



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DEL IMPACTO DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICA
EN MICRORREDES

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO

ALFONSO MANUEL CARVAJAL GUTIÉRREZ

PROFESOR GUÍA:
CESAR AUGUSTO AZURDIA MEZA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
SANDRA LORENA CESPEDES UMAÑA
DORIS ANDREA SÁEZ HUEICHAPAN

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el proyecto Conicyt ELAC2015/T10-0761.

SANTIAGO DE CHILE
2020

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO
POR: ALFONSO MANUEL CARVAJAL GUTIÉRREZ
FECHA: 2020
PROF. GUÍAS: CESAR AZURDIA MEZA
SANDRA CESPEDES UMAÑA

EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DEL IMPACTO DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICA EN MICRORREDES

El atractivo de la utilización de sistemas de microrredes eléctricas para la generación de energía ha aumentado en los últimos tiempos, queriendo enmarcarse estos sistemas cada vez más en un sistema de distribución autogestionado. Actualmente, no existen resultados extensos acerca del funcionamiento de ciertos esquemas de control de microrredes funcionando en base a esquemas de comunicación inalámbricos. Lo anterior, es decir, esta falta de resultados, produce un problema debido que este tipo de tecnología inalámbrica puede presentar beneficios para el despliegue de estos sistemas de microrredes en terreno.

En función de tomar en cuenta la falta de resultados, se orienta el presente trabajo a caracterizar las respuestas de control secundario de microrredes bajo un ambiente realista de comunicación inalámbrica. Se emplea en la investigación una microrred simulada y una real desplegada en el laboratorio. Haciendo uso para la primera de un software de simulación del comportamiento eléctrico, y para la última, configurando la microrred ya existente para realizar su comunicación de manera inalámbrica.

Se diseña un sistema de comunicación inalámbrico que funciona en el computador portátil que soporta el sistema de control de la microrred. Este sistema emula la comunicación que los generadores tendrían en un ambiente real. De la misma forma, para la microrred del laboratorio se trabaja para imitar un sistema que funcione con la misma tecnología inalámbrica que el simulado. Para las dos microrredes se añade un sistema de perturbación de canal, por medio de un *jammer* programado en una radio definida por software, y a través de la introducción de tráfico por medio de otro computador.

Con los resultados obtenidos, se puede evidenciar que las dinámicas más realistas del enlace introducen dinámicas distintas a las evidenciadas en los trabajos con parámetros fijos. De la misma forma, estos resultados sugieren que deberían agregarse en los trabajos de investigación la utilización de retardo y pérdida de paquetes en el sistema de control de manera más o menos correlacionada. Adicionalmente, se puede utilizar el sistema de comunicación para evaluar otros sistemas de control, sin la necesidad de utilizar una microrred real, como acercamiento al funcionamiento en un despliegue físico.

A todos los creadores de saber.

Agradecimientos

Primero agradecer a mi madre. A todo el apoyo que siempre me ha brindado y el cariño que me ha dado. A la entrega de valores que guían mi pensar y al depósito de confianza en mis decisiones personales. Al ejemplo de una lucha constante que no pierde el norte.

Agradecer a mis hermanas Bielka, Luna y Paula, quienes siempre han estado para mí y a su entrega de amor desinteresado de diversas maneras. A la guía, acompañamiento y ejemplo en temas importantes y en el cotidiano. A su muestra de opiniones diferentes a las mías.

Agradecer a mi familia en general. Con los apoyos en situaciones difíciles y la disposición de generar espacios de buena compañía. A la red de apoyo que han brindado.

A mi mejor amigo Maximiliano, quién siempre estuvo para acompañarme en una conversación o para realizar algún acto osado.

A mis amigos de universidad, quienes me apoyaron en el trascurso de esta e hicieron más ameno y entretenido su paso.

Agradecer a la Facultad por ayudarme a encontrar una carrera de mi total gusto, donde puedo aprender y desarrollar mis talentos de buena manera.

Agradecer finalmente a mis profesores guía Sandra y Cesar. Que me apoyaron todo el proceso dándome críticas constructivas, resolviendo mis dudas y entregándome confianzas para desarrollar mi trabajo.

Tabla de contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación y Antecedentes	1
1.2. Descripción del problema	3
1.3. Objetivos	4
1.3.1. Objetivo General	4
1.3.2. Objetivos específicos	4
1.4. Estructura de la memoria	5
2. Marco teórico y estado del arte	6
2.1. Marco teórico	6
2.1.1. Generalidades sobre microrredes	6
2.1.2. Control en microrredes	8
2.1.3. Primera capa de control en la microrred simulada	9
2.1.4. Segunda capa de control en la microrred simulada	10
2.1.5. IEEE 802.11 y UDP	13
2.1.6. Retardo de recepción	17
2.2. Estado del arte en uso de comunicación en control secundario de MGs	17
3. Metodología	21
3.1. Descripción de la metodología	21
3.2. Implementación de la plataforma experimental	22
3.2.1. Funcionamiento del sistema eléctrico simulado	22
3.2.2. Funcionamiento del sistema de comunicación	24
3.2.3. Funcionamiento del sistema de perturbación del canal	29
3.2.4. Funcionamiento de la microrred en el laboratorio	33
4. Análisis de resultados y discusión	37
4.1. Contribución	37
4.2. Resultados para microrred simulada en comunicación unicast	37
4.3. Resultados para microrred simulada en comunicación broadcast	51
4.4. Resultados para la microrred en el laboratorio	65
5. Conclusiones	76
BIBLIOGRAFIA	80

Índice de tablas

1.	Características de trabajos de investigación asociados a dificultades de comunicación en el control de MGs.	20
2.	Valores de los componentes pasivos de la MG.	23
3.	Eventos significativos en la dinámica de la MG.	23
4.	Parámetros usados en la simulación.	24
5.	Direcciones dentro de la LAN.	28
6.	Parámetros para analizar el forzamiento del canal de aire.	32
7.	Casos de experimentación para MG en el laboratorio.	36
8.	Caso A - Retardos promedio de comunicación entre DGs.	40
9.	Caso B - Retardo promedio de comunicación entre DGs.	45
10.	Caso B - Porcentaje promedio de paquetes recibidos correctamente.	45
11.	Caso C - Porcentajes de paquetes recibidos en la simulación.	47
12.	Caso C - Retardo de recepción en paquetes recibidos.	47
13.	Caso D - Retardo de recepción en paquetes recibidos.	49
14.	Caso E - Retardo promedio de comunicación entre DGs.	52
15.	Caso E - Porcentaje de paquetes recibidos por los nodos en el caso de <i>broadcast</i>	54
16.	Caso F - Retardo de recepción.	57
17.	Caso F - Porcentaje de paquetes recibidos correctamente.	57
18.	Caso G - Paquetes recibidos correctamente.	59
19.	Caso G - Retardo de recepción.	60
20.	Caso H - Retardo para el promedio de las simulaciones.	61
21.	Caso H - Porcentaje de paquetes recibidos en simulaciones a comparar. Situaciones con y sin actualización de matriz de adyacencia. Ambas simulaciones no presentan recepción entre algunos nodos después de los 20 s.	64
22.	Desviación Máxima de frecuencia en experimentación.	74
23.	Retardo promedio.	74
24.	Paquetes perdidos. PR es la cantidad de paquetes recibidos correctamente. PP es la cantidad de paquetes perdidos.	75
25.	Casos de experimentación para MG en el laboratorio.	75

Índice de figuras

1.	Diagrama con los componenetes básicos de una microrred.	6
2.	Esquema jerárquico de control en microrredes	9
3.	Esquema de control primario y secundario de cada DG en la microrred	12
4.	Sabores de Wi-Fi y sus principales características	13
5.	Canales en IEEE 802.11 que entregan 20 MHz de ancho de banda sin superponerse	14
6.	Relación entre IFS y el <i>backoff time</i>	15
7.	<i>Header</i> UDP	16
8.	Diagrama simplificado del funcionamiento de la MG simulada.	22
9.	Diagrama de interfaces inalámbricas integradas en el mismo computador.	25
10.	Diagrama de integración del simulador con las NICs.	25
11.	Diagrama de comunicación para transmisor.	26
12.	Diagrama de comunicación para recepción.	27
13.	Diagrama de comunicación para recepción con actualización de matriz de adyacencia.	28
14.	Disposición espacial del perturbador del canal inalámbrico.	29
15.	Potencia en el canal 6 de IEEE 802.11.	30
16.	Potencia en el canal 6 de IEEE 802.11. Sistema de control enviando paquetes en el canal.	31
17.	Potencia en el canal 6 de IEEE 802.11. <i>Jammer</i> funcionando a 23 dB.	31
18.	Potencia en el canal 6 de IEEE 802.11. <i>Jammer</i> funcionando a 24 dB.	32
19.	Diagrama general de la MG usada	33
20.	Disposición espacial de los nodos en el <i>set</i> experimental.	34
21.	Vista de los nodos.	35
22.	Vista de los nodos.	35
23.	Caso A - Respuesta de control secundario para restitución de frecuencia en los generadores. Restauración promedio para los 3 generadores.	38
24.	Caso A - Respuesta de control secundario para restitución de tensión en los generadores. Restauración promedio para los 3 generadores.	39
25.	Caso A - Respuesta de control secundario para restitución de frecuencia. Potencias activas entregadas por los generadores.	39
26.	Caso A - Respuesta de control secundario para restitución de tensión en los generadores. Potencias reactivas entregadas por los generadores.	40
27.	Caso A - Señales de control secundaria para ambiente ideal.	41
28.	Caso B - Respuesta de control para restitución de frecuencia promedio en los generadores.	42
29.	Caso B - Respuesta de control secundario para restitución de tensión y frecuencia en los generadores. Potencias activas y reactivas entregadas por los generadores.	43

30.	Caso B - Potencias entregadas por la simulación.	44
31.	Caso B - Acciones de control secundario para caída de enlace.	44
32.	Caso C - Potencia activa para dos situaciones dentro de la simulación con <i>jammer</i>	46
33.	Caso C - Frecuencia promedio para dos situaciones dentro de la simulación con <i>jammer</i>	46
34.	Caso C - Retardo de recepción para los paquetes enviados por el generador 1. Situación de deterioro de enlace.	48
35.	Caso D - Respuesta de distribución de potencia activa. <i>jammer</i> en 24 dB.	49
36.	Caso D - Dinámica de recepción para paquetes recibidos por el generador 3. <i>Jammer</i> en 24 dB.	50
37.	Caso D - Retardo de recepción para DG3, paquetes enviados desde DG2. <i>Jammer</i> en 24 dB.	51
38.	Caso E - Respuestas de distribución para potencia activa y restauración de frecuencia. Comunicación por <i>broadcast</i>	52
39.	Caso E - Respuesta para restauración y distribución de potencia activa y frecuencia.	53
40.	Caso E - Retardo de comunicación para recepción de paquetes por parte del generador 3. Situación de caída del enlace de comunicación.	54
41.	Caso E - Respuesta para restauración y distribución de potencia reactiva y tensión.	55
42.	Caso E - Señales de control para tensión y frecuencia. Comunicación por <i>broadcast</i>	55
43.	Caso F -Respuestas de distribución de potencias activas. <i>Jammer</i> con 23 dB.	56
44.	Caso G - Respuesta en distribución de potencia activa y restitución de frecuencia. Situación con deterioro de enlace.	58
45.	Caso G - Respuesta en distribución de potencia reactiva y restitución de tensión. Situación con deterioro de enlace.	58
46.	Caso G - Retardo de comunicación para simulación particular del <i>jammer</i> a 24 dB. Recepción del generador 3.	60
47.	Caso H - Restitución de frecuencia y distribución de potencia activa, caso de fallo de enlace. Control con actualización de matriz de adyacencia.	61
48.	Caso H - Estado ilustrativo de la comunicación para la situación con fallo de enlace.	62
49.	Caso H - Restitución de frecuencia y distribución de potencia activa, caso de fallo de enlace. Control sin actualización de matriz de adyacencia.	63
50.	Caso H - Estado ilustrativo de la comunicación para la situación con fallo de enlace. Control sin actualización de matriz de adyacencia.	63
51.	Respuesta en frecuencia casos 1 y 2.	65
52.	Respuesta en frecuencia casos 3 y 9.	66
53.	Retardo en recepción casos 3 y 9.	67
54.	Respuesta en frecuencia casos 10 y 11.	68
55.	Retardo en recepción casos 10 y 11.	68

56.	Respuesta en frecuencia casos 12 y 13.	69
57.	Retardo en recepción casos 12 y 13.	70
58.	Respuesta en tensión casos 1 y 2.	70
59.	Respuesta en tensión casos 9 y 10.	71
60.	Señal de control secundario casos 9 y 10.	71
61.	Respuesta en tensión casos 11 y 12.	72
62.	Respuesta en tensión caso 13, acción de control caso 12.	73

1. Introducción

1.1. Motivación y Antecedentes

Una rama de desarrollo que está ganando fuerza en la generación y distribución de energía son las microrredes (del inglés MG). El aumento de la cantidad de estas y la tendencia a la expansión de implementaciones de parte del mercado [1], orienta esfuerzos para situar a este paradigma dentro del marco del futuro de la distribución, i.e., las redes eléctricas inteligentes (del inglés SG). Es necesario entonces realizar investigaciones con el objetivo de crear insumos para lograr implementaciones con un correcto control y eficiencia en el despliegue real de las redes.

Problemas actuales como la contaminación debido a la generación fósil fomentan la creación de grandes parques energéticos con energías renovables, así como la posibilidad creada por las MG de autoabastecimiento y venta de energía por parte de los usuarios de manera distribuida. Igualmente se puede tomar en cuenta que aún quedan comunidades rurales en el mundo donde no se tiene acceso a energía proveniente de la red centralizada de potencia [2], y la implementación de microrredes parece adecuada para resolver algunos problemas de abastecimiento energético [3]. De esa forma, un despliegue real debe ser concordante con las dificultades económicas de mantener una microrred por parte de las comunidades rurales, teniendo en cuenta el costo de los componentes y la eficiencia energética [4].

Para lograr una óptima gestión y planificación de aspectos incumbentes al funcionamiento de la MG se han sugerido los beneficios que un sistema de comunicaciones podría traer, beneficios como control, gestión, operación en forma aislada o conectada a la red, escalabilidad, etc. Hay que tomar en cuenta que la ejecución de la red comprendiendo un sistema que comunica a sus componentes, trae consigo problemáticas inherentes a la confiabilidad esperada de la comunicación misma. Por la razón anterior es menester definir un esquema de comunicaciones que sea adecuado con las restricciones que tiene la implementación, así como con la naturaleza de los datos que está comunicando, ya sea la prioridad que posean, su tamaño, o su error máximo permitido, siendo los anteriores algunos parámetros influyentes.

Dicho lo anterior, especial consideración hay que tener con las fuentes de energía renovable no continuas como la energía solar o la energía del viento. Siendo ambos tipos de energía de la mayor importancia en cuanto a ser propuestas como fuentes adecuadas para despliegues reales de una MG. Este tipo de fuentes de energía no continua presentan desafíos al no ser fuentes estables de energía [5] como lo podría ser un microgenerador diesel por ejemplo. La incorporación de sistemas de acumuladores y de comunicación inteligente entre los componentes de la microrred pueden ayudar a hacer a esas fuentes más confiables, y soportar el argumento de factibilidad del despliegue masivo de estas tecnologías.

Algunos de los beneficios potenciales que puede proveer el conocimiento y diseño de una correcta integración de los componentes distribuidos de la MG pueden ser entre otros [6]:

- Diseñar esquemas para que los usuarios de la red puedan adaptarse y beneficiarse del estado actual y necesidades de la misma.
- Desarrollar características que favorezcan mecanismos de *plug-and-play* para una integración fácil con la red.
- Creación de modelos de mercados que permitan incentivos para la utilización de fuentes intermitentes de energía (renovables como solar o eólica por ejemplo).
- Despacho de los unidades bajo incerteza en los niveles de demanda, así como determinar niveles apropiados de reservas.

Los beneficios esperados de un sistema de comunicación en el contexto de la MG fueron introducidos en los puntos anteriores, pero hace falta explorar cómo las infraestructuras propuestas para ofrecer comunicación afectan la respuesta general de la MG, y sus posibles falencias o fortalezas. A grandes rasgos podemos diferenciar entre dos tipos de infraestructuras de comunicación: basadas en enlaces cableados o enlaces inalámbricos. Estas infraestructuras pudiendo poseer (o no poseer) características adecuadas según las necesidades específicas del operador o diseñador de la MG.

