred, es decir, la carga nominal establecida en 10MW deja al sistema con suficientes reservas rodantes para responder

ante cambios de frecuencia, un incremento de esta potencia nominal disminuye los márgenes de reserva, lo que compromete la respuesta del control, además de realizar variaciones en la reserva rodante del sistema, se evaluó la respuesta de frecuencia de la microred ante escenarios que incluyen penetración de V2G y escenarios que prescindan de la misma.

3.4.1 Escenario 1: Con reserva rodante y penetración V2G

El primer escenario de simulación es con las configuraciones predeterminadas de la microred; es decir cuando la carga residencial alcanza un pico de 10MW (en primavera u otoño), la máquina asíncrona trabaja con 0,16 MVA, un porcentaje de autos eléctricos actúan como carga y el otro está aportando 5% de su potencia para regulación de frecuencia de la microred.

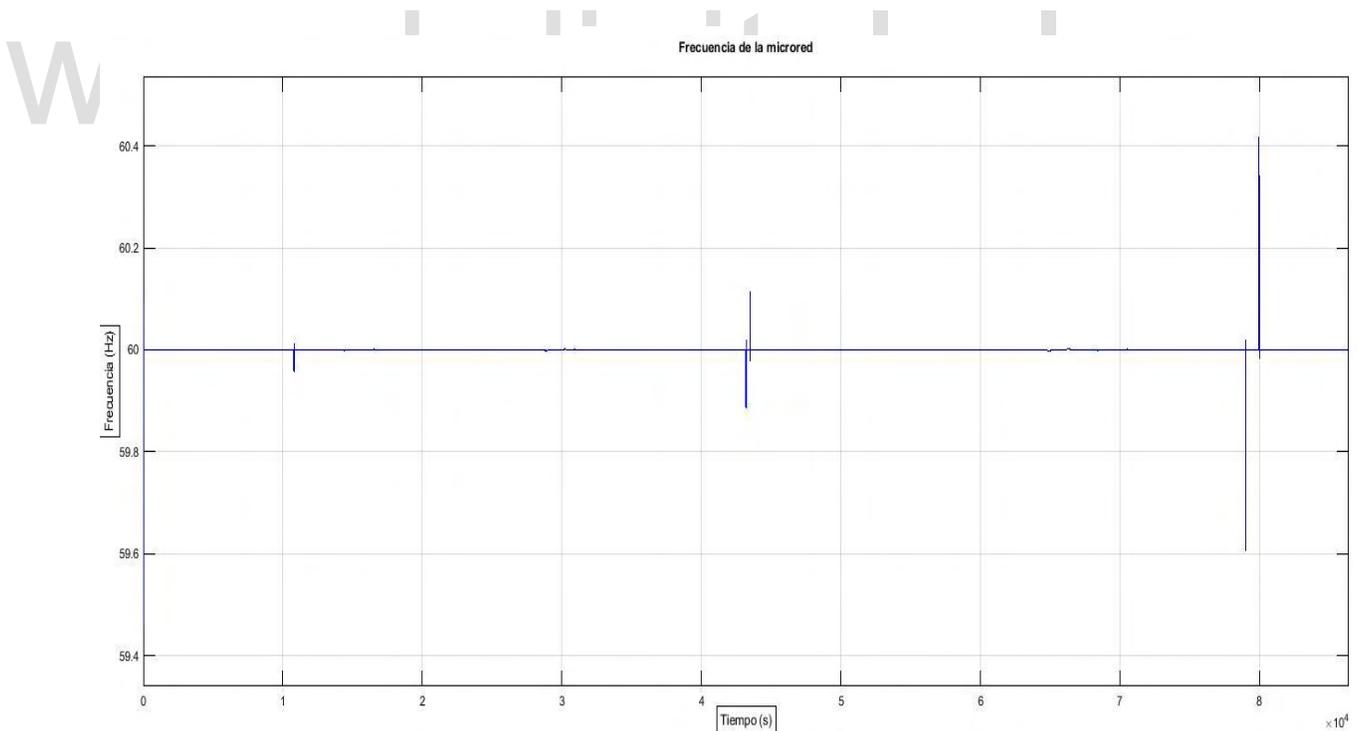


Figura 3.10: Frecuencia de la microred, escenario 1.

La frecuencia del sistema durante las 24 horas de simulación es la que se observa en la figura 3.10, la misma tiene un comportamiento dentro de los límites establecidos sin embargo se desvía al ocurrir cada uno de los tres eventos expuestos anteriormente. Teniendo en cuenta que los cambios producidos en la frecuencia provienen de cambios en los consumos de potencia, la potencia de la carga neta (carga residencial, carga industrial y carga bidireccional en modo de consumo) se muestra en la figura 3.11, en la cual se pueden observar las variaciones que crean las fluctuaciones en la frecuencia de la microred.

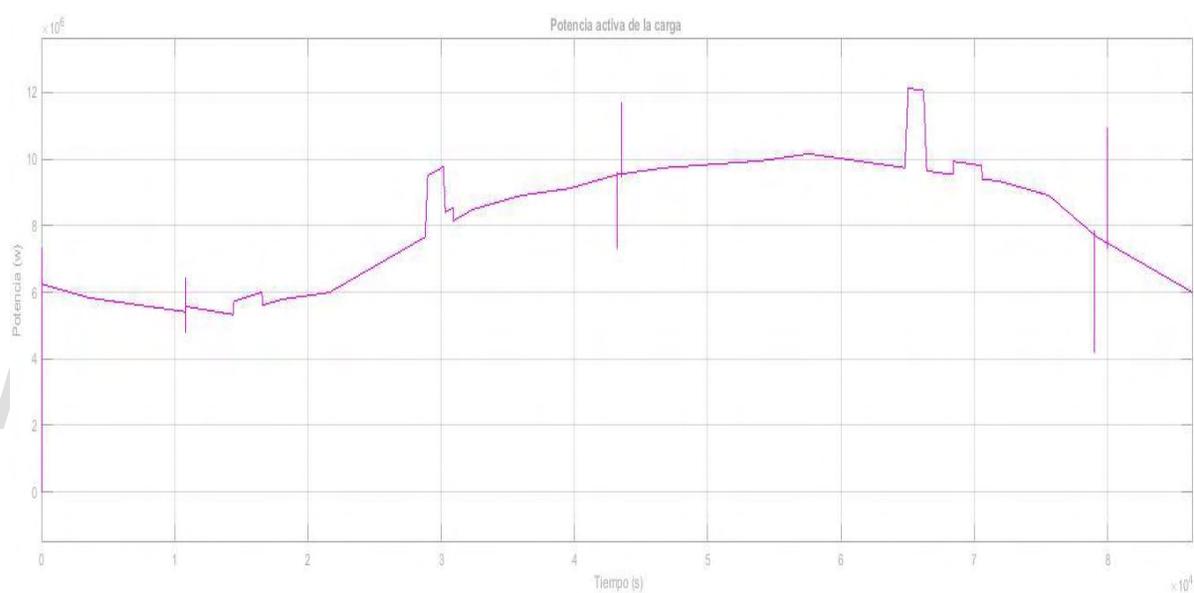


Figura 3.11: Potencia activa de la carga, escenario 1.

En las figuras 3.10 y 3.11 se observa la relación entre la potencia activa de la carga y la frecuencia; sin embargo es necesario observar en detalle los efectos que cada una de las perturbaciones tienen en la frecuencia del sistema además de la respuesta de potencia del generador diesel y de los autos eléctricos en regulación.

Efecto del evento 1: El evento 1 que simula el arranque de la máquina asíncrona representa un aumento en la potencia consumida por la carga y una disminución en la frecuencia de la microred, esta disminución se puede observar en la figura 3.12 y los valores pico inferiores y superiores a los cuales llega la frecuencia del sistema se encuentran tabulados en la tabla 3.2.

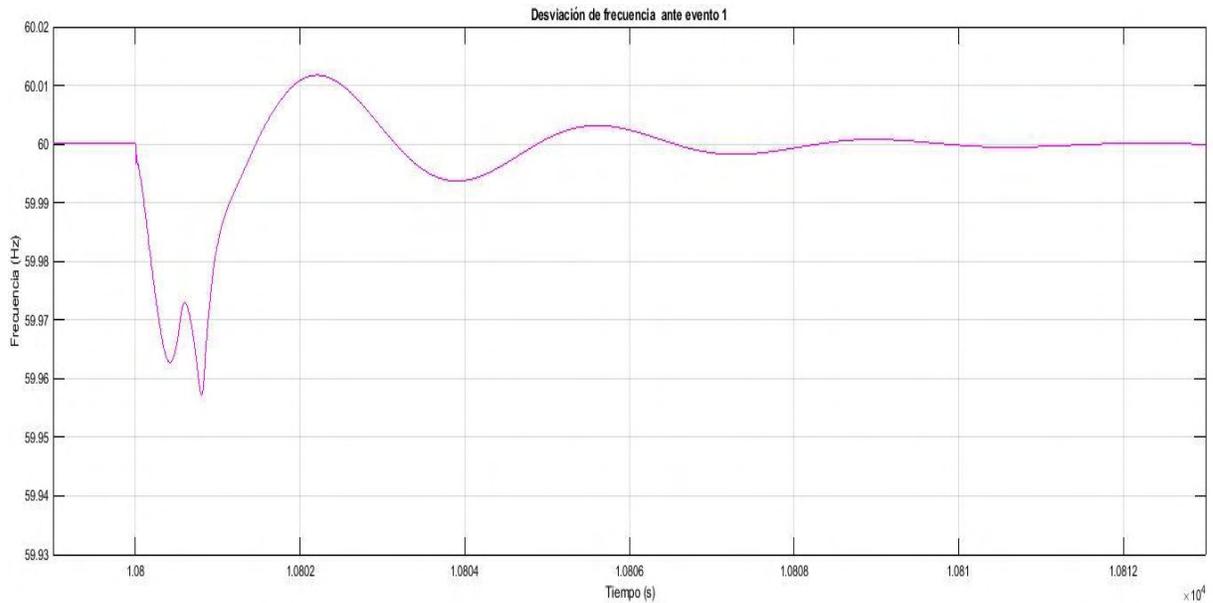


Figura 3.12: Desviación de frecuencia producida por el evento 1, escenario 1.

En la figura 3.13 se puede observar el aumento de potencia activa en la carga, y la respuesta tanto del generador diesel como de los V2G en regulación.

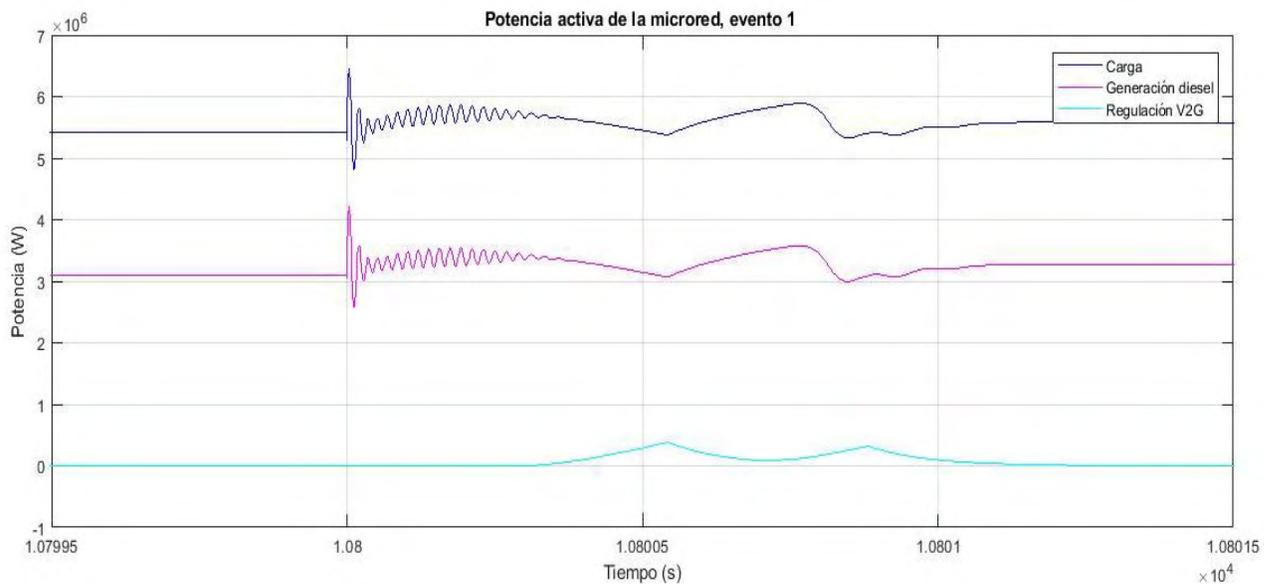


Figura 3.13: Desviación de frecuencia producida por el evento 1, escenario 1.

Efecto del evento 2: El evento 2, simulado como un sombreado parcial en la granja solar representa una disminución en la potencia producida por la microrred y una disminución en la frecuencia de la microrred, esta disminución se puede observar en la figura 3.14 y mientras que al despejarse el sombreado parcial ocurre un aumento en la frecuencia lo cual se puede observar en la figuras 3.15 los valores pico inferiores y superiores a los cuales llega la frecuencia del sistema se encuentran tabulados en la tabla 3.2.

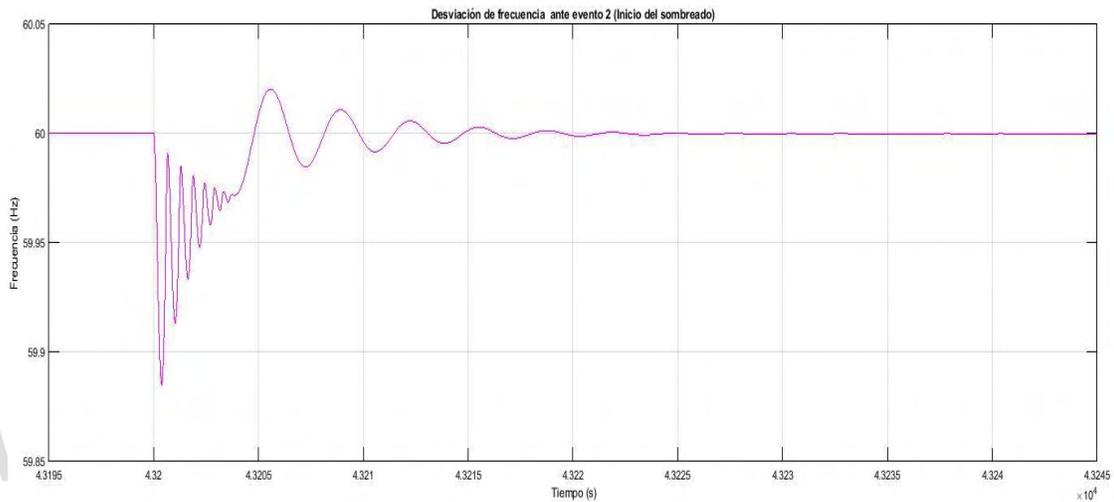


Figura 3.14: Desviación de frecuencia producida por el evento 2 (inicio del sombreado parcial)

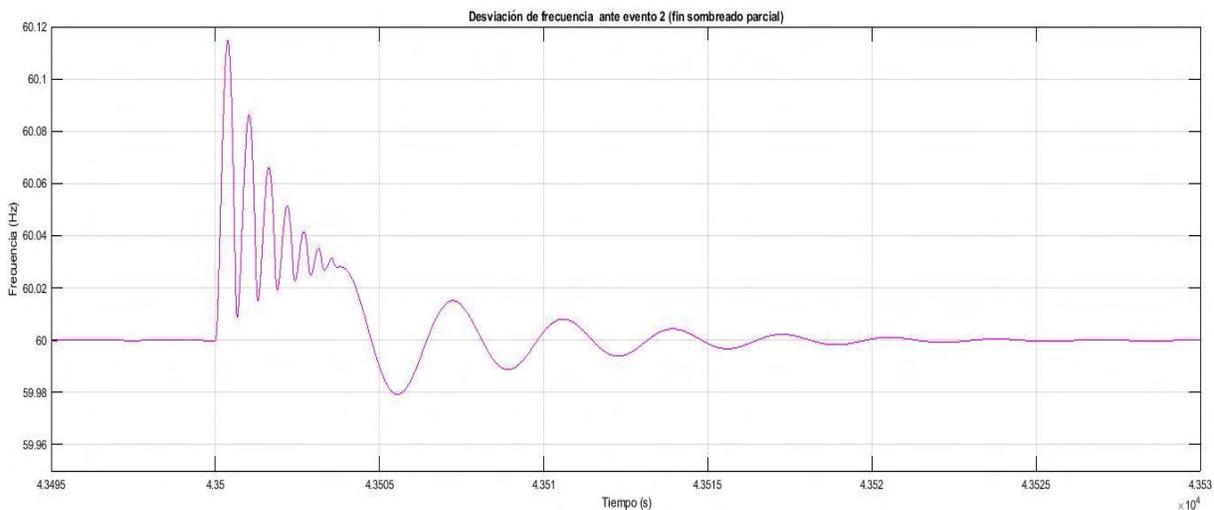


Figura 3.15: Desviación de frecuencia producida por el evento 2 (fin del sombreado parcial)

En las figuras 3.16 y 3.17 se puede observar la potencia del sistema ante la perturbación ocurrida, una vez más en el restablecimiento de la frecuencia del sistema depende del aporte del generador diesel y el sistema V2G.

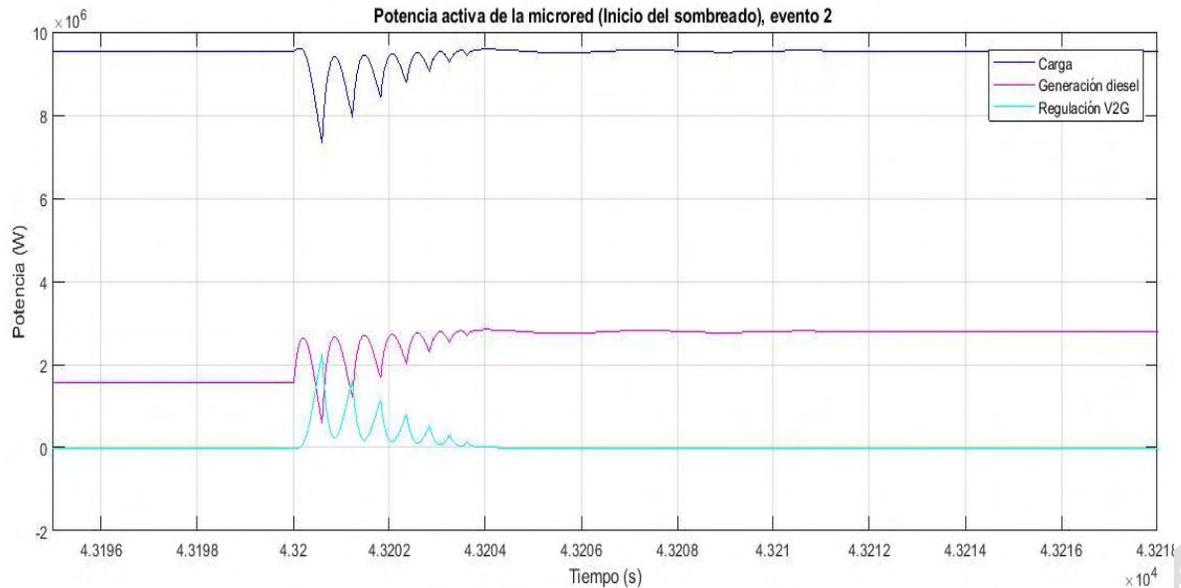


Figura 3.16: Potencia de la microred (inicio del sombreado parcial), evento 2

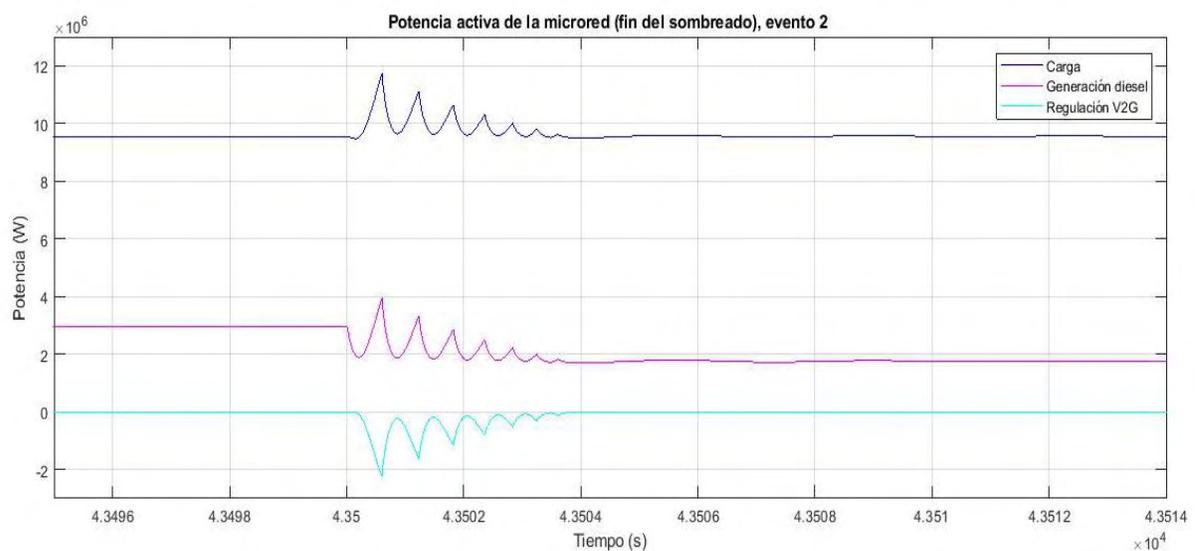


Figura 3.17: Potencia de la microred (fin del sombreado parcial), evento 2.

Efecto del evento 3: El evento 3, simulado como una desconexión del parque eólico producido por una velocidad excesiva del viento, disminuye la potencia disponible de la microred para la carga, lo cual influye en la frecuencia, la desconexión del parque (figura 3.18) implica disminución en la frecuencia, la reconexión del parque (figura 3.19) causa una sobrefrecuencia.