Con respecto a los tipos de comunicación cableadas se destaca el diseño de sistemas que usan el concepto de *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA) para la conexión entre enlaces directos de comunicación. SCADA usualmente usa *Enhanced Performance Architecture* (EPA)[7], modelo que tiene menos capas definidas que el modelo OSI estándar. Entre algunos protocolos utilizados podemos encontrar *Modbus*, que define una comunicación clientes-servidor presentando simplicidad de implementación. DNP3 define una comunicación Maestro/Eslavo o IEC 61850, que define eventos o modelos de datos para optimizar la operación. Enlaces disponibles pueden ser RS232, RS485 y Ethernet de la misma forma.

Los resultados documentados en general no se refieren al efecto de deficiencias del enlace de comunicación en la respuesta del sistema. En [8]- [9] se implementan sistemas referidos a la operación en modo aislado de la MG, utilizando enlaces como RS485 o Ethernet (cableados) por ejemplo. Sus resultados validan la utilidad que el sistema propuesto genera en el objetivo de la comunicación, pero no expresan este análisis ante imperfecciones de la comunicación misma.

A diferencia de las tecnologías cableadas, las tecnologías de enlace inalámbricas son igualmente adecuadas para varias aplicaciones en la MG. Siendo destacables sus características de menores costos de instalación y mantención, así como sus capacidades potenciales de escalabilidad. Entre algunas tecnologías inalámbricas aptas para el uso para sistemas de comunicación de redes eléctricas inteligentes podemos encontrar: Zigbee, basado en IEEE 802.15.4. para el uso sobre medidores

inteligentes sobre *Home Area Networks* (HAN) por ejemplo. Bluetooth, que genera enlaces de poco alcance con una tasa de datos media. WiMAX, basado sobre IEEE 802.16. diseñado para funcionar sobre *Wireless Metropolitan Area Network* (WMAN) y poseer altas tasas de datos. LTE, que puede ser usado con cualquier red celular ya desplegada, entregando alta tasa de datos y ahorros en despliegue, en caso de utilizar la red celular ya instalada. También encontramos IEEE 802.11, diseñado para funcionar en *wireless local area networks* (WLAN), poseyendo varios «sabores» para adecuarse a tasas de datos, o niveles de seguridad requeridos.

En [10]-[11] se muestran diseños de implementaciones de comunicaciones utilizando Zigbee. Se puede ver en la última que el número de nodos afecta notablemente el desempeño de la red. En [12] se realiza un estudio utilizando un sistema híbrido basado en ZigBee, Wi-Fi y WiMAX para controlar distintos componentes de la MG. Se define que Zigbee, Wi-Fi y WiMAX son las mejores opciones para aplicaciones HAN, NAN y WAN. Se utilizan perfiles de viento, luminosidad y temperatura, así como una definición de perfiles de ruido. Las conclusiones del trabajo muestran cómo el esquema desarrollado es satisfactorio para gestionar los componentes de la red, pero no se hace un análisis en cuanto a la variación de la calidad de la comunicación y su efecto sobre los enlaces y la respuesta de la red. En general los estudios son de este tipo, donde se proponen esquemas para el análisis de control secundario de la red, es decir, distribución de potencias, restitución, cambio del modo de conexión, etc. pero no se hace un análisis de robustez o dinámica ante cambios fuera del funcionamiento «normal» de la comunicación que gestiona al control secundario.

A pesar de la existencia de implementaciones reales de MGs que pueden funcionar bien bajo condiciones nominales, hace falta investigación acerca de la dinámicas que pueden presentar esquemas de comunicación inalámbricos y su introducción para la evolución y adopción masiva de estas formas de generación distribuida. En particular en este documento se aborda el problema de un enlace de comunicación basado en IEEE 802.11 para el sistema de control secundario de la microrred.

1.2. Descripción del problema

Como se vió en la sección anterior, existe una diferenciación entre enlaces de comunicación inalámbricos y cableados. En general los sistemas de comunicación cableados son los más utilizados y de los cuales se conoce mejor su respuesta experimental. Queda de esa manera un espacio de incertidumbre en el conocimiento del comportamiento de la respuesta de control de la MG bajo un esquema inalámbrico de comunicación.

Con respecto a los sistemas con enlaces de comunicación inalámbricos, hasta donde se tiene conocimiento no hay una caracterización adecuada del efecto de la calidad del enlace en la respuesta de control secundario, consecuentemente, sólo se pueden prever los efectos a priori que tendrán estos

parámetros y pueden no preverse otros. Igualmente, es aún más importante tener una caracterización de la respuesta de control secundario, que tome en cuenta efectos más realistas, propios de la experimentación con esquemas realizados de manera física. Lo dicho con anterioridad implica que la dificultad es entonces la falta de un estado base, que describa el comportamiento del sistema de control secundario, gestionado bajo comunicación inalámbrica, como insumo de conocimiento para evaluar nuevos esquemas de control y contrastar la aplicabilidad de estas tecnologías en implementaciones reales con sus propias particularidades.

Dado que IEEE 802.11 es un protocolo de comunicación inalámbrico bastante robusto y validado experimentalmente por el uso extenso en comunicación de *local area networks* (LAN), parece ser una opción adecuada para probar el efecto de la calidad de canal inalámbrico en la respuesta de control secundario. La distancia de aproximadamente 100 m de alcance también lo hace una opción apropiada para probar la comunicación entre modos que no están tan lejanos entre sí. En el sentido de poder experimentar con IEEE 802.11 y una MG que base su comunicación en esta tecnología, hay que crear un esquema experimental capaz de crear la comunicación basada en IEEE 802.11 para el esquema de control secundario particular de la MG utilizada. Asimismo, el esquema experimental diseñado debe ser capaz de obtener métricas adecuadas para analizar la respuesta de control.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Analizar la respuesta del sistema de control secundario de una microrred simulada y una real desplegada en laboratorio, bajo parámetros variantes de calidad del canal de un sistema de comunicación inalámbrico basado en IEEE 802.11 que interconecta los controladores de los generadores de la microrred.

1.3.2. Objetivos específicos

- Establecer un estado del arte en sistemas de comunicación inalámbrico para esquemas de control secundario de microrredes. Para conocer sobre acercamientos a la problemática, métricas utilizadas y resultados previos.
- Definir e implementar un esquema experimental que permita la obtención de datos de la respuesta del sistema de control secundario de una MG emulada-simulada y otra desplegada en un laboratorio, permitiendo variar parámetros de la calidad del enlace de comunicación. Caracterizar esta respuesta de control en base a métricas como pérdida de paquetes y retardos (*delay*).

- Analizar los resultados y documentar los mismos. En función de explicar las posibles desviaciones en respuesta, aislando ese posible desvío en base a parámetros de calidad de la comunicación.

1.4. Estructura de la memoria

El trabajo de memoria cuenta de cinco capítulos, usando el primero de los capítulos para introducir la temática. La estructura de los capítulos restantes es la siguiente:

El Capítulo 2 explica aspectos teóricos referidos a las investigaciones relacionadas y al funcionamiento de la microrred. Se aborda una explicación de conceptos usados en el documento acerca del control de MG, de la comunicación IEEE 802.11 y de los protocolos usados. Se habla de ciertas investigaciones donde se usan tópicos similares, pero que se acercan de manera más o menos tangencial al tema de investigación.

El Capítulo 3 explica el funcionamiento lógico de las estructuras experimentales usadas para obtener los resultados. Se explica el software y hardware utilizado, los casos de estudio y las capacidades del hardware utilizado para forzar el canal de comunicación.

En el Capítulo 4 se muestran los resultados más notables de experimentación. Se muestran los resultados obtenidos y se explica la razón del comportamiento de las respuestas.

En el capítulo final se concluye el trabajo de investigación, nombrando los principales aprendizajes y los tópicos propuestos de investigación futura.

2. Marco teórico y estado del arte

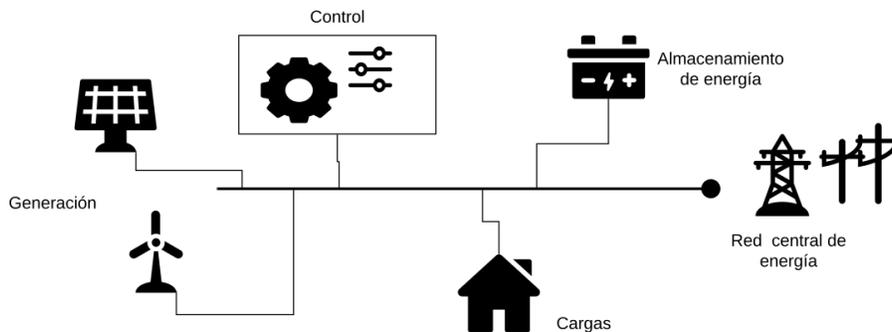
2.1. Marco teórico

2.1.1. Generalidades sobre microrredes

La red de distribución del futuro será una del tipo activo [13]. Se necesitará que se desagregue el control y la toma de decisiones a agentes intermedios de la red de distribución, dándole mayores capacidades de manejo eficiente, confiable y autogestionado de la energía. Con las nuevas disposiciones de inteligencia en la distribución se pueden gestionar las demandas locales de potencia, interactuando con los usuarios por ejemplo a través de un sistema de medición inteligente. También se pueden crear estrategias dinámicas de control, ofreciendo mayor seguridad y confianza en el suministro.

Las MG son un concepto central en esta adquisición de inteligencia en las redes de distribución. Este tipo de redes se pueden definir como la interconexión de generadores distribuidos (del inglés DG), dispositivos de almacenamientos de energía (acumuladores) y cargas, funcionando los componentes como controlables en forma de entidad conjunta y muchas veces autónomas de la red central de potencia. Asimismo, las microrredes generalmente funcionan como sistemas de generación de baja a media tensión. En la figura 1 se muestra el diagrama de componentes generales de una microrred.

Figura 1: Diagrama con los componentes básicos de una microrred.



Hay dos esquemas básicos de conexión de las MG: en modo de conexión a la red central (*on-grid mode*) o como generación de energía aislada (*isolated mode*). Puede permitirse también un modo mixto, donde el modo aislado puede ser desencadenado por ejemplo porque hubo una falla en la red distribución central y la MG se desconectó de ella, o debido a que se diseñó para funcionar aislada desde un comienzo. Generalmente las microrredes tienen la capacidad de funcionar en

ambos modos y deben poseer la confiabilidad suficiente para que la transición entre ambos modos se lleve a cabo sin exponer la seguridad de la red ni de sus componentes.

Desde el punto de vista mercantil, las MG pueden y generalmente funcionan dentro de mercados de energía. Siendo las características del mercado en el que se encuentran distintas, si se encuentran en la capa de generación, transmisión o distribución de la energía, y dependientes de las leyes reguladoras locales en las que están inmersas, de todas formas se pueden identificar agentes generales que forman parte de la estructura mercantil de la red:

- Consumidor: Puede ser una casa, un conjunto de casas o alguna dependencia mediana empresarial. Típicamente este agente presenta algún tipo de contrato tarifado con la red de distribución. Igualmente una comunidad, o un conjunto de consumidores puede organizarse para generar energía de forma aislada y no contratarla a cambio de dinero (prosumidores). Este tipo de consumidor puede transformarse en uno que no que no consuma la energía generada, o solo una parte, para venderla vía la red de distribución manteniendo algún contrato con la red principal
- Regulador del mercado: Es una entidad que define las características legales sobre las que puede funcionar la operación del mercado. Se preocupa de la transparencia y la accesibilidad de la red. Puede regular los costos de acceso a la red de distribución y las reglas por las cuales se define el precio final de la tarifa del usuario.
- Propietario del generador distribuido: Se encarga de la operación correcta de estos componentes. Pueden tener contratos con las empresas energéticas para proveer la potencia requerida y se encargan del monitoreo y el control de los componentes asociados al generador.
- Empresa de servicio de energía: Es quien está en contacto directo con los consumidores, poseyendo un contrato tarifario con ellos. Son entidades que pueden aumentar el valor de microrred creando esquemas que sean atractivos para los usuarios, en términos de costos de energía u otros servicios energéticos, tomando en cuenta las dificultades y posibilidades que posee este tipo de generación. Estas empresas pueden incluir dentro de su portafolio de generación este tipo de oferta de potencia.
- Operador de la microrred: Se encarga del mantenimiento, la operación y el desarrollo de la red de distribución local que conforma la microrred. Este papel puede ser tomado por una empresa de servicio de energía o por prosumidores autogestionados.
- Operador del sistema de distribución: Se encarga de la operación y mantención del sistema de distribución, usualmente gestiona alto, medio y bajo voltaje. Es quien provee la energía desde los proveedores hacia los consumidores finales (en un esquema donde los consumidores no generan su energía). Posee operadores de medición para hacer la entrega de energía de forma

eficiente y según los intereses de los consumidores y la flexibilidad que ofrecen la generación distribuida pueden acceder a esquemas por ejemplo como balance de la red localmente.

2.1.2. Control en microrredes

Los requerimientos de control para una MG incluyen entre otros los siguientes:

- Regulación de la frecuencia y voltaje dentro de límites.
- Reparto de carga (*load sharing*) eficiente en términos de la potencia activa y reactiva.
- Comunicación confiable entre componentes de la MG.
- Transición ubicua entre el modo aislado y el modo conectado a la red.
- Despacho económico para reducir costos.

Los tipos de control pueden ser divididos en cuatro tipos: centralizados, descentralizados, distribuidos y jerárquicos [14]. Y el tipo usado dependerá de las capacidades del operador de la MG, sus componentes, o las necesidades específicas de la MG particular.

En los esquemas centralizados las variables de estado se comparten hacia el *microgrid control center* (MGCC) por medio de un enlace de comunicación de alta capacidad. En el MGCC se procesan las mediciones y a partir de ellas se generan las decisiones de control. Estas acciones usualmente son enviadas por el mismo canal de comunicaciones (enlace *duplex*).

En los esquemas descentralizados se utilizan las mediciones locales para determinar una acción de control en el mismo componente. No se comparten las variables de estado con los demás para formar la acción de control. Usualmente hay una división entre controladores «superiores» e «inferiores». Pueden ser una opción superior si la cantidad de componentes de la MG es grande e implica gran procesamiento para el MGCC, además de no necesitar el enlace de comunicación.

En los esquemas distribuidos los componentes comparten sus variables de estado con sus vecinos a través de un enlace con poca capacidad. Las acciones de control se realiza tomando en cuenta mediciones locales y las señales de estado de los vecinos, recibiendo las señales desde los vecinos sin un ente coordinador único. Usualmente este tipo de control se basa en una estratificación del control basado en capas.

El control jerárquico está basado y tiene por objetivos la interoperabilidad entre distintos sistemas y operadores. Se divide en tres capas de control: primaria, secundaria y terciaria. La primera se encarga del control instantáneo del voltaje y frecuencia. La secundaria se encarga de eliminar desviación del estado estacionario y la terciaria que es la más lenta, se encarga de manejar el flujo

de potencia hacia la red externa y el despacho económico. Los esquemas jerárquicos y distribuidos suelen complementarse.

Los esquemas de control provistos a las MG usualmente corresponden a esquemas del tipo jerárquico. Donde los objetivos de cada capa de control son distintos y poseen jerarquía, o son llevados a cabo en etapas consecutivas del sistema de control. Los objetivos de las capas de control se pueden ver en la figura 2. La primera y segunda capa de control tienen por objetivos estabilizar el sistema dentro de sus límites de tensión y frecuencia, así como retornarlos al valor nominal de funcionamiento. La tercera capa de control se encarga de optimizar el despacho energético de acuerdo a variables económicas en tiempo real, como por ejemplo el precio de la energía, de modo de optimizar una función de costos sujeta a restricciones basadas en los flujos de potencia y el costo. Generalmente existe una relación donde la capa de control primario es más rápida que la secundaria y sucesivamente. El control jerárquico está basado y tiene por objetivos la interoperabilidad entre distintos sistemas y operadores.

En el trabajo de simulación se utiliza un esquema de control basado en [15]. El sistema de control propone las dos primeras capas de control, utilizando control *droop* para la primera capa, y un sistema *Distributed Averaging Proportional-Integral* (DAPI) propuesto para la segunda.

Figura 2: Esquema jerárquico de control en microrredes de acuerdo a [16].



2.1.3. Primera capa de control en la microrred simulada

La primera capa de control tiene por objetivo estabilizar la red ante cambio de cargas e instaurar una distribución de las cargas entre los DGs. Se trata de procesos rápidos para controlar la frecuencia y tensión de los DGs en función de mantener la estabilidad del sistema. Para estos efectos se han propuesto técnicas como *virtual synchronous generator* (VSG) o técnicas basadas en *droop control*.