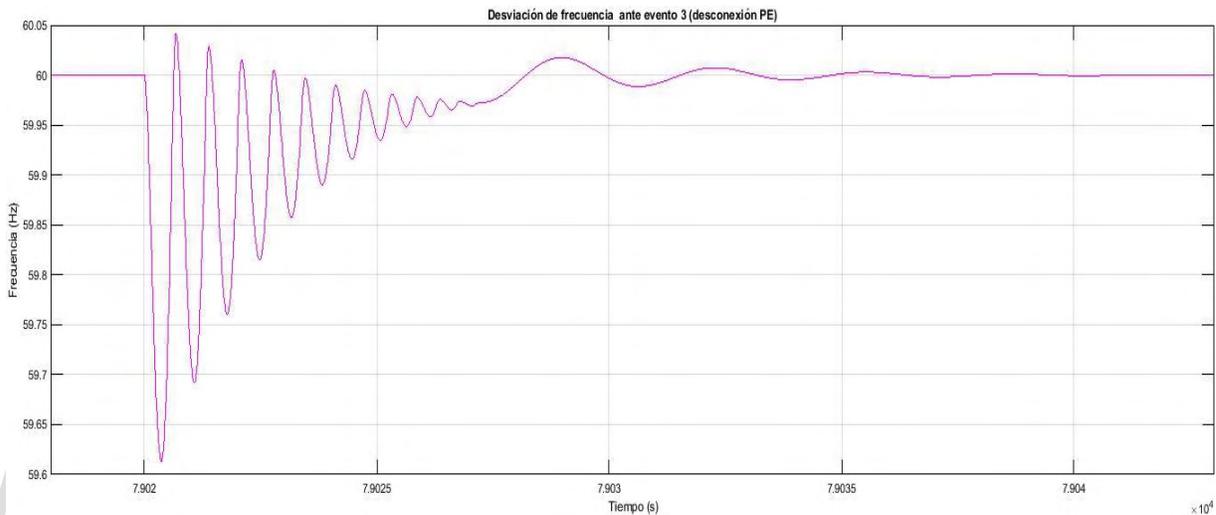


Figura 3.18: Desviación de frecuencia producida por el evento 3 (desconexión del PE)

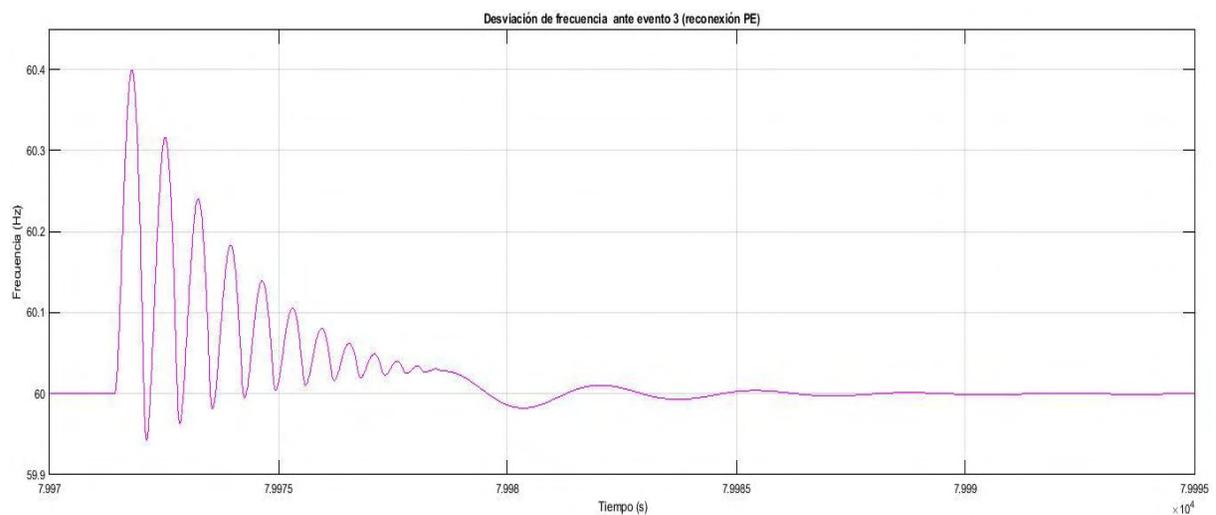


Figura 3.19: Desviación de frecuencia producida por el evento 3 (reconexión del PE)

En las figuras 3.20 y 3.21 se puede observar el comportamiento de la potencia activa de la carga y de los entes reguladores de frecuencia.

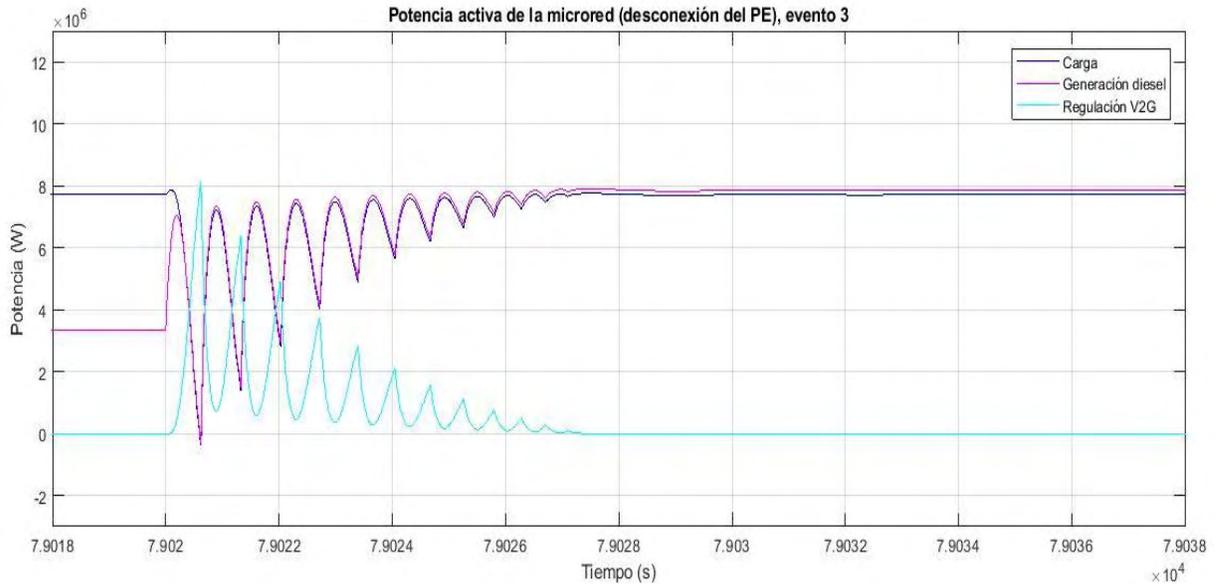


Figura 3.20: Potencia de la microred (desconexión del PE), evento 3

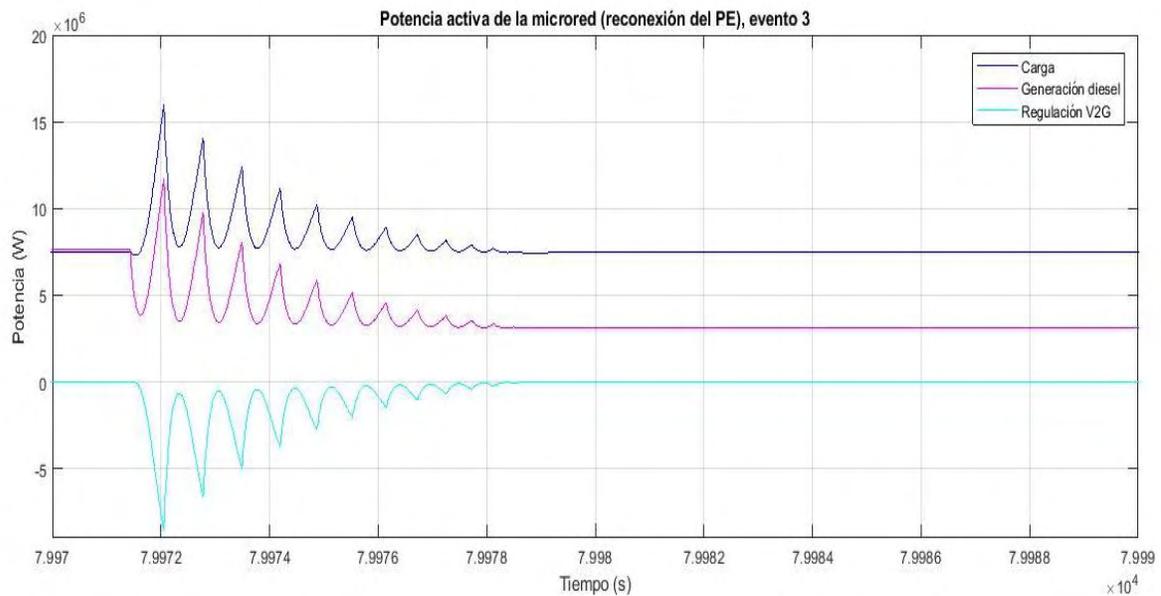


Figura 3.21: Potencia de la microred (reconexión del PE), evento 3

Una vez estudiados los efectos de las perturbaciones en la frecuencia de la microred se procede a tabular los valores de dichas desviaciones, dichos valores se presentan en la tabla 3.2. También se encuentran tabulados los valores máximos y mínimos a los cuales llega la potencia de la carga, la potencia aportada por el generador diesel y la potencia de regulación del sistema V2G.

Tabla 3.2: Valores de frecuencia en el escenario 1, ante los diferentes eventos.

Evento	Subfrecuencia (Hz)	Sobrefrecuencia (Hz)	Tiempo transitorio (s)	Potencia aportada del V2G (MW)	Potencia aportada por el GD(MW)	Potencia de la carga (MW)
1	59,96	60.01	10	0	4,23	6,46
2 (Inicio del sombreado)	59,89	60.02	20	2,13	5,87	7,33
2 (Fin del sombreado)	59,98	60,11	30	-2,22	3,82	11,68
3(Desconexión PE)	59,62	60,02	20	8,00	-1,47	-2,57
3 (Reconexión PE)	59,95	60,4	20	-8,50	11,74	15,99

3.4.2 Escenario 2: Menor reserva rodante y penetración V2G

Para establecer un segundo escenario de estudio de estudio se plantea elevar el valor pico de la carga tal como sucedería si existe un aumento en el número de consumidores o el número de artefactos por hogares; el segundo escenario tiene un incremento del 20% en la potencia de consumo de la carga lo cual disminuye la reserva rodante disponible. Las desviación de frecuencia del sistema se ante las perturbaciones se explica a continuación.

Efecto del evento 1: La figura 3.22 muestra la disminución de la frecuencia que produce el aumento de potencia activa de la carga (figura 3.23) al producirse el arranque de la máquina asincrónica a la tercera hora de la mañana.

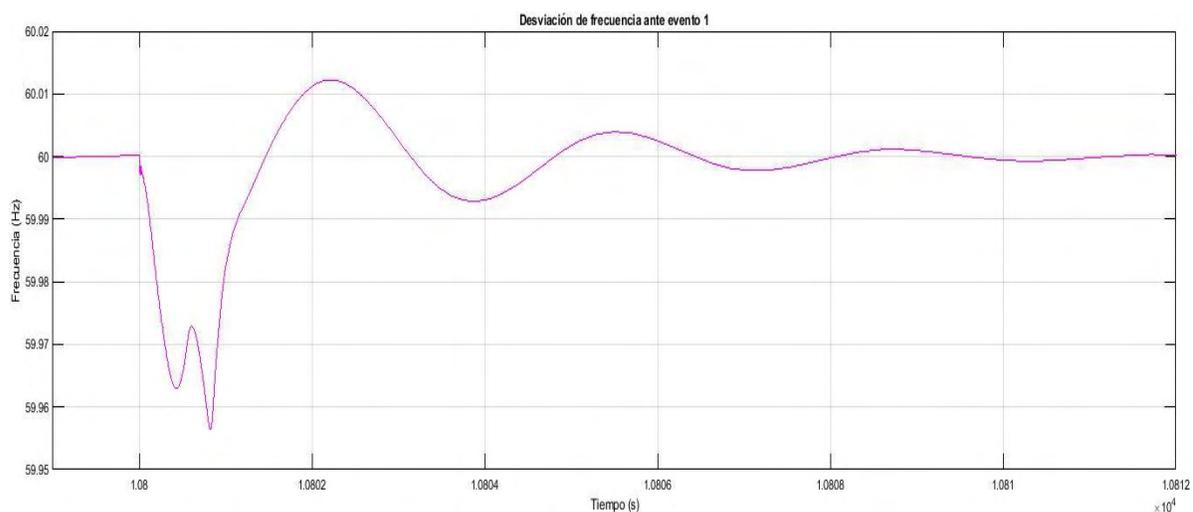


Figura 3.22: Desviación de frecuencia producida por el evento 1

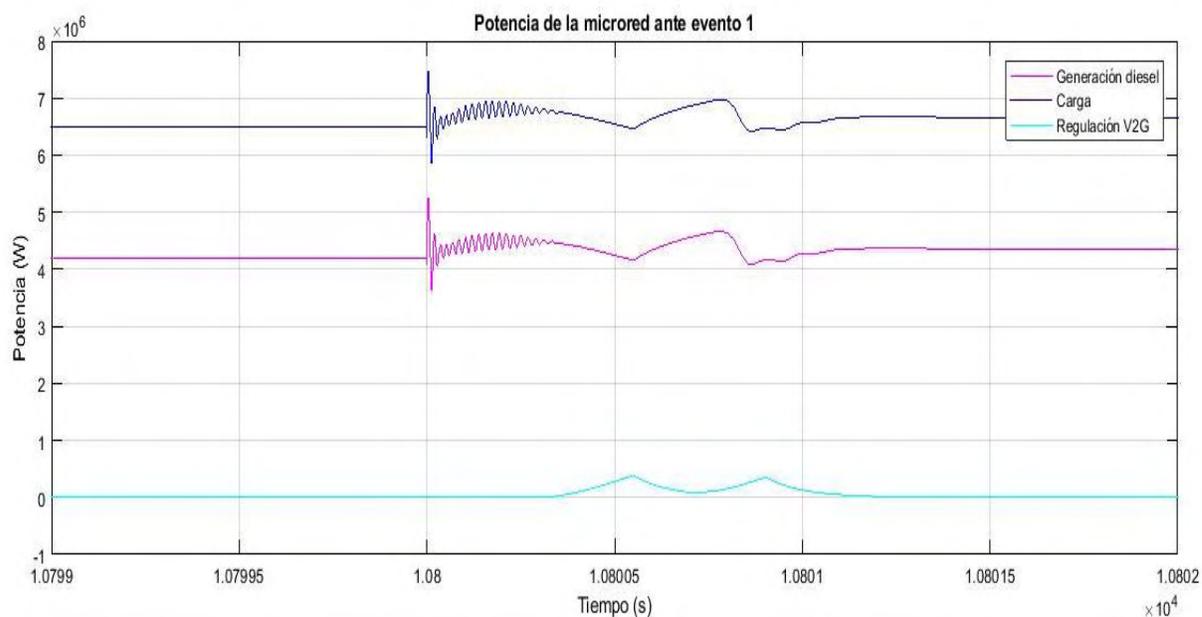


Figura 3.23: Potencia de la microred, evento 1

Efecto del evento 2: El efecto que produce la disminución de la potencia activa entregada por la granja solar en la frecuencia se puede observar en la figura 3.24, mientras que la potencia de los entes reguladores se puede observar en la figura 3.26, no obstante como el sombreado parcial es una perturbación transitoria cuando la granja solar produce de nuevo energía también causa cambios en la frecuencia de la microrred; lo cual se observa en la figura 3.25 y la respuesta de potencia se observa en la figura 3.27.

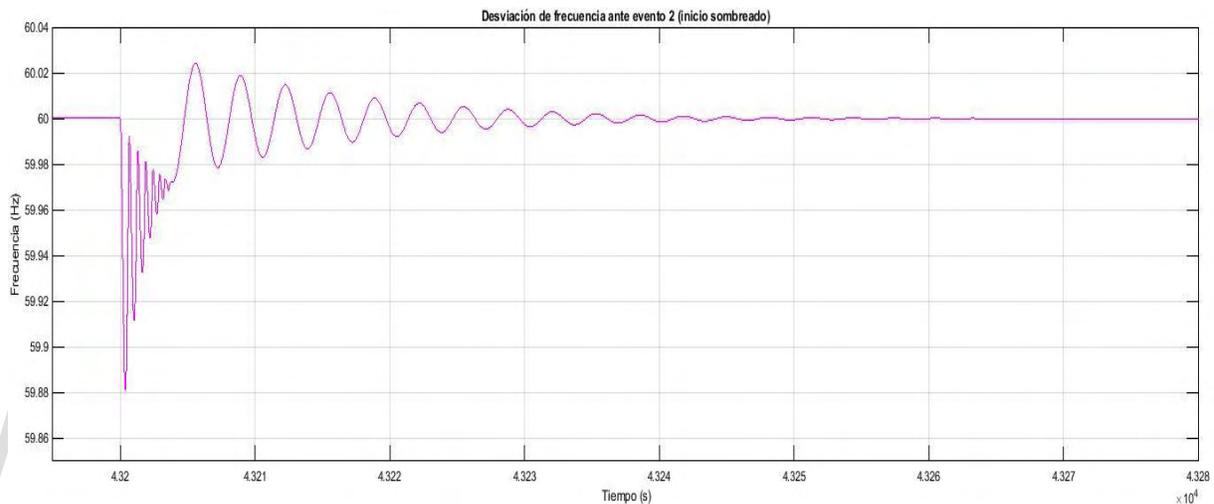


Figura 3.24: Desviación de frecuencia producida por el evento 2 (Inicio sombreado parcial)

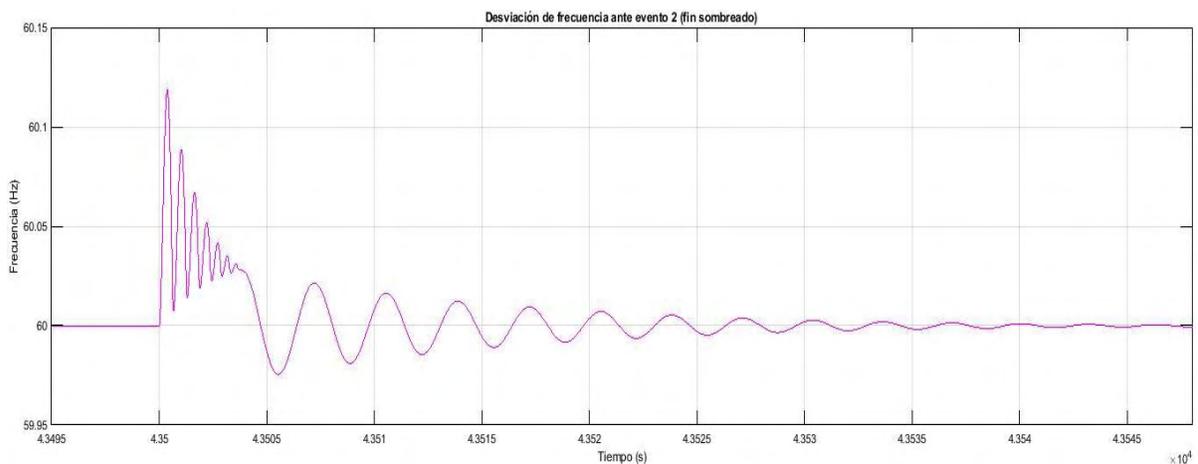


Figura 3.25: Desviación de frecuencia producida por el evento 2 (Fin sombreado parcial)

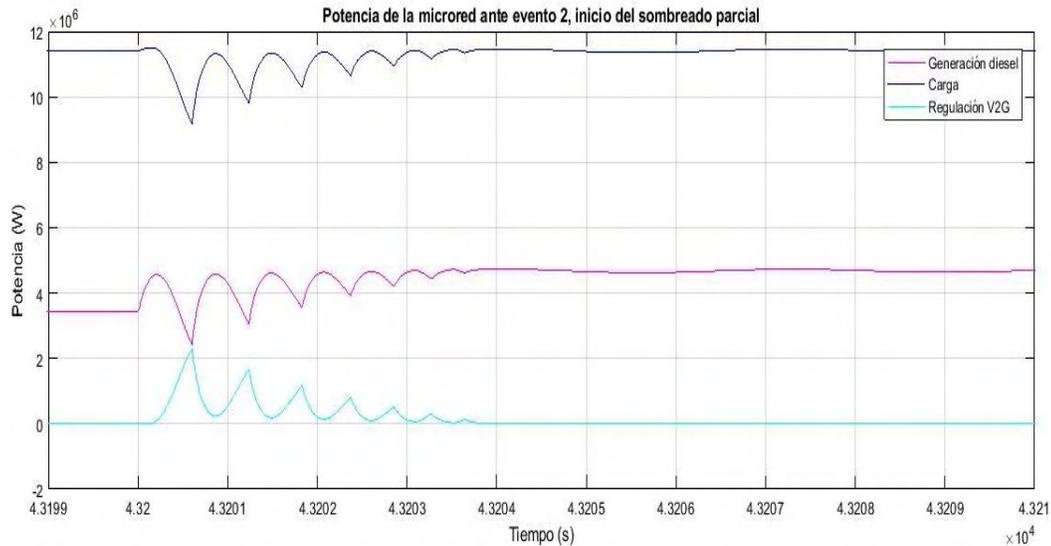


Figura 3.26: Potencia de la microred ante evento 2 (Inicio sombreado parcial)

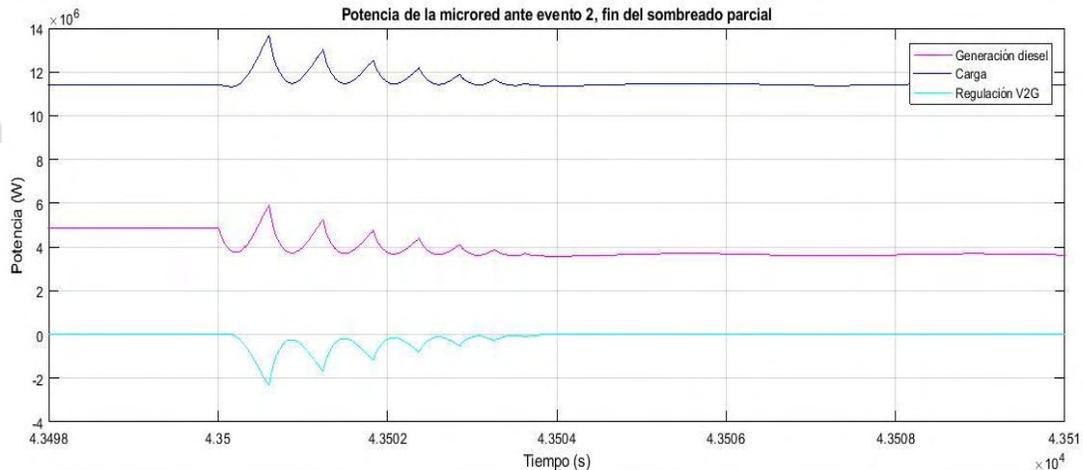


Figura 3.27: Potencia de la microred ante evento 2 (Fin sombreado parcial).

Efecto del evento 3: La desconexión del parque eólico causa en la frecuencia los cambios más notables (figura 3.28 y 3.29), obteniendo los valores más bajos para subfrecuencia y los más altos de sobrefrecuencia; los mismos se muestran en la tabla 3.3. Por otra parte esta perturbación ocurre durante las horas punta de la microred; es decir en las horas de más alto consumo de potencia lo cual se puede observar en las figuras 3.30 y 3.31.