Las técnicas basadas en *droop* tienen por objetivo imitar el comportamiento de un generador síncrono i.e. reducir la frecuencia cuando se aumenta la potencia activa [16], y reducir la tensión

cuando se aumenta la potencia reactiva. En sistemas clásicos que poseen máquinas síncronas, la gran inercia de estas naturalmente genera este comportamiento. En (1) se muestran las ecuaciones básicas del método de *droop* P/Q.

$$\omega_i = \omega^* - m_i P_i , \quad (1a)$$

$$E_i = E^* - n_i Q_i , \quad (1b)$$

donde ω_i y E_i son las señales de referencia que servirán como entrada en el lazo de control de tensión. Los parámetros ω^* y E^* son las referencias de frecuencia y tensión nominales de la red. P_i y Q_i son las potencias medidas que inyecta el DG a la red. m_i y n_i son los coeficientes de *droop* para frecuencia y tensión respectivamente. Notar que en (1) el comportamiento es del tipo lineal.

Los sistemas de control *droop* proveen de un sistema en cada DG para poder realizar la estabilización de sus señales dentro de márgenes aceptables. Este tipo de control evita la necesidad de un sistema de comunicación entre los generadores, logrando dar una respuesta rápida, simple y con mayor confianza a perturbaciones en las cargas que proveen los generadores. Asimismo tiene desventajas, como un mayor tiempo de establecimiento, o ser susceptible a no lograr la distribución de potencia en situaciones de diferencias entre las impedancias de la líneas que conectan a los DGs en paralelo [17].

De la misma forma, se puede ver que diferencias en la impedancia de la líneas, así como diferencias en las frecuencias a la que operan los generadores (debido a que tienen baja inercia) generan flujos de corrientes indeseados entre los generadores [17]. Muchas veces se utiliza un sistema de control con impedancia virtual, con el objetivo por ejemplo de reproducir una impedancia equivalente del tipo inductiva y simplificar el control *droop*.

Las señales ω_i y E_i ingresan al lazo de control de tensión, y la salida de este lazo ingresa al lazo de control de corriente. Este último lazo controla la señal PWM (*Pulse-Width Modulation*) que hace actuar al inversor del DG y dirige las señales a su valor controlado. Un aspecto a nombrar es que los lazos de control de tensión y corriente corresponden a controladores proporcionales-integrales (PI) normales.

2.1.4. Segunda capa de control en la microrred simulada

La primera capa de control mantiene al sistema dentro de límites de estabilidad, sin embargo no es capaz de traer al sistema a sus valores nominales cuando se utiliza control *droop*. Para lograr el efecto de minimizar hacia cero el error entre la frecuencia y la amplitud de la tensión del DG con respecto a la referencia de la red, se utiliza esta capa de control secundaria.

Esquemas centralizados y distribuidos son propuestos en la literatura para afrontar esta tarea. Un sistema centralizado es uno donde una entidad coordinadora, generalmente el MGCC, se comunica con todos los DGs transmitiéndoles sus señales de corrección. Una desventaja importante de los sistemas centralizados es el problema de que en caso de fallar el punto de comunicación entre los DGs y el MGCC todo el sistema falla.

Los esquemas distribuidos de control funcionan cuando los DGs transmiten sin coordinación central sus mediciones de estado a los demás DGs. Basándose en estas mediciones los DGs ajustan sus tensiones y frecuencias para alcanzar el estado deseado. En este punto es importante nombrar que además de los objetivos de restauración de tensión y frecuencia, un objetivo deseado por el operador de la microrred es compartir la potencia reactiva proporcionalmente entre los DGs.

Como se mostró en [15], los objetivos de restauración de tensión y distribución proporcional de potencia reactiva por medio de un control *droop* son objetivos contrarios. Pero por medio de los controladores DAPI propuestos en dicho trabajo, a pesar de esto, se puede diseñar un esquema de *trade-off* entre la restauración de voltaje deseada y la potencia reactiva compartida.

Las ecuaciones DAPI de control de frecuencia son detalladas a continuación:

$$\omega_i = \omega^* - m_i P_i + \Omega_i , \quad (2a)$$

$$k_i \frac{d\Omega_i}{dt} = -(\omega_i - \omega^*) - K_p \cdot \sum a_{ij} (\Omega_i - \Omega_j) . \quad (2b)$$

De estas ecuaciones, (2a) es similar a (1a) excepto que se agrega el término Ω_i que es la variable correspondiente a la segunda capa de control (ver figura 3). La relación (2b) es la ecuación que controla el cambio de Ω_i . k_i es una ganancia y a_{ij} es un coeficiente de la matriz de adyacencia, matriz que caracteriza el estado de la comunicación entre los distintos DGs (toma valor 1 o 0 dependiendo de si hay comunicación desde el generador i hacia el j). El valor K_p es un ponderador para darle prioridad a la distribución de potencia o a la restitución de frecuencia.

Las ecuaciones DAPI de control de tensión son:

$$E_i = E^* - n_i Q_i + e_i , \quad (3a)$$

$$\nu_i \frac{de_i}{dt} = -\beta_i (E_i - E^*) - K_q \cdot \sum b_{ij} \left(\frac{Q_i}{Q_i^*} - \frac{Q_j}{Q_j^*} \right) . \quad (3b)$$

Al igual que (2), en (3a) se agrega un valor e_i como variable de control secundaria de la tensión. En (3b) se presentan las ganancias ν_i y β_i , además de los coeficientes b_{ij} de la matriz de adyacencia.

Las variables Q_i^* y Q_j^* son las potencias nominales que soportan los generadores. Con este diseño se puede modificar la prioridad de control entre la restauración de la tensión al valor nominal o privilegiar la distribución de la potencia reactiva. Aumentando el valor de la constante β_i se puede privilegiar la restauración de tensión por sobre la distribución de potencia reactiva entre los DGs, generando el esquema de *trade-off* deseado. Al aumentar el valor de la constante K_q se le da prioridad a la distribución de potencia reactiva.

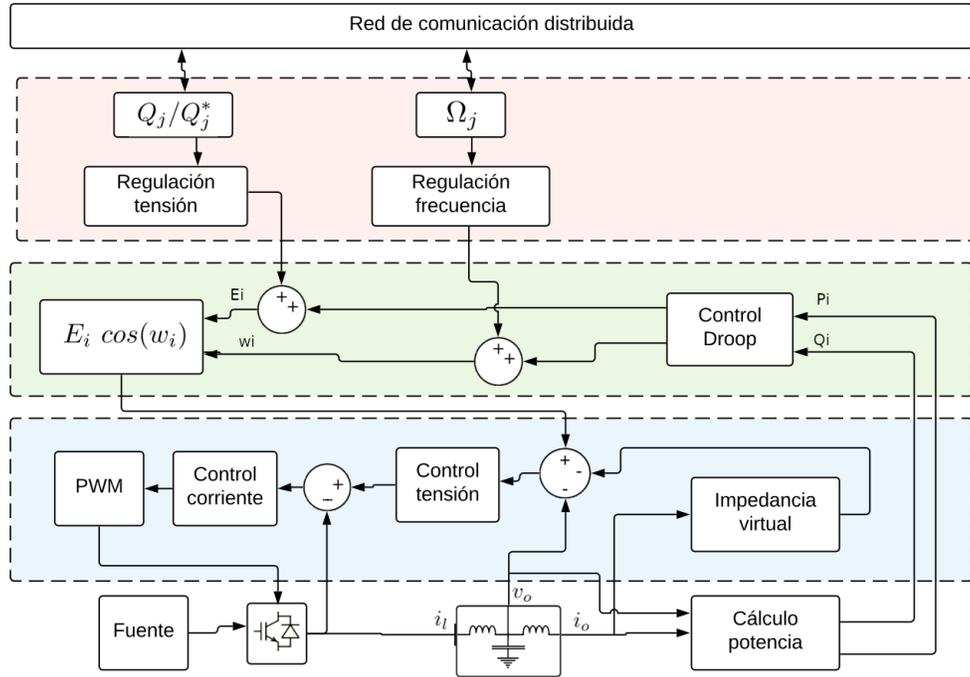


Figura 3: Esquema de control primario y secundario de cada DG en la microrred. Controlador DAPI usado en el trabajo y en [18].

Un punto importante de explicitar es que tanto en las ecuaciones (3b) y (2b) de evolución de las variables de control secundario, necesitan el conocimiento de variables de control y estados de otros generadores, Ω_j y Q_j respectivamente para cada ecuación. Este intercambio se produce por medio del canal de comunicación entre los generadores (parte superior de la figura 3). Esto quiere decir que el canal inalámbrico tendrá congestión de todos los nodos (generadores), de manera bidireccional, y descoordinada en el sentido que todos los nodos querrán acceder al canal sin haber un ente que les diga cuándo deben comunicar sus paquetes.

Otro punto a considerar, además de la capacidad del enlace de compartir los estados de cada generador y las variables de control generadas, es la capacidad del esquema de establecer el estado

del enlace de comunicación. Esto se puede ver reflejado por ejemplo, en que se podría detectar un mal funcionamiento entre el enlace que comunica el generador i -ésimo y el j -ésimo, de esta manera actualizando los valores a_{ij} y b_{ij} en las matrices de adyacencia.

2.1.5. IEEE 802.11 y UDP

Wi-Fi es una tecnología que permite la interconectividad entre equipos que se comunican de manera inalámbrica. La alianza Wi-Fi (*Wi-Fi alliance*) la define como una tecnología para interconectar productos en el WLAN y está basada en varios «sabores» de los protocolos basados en IEEE 802.11. Wi-Fi a sido una tecnología conveniente para comunicar de manera barata dispositivos en LAN, sus ventajas de costos y robustez probada lo ha hecho una forma de comunicación mundialmente adoptada, siendo la alianza Wi-Fi quien certifica qué productos utilizan esta tecnología y pueden ser utilizados con otros productos que la soporten.

IEEE 802.11 define capas físicas (PHY) y de acceso al medio (MAC) para aplicaciones WLAN [19]. Los protocolos básicos de IEEE 802.11 son similares para todas sus versiones, aunque entre ellas presentan distintas capacidades, que se pueden ver en la figura 4.

Figura 4: Sabores de Wi-Fi y sus principales características de acuerdo a [20].

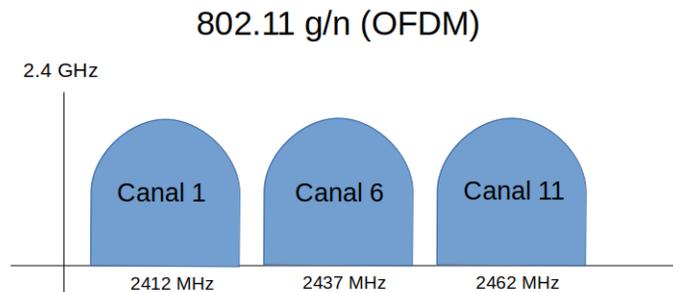
Estandares IEEE 802.11						
Fecha Lanzamiento	Estándar	Banda	Ancho de Banda	Modulación	Tecnología avanzada de antena	Tasa de datos máxima
1997	802.11	2.4 GHz	20 MHz	DSSS, FHSSS	N/A	2 Mbps
1999	802.11b	2.4 GHz	20 MHz	DSSS	N/A	11 Mbps
1999	802.11a	5 GHz	20 MHz	OFDM	N/A	54 Mbps
2003	802.11g	2.4 GHz	20 MHz	DSSS, OFDM	N/A	542 Mbps
2009	802.11n	2.4 GHz, 5 GHz	20 MHz, 40 MHz 40 MHz, 80MHz, 160 MHz	OFDM	MIMO, hasta 4 <i>streams</i> MIMO, MU-MIMO, Hasta 8 <i>streams</i>	600 Mbps
2013	802.11ac	5 GHz		OFDM		6.93 Gbps

La versión de Wi-Fi soportada tanto por el *access point* (AP) como por las interfaces inalámbricas en este proyecto es IEEE 802.11n. Esta versión permite comunicaciones de hasta 600 Mbps. IEEE 802.11n puede operar en las frecuencias de 2.4 GHz (banda ISM) o 5 GHz. IEEE 802.11n puede configurarse para utilizar tecnología MIMO y mejorar la velocidad y robustez. Adicionalmente se puede configurar el uso de un canal de comunicaciones de 40 MHz de ancho de banda.

La banda de 2.4 GHz está dividida en 14 canales espaciadas por 5 MHz, estando el canal 1 centrado en 2.412 GHz. Productos que utilizan 802.11 para que sean compatibles deben compartir

los mismos anchos de banda. Estos canales dependiendo de la tecnología pueden configurarse para operar con distintos anchos de banda. En particular en IEEE 802.11n puede configurarse para usar un ancho de banda de 20 MHz (usado en la experiencia). La figura 5, muestra los canales en IEEE 802.11n que pueden usarse con este ancho de banda y no se superponen teóricamente.

Figura 5: Canales en IEEE 802.11 que entregan 20 MHz de ancho de banda sin superponerse según [20].



El mecanismo general para gestionar el acceso al medio en la capa MAC es *carrier sense multiple access with collision avoidance* (CSMA/CA). El monitoreo del canal (*carrier sense*) hace referencia a que en la capa física el transmisor está «escuchando» el canal, si detecta otros paquetes en el canal no realiza la transmisión inmediatamente. El tiempo entre envío de *frames* está caracterizado principalmente por dos conceptos: por el *InterFrame Space* (IFS) y el *Backoff Time*.

El IFS hace referencia a tiempos que debe esperar el nodo transmisor antes de iniciar un intento de envío. Se definen varios tipos de IFS: SIFS, AIFS, DFIS, etc. El funcionamiento del IFS es tal que el transmisor está monitoreando el canal antes de enviar y si continuamente está libre (*idle*) por ese periodo de tiempo, pasará a escuchar un segundo tiempo, el *backoff time*. Los usos de distintos tipos de IFS son dependientes del tipo de paquete que se va a enviar, por ejemplo SIFS (*short interframe space*) se puede utilizar para enviar paquetes RTS (*request to send*) o CTS (*clear to send*), la prioridad misma del paquete (si es de datos), o si el paquete que se intentó enviar anteriormente al que se enviará a continuación tuvo un resultado satisfactorio o no.

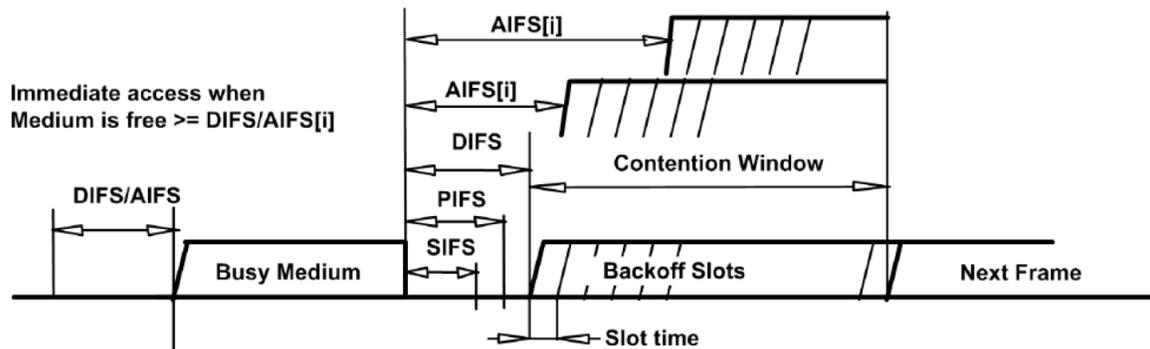
El *backoff time* es un tiempo aleatorio que debe esperar el transmisor para enviar, para darle prioridad a paquetes que deben esperar menos tiempo o para tomar en cuenta el estado de congestión del canal. El tiempo de espera aleatorio del *backoff time* se elige de una distribución uniforme entre los valores $[0, CW]$, donde CW es el *contention window*. El CW es un número entero de *time slots*, que es una unidad de tiempo mínima, y que habita dentro de un CW mínimo CW_{min} y uno máximo CW_{max} . Inicialmente el valor de CW toma el valor CW_{min} y cada vez que hay un intento

infructuoso de envío aumenta. El CW puede llegar eventualmente al valor de CW_{max} y se queda en ese valor hasta ser reseteado [21]. El tiempo de espera asociado al *backoff time* es ir reduciendo el contador mientras el canal está libre. En caso de que mientras está realizándose el conteo se detecta el canal como ocupado otra vez, el contador se detiene e inicia nuevamente cuando el canal se despeja.

El comportamiento de este tipo de acceso al canal difiere para la comunicación *unicast* y *broadcast*. Para *broadcast*, al no tener un nodo objetivo fijo, no se utilizan los paquetes de control RTS o CTS. De la misma forma, no se esperan mensajes de ACK (*acknowledge*) por parte del nodo emisor, influyendo en que el valor de CW no cambia ante intentos infructuosos. En transmisión *broadcast* el emisor no se preocupa de si llegó el paquete o no. Por otra parte, en el caso de *unicast*, sí aplican los paquetes RTS y CTS, además del aumento del valor del *contention window* [22], y la confirmación de paquetes (ACK).

En la figura 6 se ve la relación entre el IFS y el *backoff time*. Entre intentos de envíos consecutivos se espera un tiempo caracterizado por el IFS y luego un tiempo asociado al *backoff*. Es sobre este tiempo de *backoff* que niveles mayores de ruido pueden afectar, al no realizarse un envío exitoso por no detectar el canal como ocupado, o no poder recibir ACK de respuesta exitosa. Sobre este *backoff* afecta la cantidad de tráfico de paquetes en el canal de aire, pudiendo aumentar el tiempo de contención o la espera para reducir los *time slots* cuando el canal está ocupado, y por ende la velocidad con la que los paquetes de control enviados por la MG son recibidos por otros nodos.

Figura 6: Relación entre IFS y el *backoff time* [23].



UDP

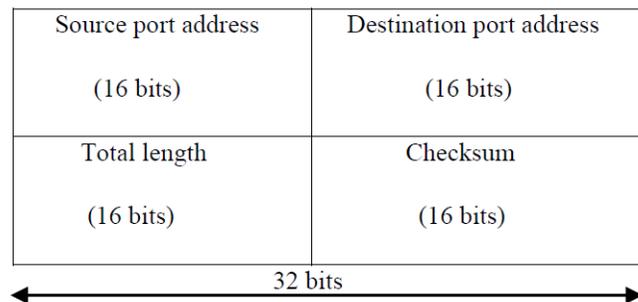
La capa de transporte es la segunda capa en el modelo TCP/IP. Su objetivo es proporcionar comunicación *end-to-end* entre dos nodos de la red. Puede soportar servicios orientados a la co-

nexión, con confianza de transmisión, control de flujo y congestión, multiplexión, etc. Existen dos protocolos principales en la capa de transporte: TCP y UDP.

El protocolo UDP (*User Datagram protocol*) es un protocolo de la capa de transporte que no está orientado a la conexión. No está orientada de esa manera a mantener una sesión fija (como lo sería en TCP) y no se preocupa de confiabilidad del envío, ni de la llegada en orden de los paquetes, no se preocupa de retransmisiones en caso de fallo en el envío de un paquete. Las características tienen sentido si se utiliza una aplicación donde no se espera una gran cantidad de pérdidas de paquetes, o en el caso de que la pérdida de paquetes en sí sea menos importante que la velocidad a la que llegan [24], es decir, se necesita que los paquetes lleguen de la manera más rápida posible y me dejan de interesar en la medida que presentan mayor retardo. Un ejemplo de lo anterior podría ser comunicación en vivo, donde si un paquete llega retrasado ya no es útil, porque esa parte de la comunicación real (voz o imagen) ya fue realizada.

La estructura de un paquete de la cabecera UDP se ve en la figura 7. Existen 4 campos asociados al *header*. La dirección del emisor y el receptor, el largo total del paquete y un *checksum* para ayudar en el proceso de corrección de errores. No se espera del receptor un mensaje de ACK luego del envío por parte del receptor.

Figura 7: *Header* UDP [24].



En el caso de la utilización de paquetes para comunicar las señales de control enviadas por los generadores, se necesita la entrega rápida de los mismos hacia los demás nodos. Por esta razón se utilizan paquetes encapsulados en UDP. No es útil intentar retransmisiones cuando el estado de la red ya cambió, así como la simpleza de UDP puede ayudar al tiempo de procesamiento del paquete en el nodo receptor. Con este protocolo igualmente se puede experimentar el uso de comunicación por medio de mensajes *unicast* o *broadcast*, ya que cambia la cantidad de paquetes en el canal de aire y también los intentos de retransmisión por parte de la capa MAC.

2.1.6. Retardo de recepción

Un sistema de comunicación presenta inherentemente el fenómeno de retardo de comunicación. En particular, para el sistema de comunicación utilizado en el trabajo, el carácter inalámbrico y la presencia de descoordinación en la emisión de paquetes de los nodos comunicantes, genera el efecto de presencia de retardo por varias razones. La desagregación de los tipos de retardo que influyen en el valor final T_T de éste son los siguientes:

$$T_T = T_{cola} + T_{MAC} + T_t + T_p + T_{pr} \quad (4)$$

donde T_{cola} es el tiempo que espera un paquete en la cola del nodo emisor esperando que los paquetes previos sean enviados o descartados. T_{MAC} es el tiempo que debe esperar el paquete que está primero en la fila de envío por el IFS, sumado al procedimiento del *backoff time* y las posibles esperas de ACK que no llegan al nodo emisor (retransmisión) en caso de la comunicación por *unicast*. T_t es el tiempo de transmisión, tiempo que demora el paquete en ponerse en el canal de aire de manera completa; este tiempo depende del tamaño del paquete y la tasa de envío. T_p es el tiempo de propagación, tiempo que se demora el paquete en viajar en el canal de aire, y T_{pr} es el tiempo que demora el nodo receptor en el desencapsulamiento y procesamiento del paquete para entregarlo al sistema de control. De estos tiempos que afectan el valor final T_T , se consideran despreciables T_t , T_p , y T_{pr} ; siendo principalmente T_{MAC} el tiempo que afecta el incremento grande del valor del retardo.

El método utilizado para medir el valor del retardo en la recepción de un paquete puede afectar ciertamente el valor de este en varios ms. Se necesita que el nodo emisor y receptor tengan un reloj bien sincronizado para poder utilizar el marcador temporal (*timestamp*) de uno para compararlo con el tiempo medido en el otro. En el caso de la medición utilizada para efectos de la MG simulada, al presentarse los tres nodos comunicantes dentro del mismo programa de simulación, se utiliza el reloj común que es el entregado por el sistema operativo. Este reloj, invocado desde el programa de simulación, entrega una certeza de hasta 1 ms en la medición del tiempo actual. Para el caso de la medición del retardo para la MG instalada en el laboratorio, la medición del retardo se hace por medio del tiempo señalado por la plataforma que gestiona el hardware (DSpace), plataforma que está sincronizada entre los DGs por medio de un *trigger* con una exactitud de μs .

2.2. Estado del arte en uso de comunicación en control secundario de MGs

El estado del arte en el estudio de las comunicaciones utilizadas por el sistema de control en arquitecturas de MG inteligentes, se pueden separar los enlaces en dos tipos, conexión por medios cableados y por medios inalámbricos. De la misma manera, se puede caracterizar la comunicación

utilizada por medio del área de cobertura a la cual debe entregar servicio. Una división clásica de los sistemas puede verse a través de los conceptos de *Home Area Network* (HAN), *Neighborhood Area Network* (NAN) y *Wide Area Network* (WAN) [25]. Algunos otros conceptos concernientes a esta división son los de *Field Area Network* (FAN), *Business/Building Area Network* (BAN) e *Industrial Area Networks* (IAN) [26].

Con respecto al enlace de comunicación entre las componentes que definen el área de una NAN, se pueden usar tecnologías como *Power Line Communications* (PLC), tecnologías celulares o *Ethernet* [27]. De la mismas manera, una tecnología que parece interesante de analizar en la distancia comprendida por una NAN es IEEE 802.11, conocida popularmente por la validación Wi-Fi.

Los enlaces del tipo inalámbrico, en el contexto de control de microrredes, parecen estar siendo explorados sólo recientemente y no parece haber un consenso ni entendimiento a cabalidad de las mejores tecnologías de acceso, ni tampoco las complicaciones inherentes a su operación bajo circunstancias no ideales. Con respecto a los enlaces inalámbricos hay algunos trabajos referentes a las dinámicas de conexiones basadas en IEEE 802.11. La tabla 1 muestra un resumen de trabajos que analizan en parte eventos de comunicación no ideal en el contexto de control secundario de MGs.

En [28] se analiza la respuesta de un sistema de control secundario basado en una arquitectura *full mesh* y un control distribuido entre los DGs de la microrred. Los DGs se comunican sobre 802.11 y se implementa un sistema de ataque a la comunicación por medio de *jamming*. El sistema se ve afectado en cuanto a la velocidad de convergencia y al presentarse un error del valor de referencia al cual debería restaurarse la tensión. La investigación sin embargo no muestra por ejemplo cuáles son los valores de calidad de canal que repercutieron en esos errores del sistema de control.

En [29] se expone el análisis de un sistema de control híbrido centralizado-descentralizado para una microrred que puede hacer la transición desde y hacia el modo *on-grid* y *islanded*. En el trabajo se analiza el efecto que tienen parámetros como la tasa de adquisición de datos y el tráfico presente en el canal inalámbrico, sobre la respuesta del sistema ante una perturbación que obliga a la MG a pasar desde el modo *on-grid* al modo *islanded*. El trabajo muestra que el efecto principalmente de la tasa de adquisición de datos es importante en la rapidez con que se alcanza el equilibrio, así como si se es estable o no. Sin embargo, el trabajo es puramente simulado, sin dejar claro los algoritmos de control utilizados. Adicionalmente a esto, sólo analiza el evento de transición de esos estados, no se somete a cambio de cargas ni da cuenta como se comporta en caso de falla de algún DG.

En [30] se analiza el efecto del retardo (*delay*) de comunicación en el sistema de control secundario de un red aislada. Se crea un modelo en *pequeña señal* para explorar la estabilidad del sistema y se analiza la dependencia del retardo máximo estable en función de las ganancias de los controladores.

Se diseña un sistema simple de elección de las ganancias según el retardo que presenta la red. Este artículo cubre de manera formal el problema del retardo, y diseña un esquema que cumple con mejorar el desempeño, sin embargo no toma en consideración la interferencia co-canal, y el análisis es sólo para una MG gestionada de manera centralizada.

En [31] se comparan tres esquemas de control: PI, *Model predictive controller* (MPC), y *Smith predictor* (SP). Los controladores están diseñados para funcionar bajo cierto retardo «nominal» y se someten a distintos retardos de comunicación. El estudio muestra la robustez del MPC sobre los otros, pero no se realiza el análisis de otras variables de calidad del canal. Los controladores son diseñados igualmente para un esquema centralizado.

En el trabajo [18] se propone una estrategia de control tomando en cuenta el despacho óptimo y las corrientes máximas de las líneas para un esquema distribuido de control. El sistema de control se analiza bajo el efecto de caídas de enlaces y antes tres casos de retardos de comunicación. El sistema responde de buena manera y el retardo máximo analizado muestra que se hace más lenta la respuesta de control. Sin embargo, no se toman en cuenta la naturaleza aleatoria del retardo de enlace real en un sistema de comunicación inalámbrico, así como las pérdidas posibles de paquetes.

En el trabajo en [32] se analiza la respuesta de un esquema *distributed model-based predictive control* (DMPC) como estrategia de control. Se compara su robustez ante pérdida de enlace y retardos, entre otros, contra un esquema de control DAPI. El trabajo muestra que el esquema DMPC puede ser mejor que el DAPI ante retardos de paquetes con un máximo de 1 s. No se toma en cuenta pérdidas de paquetes ni la irregularidad del retardo.

En [33] se realiza un análisis comparativo entre cuatro estrategias de control: un SP, un MPC centralizado, un esquema DAPI y uno DMPC. Entre algunos ambientes se evalúa el efecto de retardos del canal en función de indicadores de control. Se obtienen dinámicas de desempeño de los cuatro controladores bajo distintos niveles de retardo estableciendo curvas de desempeño. El trabajo es completo en función de crear ciertos escenarios donde unos controladores son más robustos que otros. No toma en cuenta a pesar de esto que la presencia de retardo puede estar acompañada por pérdidas de paquetes de manera más o menos correlacionada, sobretodo en enlaces inalámbricos. Igualmente no se aproxima a una distribución aleatoria del retardo.

Los trabajos en general muestran que se proponen esquemas de control distintos, que pueden preocuparse de estabilidad de las líneas, la distribución de potencias o la predicción de horizontes de control. Estos trabajos analizan el problema de comunicación, pero no es su foco y por lo tanto suelen utilizar condiciones estáticas del estado de comunicación, así como aislar variables de ese estado, situación que no suele ocurrir en enlaces inalámbricos.

Con respecto al efecto de la perturbación del canal ante niveles distintos de ruido y su efecto en el desempeño de IEEE 802.11 se puede ver que el nivel de ruido importa [34]. En el trabajo se

aprecia que la presencia de otras comunicaciones en base a IEEE 802.11 puede afectar de manera significativa el funcionamiento de la red. De la misma forma, se observa que el deterioro del *throughput* entregado por IEEE 802.11n aumenta de manera no lineal con el nivel de ruido, sino que a partir de un cierto nivel el deterioro incrementa de gran manera. Igualmente, la atenuación genera luego de cierto valor un deterioro grande con respecto a sus valores menores.

Artículo	Modo conexión	Experimentación	Tipo de enlace	Tecnología	Esquema control	Tipo Experimentación
[28]	Aislado	Interferencia local - <i>Jamming</i>	Inalámbrico	IEEE 802.11	Distribuido	Simulado
[29]	Conectado a aislado	Retardos - Tasa de envío	Inalámbrico	CSMA	Centralizado - Distribuido	Simulado
[30]	Aislado	Retardos	Genérico	-	Centralizado	Simulado
[31]	Aislado	Retardos - Distintos controladores	Genérico	-	Centralizado	Simulado
[18]	Aislado	Caída enlace - Retardos	Genérico	-	Distribuido	Simulado
[32]	Aislado	Caída enlace - Retardos	Cableado	-	Distribuido	Experimental - Simulado
[33]	Aislado	Retardos - Distintos controladores	Genérico	-	Distribuido - Centralizado	Simulado

Tabla 1: Características de trabajos de investigación asociados a dificultades de comunicación en el control de MGs.

3. Metodología

3.1. Descripción de la metodología

En función de desarrollar una respuesta a los objetivos de la memoria (enunciados en su sección respectiva), se requiere asemejar el funcionamiento real de una microrred estando estructurada de manera aislada a la red principal de distribución. La microrred debe presentar un sistema de comunicaciones inalámbrico, que cree un flujo de datos entre los controladores de los inversores de cada generador, para compartir sus estados y en base a ellos tomar la acción de control. Todo lo anterior en el sentido de generar una muestra de resultados experimentales sobre los cuales caracterizar y analizar la respuesta del sistema bajo distinta calidad del enlace inalámbrico de comunicaciones.

El sistema de simulación-emulación de la MG consta de dos partes, una parte que simula las dinámicas de la barra de energía, las cargas y los generadores; además de los flujos eléctricos de potencia y las tensiones que se generan en los puntos de interconexión entre los generadores con la barra de transmisión. La segunda parte tiene que ver con el sistema de comunicaciones que interviene en el intercambio de datos de control por parte de los generadores para crear las acciones de restitución frecuencia y tensión. Por sistema simulado se hace referencia a la simulación de las dinámicas eléctricas de parte del software de simulación, mientras que por sistema emulado se refiere al sistema de comunicación basado en hardware que emula el comportamiento en despliegue.

En parte de este trabajo se dispondrá de un sistema simulado, en el cual la parte estrictamente eléctrica, de distribución y generación de energía, son simuladas por medio de un computador que contendrá todo el sistema eléctrico. Para este efecto se hará uso de la plataforma *PLECS*, software especializado en imitar dinámicas eléctricas como flujos de corrientes y tensiones, así como de modelar las respuestas analógicas de las componentes de la red. El software *PLECS* presenta la ventaja de poder ser integrable con la plataforma *SIMULINK* de *MATLAB*, que contiene diversos módulos con los que se puede hacer control de sistemas y emular comunicaciones.

Con respecto al sistema de comunicación, se necesita crear una estructura de comunicación real inalámbrica que comparta paquetes de control bajo el protocolo IEEE 802.11. Para la MG simulada se introduce el uso de adaptadores Wi-Fi distintos, que comunican cada controlador de cada DG a través del aire. Para el caso de la experimentación con la MG en el laboratorio, se debe poseer un sistema que integre la gestión de las dinámicas eléctricas (hardware), con la gestión de las Raspberry Pi que se usarán para compartir las señales de control entre los generadores hacia un AP. Estas Raspberry conectadas al hardware de potencia se utilizarán para comunicar las señales de control a través de sus sistemas de comunicación Wi-Fi.

Adicionalmente se debe introducir el uso de algún mecanismo de forzamiento del canal de aire,

para crear niveles más desfavorables a la comunicación Wi-Fi. Para ese efecto se dispone de una radio definida por software que se debe configurar para el funcionar esperado.