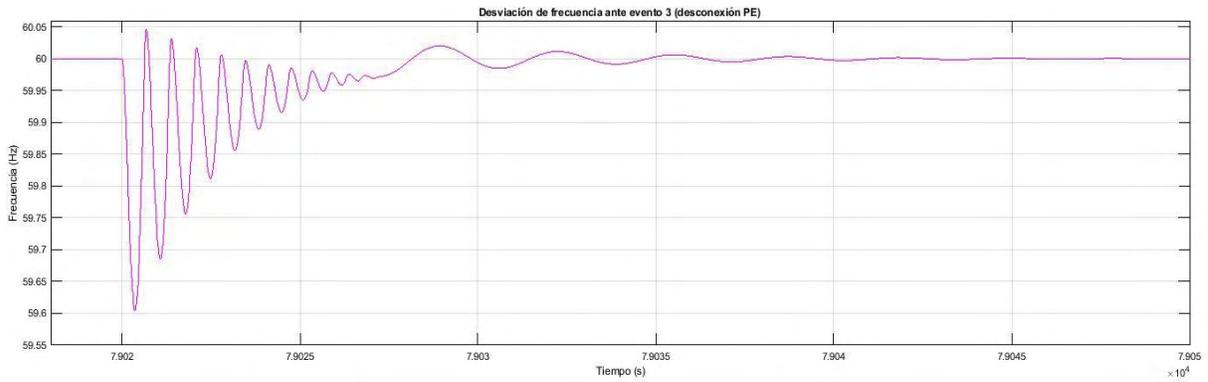


Figura 3.28: Desviación de frecuencia producida por el evento 3 (Desconexión del PE)

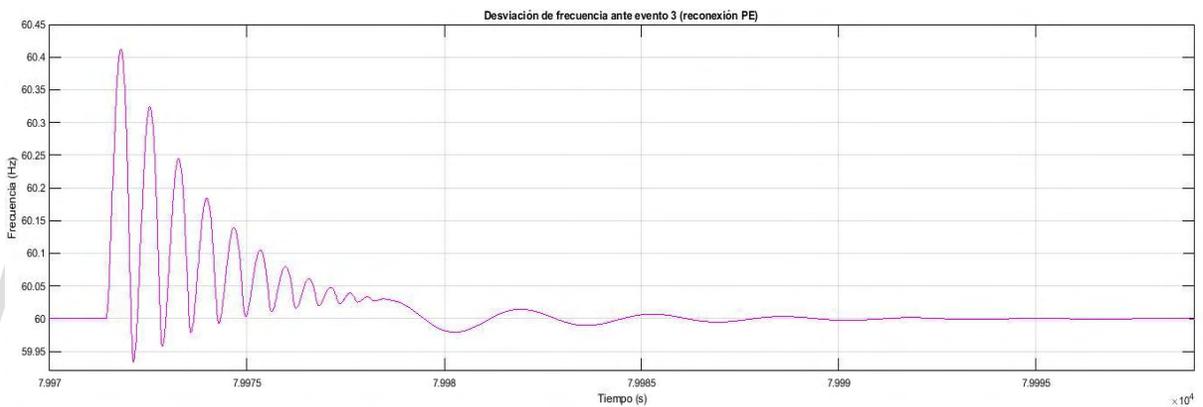


Figura 3.29: Desviación de frecuencia producida por el evento 3 (reconexión del PE)

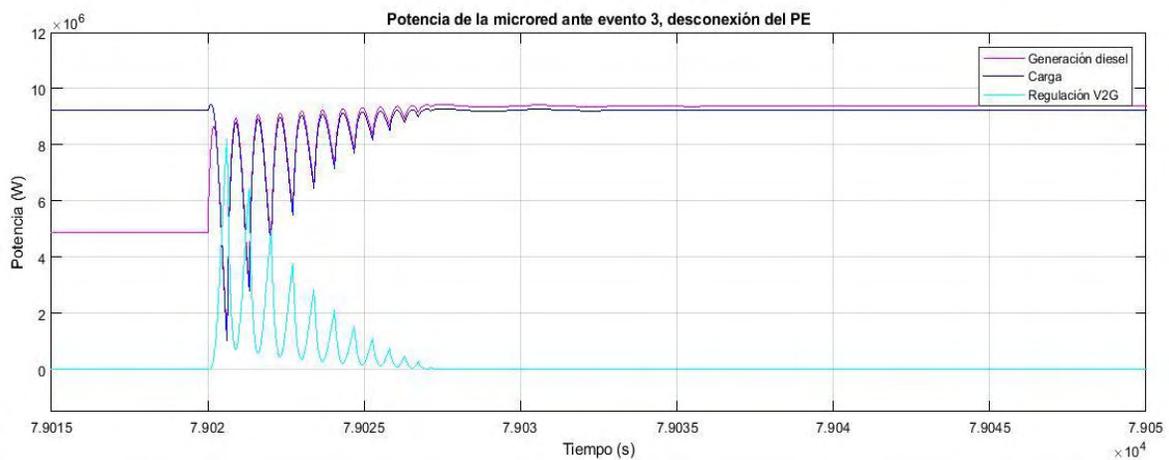


Figura 3.30: Potencia de la microrred ante evento 3 (Desconexión del PE)

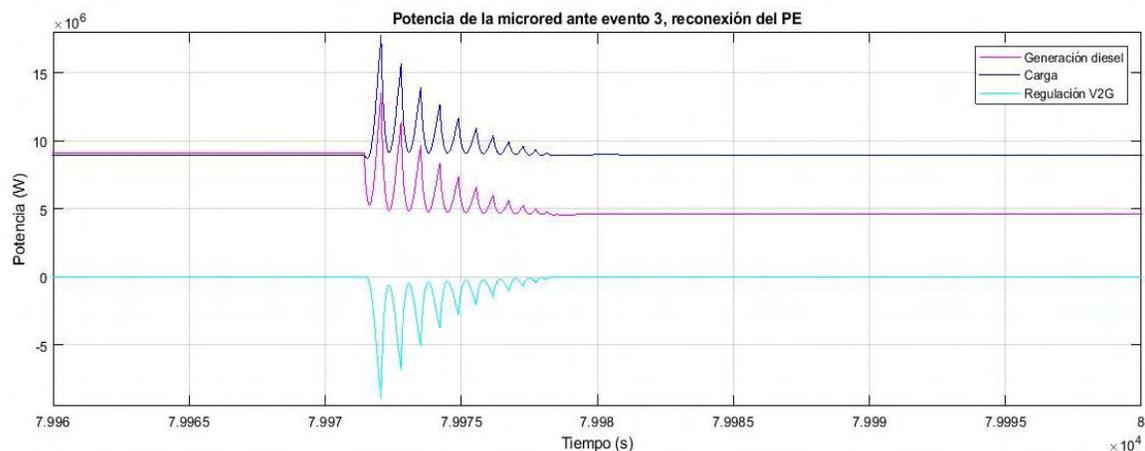


Figura 3.31: Potencia de la microred ante evento 3 (reconexión del PE).

Tabla 3.3: Valores de frecuencia en el escenario 1, ante los diferentes eventos.

Evento	Subfrecuencia (Hz)	Sobrefrecuencia (Hz)	Tiempo transitorio (s)	Potencia del V2G (MW)	Potencia por el GD (MW)	Potencia de la carga (MW)
1	59,96	60,01	10	0	5,26	7,36
2 (Inicio del sombreado)	59,88	60,02	40	2,26	2,29	9,17
2 (Fin del sombreado)	59,98	60,12	40	-2,24	5,92	13,65
3(Desconexión PE)	59,61	60,05	20	8,20	1,12	1,21
3 (Reconexión PE)	59,93	60,41	20	-8,79	13,51	17,55

La tabla 3.3 muestra los valores de subfrecuencia y de sobrefrecuencia de igual manera muestra el tiempo transitorio en el cual ocurre la restauración de frecuencia a sus valores nominales.

3.4.3 Escenario 3: Con reserva rodante y sin penetración V2G

El tercer escenario propuesto desactiva el control de frecuencia a través del sistema V2G, es decir, los autos eléctricos solamente consumirán potencia activa de la microred, este escenario plantea un valor nominal de carga residencial de 10 MW lo que proporciona reserva rodante al sistema. Se presentan a continuación los efectos en la frecuencia de la microred de cada uno de los eventos, asimismo se muestra la potencia activa del generador diesel actuando como regulador de frecuencia y la potencia activa que consume la carga.

Efecto del evento 1:

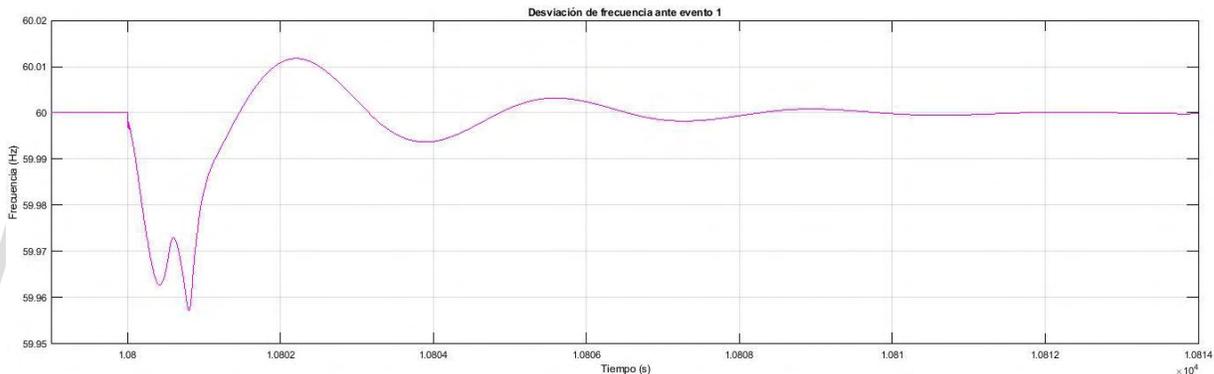


Figura 3.32: Desviación de frecuencia producida por el evento 1

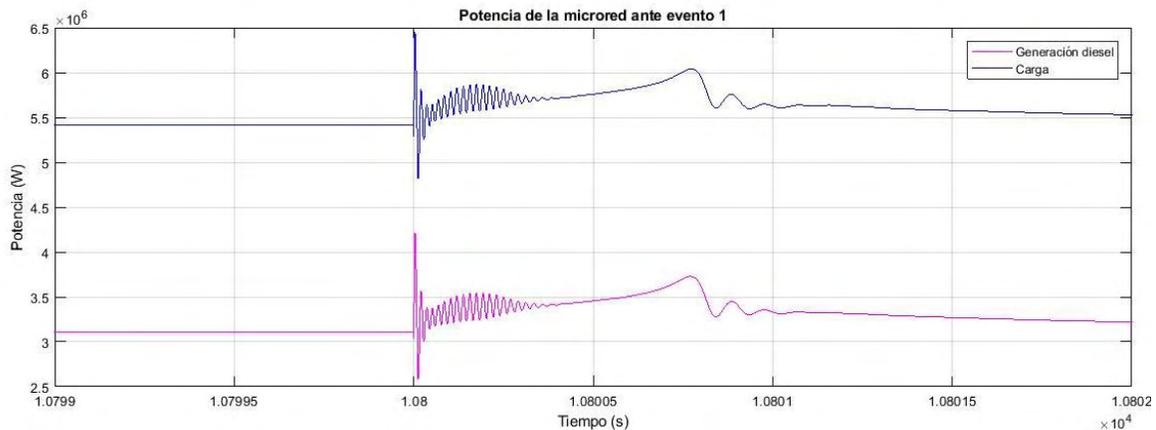


Figura 3.33: Potencia de la microred, evento 1

Efecto del evento 2:

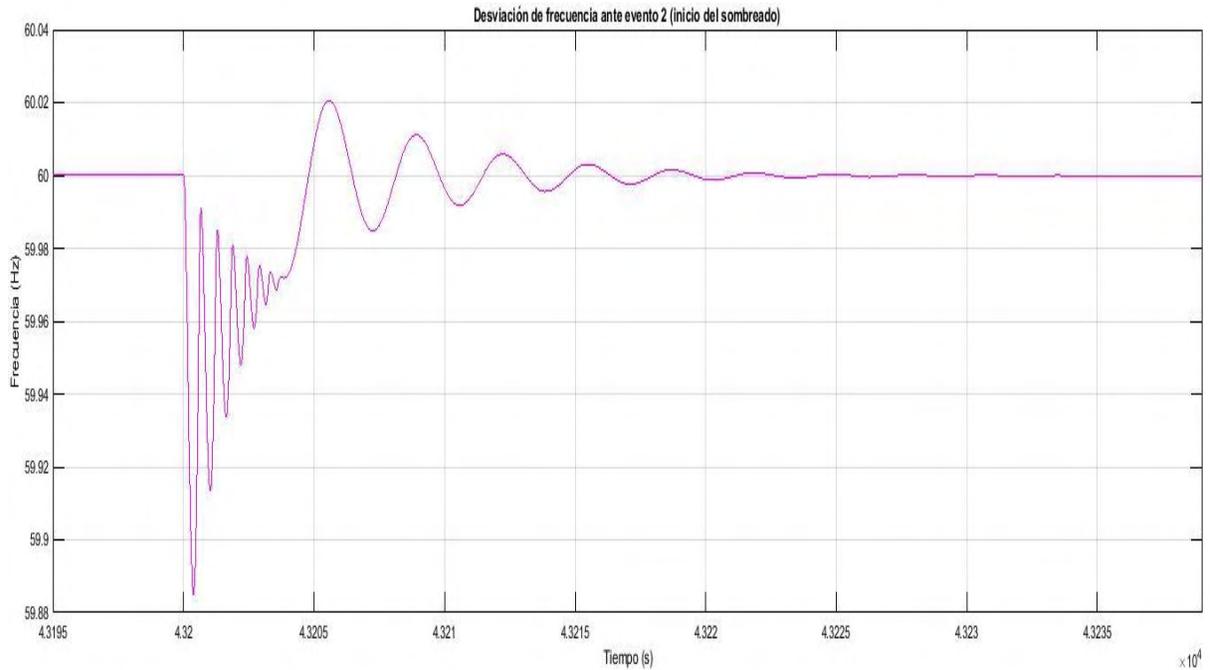


Figura 3.34: Desviación de frecuencia producida por el evento 2 (Inicio sombreado parcial)

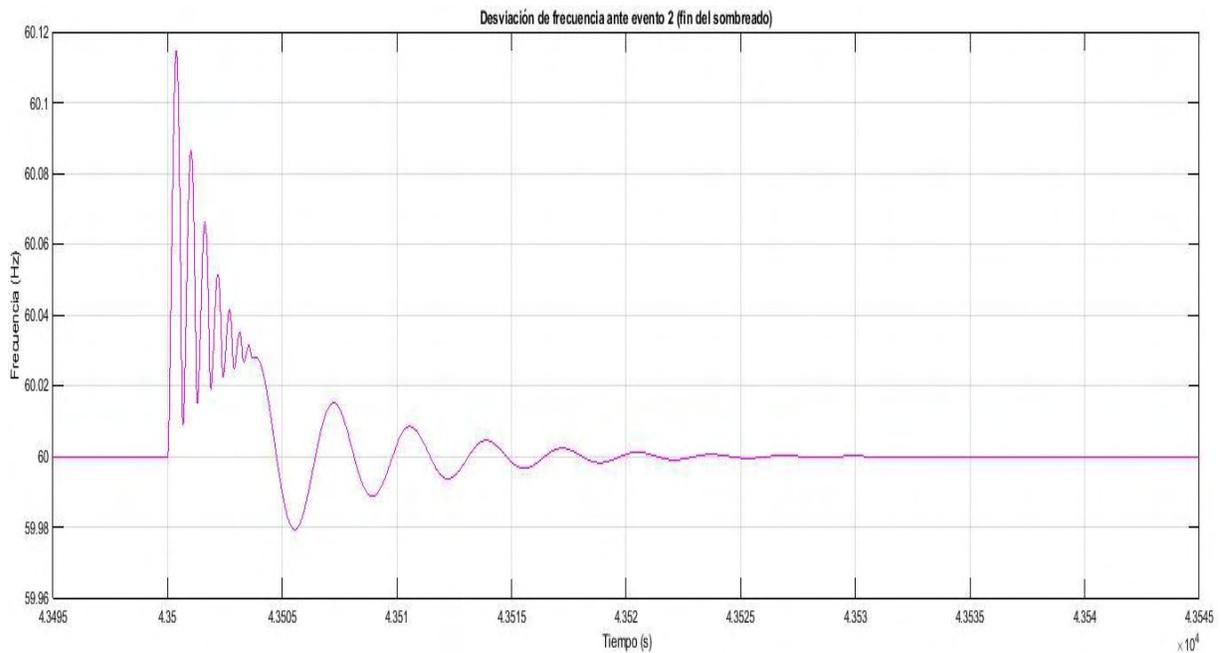


Figura 3.35: Desviación de frecuencia producida por el evento 2 (Fin sombreado parcial)

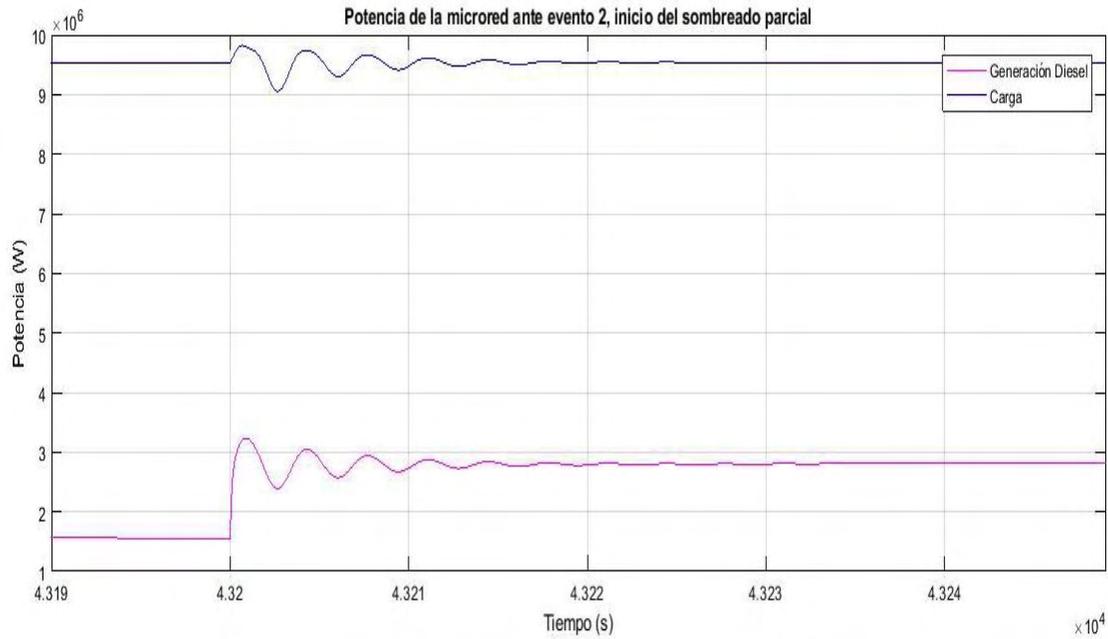


Figura 3.36: Potencia de la microred ante evento 2 (Inicio sombreado parcial)

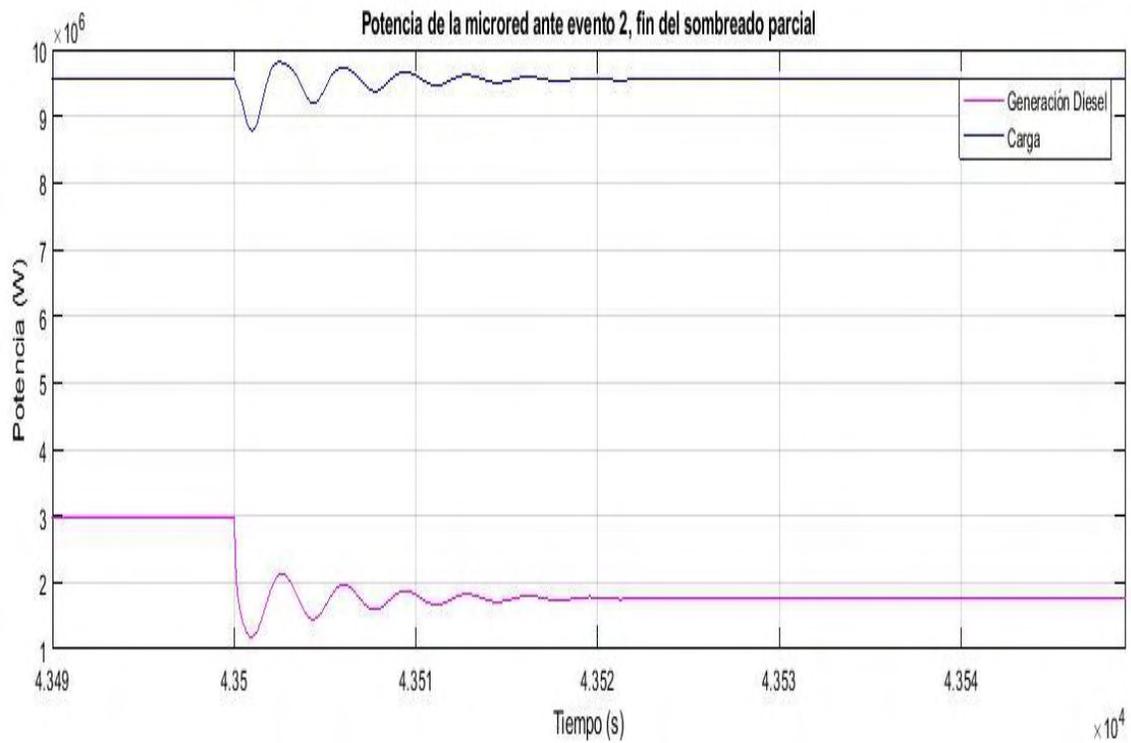


Figura 3.37: Potencia de la microred ante evento 2 (Fin sombreado parcial)

Efecto del evento 3:

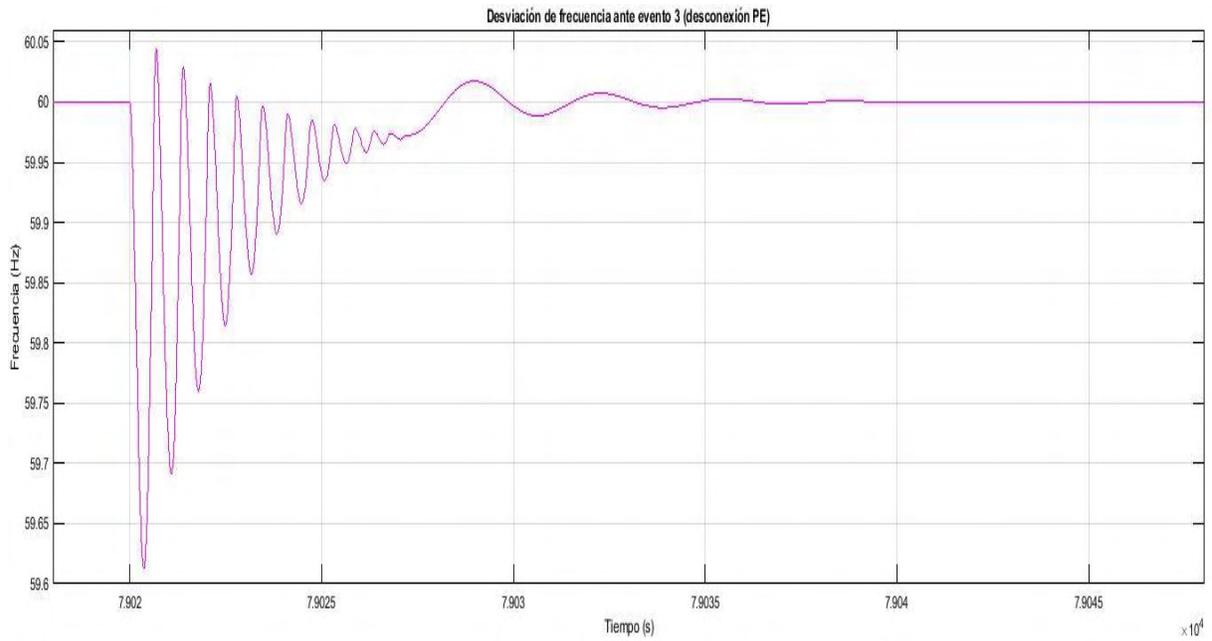


Figura 3.38: Desviación de frecuencia producida por el evento 3 (Desconexión del PE)

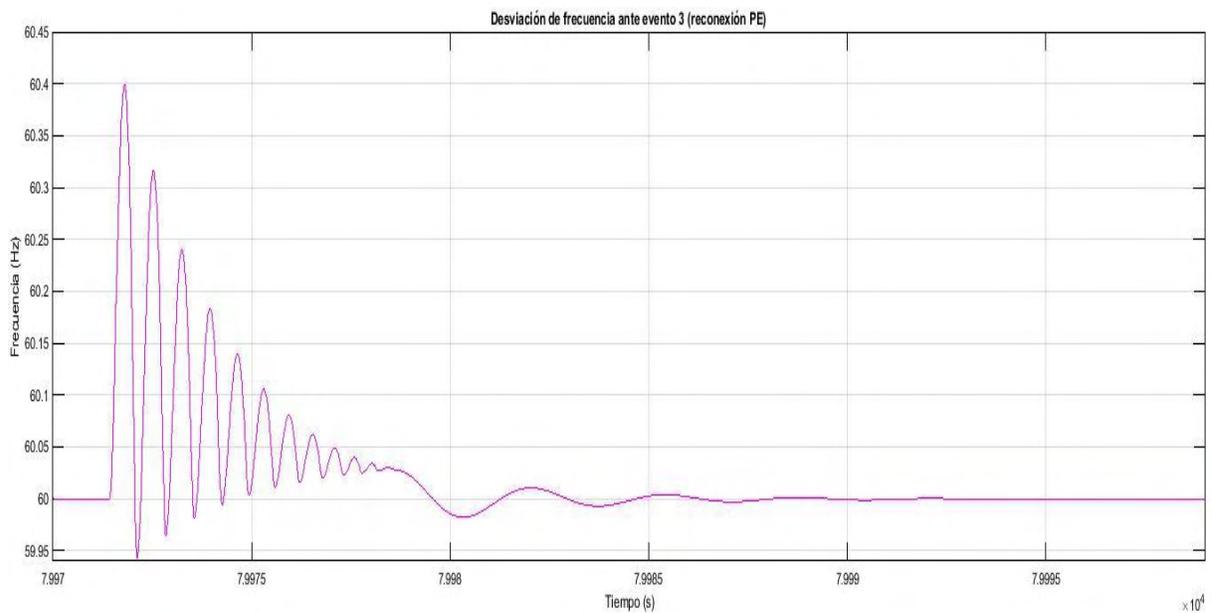


Figura 3.39: Desviación de frecuencia producida por el evento 3 (reconexión del PE)