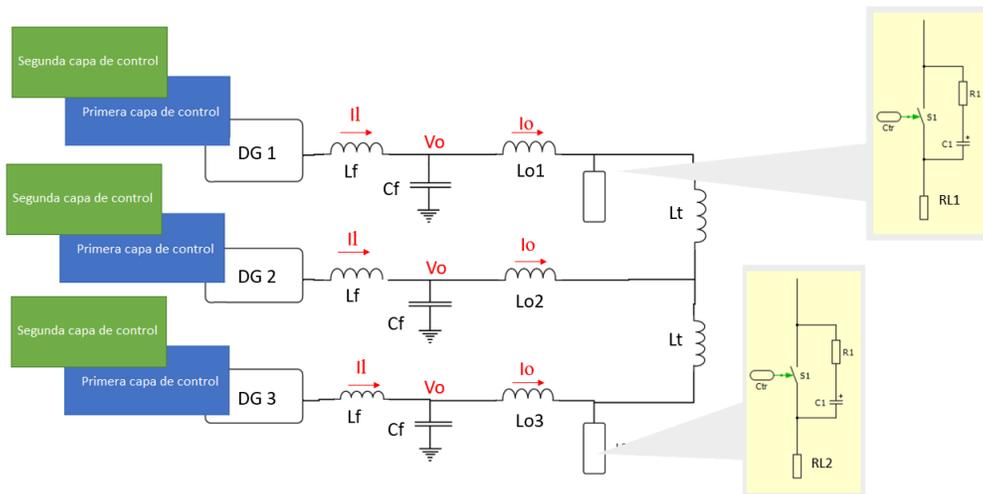
3.2. Implementación de la plataforma experimental

3.2.1. Funcionamiento del sistema eléctrico simulado

Para obtener las dinámicas eléctricas propias del sistema de potencia como lo es la MG a investigar se utiliza un sistema simulado. Para la simulación de las dinámicas eléctricas i.e. flujos de potencias en la barra, funcionamiento de los inversores, modelamiento de las cargas, comportamiento del sistema de control primario y el secundario (excepto la parte de la comunicación misma), se utiliza la plataforma PLECS integrada con SIMULINK.

El diagrama circuital simplificado de la MG se ve en la figura 8. En la tabla 2 se ven los valores de los componentes pasivos de la líneas y de las cargas que componen la MG aislada; esos valores son correspondientes a los valores pertenecientes a la experimentación en [32]. A la salidas de los DGs se encuentra un filtro LC. En el punto v_o se toman las mediciones de tensión, y en los puntos I_l y I_o las mediciones de corriente que se usarán para pasárselas a los esquemas de control (ver figura 3). Las líneas de transmisión se modelan como unas del tipo inductivo. Adicionalmente se puede decir que hay dos cargas locales en la MG, conectadas a los generadores «1» y «3». Estas cargas locales son las que crean cambios en el estado de consumo de la MG. El DG «2» no presenta carga, debido a que esa configuración se usó para verificar los flujos de potencia de la MG.

Figura 8: Diagrama simplificado del funcionamiento de la MG simulada.



Componente	Valor
Lo1	2.5 [mH]
Lo2	2.5 [mH]
Lo3	2.5 [mH]
Lt	2.5 [mH]
Lf	0.85 [mH]
Cf	70 [μ F]
RL1	11 [Ω]
RL2	22 [Ω]
R1	1000 [Ω]
C1	1 [μ F]

Tabla 2: Valores de los componentes pasivos de la MG.

La perturbación generada por las cargas se da cuando se conectan o desconectan de la MG. En la tabla 3 se muestran los tiempos donde se producen alteraciones al estado de la red. La tabla muestra también algunas unidades de tiempo que rigen el comportamiento de la simulación.

Evento	Tiempo [s]
Duración simulación	45
Activación Ctrl. secundario	5
Conexión carga RL1	7
Conexión carga RL2	17
Desconexión carga RL1	27
Desconexión carga RL2	37

Tabla 3: Eventos significativos en la dinámica de la MG.

Otros parámetros configurables se ven en la tabla 4. Estos parámetros afectan las respuestas de la red en el sentido que su valor genera distintas respuestas ante perturbaciones de la red. O la llevan a otros estados estacionarios. Las ganancias de los controladores secundarios han sido configuradas para que el estado estacionario después de un cambio de carga se alcance en aproximadamente en 3 s, cuando no hay perturbaciones en el canal inalámbrico.

Variable	Valor	Símbolo
Frecuencia nominal DGs	50 [Hz]	ω^*
Tensión arranque conversores	35 [V]	V_{init}
Tensión nominal línea-neutro	150 [V]	E^*
Paso temporal simulación	$0.625 \cdot 10^{-5}$ [s]	T_s
Tiempo muestreo C. secundario	0.05 [s]	$T_{s_{sec}}$
Potencia máxima DGs	2400 [VA]	S_{max}
Potencia mínima DGs	0 [VA]	S_{min}
Ganancia proporcional C. Primario (tensión)	0.44144	GP_{P-vol}
Ganancia integral C. Primario (tensión)	69.74752	GP_{I-vol}
Ganancia proporcional C. Primario (corriente)	5.3411	GP_{P-cur}
Ganancia integral C. Primario (corriente)	8011.65	GP_{I-cur}
Ganancia integral DAPI (frecuencia)	2	k_i
Ganancia integral DAPI (tensión)	1.5	ν_i
Ganancia distribución P DAPI	0.5	K_p
Ganancia distribución Q DAPI	0.1	K_q
Ganancia restauración V DAPI	4	β_i
Pendiente droop P DGs	0.0001	m_i
Pendiente droop Q DGs	0.001	n_i

Tabla 4: Parámetros usados en la simulación.

Las señales de medición de corrientes y tensiones a la salida de los inversores son usadas por los bloques de SIMULINK que crean las referencias de control secundario, y estas son usadas por los bloques de control primario. La cantidad de simulaciones por caso a analizar son 20.

3.2.2. Funcionamiento del sistema de comunicación

El esquema de comunicación que usan los DGs en el esquema de control simulado obedece a tres interfaces inalámbricas intercambiando paquetes a través del canal de aire. En las figuras 9 y 10 se muestra el diagrama del sistema de comunicación que siguen los nodos inalámbricos. Se observa la presencia de 3 interfaces inalámbricas (del inglés NICs) integradas en el mismo computador, las 3 NICs emulan los 3 sistemas de comunicación de cada generador distribuido. Existe la presencia de un AP y *router*, éste se encarga de darles conectividad a las 3 interfaces inalámbricas i.e. los generadores se comunican como *hosts* conectados a la misma LAN. Las tres interfaces que hacen de *hosts*, se componen en este caso del adaptador inalámbrico propio del computador, adaptador modelo *Realtek RTL8723DE 802.11b/g/n PCIe*, y dos adaptadores IEEE 802.11 conectados a los puertos USB de la misma laptop. Los modelos de los adaptadores USB son *LB-LINK BL-WIN151*

y *LV-UW03*.

La comunicación se logra por medio de la integración de la simulación del circuito eléctrico que soporta SIMULINK más *PLECS*, con bloques con funciones nativas de MATLAB para comunicación. El programa está simulando iterativamente las dinámicas eléctrica, el muestreo y traspaso de variables entre bloques por parte del software SIMULINK, mientras se utiliza un bloque dentro de esa simulación que albergará las formas de comunicarse que tiene MATLAB con el hardware dedicado.

Figura 9: Diagrama de interfaces inalámbricas integradas en el mismo computador.

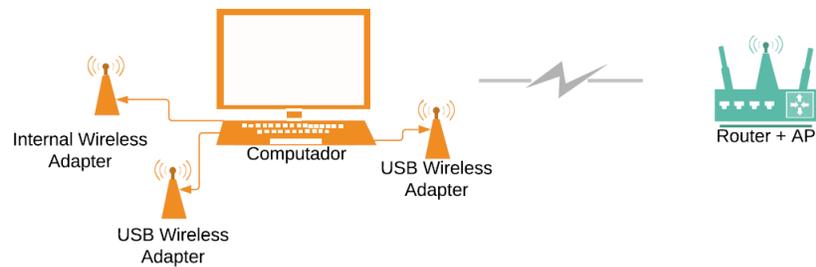
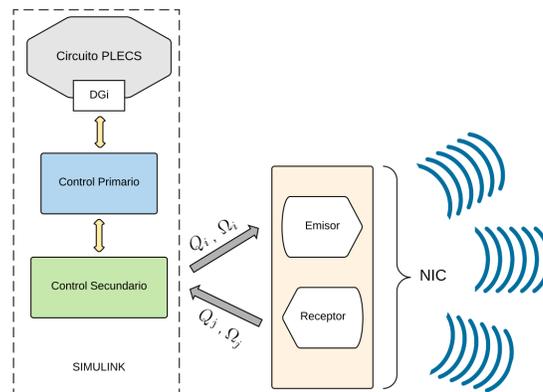


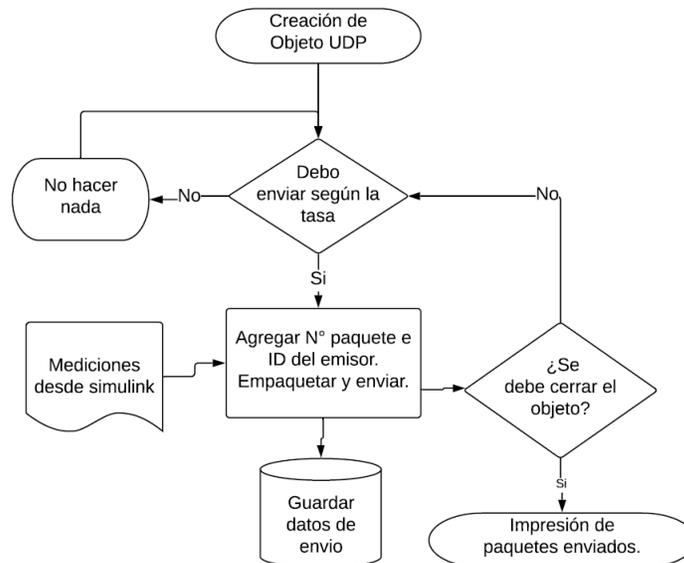
Figura 10: Diagrama de integración del simulador con las NICs.



La comunicación para un nodo emisor en MATLAB tiene el comportamiento que se ve en figura 11. Se crean 3 objetos UDP con los puertos y direcciones IP que usarán los generadores para

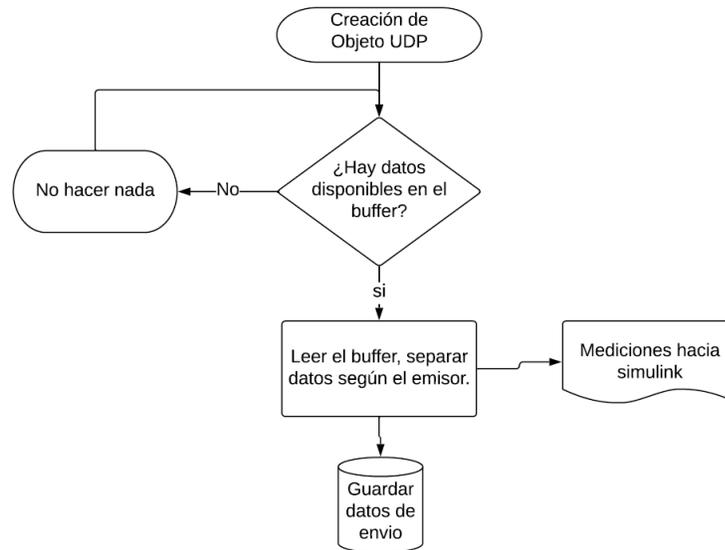
compartir las señales. Luego en cada iteración de la simulación se pregunta si se deben enviar las señales de control dado una tasa de emisión de datos. Si es efectivo el envío se reciben los datos de estado eléctrico de la red y se encapsulan en un mensaje que contiene la potencia activa y reactivas medidas, más el valor actual de la respuesta de control secundario para la frecuencia, el número del mensaje enviado y el nombre del generador que lo envía. Después del tiempo configurado para el cierre, el objeto UDP se cierra y elimina del *workspace* de MATLAB para poder crearse uno nuevo en una siguiente simulación. En el caso de la comunicación por *unicast* para cada generador se crean dos objetos emisores UDP, que envían consecutivamente sus paquetes de control a los receptores. Para la comunicación *broadcast* se crea solamente un objeto UDP emisor.

Figura 11: Diagrama de comunicación para transmisor.



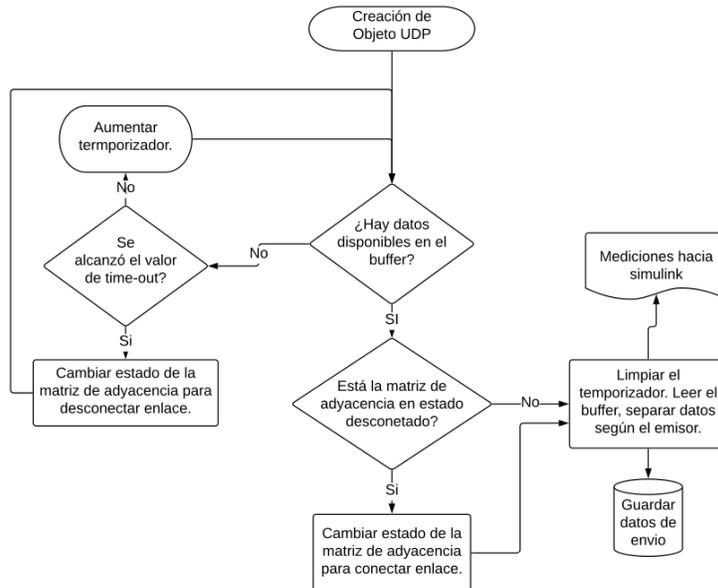
La recepción sigue la lógica de la figura 12. El receptor una vez creado el objeto UDP tiene abiertos sus puertos en todo momento para la recepción de paquetes. En caso de tener datos en el *buffer* en alguna iteración de la simulación, este lee los datos del mismo, desencapsula los datos recibidos y traspasa las mediciones eléctricas al programa simulador. En el caso de que en una iteración de la simulación no se haya recibido nuevos datos de mediciones, el receptor simplemente envía hacia el programa simulador el último valor que haya tenido de recepción de ese dato. Se utilizan por generador 1 o 2 objetos UDP receptores, para la comunicación *unicast* y *broadcast* respectivamente.

Figura 12: Diagrama de comunicación para recepción.



Se agrega otro tipo de lógica en la recepción de paquetes. Esta lógica es bastante parecida a la de la figura 12, pero se incluye el cambio del estado del enlace a través de los valores de la matriz de adyacencia. La figura 13 muestra esta lógica. En este modo de recepción, el receptor en cada iteración evalúa si ha recibido un paquete o no, en caso de no recibir un paquete aumentará el valor de un temporizador, temporizador que guarda el tiempo transcurrido desde la última recepción de un paquete desde un DG determinado. En caso de alcanzarse el *time-out*, el índice asociado a ese enlace en la matriz de adyacencia cambia al valor de «0», dando cuenta que ese enlace no se tomará en cuenta en el cálculo de la acción de control. Si llega a recibirse un paquete desde un DG determinado, el receptor cambia ese temporizador a cero y en caso de que la matriz denotara una desconexión, vuelve a establecerla cambiando el valor del índice de la matriz de adyacencia a «1». En la experiencia de simulación, el temporizador mide el tiempo a partir del tiempo de simulación, no el tiempo que entrega el sistema operativo. Además, el *time-out* fue configurado en 4 ciclos de envío, es decir, se esperaba que si 4 paquetes que debían ser enviados no se recibieran, esto era suficiente para esperar que el enlace entre el DG que enviaba y el que no recibía fuera considerado como deteriorado y fuera desconectado.

Figura 13: Diagrama de comunicación para recepción con actualización de matriz de adyacencia.



El *router* inalámbrico usado para la comunicación es un del tipo ARRIS TG2492LG (provisto por VTR). En la tabla 5 se muestran las direcciones IPv4 usados tanto por los hosts como por el AP inalámbrico. Para efectos de que los paquetes enviados desde un nodo hacia otro pasarán por el canal de aire, a pesar de estar los *hosts* conectados a la misma máquina, se cambió la tabla de rutas del sistema operativo (Windows 10), forzando que los paquetes que fueran enviados desde alguna dirección *host* en la tabla 5 hacia otro dirección de la misma tabla (envío *unicast*), usarán el *gateway* definido por la dirección del AP. Una distinción a nombrar es que en el caso de envío de datos UDP en *unicast* los puertos de receptores y emisores son todos distintos. En caso de envío de datos por medio de *broadcast* los receptores utilizan el mismo puerto **4011** para recibir el mismo dato en un sólo envío del emisor.

Nodo	Dirección IPv4
AP	192.168.0.1
Generador 1	192.168.0.15
Generador 2	192.168.0.14
Generador 3	192.168.0.33

Tabla 5: Direcciones dentro de la LAN.

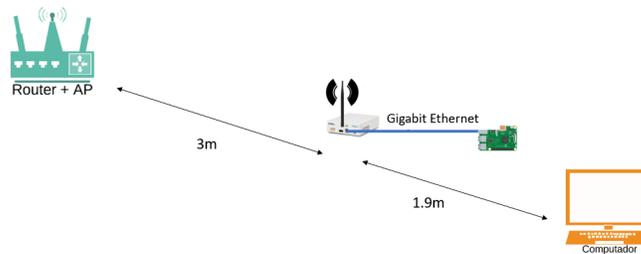
Se configuró el *router* para trabajar de manera fija sobre un ancho de banda de 20 MHz, utilizando siempre el canal 6 en la banda de 2.4 GHz i.e. el ancho desde 2.426 GHz hasta 2.448 GHz. La tasa de envío de paquetes de control es configurada en 10 Hz.

3.2.3. Funcionamiento del sistema de perturbación del canal

Para el canal de comunicaciones se dispone un sistema para perturbar su estado ideal, es decir, el estado donde todo el ancho de banda se utiliza para intercambiar las señales de control (además de las señales de control propias para mantener el enlace inalámbrico), y donde los niveles de ruido son apropiados para tener un desempeño de IEEE 801.11 correcto.

Para los efectos de poder crear un forzamiento en el canal de aire se utilizan las capacidades que entrega la USRP (*Universal Software Radio Peripheral*) modelo NI-2922 de Texas Instruments [35]. La NI-2922 es una radio definida por software (SDR en inglés) que tiene las capacidad de funcionar a las frecuencias desde 400 MHz a 4.4 GHz y con un máximo de 40 MHz de ancho de banda, dependiente de las capacidad del enlace de comunicación de datos entre la SDR y el hardware que la gestione. La figura 14 muestra como es la arquitectura usada por este sistema de forzamiento.

Figura 14: Disposición espacial del perturbador del canal inalámbrico.



El sistema consta de una Raspberry Pi 3 modelo B+ que controla el comportamiento de las SDR modelo NI-2922. Este computador de placa reducida se conecta mediante un enlace *Gigabit Ethernet* a las SDR. Las SDR están programadas bajo la plataforma de software libre GRC (*GNU Radio Companion*) [36], instaladas sobre el sistema operativo Rasbian en la Raspberry. Con GRC se puede programar una radio para que funcione como un *jammer* simple, es decir, un dispositivo que transmita potencia de manera aleatoria, subiendo el nivel de ruido del canal. La SDR configurada como *jammer* simple transmite ruido gaussiano en la banda de los 2.437 GHz. Por ruido gaussiano se hace referencia a que la amplitud de software entregada por GNU es un *stream* de números complejos obtenidos desde una distribución gaussiana con media cero y desviación estándar igual a $1/\sqrt{2}$.

Por otro lado la segunda radio puede configurarse para funcionar como un analizador de espectro: con el analizador se puede estar monitoreando el canal de aire para ver características en potencia de la señales que se encuentren en la banda escuchada. Con esta configuración se puede verificar que la potencia entregada por el *jammer* sea la que se espera de él según software, además de ver la potencia de las señales enviadas por el sistema de control de la microrred emulada.

En la figura 15 se observa el canal 6 WLAN de IEEE 802.11. (2.437 GHz) en un mapa de calor, el canal sólo presenta comunicación intermitente. Esta potencia podría deberse a otros dispositivos en el canal o a señales de control del AP. La potencia medida por GRC posee unidades referenciales de dB. Esta unidad referencial a priori no tiene una significación física como lo sería dBm por ejemplo. Se puede ver que el analizador de espectro detecta potencia entre los -96 dB y -63 dB. Una vez se empiezan a compartir señales de control, se aprecia potencia más periódica por parte del analizador de espectro. La figura 16 muestra la situación cuando el sistema simulado está enviando paquetes de control.

Figura 15: Potencia en el canal 6 de IEEE 802.11.

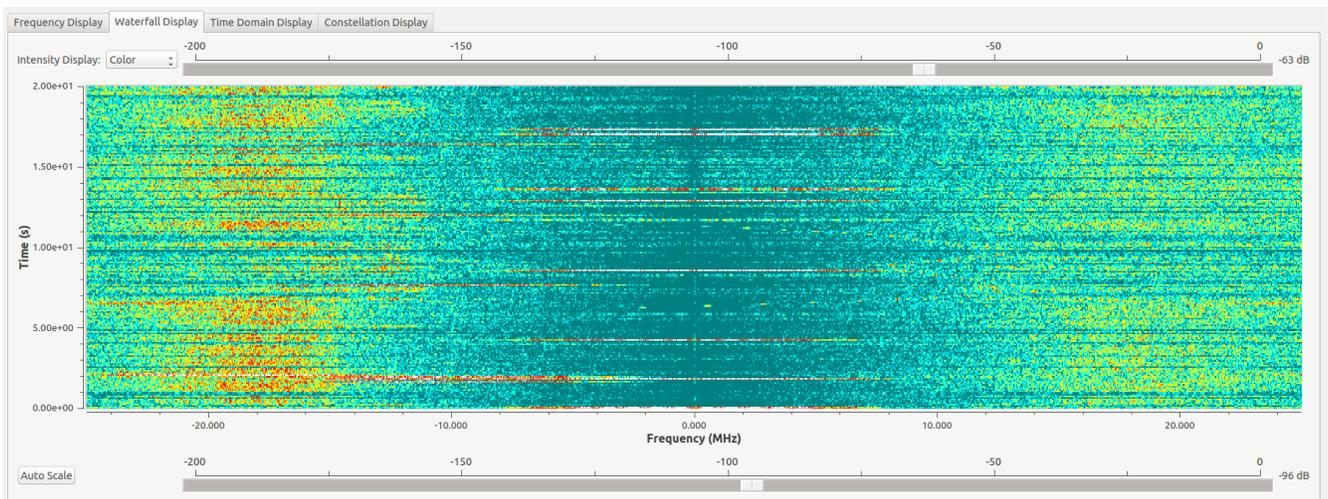
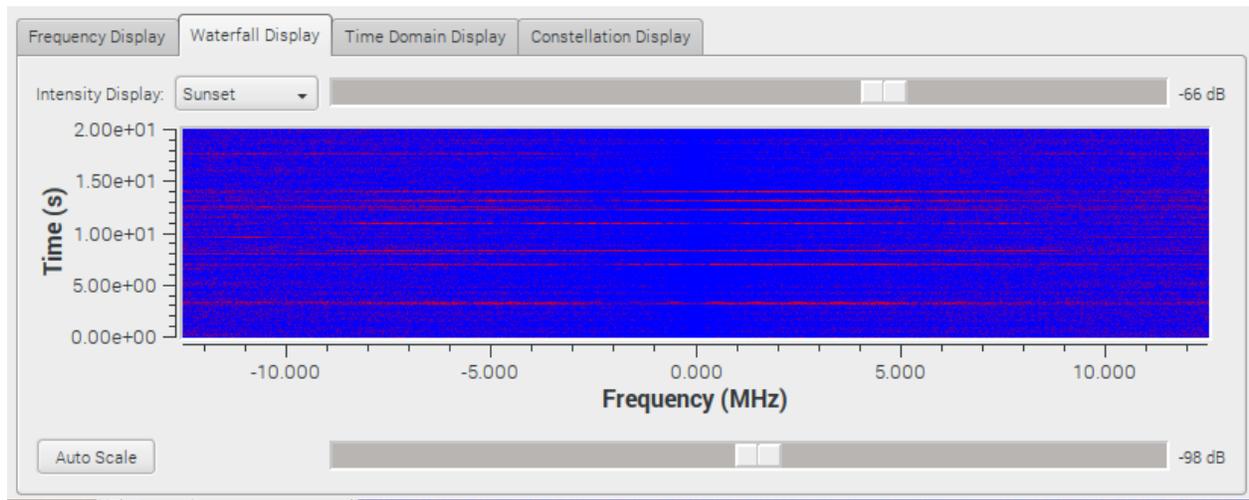
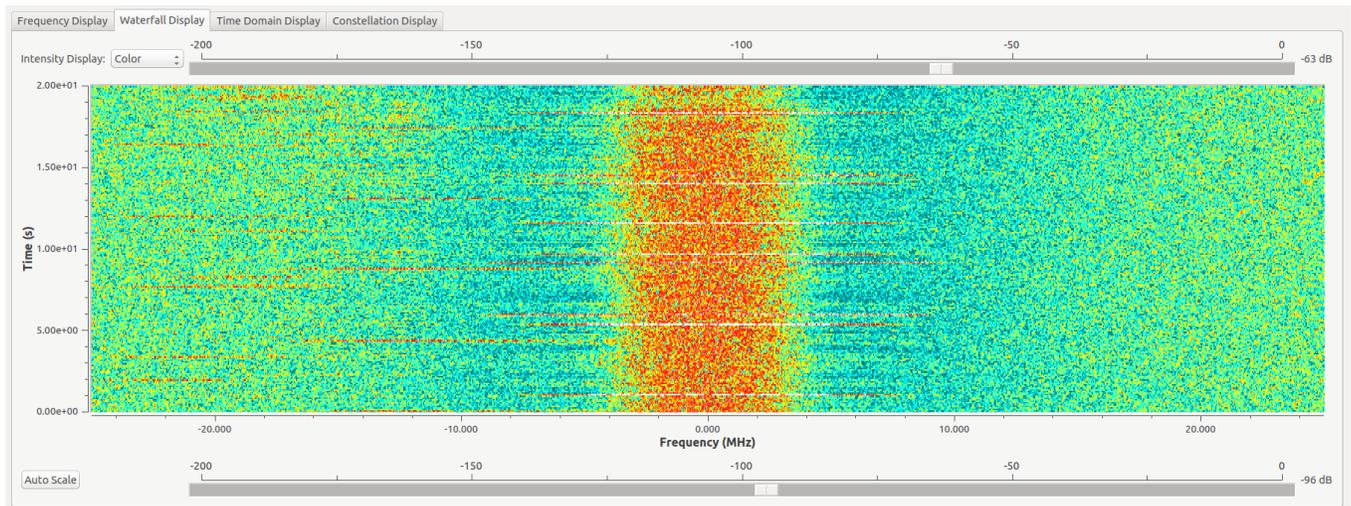


Figura 16: Potencia en el canal 6 de IEEE 802.11. Sistema de control enviando paquetes en el canal.



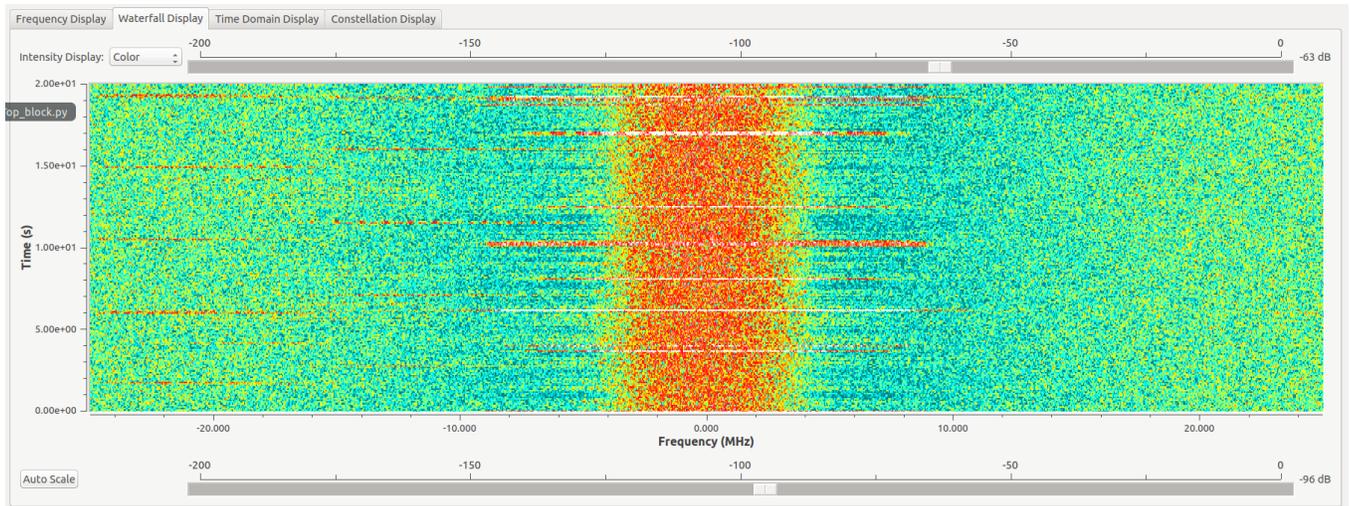
La figura 17 muestra el *jammer* funcionando a la máxima capacidad de transmisión de datos posible sin presentar advertencias de *Underrun*. Los parámetros utilizados para generar el envío de potencia y para leer el canal de aire (analizador de espectro) se listan en la tabla 6. La figura 17 muestra al *jammer* transmitiendo con una potencia de software 23 dB y experimentalmente es capaz de entregar una potencia con un ancho de bandas de aproximadamente 6 MHz.

Figura 17: Potencia en el canal 6 de IEEE 802.11. *Jammer* funcionando a 23 dB.



La figura 18 muestra el comportamiento del *jammer* cuando está operando a 24 dB. Experimentalmente la potencia en el canal aparece abarcando un ancho de banda de 6 MHz, pero las vecindades al ancho principal del *jammer* igualmente están aumentando su nivel de potencia, generando que suba el nivel del ruido de manera extendida además del aumento de la banda central del canal 6.

Figura 18: Potencia en el canal 6 de IEEE 802.11. *Jammer* funcionando a 24 dB.



Analizador de espectro	
Wire format	Complex int8
Sampling Rate	50 MHz
Central freq.	2.437 GHz
Gain	23 dB
DSP rate	100 MHz
Antenna type	NI VERT 400
Jammer	
Wire format	Complex int8
Sampling Rate	1.74 MHz
Central freq.	2.437 GHz
Gain	23 dB - 24 dB
DSP rate	100 MHz
Antenna type	NI VERT 2450

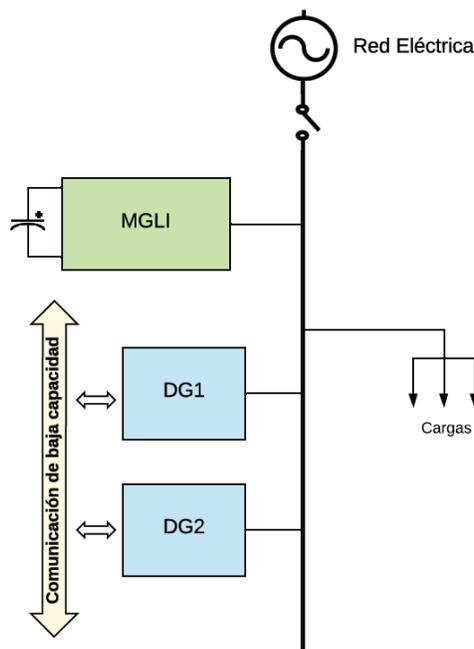
Tabla 6: Parámetros para analizar el forzamiento del canal de aire.

3.2.4. Funcionamiento de la microrred en el laboratorio

Para la segunda experiencia de investigación se apuesta por un acercamiento experimental real de una MG. El sistema experimental se encuentra dentro de las dependencias del *Institute RDI High Tech Products for Sustainable Development*, Brasov, Rumania. La disposición experimental se encuentra descrita en detalle en [37]. La figura 19 muestra la disposición de la MG utilizada. En ese trabajo, la MG propuesta es sometida a la evaluación del desempeño bajo operación en forma aislada y conectada, tomando en cuenta el proceso de transición entre las dos. De la misma forma se somete la MG a perturbación de cargas o problemas de conexión. El esquema centralizado de ese trabajo logra los objetivos de control y suavidad de respuestas, siendo los requerimientos de comunicación no alterados debido al aumento de DGs o el estado de la red.

La disposición de la MG utilizada es la misma del trabajo de investigación [37] i.e. cuenta de 3 generadores y control centralizado. En términos de control secundario uno de ellos actúa como maestro (MGLI) de los restantes (DG_i), y es él quien envía paquetes de control vía *broadcast* con las señales de restauración a los demás, para controlar la frecuencia y la tensión. El maestro presenta un supercapacitor para atenuar eventos ante la desconexión y conexión con la red externa (propósito del sistema de control propuesto en [37]).

Figura 19: Diagrama general de la MG usada en [37].