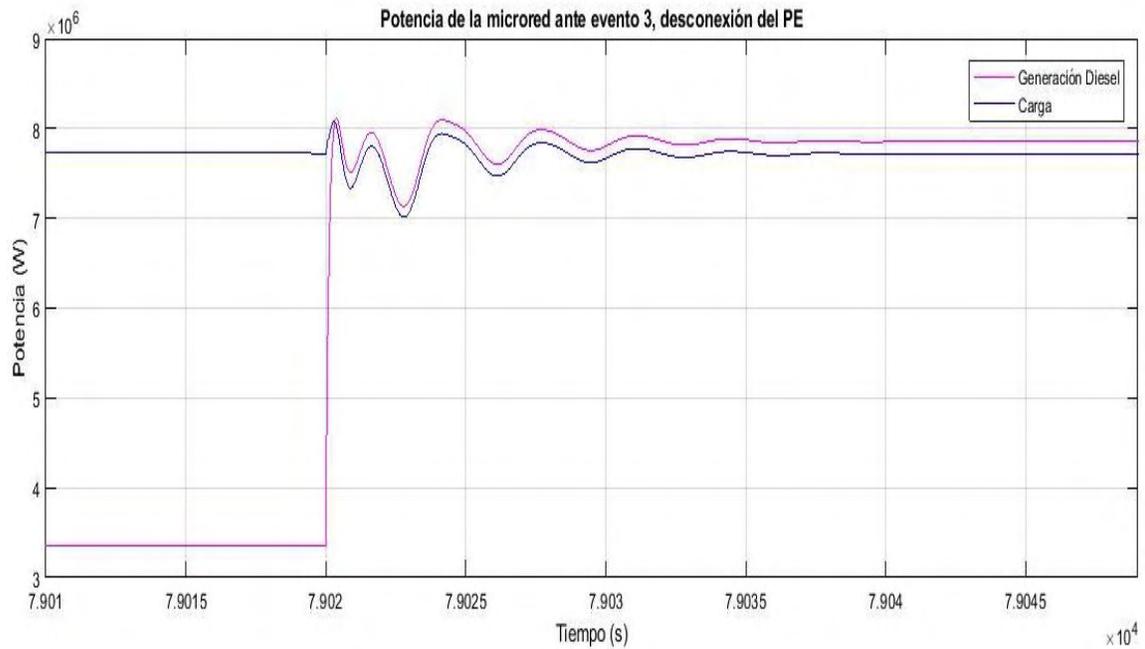


Figura 3.40: Potencia de la microred ante evento 3 (Desconexión del PE)

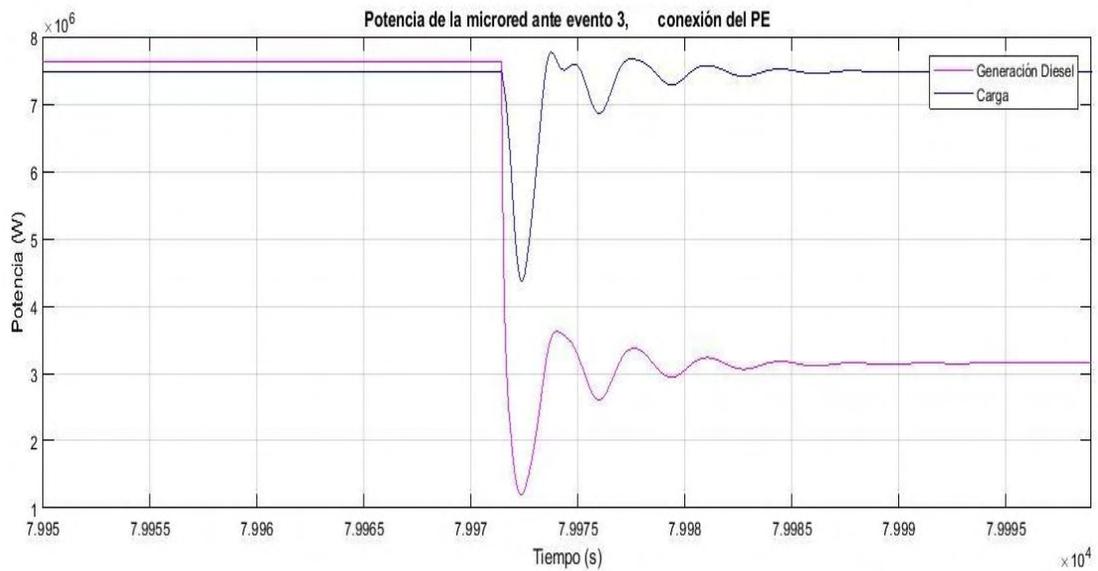


Figura 3.41: Potencia de la microred ante evento 3 (reconexión del PE)

Tabla 3.4: Valores de frecuencia en el escenario 1, ante los diferentes eventos.

Evento	Sub-frecuencia (Hz)	Sobre-frecuencia (Hz)	Tiempo transitorio (s)	Potencia aportada por el GD(MW)	Potencia de la carga (MW)
1	59,96	60,01	10	4,219	6,449
2 (Inicio del sombreado)	59,89	60,02	20	3,185	9,815
2 (Fin del sombreado)	59,98	60,11	20	1,196	8,803
3(Desconexión PE)	59,62	60,04	20	8,06	8,06
3 (Reconexión PE)	59,95	60,4	20	1,246	4,407

La tabla 3.4 resume los valores de sobre y subfrecuencia de la microred ante cada uno de los eventos propuestos para análisis, la diferencia de potencia entre el generador diesel y la carga es aportada por la generación de energía eléctrica a partir de energías renovables, sin embargo ellas no participan en la regulación de frecuencia de la microred para este escenario.

3.4.4 Escenario 4: Menor reserva rodante y sin penetración V2G

El último escenario se considera el escenario crítico, debido a que se trabaja sin regulación de frecuencia por parte de los vehículos eléctricos y se somete al sistema a trabajar con menor reserva rodante, antes estas condiciones de funcionamiento se observan valores de sub y sobrefrecuencia (Tabla 3.5) que superan los límites recomendados para evitar daños a largo plazo la máquina, lo cual hace evidente que bajo estas condiciones es necesario un control de frecuencia que sea gestionado a partir de las fuentes de energía intermitentes que se encuentran en la microred.

Efecto del evento 1:

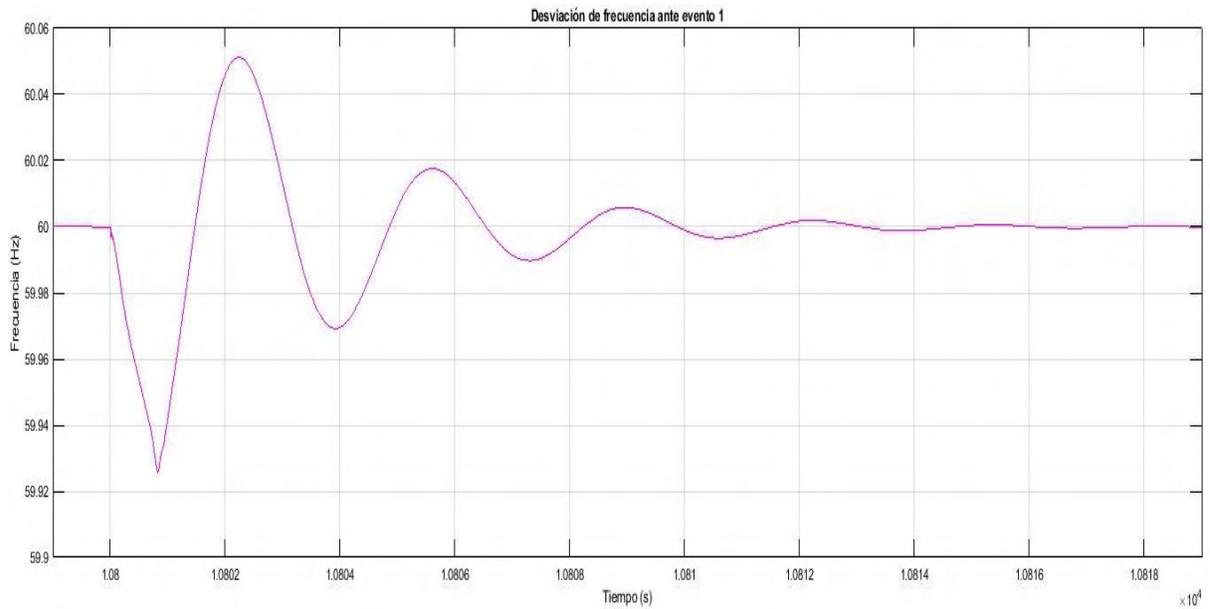


Figura 3.42: Desviación de frecuencia producida por el evento 1

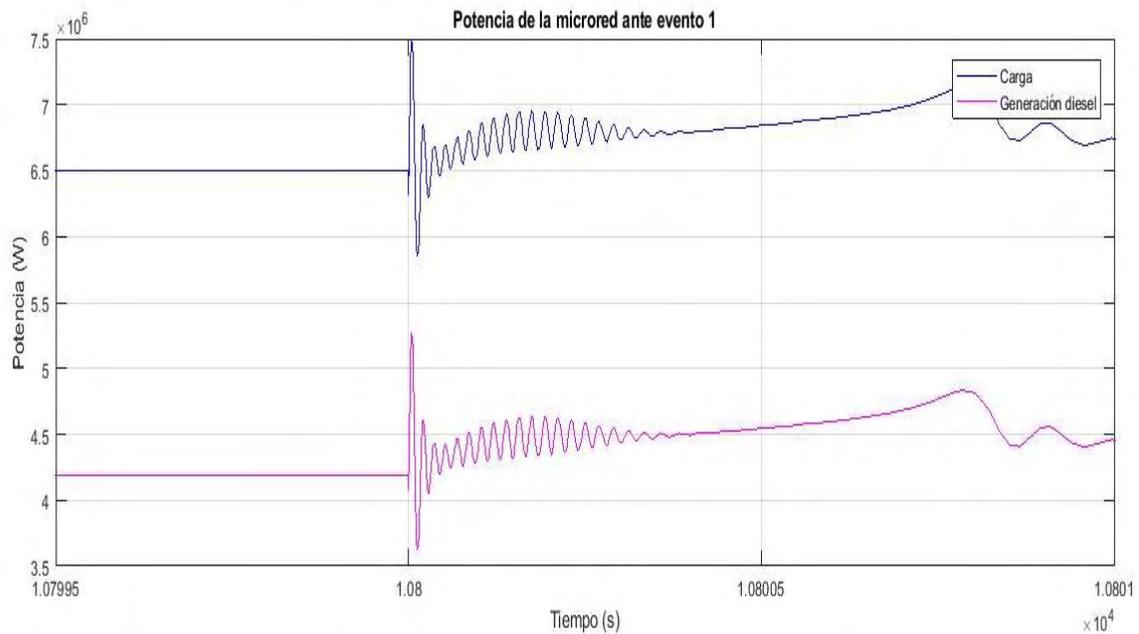


Figura 3.43: Potencia de la microred, evento 1.

Efecto del evento 2:

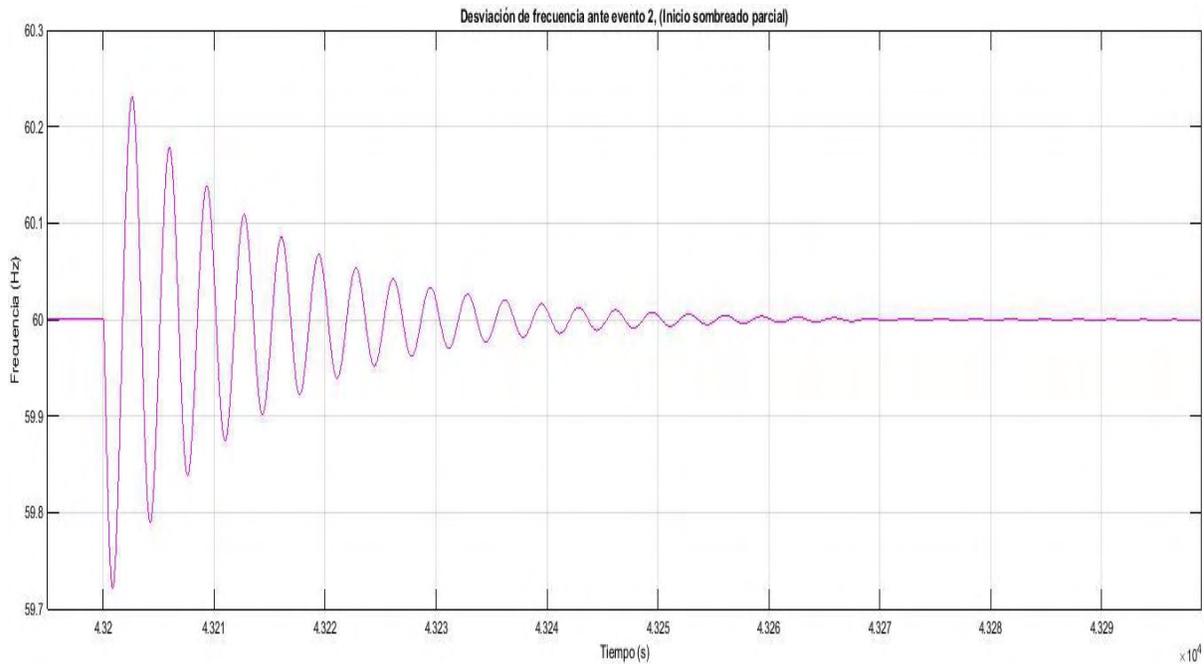


Figura 3.44: Desviación de frecuencia producida por el evento 2 (Inicio sombreado parcial)

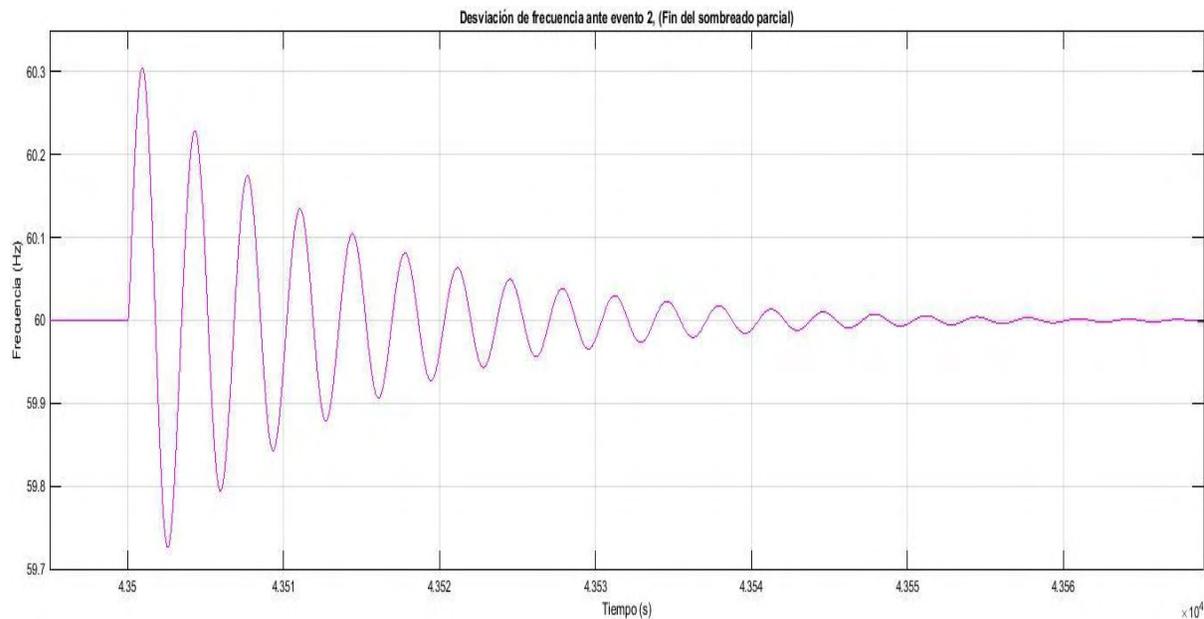


Figura 3.45: Desviación de frecuencia producida por el evento 2 (Fin sombreado parcial)

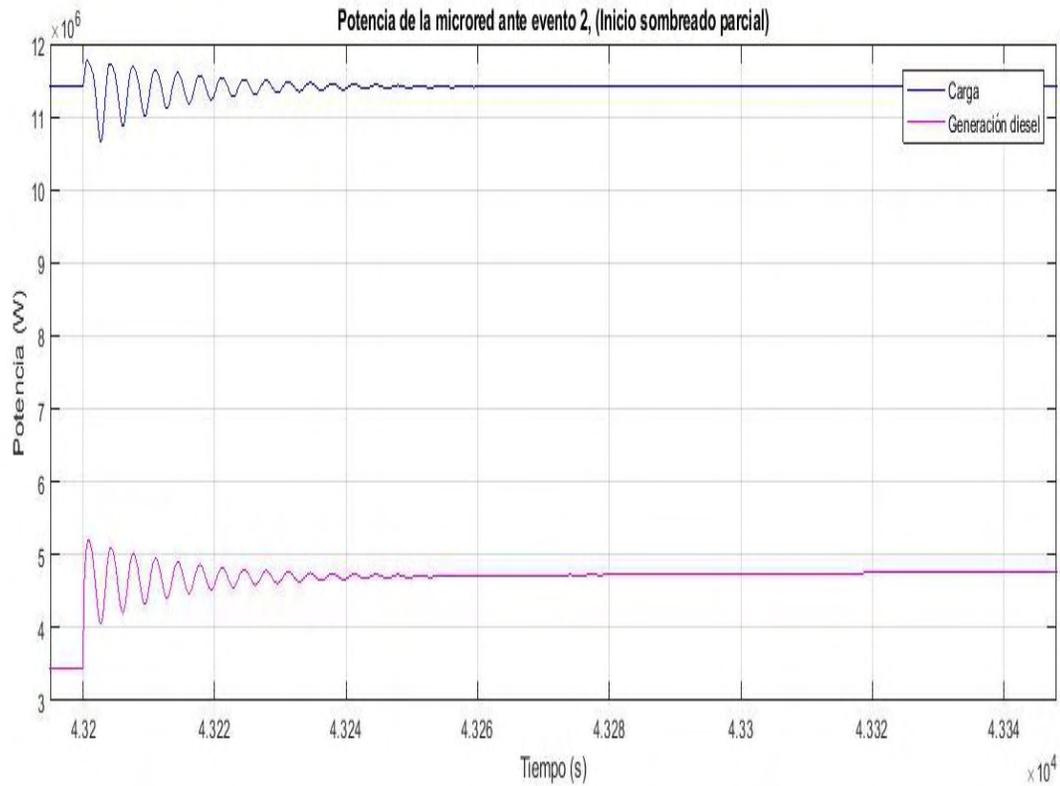


Figura 3.46: Potencia de la microred ante evento 2 (Inicio sombreado parcial)

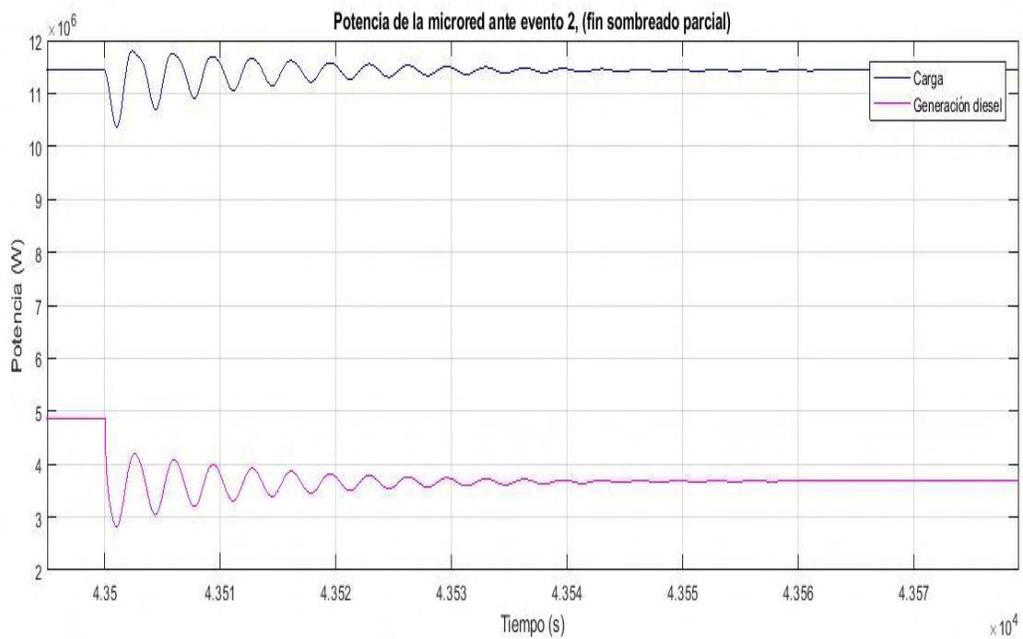


Figura 3.47: Potencia de la microred ante evento 2 (Fin sombreado parcial)

Efecto del evento 3:

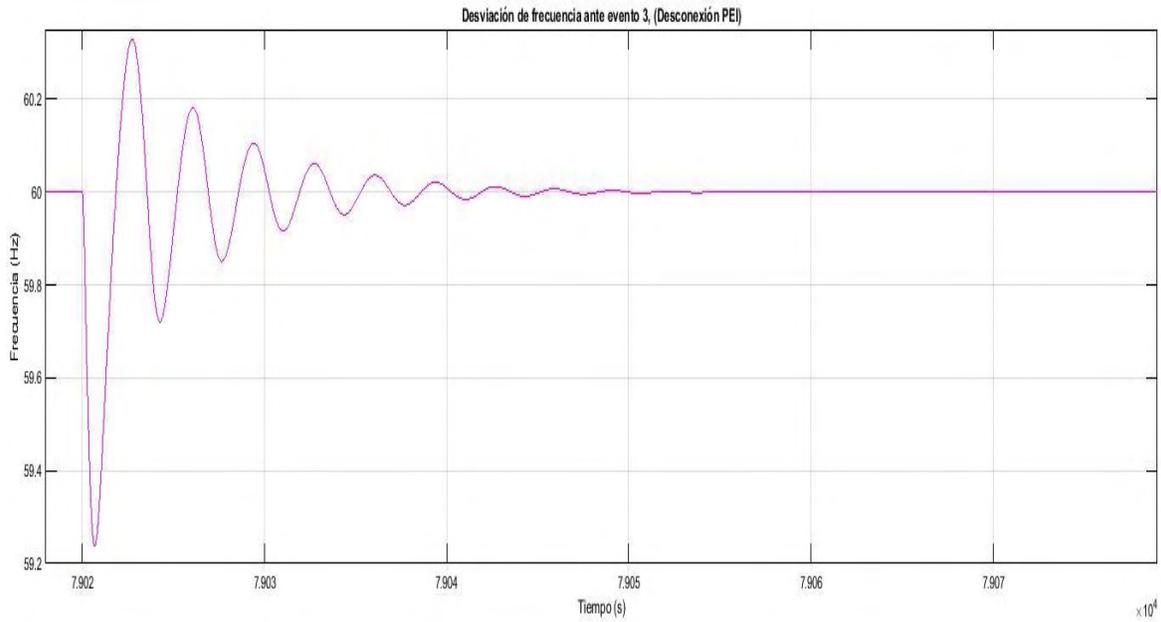


Figura 3.48: Desviación de frecuencia producida por el evento 3 (Desconexión del PE)

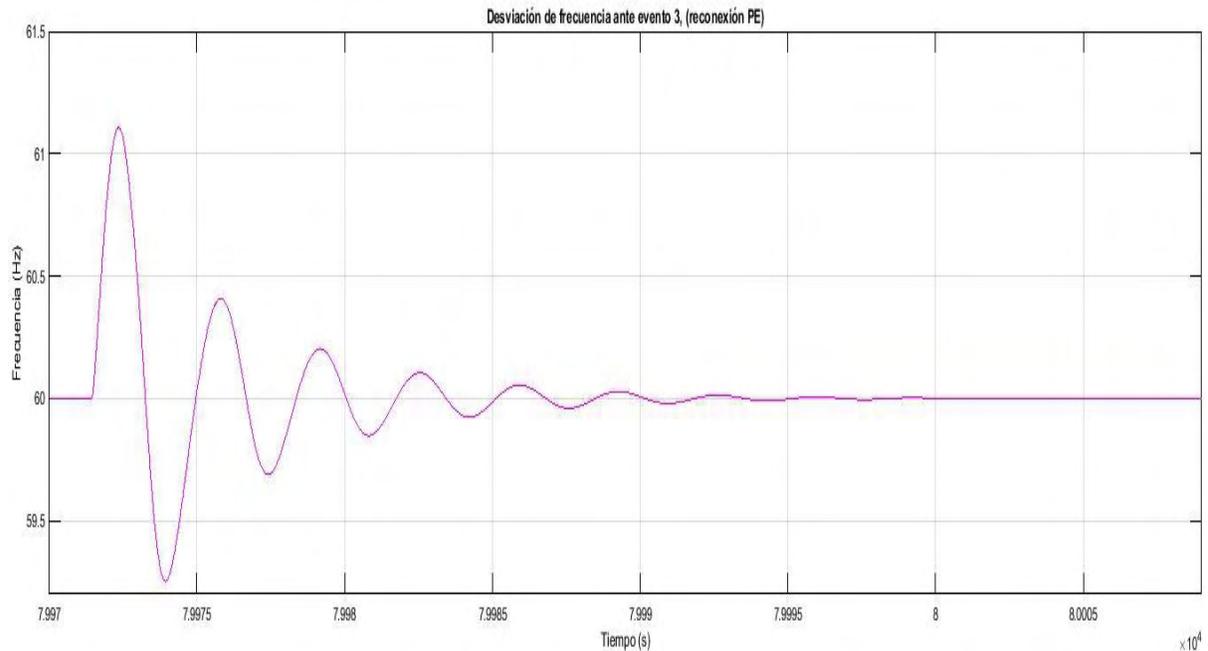


Figura 3.49: Desviación de frecuencia producida por el evento 3 (reconexión del PE)

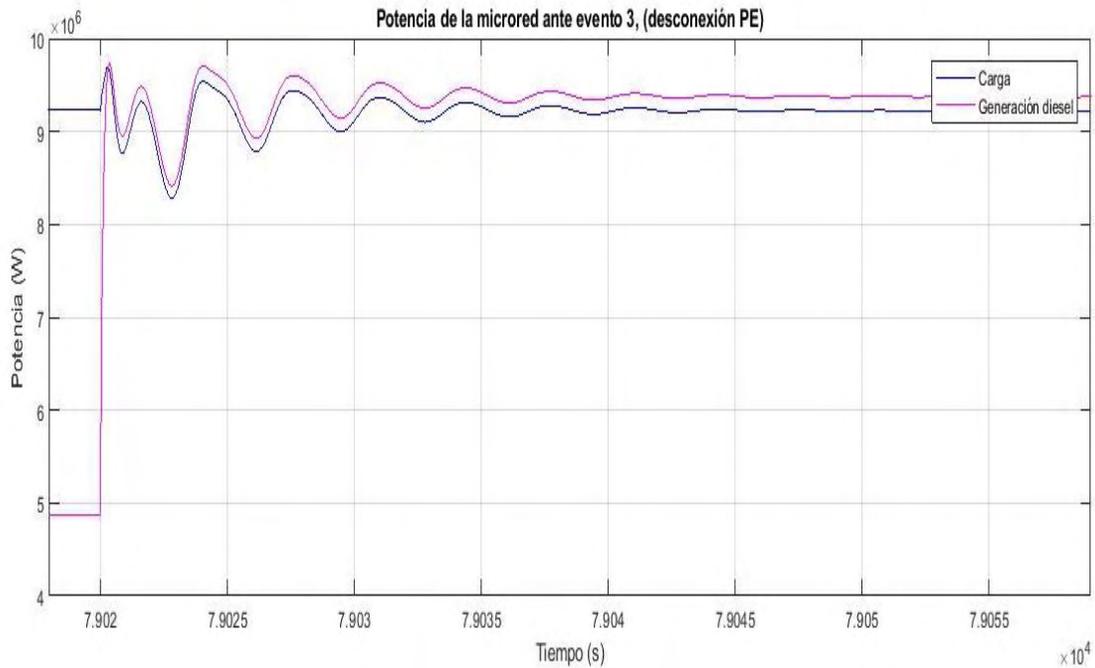


Figura 3.50: Potencia de la microred ante evento 3 (Desconexión del PE)

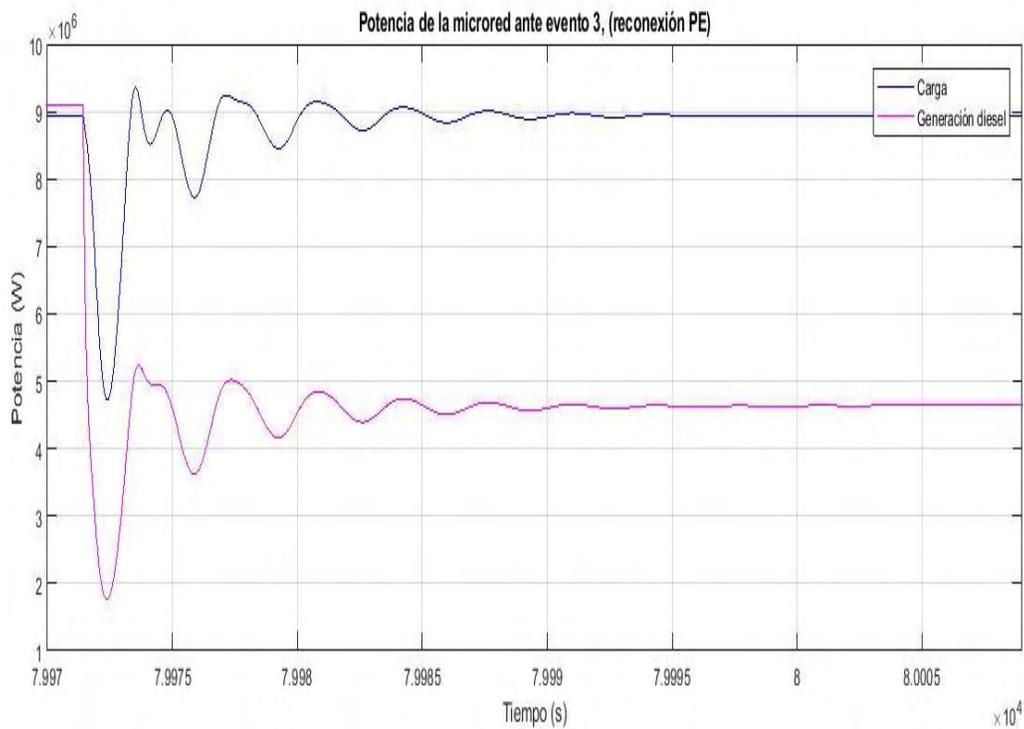


Figura 3.51: Potencia de la microred ante evento 3 (reconexión del PE)

Tabla 3.5: Valores de frecuencia en el escenario 1, ante los diferentes eventos.

Evento	Subfrecuencia (Hz)	Sobrefrecuencia (Hz)	Tiempo transitorio (s)	Potencia aportada por el GD(MW)	Potencia de la carga (MW)
1	59,93	60,05	10	5,26	7,49
2 (Inicio del sombreado)	59,72	60,23	70	5,20	11,77
2 (Fin del sombreado)	59,73	60,3	60	2,85	10,04
3(Desconexión PE)	59,25	60,33	30	9,73	9,68
3 (Reconexión PE)	59,26	61,1	20	1,78	4,79

En la tabla 3.5 se puede observar no solamente que los valores de frecuencia superan los límites recomendados sino que el tiempo transitorio también es más alto, lo cual también crea fatiga en la máquina a largo plazo.

CAPÍTULO IV

DISEÑO DE ESQUEMA DE CONTROL DE FRECUENCIA A TRAVÉS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGIA EN BATERIAS.

El capítulo IV presenta el diseño del control primario frecuencia a implementar en la microred, dicho control se propone como una alternativa al control predeterminado incluido en la misma.

4.1 DESCRIPCIÓN DEL CONTROL INCLUIDO EN LA MICRORED AISLADA.

La microred descrita en el capítulo III posee un mecanismo de control de frecuencia utilizando la potencia activa que aportan los vehículos eléctricos y el generador diesel; el diagrama de bloques del control se muestra en la figura 4.1.

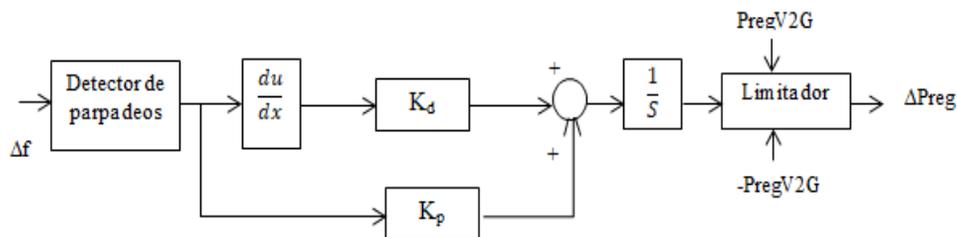


Figura 4.1 Diagrama de bloques del control incluido en la microred.

Como se puede observar en la figura 4.1, la regulación de frecuencia de la microred parte de una diferencia (Δf) entre la frecuencia medida y la frecuencia nominal o referencia del sistema; esta señal pasa a través de un detector de parpadeos, es decir, un mecanismo que determina si la diferencia Δf es lo suficientemente grande para activar el control. Por otra parte el control posee un limitador que tiene como objetivo mantener la potencia de salida entre los valores que son capaces de entregar el sistema V2G, siendo éstos los que proporciona la potencia activa para la regulación.

La implementación de dicho control en MATLAB/Simulink se observa en la figura 4.2, en la misma se puede apreciar que la frecuencia de referencia es 1 p.u y la frecuencia medida proviene de la medición de la velocidad del rotor de la máquina síncrona del generador, por lo tanto el sistema de control es alimentado con variables tanto de los autos eléctricos en estado de regulación como de la generación diesel.

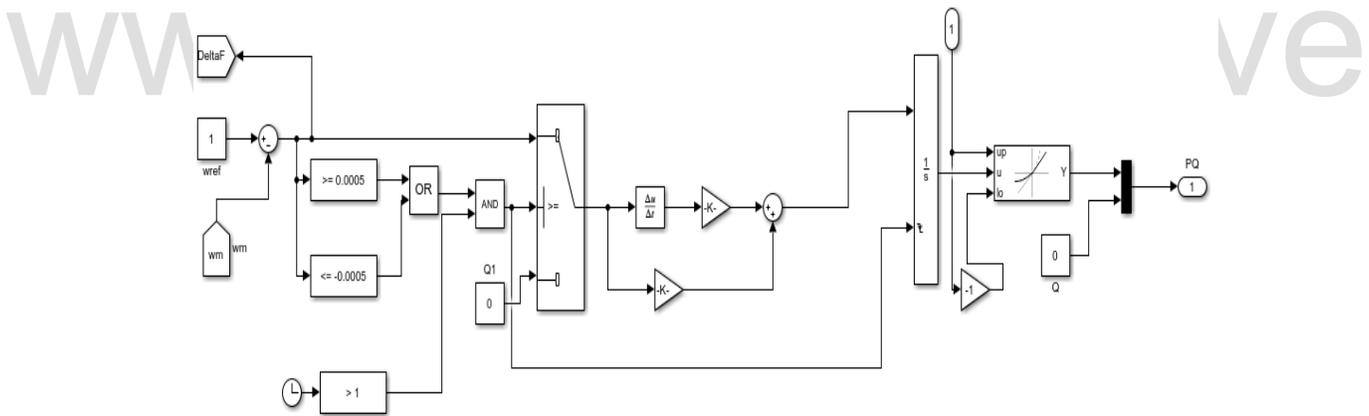


Figura 4.2 Control de frecuencia implementado en la microred.

4.2 DESCRIPCIÓN DEL ESQUEMA DE CONTROL PROPUESTO.

A pesar de tener una buena respuesta ante perturbaciones, el control predeterminado en la microred puede ser diseñado de manera que incluya las fuentes de energía renovable, en ese sentido, se propone un control primario de frecuencia que incorpore sistemas de

almacenamiento de energía, destinados a guardar el 20% de la energía eléctrica producida por el parque eólico para regular la frecuencia ante los distintos eventos planteados. Según Sarasua, Molina, Pontoriero & Mercado (2008), 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. Existen dos modos de control que incluyen sistemas de almacenamiento, el primero es el modo de control continuo en el cual se requiere permanentemente de la actuación del dispositivo de almacenamiento para balancear los cambios continuos de demanda y contingencias leves, el otro modo es el denominado control antes contingencias severas donde el grado de actuación de sistema de almacenamiento es menor, pero los requerimientos de potencia y de respuesta dinámica son sensiblemente mayores, a éste 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, Molina, Pontoriero & Mercado, 2008).

4.2.1 Dimensionamiento del sistema de almacenamiento.

El sistema de almacenamiento escogido para la regulación de frecuencia es una batería debido a que en la actualidad existen parques eólicos que ya incluyen este tipo de tecnologías como por ejemplo, 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). El circuito equivalente de la batería de iones de litio es el que se muestra en la figura 4.3 en donde el voltaje V_{oc} denota el voltaje a circuito abierto que varía no linealmente con respecto al estado de carga, SOC por sus siglas en inglés, R_0 es la resistencia óhmica de la batería que describe la resistencia electrolítica, R_1 es la resistencia de polarización y C_1 es la capacitancia de polarización, I denota la corriente que fluye a través de la carga, y U denota el voltaje en los terminales de la batería, si el valor de I es positivo corresponde a descarga de la batería y un valor negativo corresponde a carga (Zhang, Peng, Ning, Mu & Sun, 2017) .

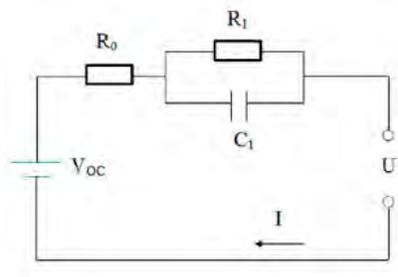


Figura 4.3: Circuito equivalente de la batería de iones de litio.

Para introducir una batería de iones de litio al modelo de microred es necesario realizar un dimensionamiento previo, con el objetivo de que la misma posea la capacidad necesaria para almacenar la potencia proveniente del parque eólico, el procedimiento que se sigue para dimensionar baterías que se utilizarán en este tipo de aplicaciones es medir los consumos nocturnos, una vez medidos los consumos se calcula la energía a almacenar, para lo cual se elige la capacidad de descarga y la tensión para conocer los amperios-hora (Alromar, s.f), sin embargo para el modelo propuesto no se parte de los consumo nocturnos sino 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), sin embargo para el dimensionamiento de la batería a utilizar en el control fue necesario partir de la potencia que se le introduce a la batería proveniente del parque eólico. El parque eólico produce una potencia nominal de 4,5MW, un 20% de ésta potencia está destinada a la carga de la batería, es decir, 0,9MW (cuando el parque produce la potencia nominal) sin embargo se desea que la batería descargue solamente el 80% de capacidad con el objetivo de alargar su vida útil, lo que quiere decir que entregará hasta 720KW, es establecido un ratio de descarga de 10 horas (tiempo durante el cual se descargará la batería) (Alromar, s.f), con éste ratio establecido se propone una batería con una capacidad de 7,2MWh, para encontrar la capacidad de la batería en A-h es necesario dividir los MWh entre el voltaje nominal de los terminales de la batería, normalmente los niveles de tensión para este tipo de

baterías de 0,45kV DC (Sarausa, Molina, Pontorierio & Mercado, 2008), lo cual da como resultado una capacidad de 16,67kA-h. Por último es de vital importancia establecer la temperatura a la cual trabajará la batería, para el presente trabajo se estableció una temperatura constante de 20°C.

Para baterías utilizadas en regulación de frecuencia es importante poseer las siguientes características (Sarausa, Molina, Pontorierio & Mercado, 2008):

- Tiempo de descarga mínimo de 60 s.
- Tiempo de respuesta no mayor al segundo.
- Requerimientos mínimos de ubicación.
- Unidades de gran escala.

4.2.1 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 se detecte 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 control de frecuencia resulta prioritario en microredes que trabajan de manera aislada como el caso de la microred en estudio debido a que no existen centrales de gran capacidad que regulen la frecuencia y proporcionen reserva rodante al sistema.

El esquema de control fue diseñado para el escenario de estudio en el cual no existe regulación de frecuencia por medio del sistema V2G y existe poca reserva rodante en generación diesel, el mismo propone utilizar un porcentaje de la potencia producida por el parque eólico almacenándola en una batería de iones de litio para 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 4.4 se muestra el control diseñado, se parte de un Δf que es la diferencia entre la frecuencia del sistema y la frecuencia nominal, posteriormente esta señal pasa a través del control preestablecido como la potencia de regulación de la microred P_{reg} , ésta 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 Δf , si el valor de Δf supera los límites establecidos como seguros de frecuencia, 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 una batería, para entregar la potencia proveniente de la batería a la red es necesario que pase a través de 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, 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

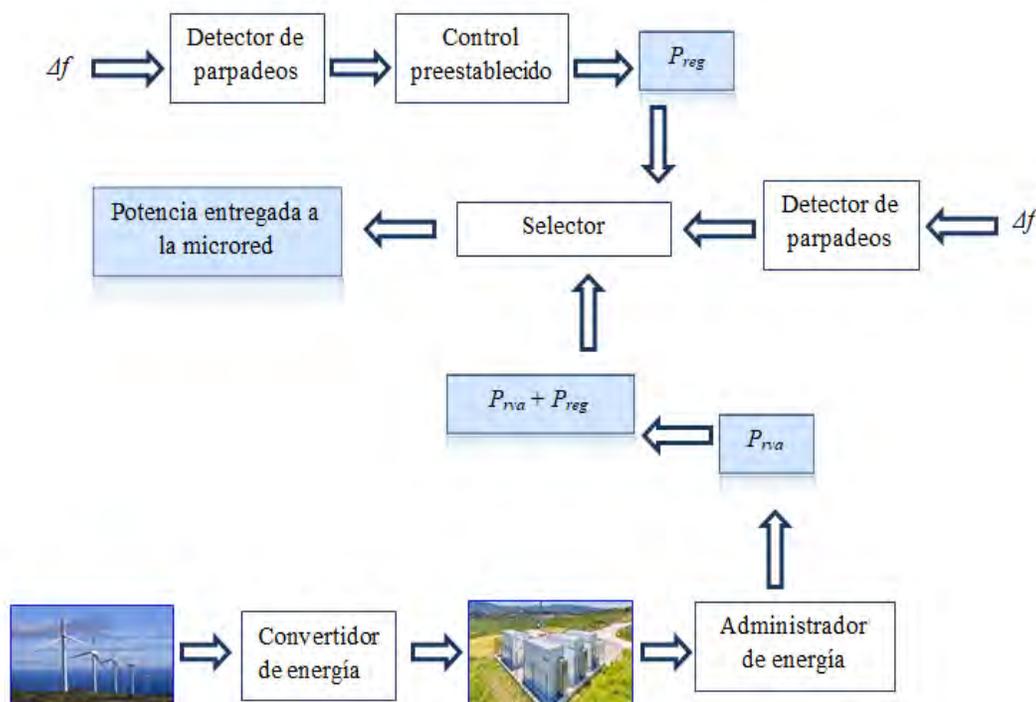


Figura 4.4: Esquema de control de frecuencia diseñado.

El esquema de control de frecuencia propuesto fue modelado en el entorno MATLAB/Simulink en tres etapas; la primera es el control preestablecido de la microred que se muestra en la figura 4.2 con la diferencia que ya no se limita 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 la misma en una batería, se muestra en la figura 4.5, la tercera y última etapa es el proceso de selección de la señal de potencia que se entregará a la microred se muestra en la figura 4.6.

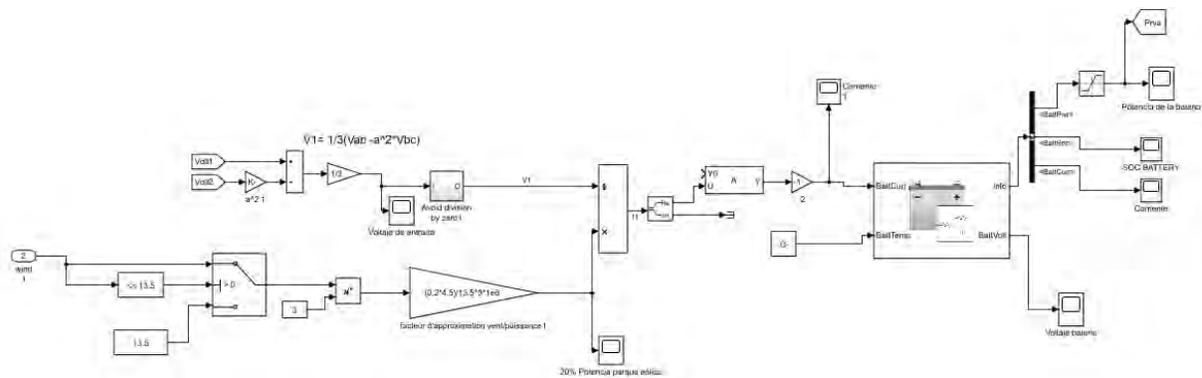


Figura 4.5: Almacenamiento de energía del parque eólico en la batería.

www.bdigital.ula.ve

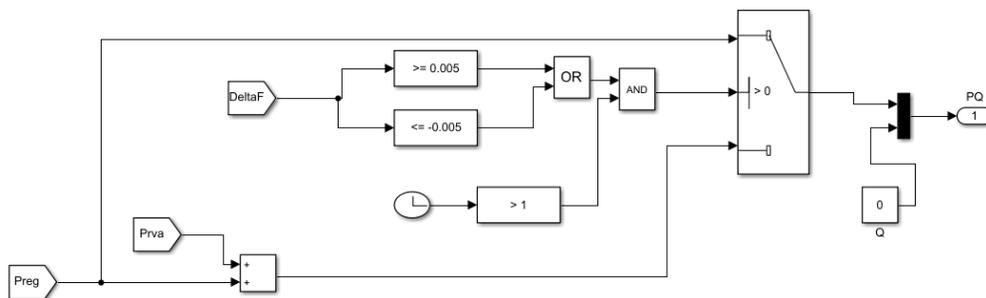


Figura 4.6: Selección de señal de potencia que se entregará a la microred.

4.3 RESPUESTA DE FRECUENCIA DE LA MICRORED ANTE EL CONTROL IMPLEMENTADO.

Como en la sección anterior se dijo, el esquema de control diseñado se implementará para el escenario 4, es decir, para un escenario sin penetración V2G y con menor reserva rodante, la

respuesta de frecuencia aplicando el esquema de control diseñado presenta una mejora sustancial, es decir, la frecuencia ante los eventos se mantiene entre los límites seguros de operación y además se restablece en su valor nominal en poco tiempo. En la figura 4.6 se presenta una comparación de la respuesta de frecuencia de la microred con el control diseñado y sin él.