El sistema de comunicación por defecto en el trabajo propuesto utiliza un enlace cableado CAN serial RS232. En el caso de la experimentación en este trabajo, se utiliza un enlace inalámbrico Wi-Fi soportado por 3 Raspberry Pi que se comunican entre el maestro y los dos generadores esclavos. Las señales de control vienen desde el hardware manejado por DSpace y utilizan un cable RS232 para el enlace con la Raspberry. Desde la Raspberry se utiliza el adaptador interno WIFI que se comunica en la banda de 2.4 GHz, particularmente el canal 6 de IEEE 802.11 i.e. 2.437 GHz con un ancho de banda de 20 MHz.

El esquema experimental tiene una distribución espacial de los nodos comunicantes como se ve en la figura 20. La figura muestra las distancias horizontales entre los nodos y las alturas en la que se encuentran del suelo. En la figura los dos nodos esclavos son referidos como clientes (*client*) y el restante como maestro (*master*); igualmente se sitúa la ubicación del AP y del *jammer* para forzar el canal de comunicación. Sin embargo estas distancias, el ambiente no estaba libre de otros elementos. Están presentes en el ambiente también los equipos de la microrred y otros *racks* metálicos donde se encontraban los mismos, además de otros equipos del laboratorio. La figuras 21 y 22 muestran el ambiente experimental.

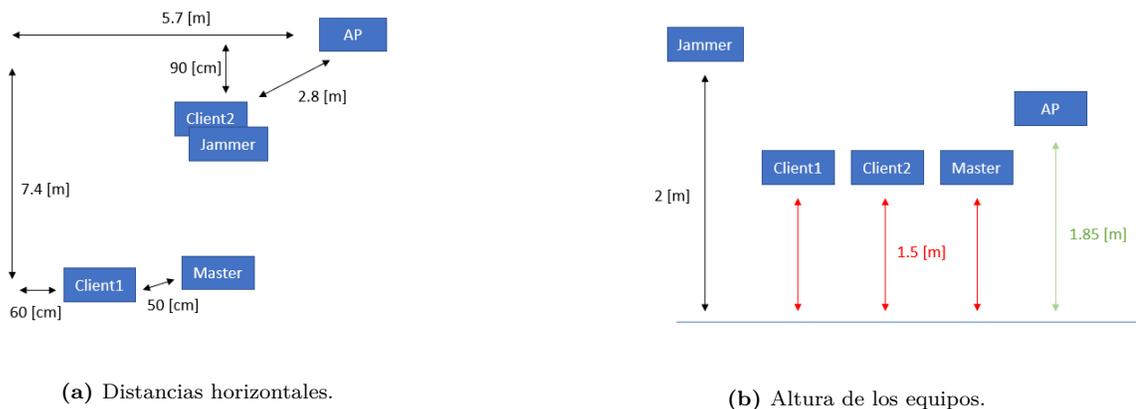
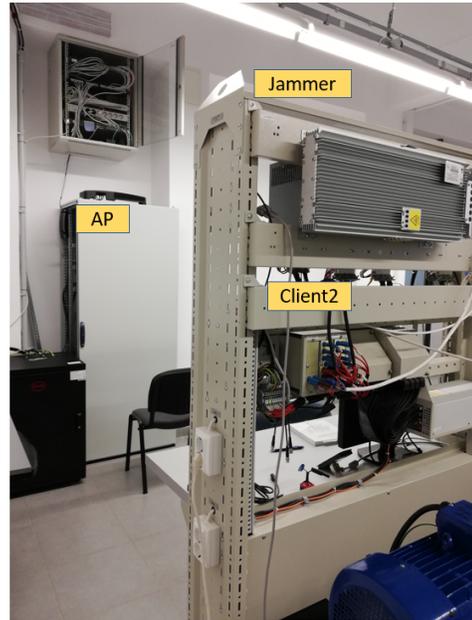


Figura 20: Disposición espacial de los nodos en el *set* experimental.

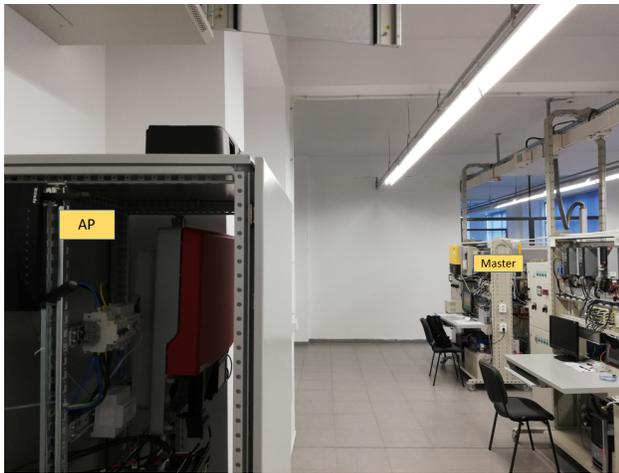


(a) AP.



(b) Vista posterior AP, Cliente 2 y Jammer.

Figura 21: Vista de los nodos.



(a) Distancia AP y maestro.



(b) Todos los nodos.

Figura 22: Vista de los nodos.

Se llevaron a cabo experimentos para probar la dependencia de la respuesta del sistema ante

efectos de cambio en la calidad del canal. El principal experimento fue el cambio de carga de la MG con distintos niveles de potencia del *Jammer* y ante la presencia y ausencia de otras fuentes de tráfico.

En la tabla 7 se ve la enumeración de casos sobre los cuales se hizo funcionar la red y se forzó el canal. En los casos donde se enuncia un *burst*, especificar que por esto se refiere al cambio entre un nivel de 3 dB de ruido a uno de 10 dB y volver al nivel de 3 dB (caso 11). Para el *burst* de tráfico (caso 13) se cambia el estado desde un canal sin tráfico extra a uno donde el tráfico posible de paquetes es máximo, para luego volver al estado sin tráfico. Los datos son muestreados desde DSpace con un periodo de 200 μs y los paquetes de control son enviados desde el mismo DSpace con un periodo de 5 ms entre paquetes.

Case	Link Type	Noise	Traffic
1	CAN	-	-
2	WIFI	-	-
3	WIFI	3 dB	-
4	WIFI	4 dB	-
5	WIFI	5 dB	-
6	WIFI	6 dB	-
7	WIFI	7 dB	-
8	WIFI	8 dB	-
9	WIFI	9 dB	-
10	WIFI	10 dB	-
11	WIFI	Burst 3-10 dB	-
12	WIFI	-	Continuos
13	WIFI	-	Burst

Tabla 7: Casos de experimentación para MG en el laboratorio.

La adición de tráfico inalámbrico se hace por medio de una instancia de MATLAB en un computador distinto. El tráfico es tal que se envía un paquete UDP por iteración del programa, sin dejar tiempos de espera entre envío y envío, es decir, los paquetes son enviados uno tras otro a la velocidad que MATLAB pueda hacerlo. El promedio de periodo de envío entre paquetes UDP enviados por el generador de tráfico externo es de 400 μs .

4. Análisis de resultados y discusión

4.1. Contribución

La contribución del trabajo tiene que ver específicamente con la falta de resultados acerca del efecto realista que tienen estados diversos de la calidad de canal de comunicaciones, de naturaleza inalámbrico, sobre el sistema de control secundario de MGs. No se encuentran resultados variados sobre esta problemática en la literatura, orientándola a la evaluación del sistema de control en situaciones ideales, no realistas sobre la aleatoriedad del funcionamiento de la comunicación, o sobre esquemas no inalámbricos.

El trabajo aquí desarrollado aporta en crear insumos experimentales sobre el efecto de calidad de canal sobre la MG particular utilizada. MG que depende fuertemente en las comunicaciones, porque su esquema de control lo utiliza para optimizar los efectos que se pueden obtener con otras configuraciones. Con trabajos de este tipo se puede empezar a evaluar la factibilidad de cambiarse a esquemas más baratos (inalámbricos) y si la robustez que da 802.11 es suficiente para manejar este tipo de esquemas de control.

Los resultados obtenidos de la experimentación se presentan y discuten en esta sección. Los dos resultados principales son los siguientes:

- Obtención de respuestas de control para la MG simulada utilizando el sistema de forzado de canal (jammer).
- Obtención de respuestas de control para una MG instalada en el laboratorio, utilizando el sistema de forzado del canal.

4.2. Resultados para microrred simulada en comunicación unicast

Se plantean una serie de experimentos dispuestos para obtener información acerca de cómo ciertos factores de la comunicación afectan al desempeño de la respuesta de control. La MG simulada es sometida a ambientes distintos de ruido de canal para apreciar el comportamiento del esquema de control bajo un enlace realista en cuanto a la dinámica de IEEE 802.11.

Caso A: Sistema de control en «estado puro». No hay presencia de otros paquetes en el canal de aire por parte de una SDR o el mismo computador que soporta la red. El AP (*access point*) solamente está conectado a los generadores. Ambiente mayormente aislado de señales exteriores de otras comunicaciones, aunque siempre puede haber alguna señal que provenga desde el exterior. Esta configuración es la base para el funcionamiento del sistema de control.

En la figura 23 se muestra la respuesta promedio del sistema para la restauración de frecuencia para los 3 generadores. La respuesta en frecuencia demora cerca de 3 s en alcanzar una respuesta

estacionaria por parte del sistema de control. Se logra ver igualmente que los valores alcanzados por la frecuencia en la fase transiente para los tres generadores es en promedio distinto sólo en $\approx 1\%$ su valor nominal: 50 Hz. La figura 24 muestra la respuesta de restauración de tensión. El transiente de la señal de tensión es menor que para la frecuencia, la desviación desde el valor nominal no alcanza a ser mayor o igual al $\approx 1\%$.

Las figuras 25 y 26 muestran las potencias activa y reactivas normalizadas entregadas por los tres generadores en todo momento de la simulación. Se aprecia cómo los tiempos de establecimiento de las señales es de ≈ 2.5 s. Las potencias activas se reparten de manera similar, concordante con las constantes (tabla 4) que regulan esto en la ecuación (2). Para la potencia reactiva igualmente es el mismo tiempo de establecimiento. En este caso, la potencia reactiva no es la misma para los tres generadores, esto por el ponderador $\beta_i = 4$ en la ecuación (3), que prioriza la restitución de tensión por sobre la distribución de potencia reactiva. Se producen sobrepasos del valor final de la señal que en el caso de la potencia reactiva pueden ser de hasta $\approx 70\%$ del valor final de la señal.

Figura 23: Caso A - Respuesta de control secundario para restitución de frecuencia en los generadores. Restauración promedio para los 3 generadores.

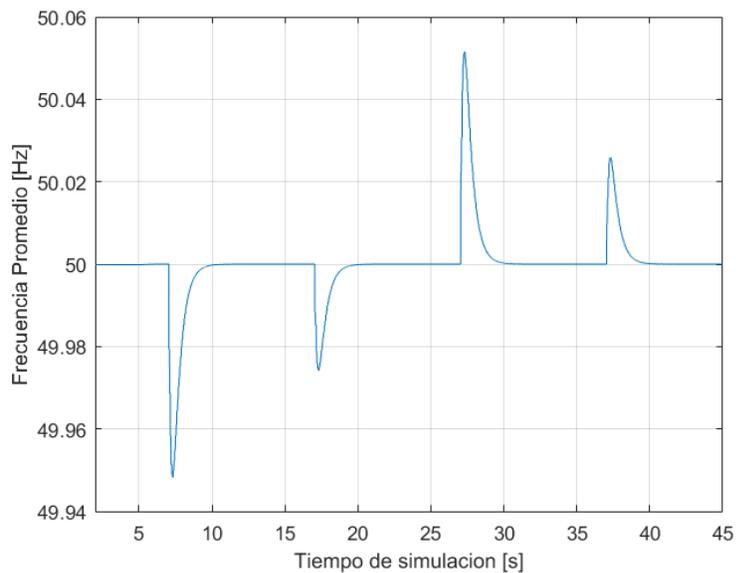


Figura 24: Caso A - Respuesta de control secundario para restitución de tensión en los generadores. Restauración promedio para los 3 generadores.

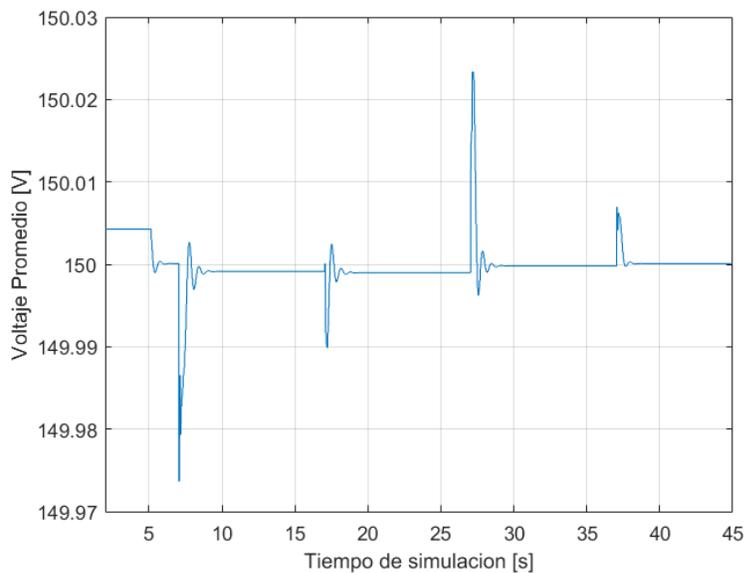


Figura 25: Caso A - Respuesta de control secundario para restitución de frecuencia. Potencias activas entregadas por los generadores.

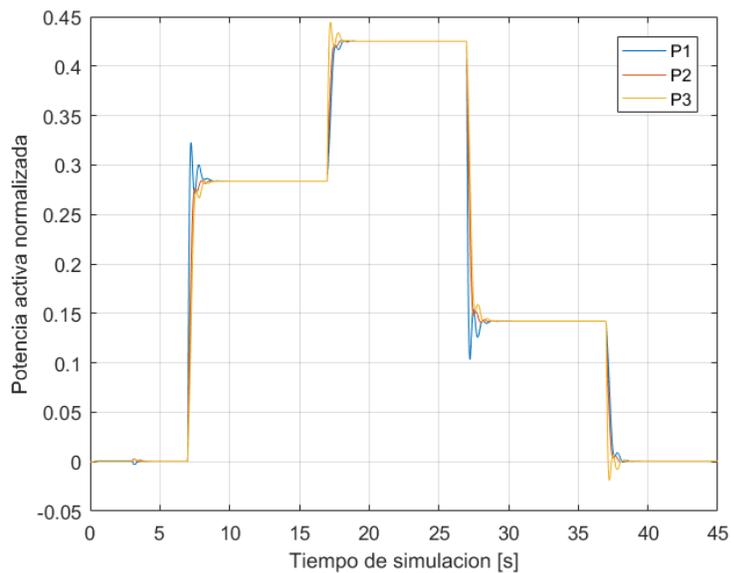
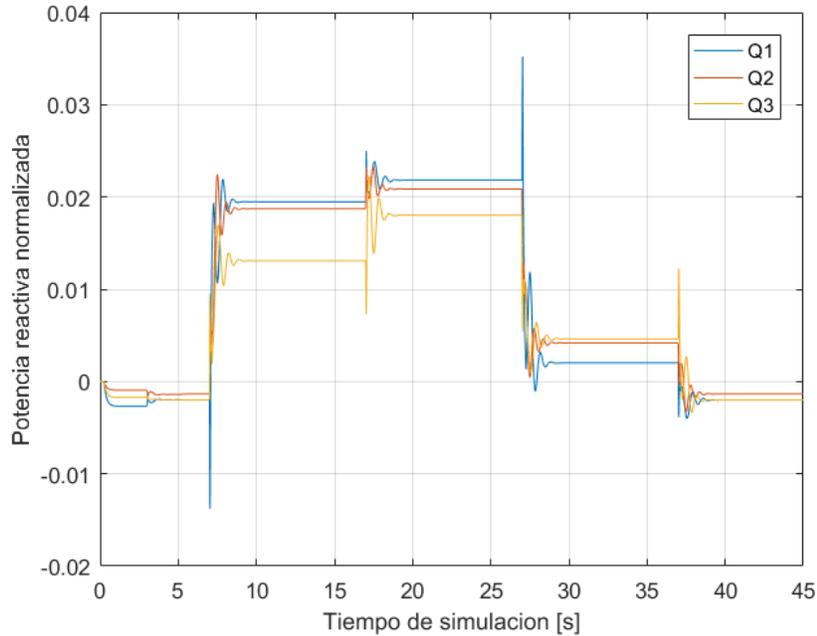


Figura 26: Caso A - Respuesta de control secundario para restitución de tensión en los generadores. Potencias reactivas entregadas por los generadores.