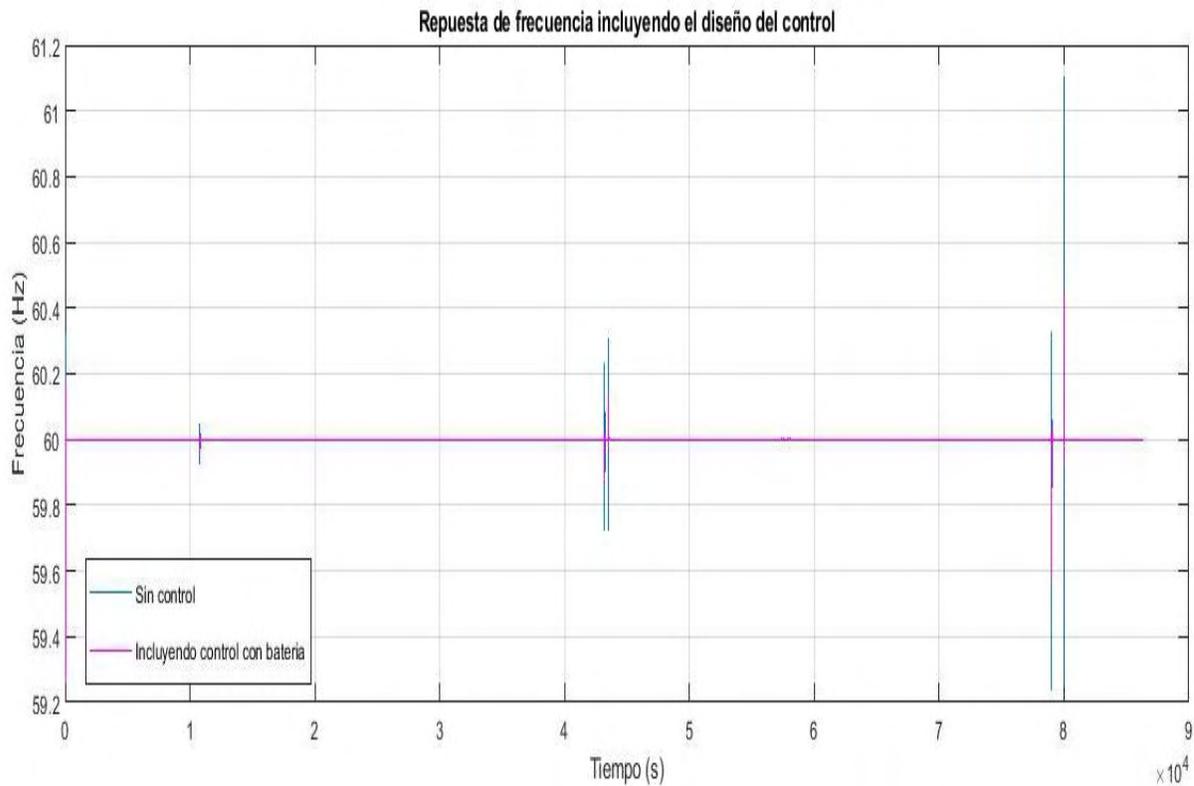


Figura 4.7: Comportamiento de la frecuencia de la microred.

Efecto del evento 1: Como se explicó en el capítulo III, 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 4.8 se puede observar cómo actúa el control ante este evento y en la figura 4.9 se puede observar el aporte de potencia del generador diesel y de la batería a la carga.

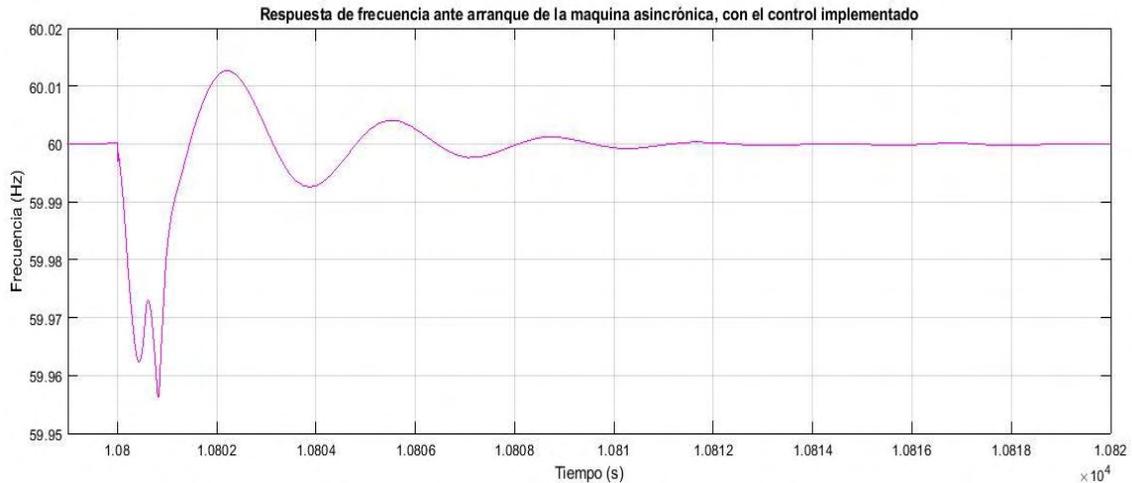


Figura 4.8: Comportamiento de la frecuencia ante el evento 1.

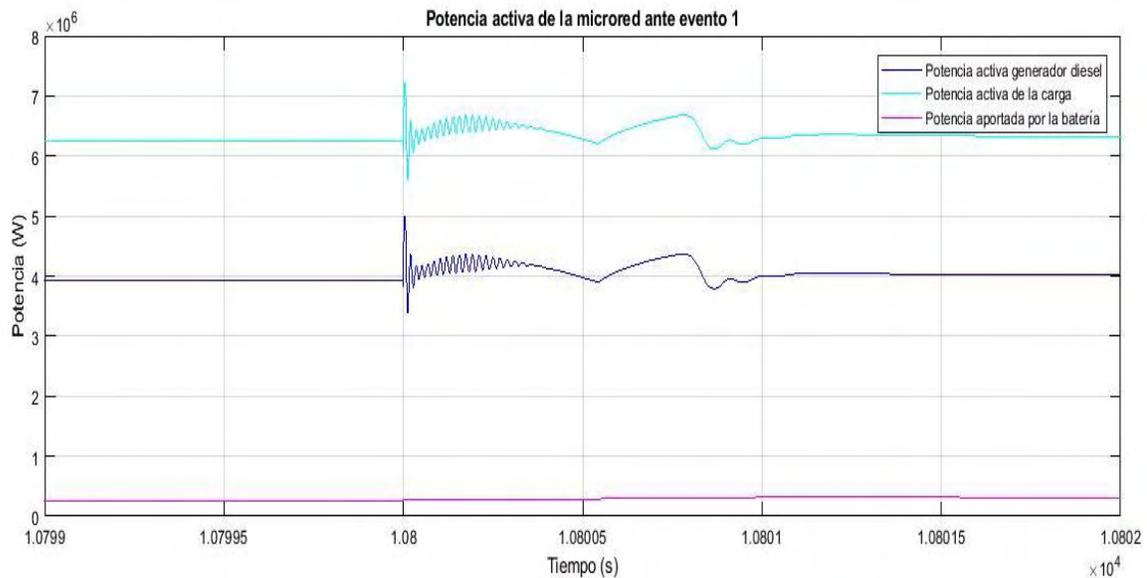


Figura 4.9: Comportamiento de la potencia activa ante el evento 1.

Efecto del evento 2: El segundo evento en afectar la frecuencia 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 4.10 y 4.12 mientras que el comportamiento de la potencia de regulación se puede observar en las figuras 4.11 y 4.13.

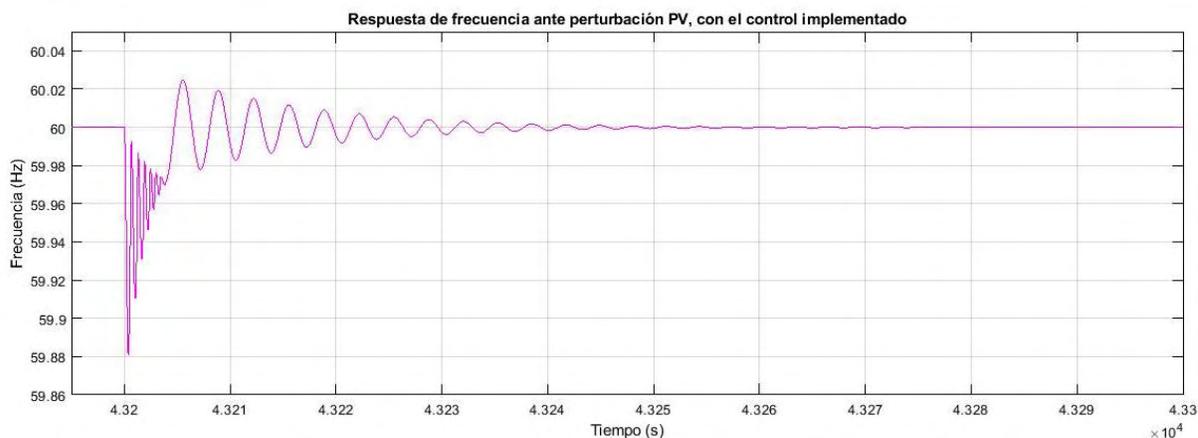


Figura 4.10: Comportamiento de la frecuencia ante el evento 2 (Inicio del sombreado parcial)

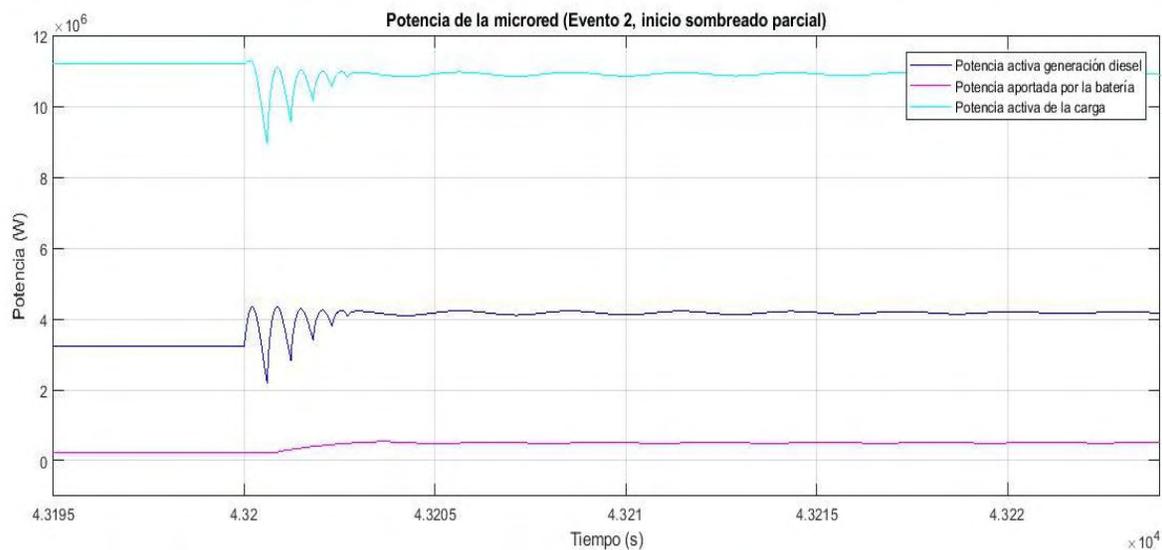


Figura 4.11: Comportamiento de la potencia activa ante el evento 2 (Inicio del sombreado parcial).

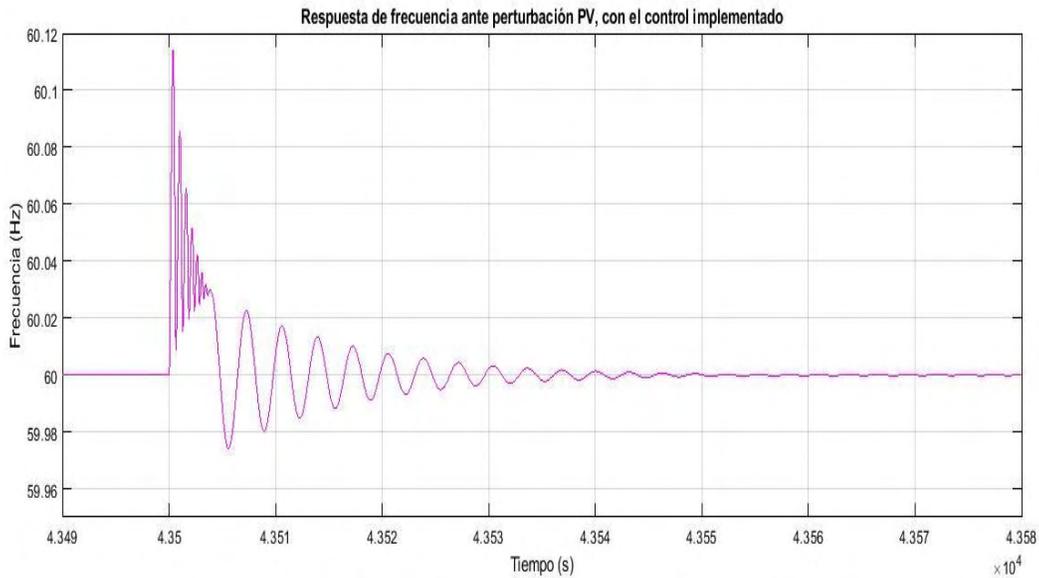


Figura 4.12: Comportamiento de la frecuencia ante el evento 2 (Fin del sombreado parcial).

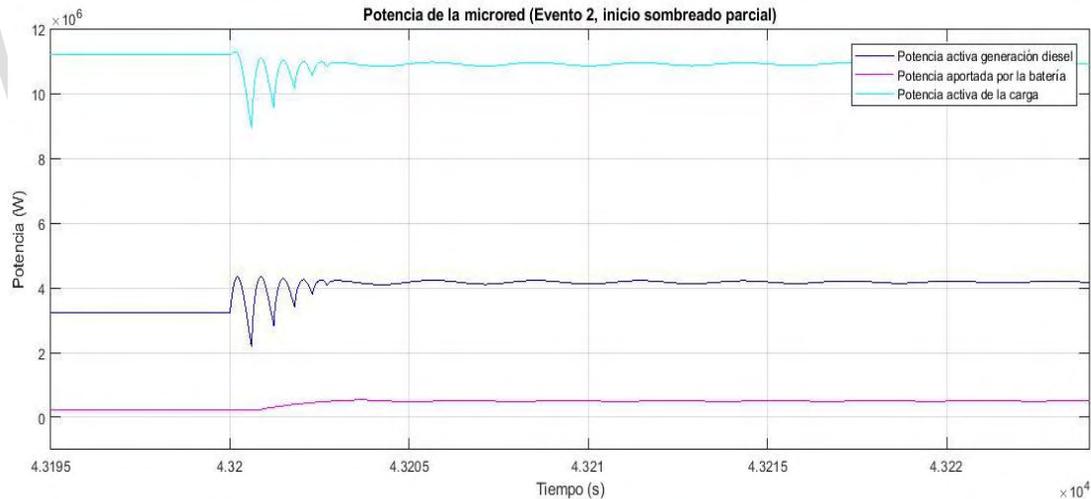


Figura 4.13: Comportamiento de la potencia activa ante el evento 2 (Fin del sombreado parcial).

Efecto del evento 3: El último evento en afectar la frecuencia es la desconexión del parque eólico debido a una excesiva velocidad del viento; esto al igual que el caso del sombreado parcial, disminuye la frecuencia al momento de la desconexión y la aumenta al presentarse la reconexión (Figuras 4.14 y 4.16). Para mantener la frecuencia dentro de los límites aceptables

la potencia del generador diesel y la de la batería son entregadas a la microrred para la desconexión, sin embargo para la reconexión solamente se utiliza la del generador diesel debido a que la batería está cargando, está disponible la potencia nominal producida por el parque eólico (Figuras 4.15 y 4.17).

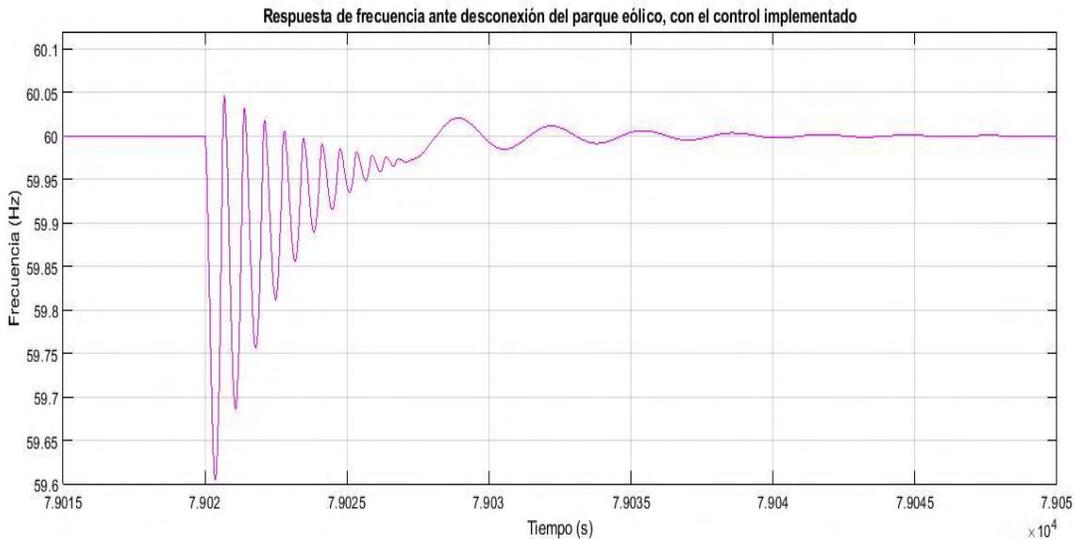


Figura 4.14: Comportamiento de la frecuencia ante el evento 3 (Desconexión del PE).

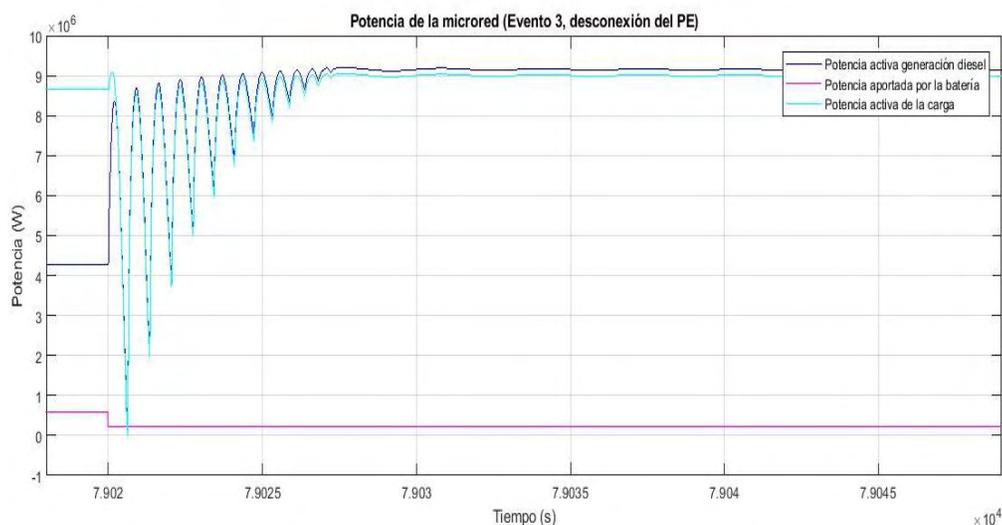


Figura 4.15: Comportamiento de la potencia activa ante el evento 3 (Desconexión del PE).

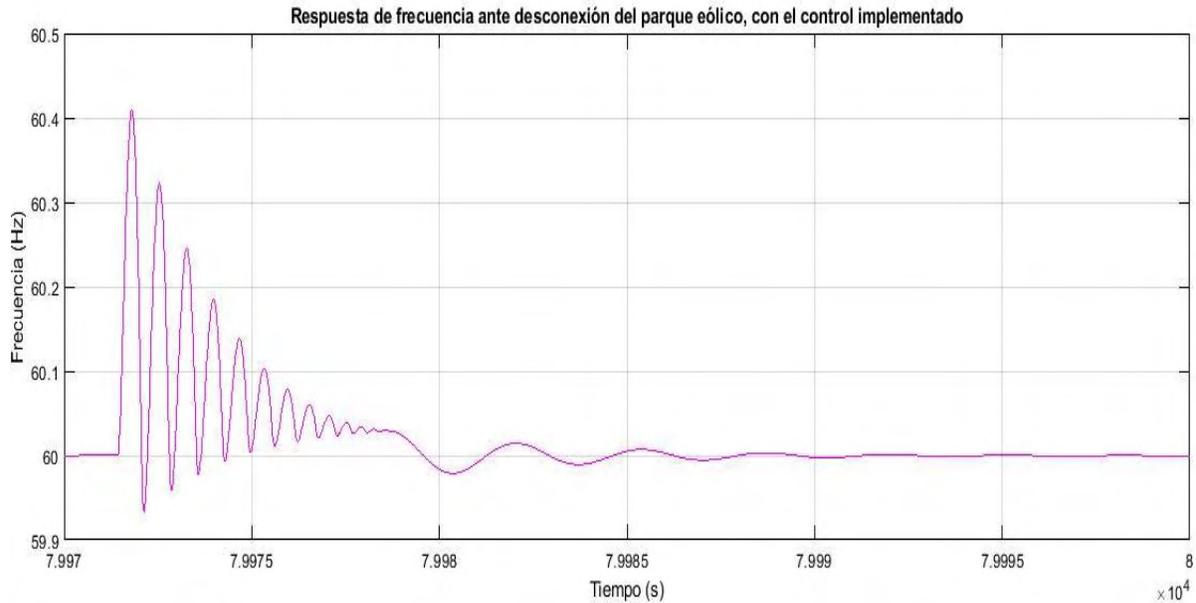


Figura 4.16: Comportamiento de la frecuencia ante el evento 3 (Reconexión del PE).

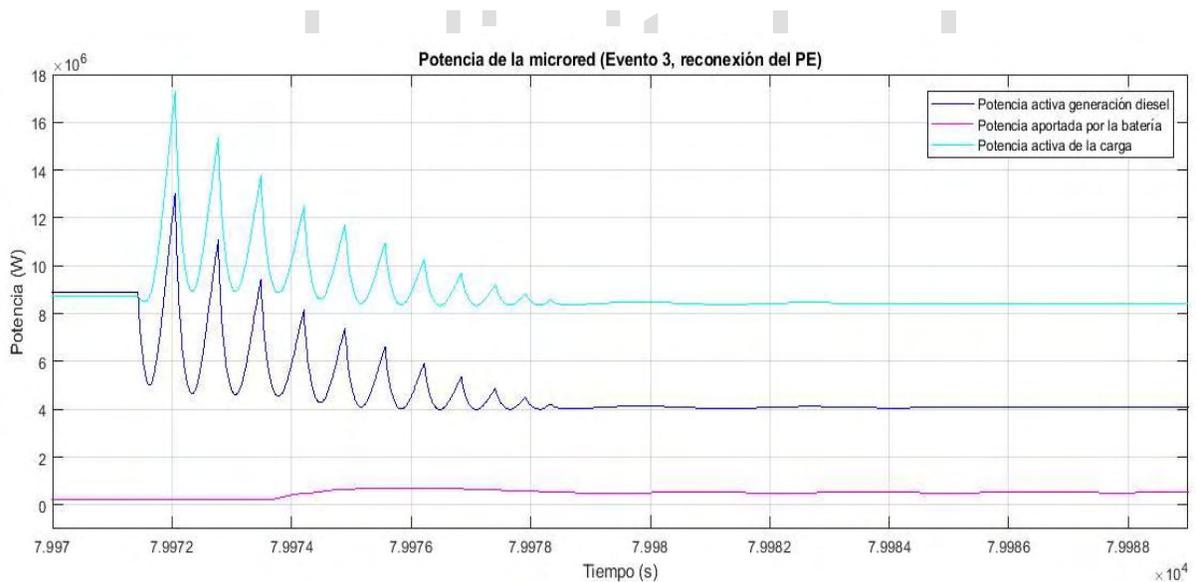


Figura 4.17: Comportamiento de la potencia activa ante el evento 3 (Reconexión del PE).

En la tabla 4.1 se ordenaron los valores de sobrefrecuencia y subfrecuencia alcanzados debido al efecto de cada evento incluyendo el tiempo que tarda el control en reponer la frecuencia a su valor nominal, de igual manera en la tabla 4.2 se puede observar los valores de

potencia activa que aportan a la regulación de frecuencia el generador diesel y la batería, 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 4.1: Valores de frecuencia ante el esquema de control de frecuencia propuesto.

Evento	Subfrecuencia (Hz)	Sobrefrecuencia (Hz)	Tiempo transitorio (s)
1	59,96	60,01	10
2 (Inicio del sombreado)	59,9	59,99	40
2 (Fin del sombreado)	60,02	60,11	30
3(Desconexión PE)	59,62	60,02	20
3 (Reconexión PE)	59,95	60,41	20

Tabla 4.2: Valores de potencia ante el esquema de control de frecuencia propuesto.

Evento	Potencia de la carga (MW)	Potencia del generador diesel (MW)	Potencia del parque eólico (MW)	Potencia de la granja solar (MW)	Potencia de la batería (MW)
1	7,214	4,988	2,360	0	0,276
2 (Inicio del sombreado)	8,974	2,190	4,000	2,870	0,476
2 (Fin del sombreado)	13,11	5,367	3,846	4,020	0,225
3(Desconexión PE)	0,003	0,244	0	0	0,317
3 (Reconexión PE)	17,160	12,86	4,360	0	0,225

Por otra parte para una implementación óptima del control propuesto es necesario verificar el estado de carga de la batería debido a que la misma entregará potencia activa para regulación únicamente cuando tiene un estado de carga mayor al 45% y se descargará hasta el 20%, por otra parte para alargar la vida útil de la batería es necesario verificar que la batería

nunca se carga más del 100%. En la figura 4.18 el estado de carga 1 equivale al 100% de la carga, claramente se puede observar que las condiciones impuestas al dimensionar la batería se cumplen, por otra lado en la figura 4.19 se puede observar el voltaje de la batería a lo largo de las 24 horas de simulación, el patrón inestable en el voltaje de la batería depende de la corriente de entrada a la misma debido a que esta corriente sigue el comportamiento de 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).

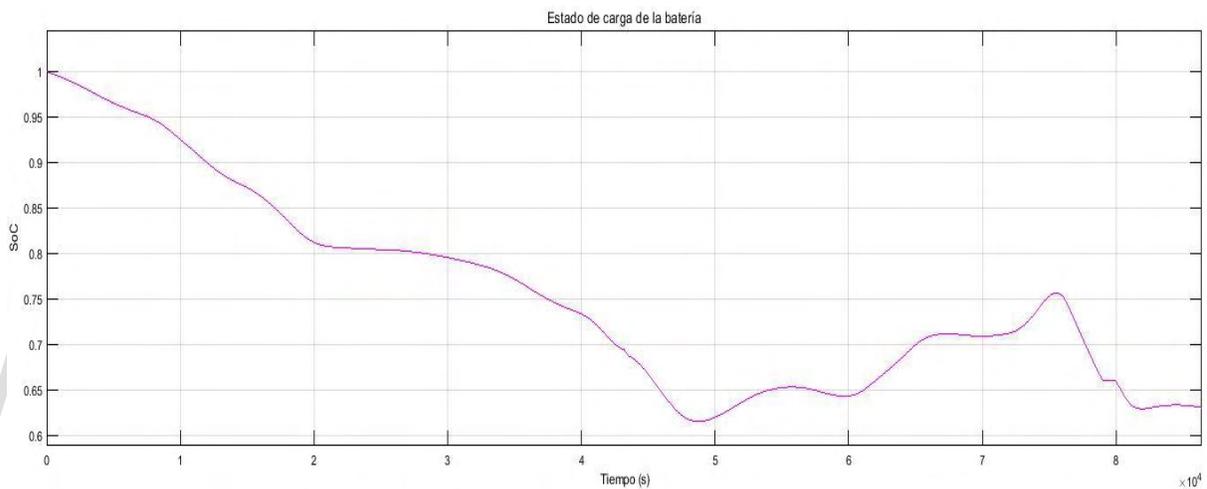


Figura 4.18: Estado de carga de la batería.

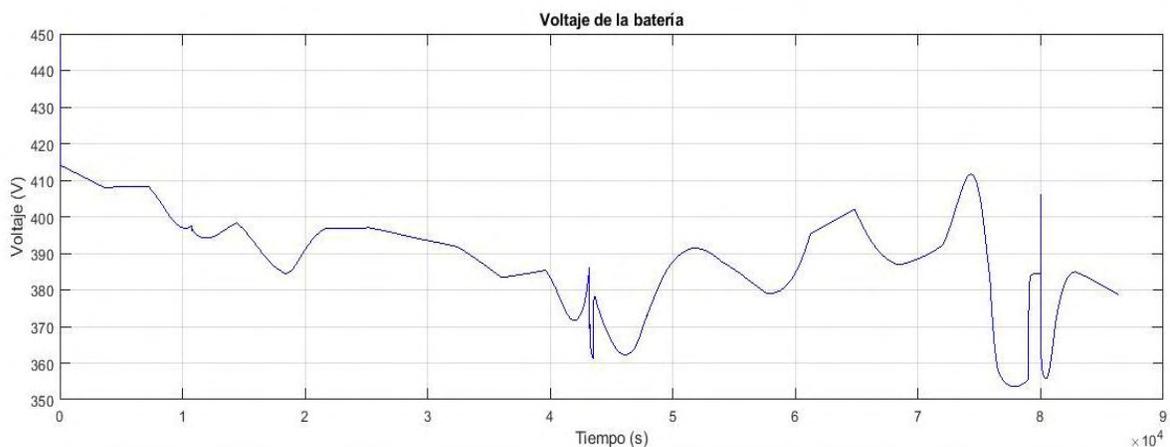


Figura 4.19: Voltaje de la batería.

El esquema de control primario diseñado también afecta indirectamente la regulación de tensión de la microred, es decir la tensión en la carga se mantiene en valores muy cercanos a 1,0 en p.u luego de ocurrir los eventos y se restablece a este valor con un pequeño tiempo transitorio, a continuación se muestra la tensión de la carga de la microred ante cada uno de los eventos:

Efecto del evento 1: En la figura 4.20 se puede observar la caída de tensión que produce el arranque de la máquina asincrónica, se puede observar que la tensión en p.u llega a un punto crítico pero se repone a un valor cercano a la unidad una vez pasada la perturbación.

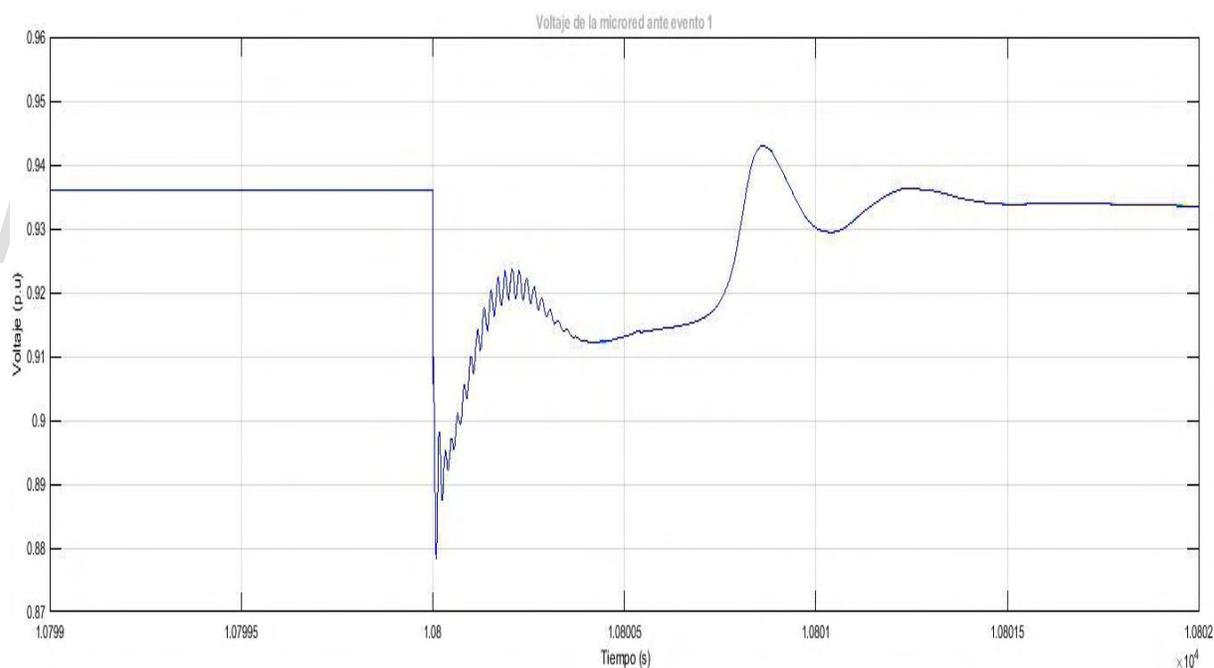


Figura 4.20: Voltaje en la carga ante evento 1.

Efecto del evento 2: en las figura 4.21 y 4.22 se observan los efectos en la tensión que implican el sombreado parcial en la granja solar, una vez pasa el valor crítico la tensión se repone a niveles cercanos a 1,0 en p.u.

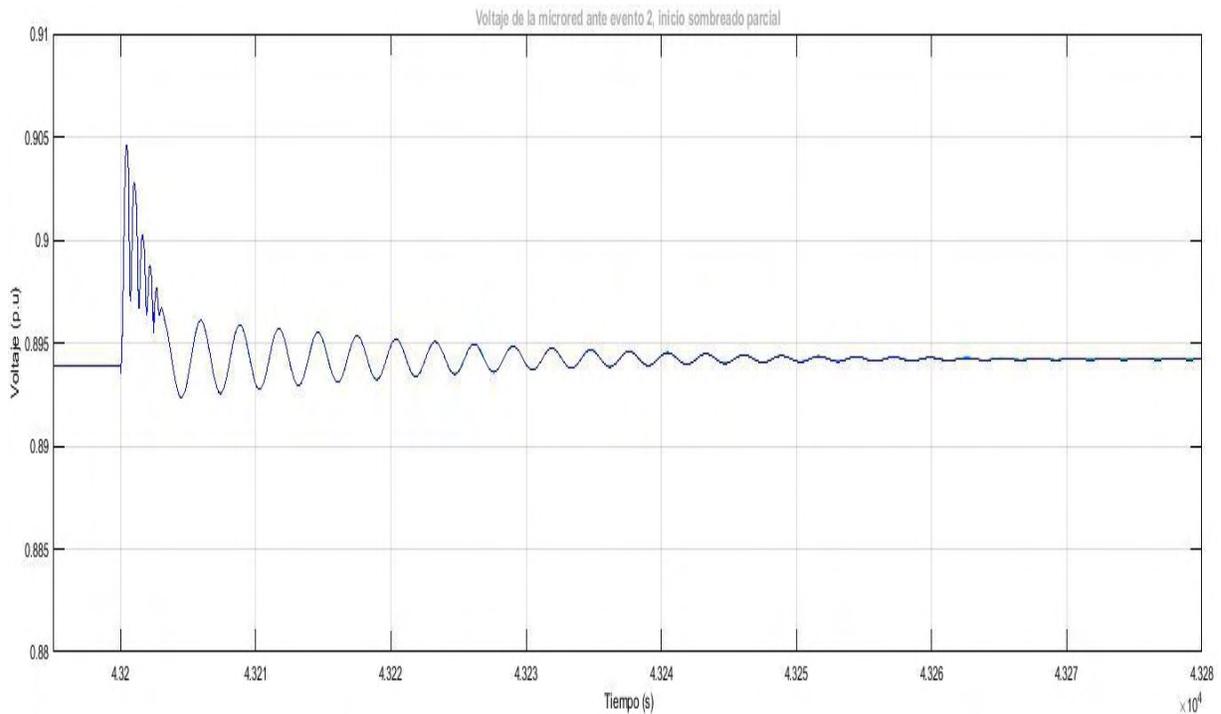


Figura 4.21: Voltaje en la carga ante evento 2, inicio sombreado parcial.

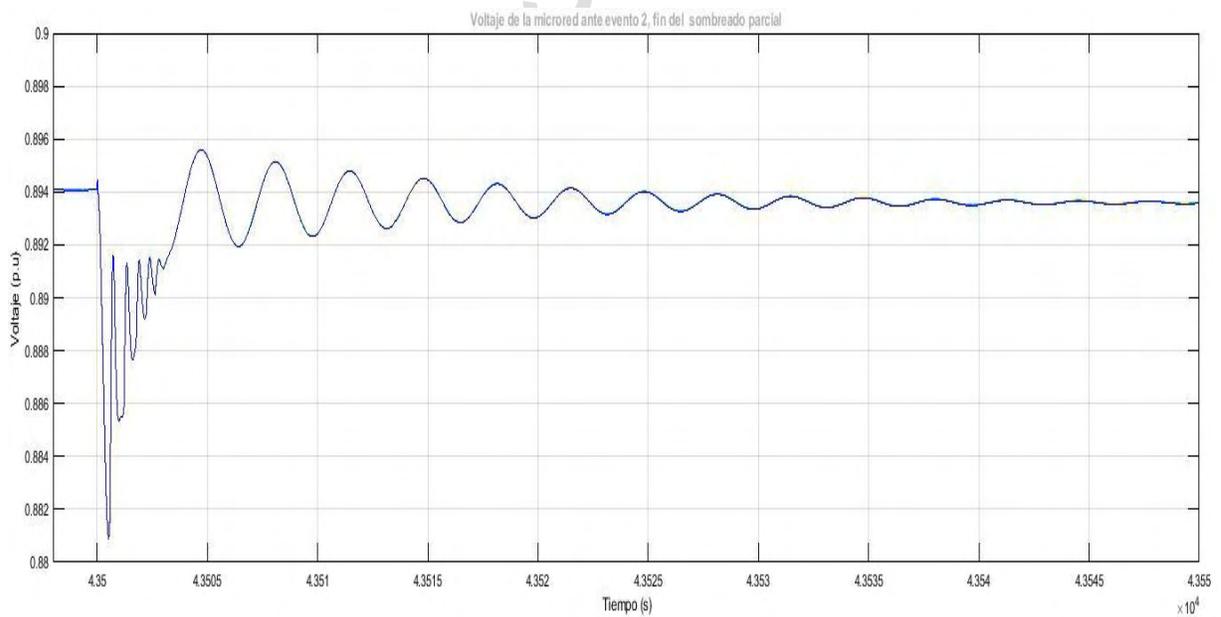


Figura 4.22: Voltaje en la carga ante evento 2, fin del sombreado parcial.

Efecto del evento 3: en las figura 4.23 y 4.24 se puede observar que luego de la conexión y reconexión del parque eólico los niveles de tensión se reponen a valores que no afectan la calidad de onda que recibe el usuario.

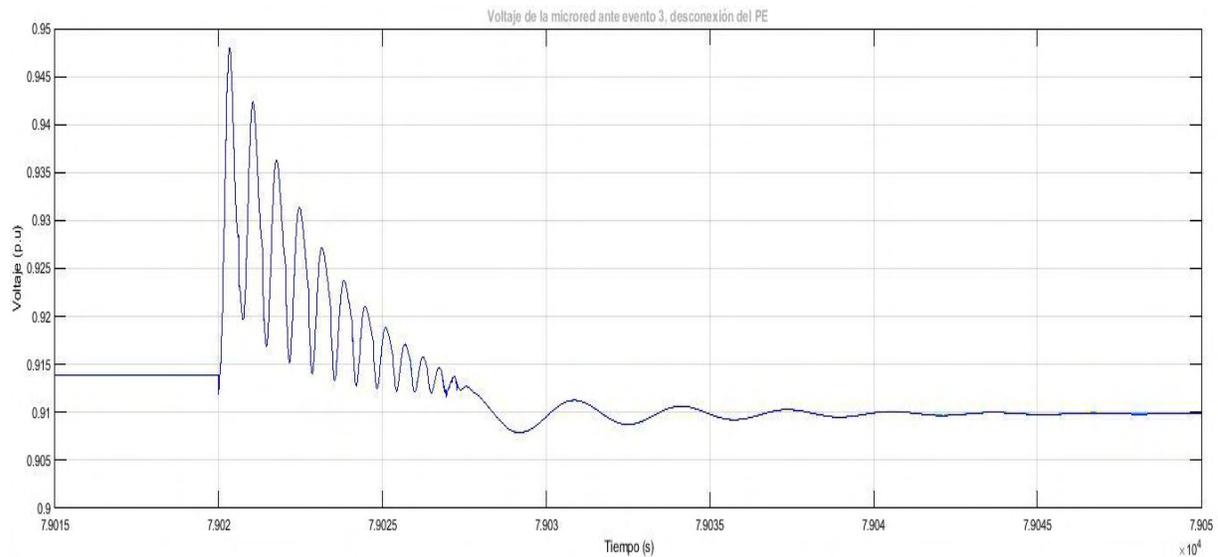


Figura 4.23: Voltaje en la carga ante evento 3, desconexión del parque eólico.

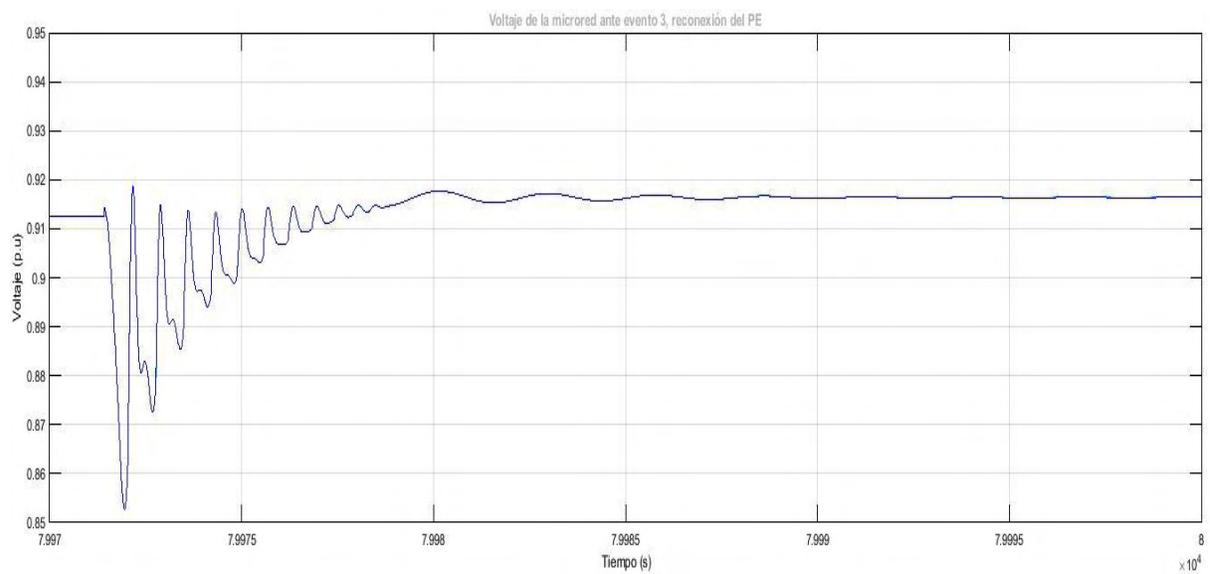


Figura 4.24: Voltaje en la carga ante evento 3, reconexión del parque eólico.

4.3.1 Balance de la respuesta de frecuencia de la microred con el esquema de control diseñado y sin la actuación del mismo.

Por último es necesario realizar una comparación con los valores de frecuencia obtenidos para el mismo escenario de simulación y ante cada evento sin el control aplicado, en ese sentido se presentan a continuación las respuestas de frecuencia de la microred para cada evento, utilizando el esquema de control propuesto y haciendo uso del control preestablecido, con el fin de realizar comparaciones entre el funcionamiento de ambos, asimismo la tabla 4.3 compara los valores de sobrefrecuencia y subfrecuencia de la microred así como los tiempos transitorios.

Efecto del evento 1: En la figura 4.25 se puede observar la disminución en los picos de sobre y subfrecuencia, asimismo se observa un tiempo de estabilización al valor de referencia más pequeño que el que se obtiene sin aplicar el esquema de control diseñado.

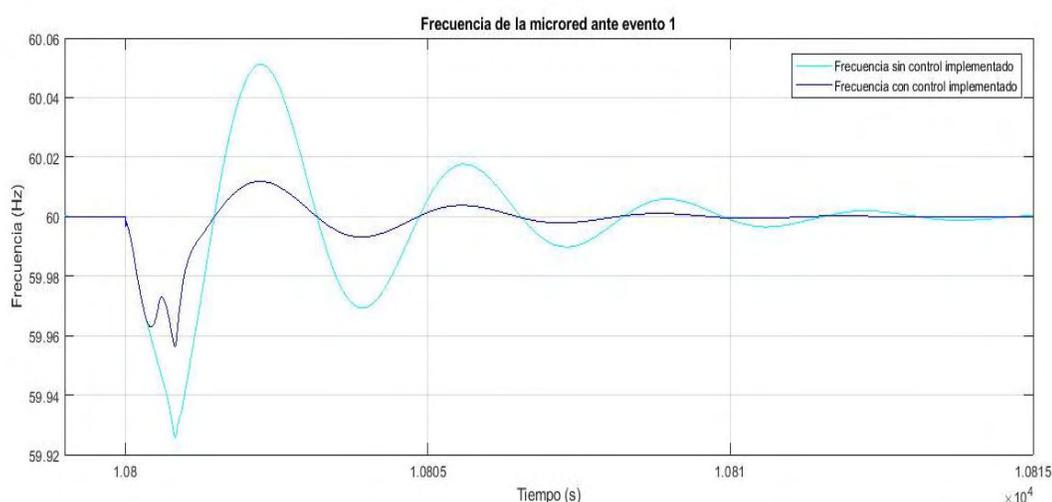


Figura 4.25: Comparación de respuesta de frecuencia ante el evento 1.

Efecto del evento 2: Como ya se ha explicado a lo largo del desarrollo del trabajo de grado el sombreado parcial produce dos perturbaciones distintas en la frecuencia, la primera hace que

su valor disminuya y la segunda produce una sobrefrecuencia, sin embargo ambos picos se ven disminuidos al aplicar el esquema de control primario diseñado.

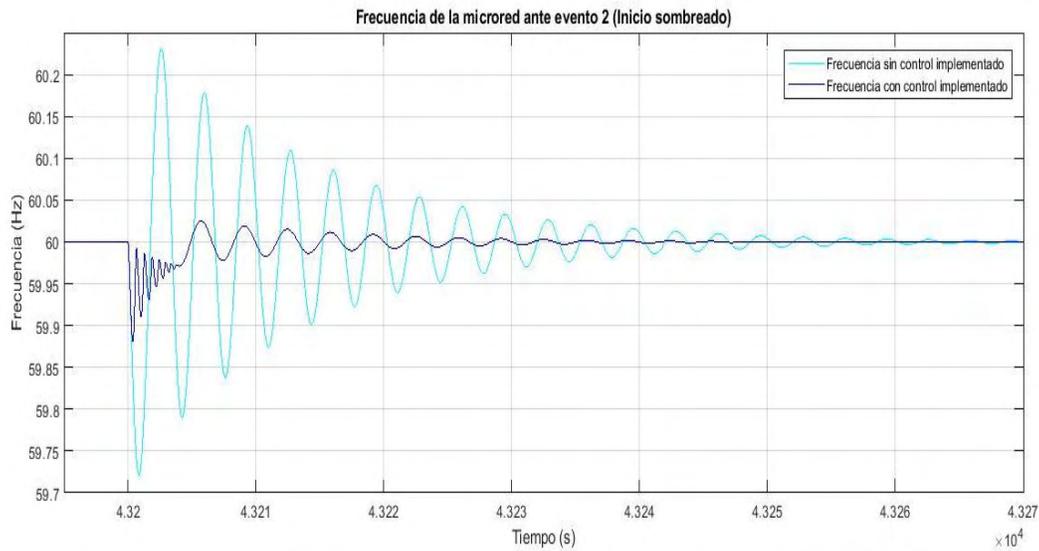


Figura 4.26: Comparación de respuesta de frecuencia ante el evento 2 (inicio sombreado parcial).

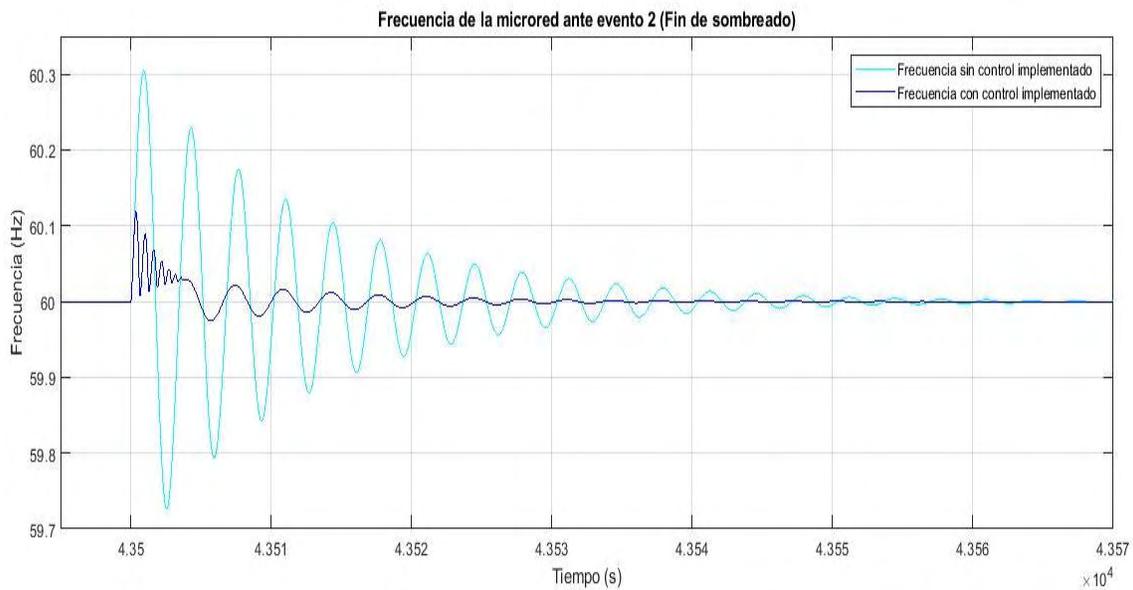


Figura 4.27: Comparación de respuesta de frecuencia ante el evento 2 (fin del sombreado parcial)

Efecto del evento 3: El tercer evento es el que somete a un mayor estrés a la microred, es decir, es el que causa una mayor desviación de frecuencia con respecto al valor nominal, sin el control aplicado la frecuencia llega a valores que sobrepasan los establecidos como seguros de operación, sin embargo al aplicar el control diseñado se puede observar que estos valores de sobrepicos disminuyen situándose entre los límites permitidos de frecuencia.

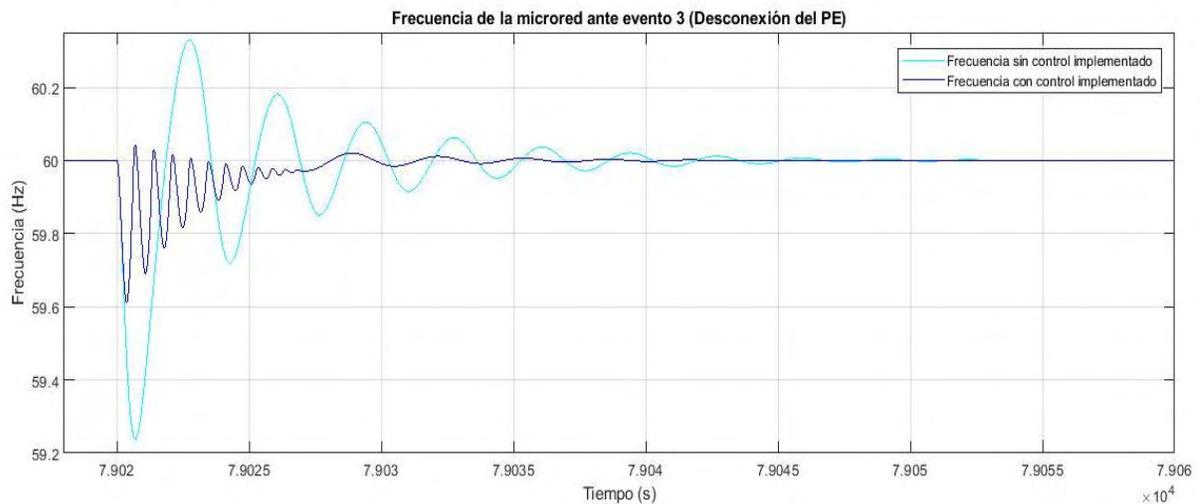


Figura 4.28: Comparación de respuesta de frecuencia ante el evento 3 (desconexión del PE).

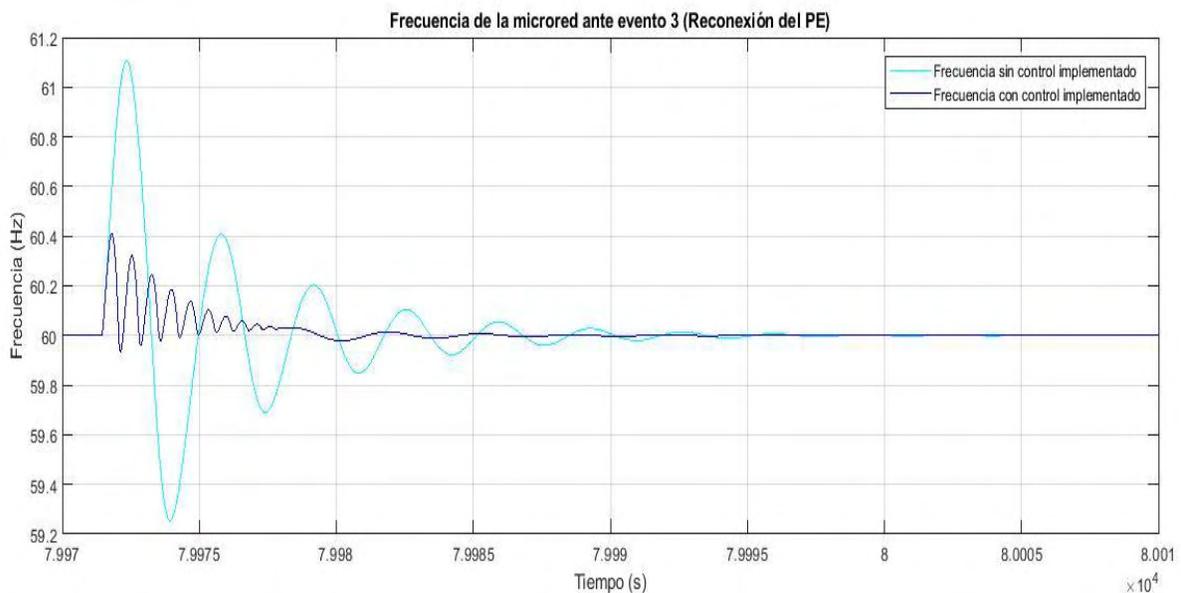


Figura 4.29: Comparación de respuesta de frecuencia ante el evento 3 (reconexión del PE).

Tabla 4.3: Comparación entre respuesta del control propuesto y el control preestablecido.

Evento (Control propuesto)	Subfrecuencia (Hz)	Sobrefrecuencia (Hz)	Tiempo transitorio (s)
1	59,96	60,01	10
2 (Inicio del sombreado)	59,9	59,99	40
2 (Fin del sombreado)	60,02	60,11	30
3(Desconexión PE)	59,62	60,02	20
3 (Reconexión PE)	59,95	60,41	20
Evento (Control preestablecido)	Subfrecuencia (Hz)	Sobrefrecuencia (Hz)	Tiempo transitorio (s)
1	59,93	60,05	10
2 (Inicio del sombreado)	59,72	60,23	70
2 (Fin del sombreado)	59,73	60,30	60
3(Desconexión PE)	59,25	60,33	30
3 (Reconexión PE)	59,26	61,1	20

4.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Las simulaciones haciendo uso del entorno Simulink/MATLAB® han servido como estudio exploratorio de la factibilidad del esquema de control primario de una microred operando en modo isla que contiene baterías que almacenan un porcentaje de la potencia producida por un parque eólico presente en la microred, como se puede observar en la sección anterior los resultados obtenidos con la implementación del control son bastante satisfactorios, el máximo error con respecto al valor nominal de la frecuencia es de 0,68% por encima y de 0,63% por debajo, lo cual demuestra que el agregar baterías como parte de la reserva rodante mejora la respuesta de frecuencia ante contingencias; no solamente restablece la frecuencia a

su valor nominal con menor tiempo transitorio sino que las desviaciones de frecuencia ante contingencias son pequeñas lo que hace que este esquema de control se examine como un escenario factible para su implementación en microredes reales. Por otra parte haciendo una comparación con el comportamiento de las desviaciones de frecuencia utilizando el control de frecuencia a través del sistema V2G se obtiene un máximo porcentaje de error con respecto del valor nominal de frecuencia de 1,83% por encima y de 1,24% por debajo teniendo en cuenta que estos valores sobrepasan los límites de operación segura de frecuencia es importante que el tiempo transitorio sea pequeño, sin embargo para este control se obtienen tiempos transitorios hasta de 70s, estos resultados se deben a que para que el sistema V2G se comporte como reserva rodante de la microred es necesaria una alta penetración de esta tecnología debido a que la potencia que se aporta para regulación es bastante pequeña en comparación con la que se podría obtener de una pequeña central diesel o de sistemas que almacenen energía proveniente de generación de electricidad a través de energías renovables, en ese sentido los controles que contienen baterías u otro sistema de almacenamiento se posicionan como una opción competitiva en el mercado de las microredes.

4.4.1 Análisis de resultados a través del uso de la matriz FODA

Se utiliza la matriz FODA para resumir de manera ordenada las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas del control diseñado como alternativa para aumentar la confiabilidad de la microred, asimismo se hace uso del mismo método para resaltar los aspectos positivos y negativos del control primario incluido en la microred que proporciona regulación de energía a través de cargas bidireccionales representado a través del sistema de vehículos a la red (V2G).

Análisis de resultados del esquema de control primario para la microred operando en modo isla que incluye almacenamiento de energía a través de baterías: La tabla 4.4 muestra las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas del control diseñado.

Tabla 4.4: Matriz FODA aplicada al esquema de control de frecuencia que incluye sistema de almacenamiento.

Fortalezas	Debilidades
<ul style="list-style-type: none"> • Aumento en la confiabilidad en el funcionamiento de la microred. • Aumento de la reserva rodante de la microred. • Respuesta rápida del control. • Tiempo transitorio entre 10 y 40s. • Disminución de los picos de sobre y subfrecuencia. • Menor número de oscilaciones al restablecer la frecuencia. • La frecuencia se mantiene dentro de los límites seguros de operación. 	<ul style="list-style-type: none"> • Necesidad de baterías de gran tamaño como sistema de almacenamiento. • Necesidad del correcto dimensionamiento de las baterías para alargar su vida útil. • Exigencia de verificación del estado de carga de la batería para regular la potencia.
Oportunidades	Amenazas
<ul style="list-style-type: none"> • Alta penetración de fuentes de energía renovable. • Inclusión de centrales eléctricas a partir de energía renovable en la regulación de frecuencia • Proveer energía con altos estándares de calidad. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto costo de la energía para los consumidores, los proyectos que incluyen energía eólica y baterías ofertan \$21/MWh, mientras que los que incluyen energía eólica, solar y baterías costarían \$30,60/MWh (Geuss, M. 2018) • Corta vida útil de las baterías. • Implicaciones ambientales de fabricar una batería.

Análisis de resultados del esquema de control de la microred que incluye el sistema de vehículos eléctricos V2G: La tabla 4.5 muestra las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas del control incluido en el modelo de la microred ya estudiada.

Tabla 4.5: Matriz FODA aplicada al esquema de control de frecuencia que incluye sistema V2G.

Fortalezas	Debilidades
<ul style="list-style-type: none"> • Inclusión en la regulación de frecuencia a cargas bidireccionales. • Reserva rodante basada en cargas bidireccionales. • Disminución de los picos de sobre y subfrecuencia al tener suficiente potencia activa para la regulación 	<ul style="list-style-type: none"> • Necesidad de incentivo para los propietarios de los vehículos. • Requiere de estudios de los perfiles de usuarios de automóviles para el diseño del control. • Tiempos transitorios para restablecer la frecuencia largos.
Oportunidades	Amenazas
<ul style="list-style-type: none"> • Paso de microredes a redes inteligentes a través de la inclusión de cargas bidireccionales. • Disminución del consumo de combustibles fósiles. 	<ul style="list-style-type: none"> • Negativa por parte de los propietarios de vehículos eléctricos a aportar el mismo para regular la frecuencia. • Corta vida útil de las baterías. • Obligación de legislación para el uso de V2G.

CONCLUSIONES.

La modernización de las redes eléctricas resulta un trabajo que requiere de investigación y experimentación por parte de los ingenieros que encargan de ello, la propuesta de incluir microredes como alternativas posibles en los sistemas de potencia surge como una opción atractiva debido a que las mismas ofrecen altos estándares de calidad de energía y a la vez incluyen penetración de fuentes de energía renovable, lo cual es difícil en las redes convencionales por temas como por ejemplo la estabilidad del sistema de potencia. Las microredes como un conjunto de cargas y generación distribuida ameritan controles de frecuencia y voltaje, lo cual se hace a través de los inversores utilizando electrónica de potencia, sin embargo como se ha demostrado a lo largo del trabajo de grado el diseño del control de frecuencia o tensión para una microred depende básicamente de la arquitectura de la misma, no obstante existen distintas investigaciones orientadas en este campo que proponen distintos controles según sea el modelo de estudio; el control con mejor documentación es el control frecuencia/potencia o control *droop* que sugiere inyectar potencia activa a la microred en función a la desviación de frecuencia de su valor nominal, partiendo de ésta idea se han originado nuevas propuestas de controles que no sólo buscan mejorar la calidad de energía que aportan las microredes sino integrar alternativas de generación a partir de energías renovables de esta manera las microredes además de ser una alternativa en boga es una opción que involucra la conciencia ambiental de los usuarios de las mismas.

Queda demostrado que el estudio a fondo de la arquitectura de una microred es la clave para que el diseño de un control tenga éxito, los parámetros relevantes son la potencia nominal total que es capaz de aportar la microred, cuanta de esta potencia nominal proviene de centrales con fuentes de energía primaria predecible como por ejemplo la generación diesel, es importante tener información de los consumos de las cargas a los cuales se servirá, además de determinar cómo actúa la frecuencia de la microred ante una perturbación como por ejemplo

un aumento en el consumo, una vez se ha estudiado de esta manera es necesario proponer un control que cumpla con los objetivos planteados, normalmente se busca alguno que aporte potencia activa que se encuentra en forma de reserva rodante al sistema, en ese sentido los controles pueden ser a través de máquinas rotatorias que se encuentran en las pequeñas centrales de generación, sistemas de almacenamiento de distintas naturalezas que involucran fuentes de energía renovable, o como se expuso anteriormente 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) y 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, en ese sentido los ingenieros poseen una gran gama de opciones para controlar los parámetros de la onda de voltaje entregada a las cargas. Como se demostró de antemano los controles que poseen baterías de gran capacidad representan un control robusto que cumple con los requerimientos de las cargas, para ello es prioritario el correcto dimensionamiento de la batería, proceso en el cual incluye el cálculo de la capacidad, la rata de descarga, los niveles de tensión que manejara y configurarla de tal manera que no solamente evite su descarga total y sobrecarga sino que aporte potencia de regulación únicamente cuando tenga suficiente potencia almacenada, esto se hace a través de un administrador de energía.

Realizando un balance entre el control diseñado y el control preestablecido que tiene implícito el modelo de microred utilizada, se pudo concluir que controlar los parámetros de una microred a través del uso de cargas bidireccionales como el sistema V2G puede ser una opción viable con grandes ventajas que incluye a los usuarios y da un paso a las redes inteligentes, asimismo se demostró la factibilidad de diseñar controles que incluyan sistemas

de almacenamientos y fuentes de energía renovable debido que a pesar de que los mismos elevan el costo de la energía para el consumidor también elevan la calidad de la misma

www.bdigital.ula.ve

RECOMENDACIONES

Una vez concluido el trabajo de grado se pueden generar distintas recomendaciones en el campo de estudio de las microredes:

- Proponer un esquema de control a través de frecuencia/potencia que incluya la potencia del generador diesel y comparar su respuesta de frecuencia con el control propuesto en el presente trabajo de grado.
- Proponer un esquema de control de voltaje para la microred.
- Diseñar un sistema de bote de carga en caso de existir una contingencia que saque de funcionamiento el generador diesel.
- Diseñar un esquema de control que incluya un sistema de almacenamiento distinto a la batería, como por ejemplo un súper capacitor.
- Simular el modelo de microred en otro entorno de programación que permita libertad de pruebas.
- Proponer esquemas de control que incluyan sistemas de almacenamiento distribuido, es decir sistemas de almacenamiento que no se encuentren en las centrales.
- Realizar estudios de estabilidad en microredes.
- Establecer escenarios de estudio que incluyan muy poca reserva rodante en la microred.
- Simular el comportamiento de los inversores en la microred.
- Simular la conexión y desconexión de la microred a la red eléctrica para determinar el comportamiento de los parámetros de la misma.
- Establecer escenarios de estudio que incluyan fallas en la carga residencial

REFERENCIAS.

ABB to enable integration of renewables in Alaskan island microgrid (2014). Disponible: www.abb.com/cawp/seitp202/BC90B54CC33D1663C1257D50002FAF58.aspx

Aguado, M. Casado, S. Garde, R. García, G. Pellejero, I. (s.f) *Modelado y caracterización de una batería de ión-litio en una microrred*. Departamento de integración de la red CENER, España.

Ahumada, C (2013). *Diseño de estrategias de control predictivas para microrredes mediante curvas de estatismo*. Tesis de MSc, Universidad de Chile, Santiago de Chile.

Andreu, J. Kortabarria, I. Ibarra, E. y Planas. *Método Droop: análisis del control wireless para la conexión en paralelo de convertidores de potencia*. Universidad del País Vasco, Bilbao.

Alromar, energías del futuro (2014). *Baterías solares para autoconsumo, dimensionamiento y consejos útiles*. Disponible en: www.alromar-energia.es/blog/tag/calculas-baterias-solares/

Arrizubieta, L. (2015). *Sistema de control jerárquico de una microrred* 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 microrredes 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

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. Iravani, 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 microredes aisladas*. Trabajo de grado no publicado. Universidad de Sevilla, Sevilla.

Dulce, F (2015). *Modelamiento y control de una microred 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 microred 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/

Fehlandt, S. (2012). *Desarrollo de simulador integrado de microredes inteligentes*. Trabajo de grado no publicado. Universidad de Chile, Santiago de Chile.

Fosatti, J. (2011). *Revisión bibliográfica sobre microredes inteligentes*. Memoria de trabajos de difusión científica y técnica, ISSN 1510-7450, vol. 9.

Geus, M (2018). *Wind with batteries? Build it quickly and it could cost \$21/MWh in Colorado*. Disponible: <https://arstechnica.com/information-technology/2018/01/colorado-could-get-some-of-the-cheapest-wind-and-solar-in-the-us-with-caveats/>

Gilat, A. *MATLAB: An introduction with applications*. (21na edición). John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, USA.

González, F. (2004). *Tecnologías de generación distribuida: Costos y eficiencia* en I seminario de ingeniería eléctrica, UNEXPO, Puerto Ordaz.

Guerrero, J. Hang, J. Y Uceda, J. (2008) *Control of distributed uninterruptible power supply systems*. IEEE transactions on industrial electronics, Vol. 55, No. 8.

Hredzak, B. y Morstyn, T (2016). *Control Strategies for Microgrids with Energy Storage Systems: An Overview*. IEEE transactions on Smart Grid.

Hitesh, D. y Yogesh, K (2016). *Frequency regulation with vehicle-to-grid (V2G) option in multi-generation power network*. ENERGETIKA, Vol 62. No.1-2.

IEEE. (2000) *IEEE 100 the Authoritative Dictionary of IEEE Standards Terms*. (7ma edición). USA: Standards information network IEEE.

Juárez. C, J. (1995). *Sistemas de distribución de energía eléctrica*. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco. México.

Kundur, P. (s.f) *Power Systems Stability and Control*. McGraw- Hill. Inc

Ledesma, P. (2008). *Regulación de frecuencia y potencia*. Trabajo de grado. Universidad Carlos III de Madrid, Madrid.

Madureira, A. Moreira, C. y Peças, J. (2006). *Defining control strategies for Microgrids islanded operation*. IEEE transactions on power systems, vol. 21, No.2.

MathWorks. (s.f). *Simulink: Simulación y diseño basado en modelos*. Disponible en: <https://es.mathworks.com/products/simulink.html>

MathWorks. (s.f). *Simscape Power Systems*. Disponible en: <https://es.mathworks.com/products/simulink.html>

MathWorks. (s.f). *24h simulation vehicle to grid*. Disponible en: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/24-hour-simulation-of-a-vehicle-to-grid-v2g-system.html>

MathWorks. (s.f). *Generate parameter data for equivalent circuit battery block*. Disponible en: <https://www.mathworks.com/help/autoblks/ug/generate-parameter-data-for-estimations-circuit-battery-block.html>

Medina, R. *Microredes basadas en electrónica de potencia: características, operación y estabilidad*. Disponible: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5972795.pdf>

Mercado, P. Molina, M. Pontoriero, D. Sarasua, A. (2008). *Integración de energía eólica sistema de almacenamiento en sistemas de suministro de energía eléctrica*. Instituto de Energía Eléctrica. Universidad de San Juan. San Juan.

Microgrid definitions. (s.f). Disponible: building-microgrid.lbl.gov/microgrid-definitions

Moller, R (2012). *Estrategias de regulación primaria de frecuencia de generadores eólicos*. Trabajo de grado. Universidad de Chile, Santiago de Chile.

Mora, P. (2014). *Clases de centrales eléctricas*. Notas de clases de 3069, Departamento de Potencia, Universidad de Los Andes. Mérida.

Mora, E. (s.f). *Análisis de sistemas de potencia*. Universidad de Los Andes, Mérida.

Mu, Z. Ning, Z. Peng, C. Sun, C. y Zhang, L. (2017). *Comparative Research on RC equivalent Circuit Models for Lithium- Ion Batteries of Electric Vehicles*. Applied sciences. Vol 7.

Ramírez, J. (2014). *Operación de una microred*. CINVESTAV- Unidad Guadalajara, Guadalajara

Raish, A. Zonetti, D. Schiffer, J. Sezi, J. Stankovic, T. y Ortega. (s.f) .*Modeling of microgrid from fundamental physics to phasors and voltage source*. ELSEVIER.

Rehman, U. y Riaz, M. (2017). *Vehicle to grid System for load and frequency management in Smart grid* en International Conference on Open Source and Technologies (ICOSST).

Rivera, S. y Tirado, S. (2017). *Vehículos eléctricos como controladores de frecuencia en una Microred*. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.

Sánchez, A. (s.f). *Operación y control de microredes*. Disponible en: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70022/fichero/Tesis+M%C3%A1ster+Microredes+ASR+27112007.pdf>

Torres, C. (2008). *Energicentro: Baterías y energía*. Disponible en: <http://energicentro.blogspot.com/2008/09/amperios-hora-capacidad-de-una-batera.htm>

Todoproductividad (2011). *Cómo calcular la capacidad de las baterías para cada aplicación*. Disponible en: <http://todoproductividad.blogspot.com/2011/02/como-calcular-la-capacidad-de-las.html>

Twenergy (2015). *Baterías para energía eólica: ejemplos de integración de energía eólica con baterías*. Disponibles en: <https://twenergy.com/a/baterias-para-energia-eolica-ejemplos-de-integracion-de-energia-eolica-con-baterias-1870>

Universidad de Chile (2010). *FCFM ilumina Chile: Primera microred a base de energías renovables de nuestro país*. Disponible: www.uchile.cl/noticias/65512/primera-microred-a-base-energias-renovables-de-nuestro-pais