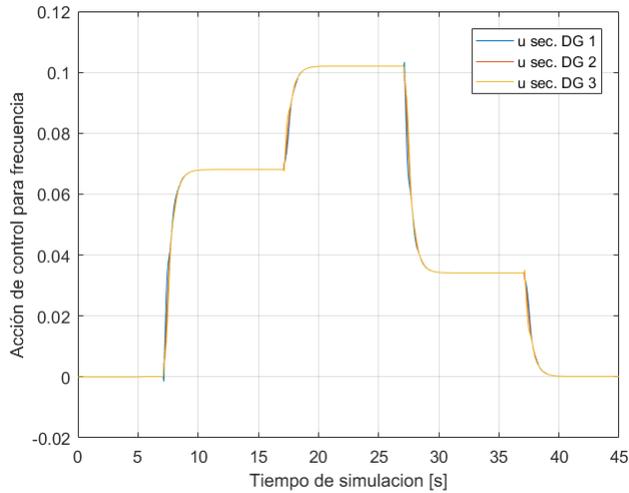


Con respecto a la presencia de retardo en la comunicación, se puede hablar que este tiene un fuerte carácter aleatorio, dependiente del estado actual de tráfico, nivel de procesamiento actual de la simulación, tiempos de acceso al medio, etc. En la tabla 8 se pueden ver los retardos promedio distribuidos según qué interfaz está enviando y cuál recibiendo el paquete de control.

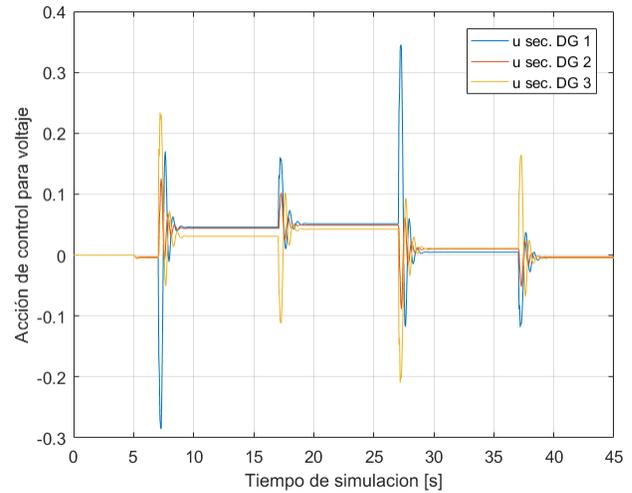
Emisor / Receptor	DG 1	DG 2	DG 3
DG 1	-	0.05 s	0.112 s
DG 2	0.063 s	-	0.123 s
DG 3	0.053 s	0.056 s	-

Tabla 8: Caso A - Retardos promedio de comunicación entre DGs.

En la figura 27 se ven las respuestas de la señal de control secundario para la restauración de voltaje y frecuencia. La señal de control de frecuencia presenta pocas oscilaciones y en casi todo momento las tres señales de control tienen el mismo valor. En los momentos de cambios de carga sin embargo, la señal de restauración de frecuencia del generador 1 (figura 27a) difiere su valor



(a) Señales de control secundario para frecuencia.



(b) Señales de control secundario para tensión.

Figura 27: Caso A - Señales de control secundaria para ambiente ideal.

levemente de las otras dos señales de control, lo que se traduce en sobrepasos y comportamientos oscilatorios en la señales de potencia activa (figura 25).

En la figura 27b se aprecian las señales de control secundario para la tensión. A diferencia de las señales de control secundaria para frecuencia, estas señales sí presentan diferencias mayores en cuanto a sus valores, a pesar de alcanzar un comportamiento estacionario luego de ≈ 2.5 s. El generador 3 no alcanza el mismo nivel de señal de control que los otros dos generadores, lo que repercute en el valor de potencia reactiva que entrega ese generador (figura 26). Los sobrepasos son mayores, así como el comportamiento oscilatorio antes de alcanzar el estado estacionario, lo anterior también se ve reflejado en los valores de potencia reactiva de los generadores.

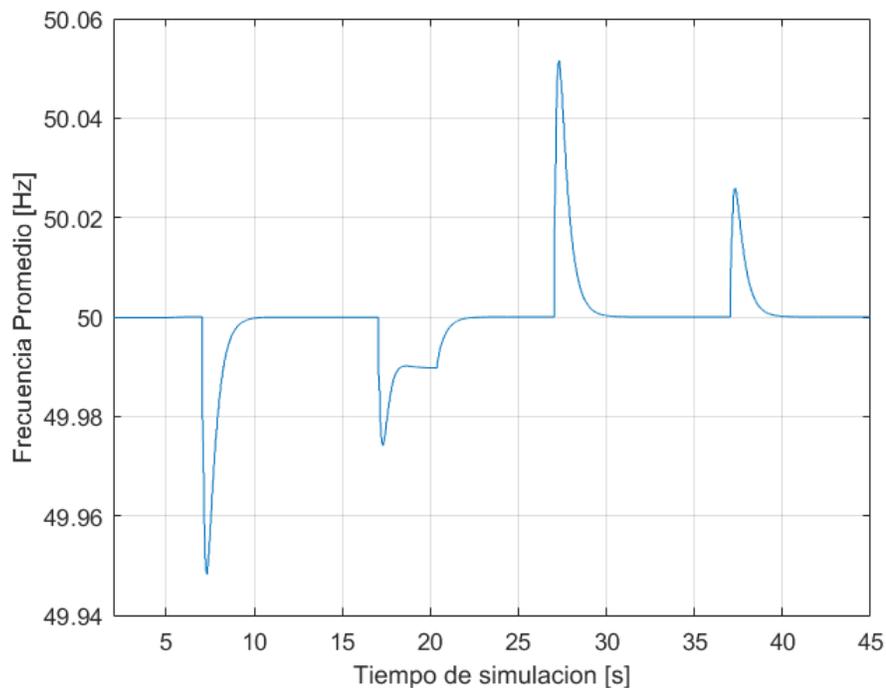
Lo anterior corresponde a un estado correcto de funcionamiento del sistema de control DAPI dados los parámetros de control. Se pueden utilizar estas características de la respuesta para comparar otras respuestas de sistema de control.

Caso B: Sistema nuevamente en «estado puro». No hay presencia de una elevación del nivel de ruido. No hay presencia de saturación en el canal de aire. El AP está conectado solamente a los generadores. En $t = 10$ s el generador número 2 pierde la capacidad de enviar sus señales de control

a los otros generadores, permitiéndole aún escuchar las señales de control que los otros le envían. En $t = 20$ s se reponen los envíos desde el segundo generador hacia los demás, compartiendo su señal de control con estos.

Las figuras 28 y 29 muestra la restitución de frecuencia y la tensión para esta disposición. El resultado a notar es que independientemente de que el segundo generador no envía sus señales de control, la respuesta del sistema (figura 29) es la misma para la restitución de tensión promedio en el caso ideal (figura 24). La respuesta de restitución de frecuencia da cuenta de la falta de las señales de control del generador 2. En la figura 28 se ve que en el tiempo $t = 10$ s se logra restituir la frecuencia después de un primer cambio de carga, en el siguiente cambio de carga en $t = 17$ s no se logra alcanzar nuevamente el valor ideal de frecuencia (no hay comunicación de envío para DG2). Una vez que se restablece el envío de señales por parte del segundo generador ($t = 20$ s), rápidamente el algoritmo de control restituye la frecuencia a su valor nominal.

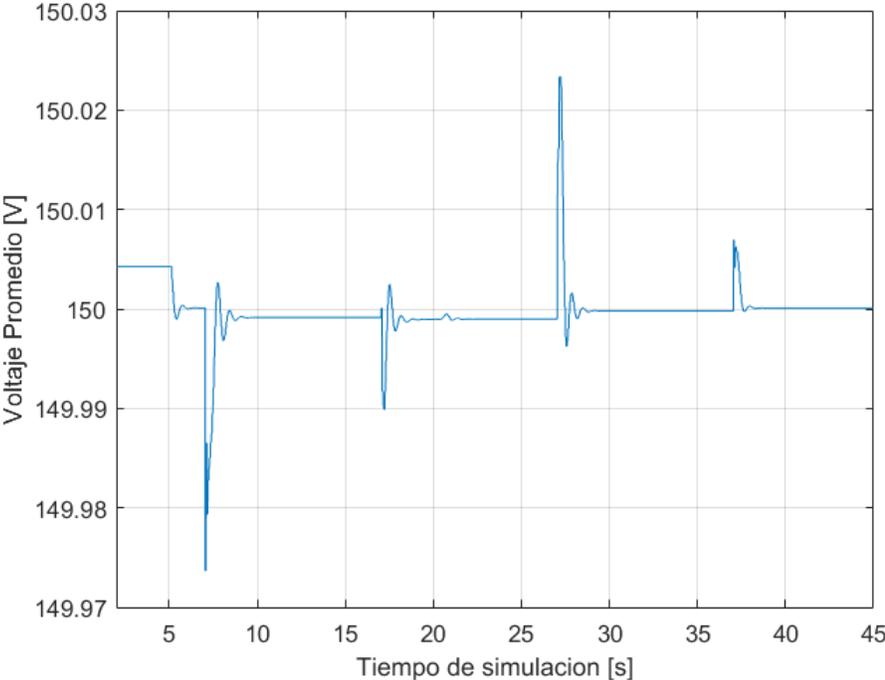
Figura 28: Caso B - Respuesta de control para restitución de frecuencia promedio en los generadores.

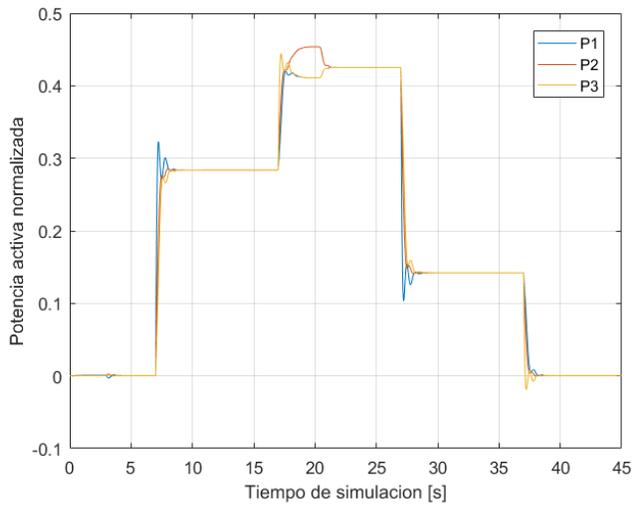


La figura 30 muestra la dinámica de las potencias activas y reactivas alcanzadas en la situación de caída de enlace de transmisión del generador 2. Ambas potencias presentan un deterioro de la distribución de la potencia compartida. Las potencias activas para los tres generadores difiere

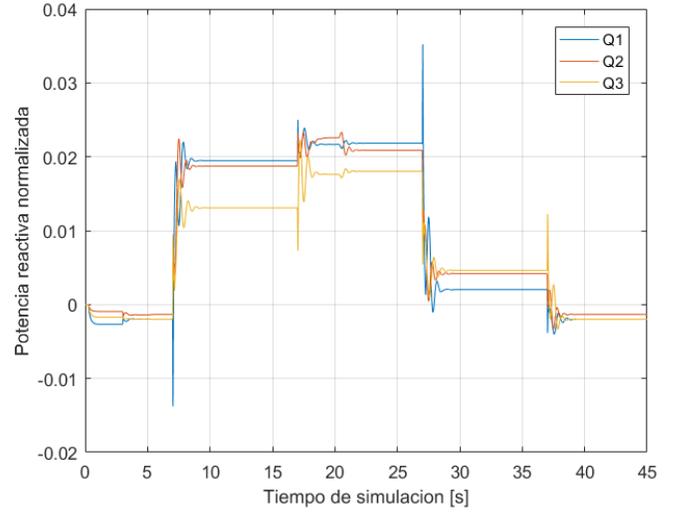
del valor alcanzado en el estado estacionario cuando la comunicación era *full-duplex* en todo los generadores. Una vez se restituye la comunicación, rápidamente se alcanza el estado de comportamiento normal. Las señales de potencia y su dinámica se condicen con el comportamiento de las señales de control que regulan la restitución de voltaje y frecuencia (figura 31). Los generadores no pudieron actualizar sus señales de control debido a que el DG 2 no podía comunicarlas por otra vía. En [15] se puede alcanzar el estado estacionario ante una caída de enlace debido a que hay otro enlace desde el cual los DGs incomunicados acceden al mecanismo de consenso.

Figura 29: Caso B - Respuesta de control secundario para restitución de tensión y frecuencia en los generadores. Potencias activas y reactivas entregadas por los generadores.



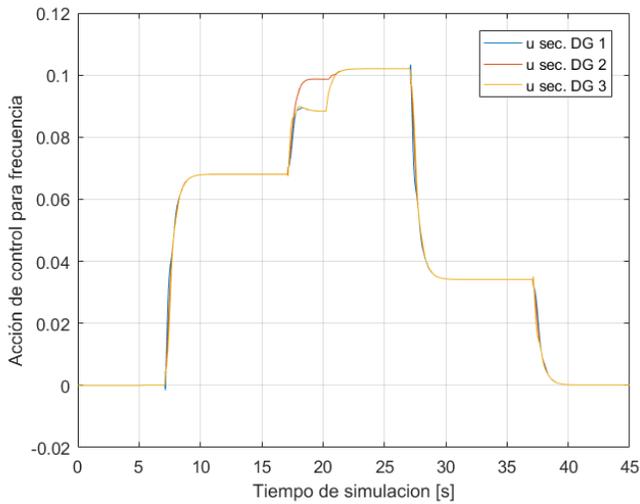


(a) Potencia activa entregada por generadores.

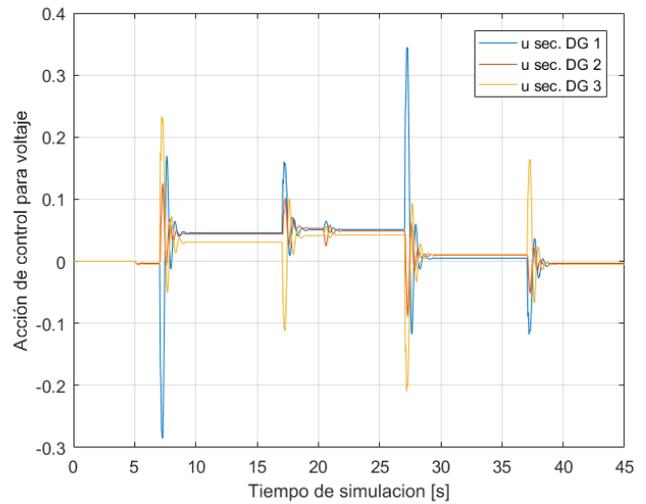


(b) Potencia reactiva entregada por generadores.

Figura 30: Caso B - Potencias entregadas por la simulación.



(a) Señales de control secundario para frecuencia.



(b) Señales de control secundario para tensión.

Figura 31: Caso B - Acciones de control secundario para caída de enlace.

Los retardos promedios de todas de las simulaciones para este escenario se muestran en la tabla

9. En la tabla 10 se ve el porcentaje promedio de paquetes recibidos correctamente para las simulaciones.

Emisor / Receptor	DG 1	DG 2	DG 3
DG 1	-	0.043 s	0.103 s
DG 2	0.051 s	-	0.091 s
DG 3	0.04 s	0.041 s	-

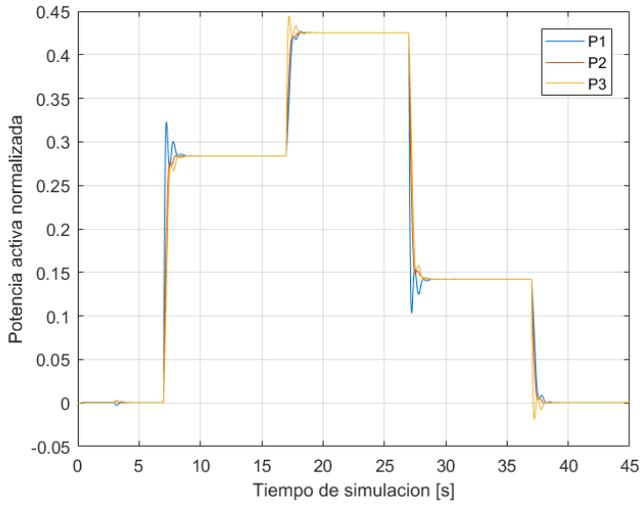
Tabla 9: Caso B - Retardo promedio de comunicación entre DGs.

Receptor / Emisor	DG 1	DG 2	DG 3
DG 1	-	99.94 %	95.63 %
DG 2	99.83 %	-	95.53 %
DG 3	95.5 %	95.85 %	-

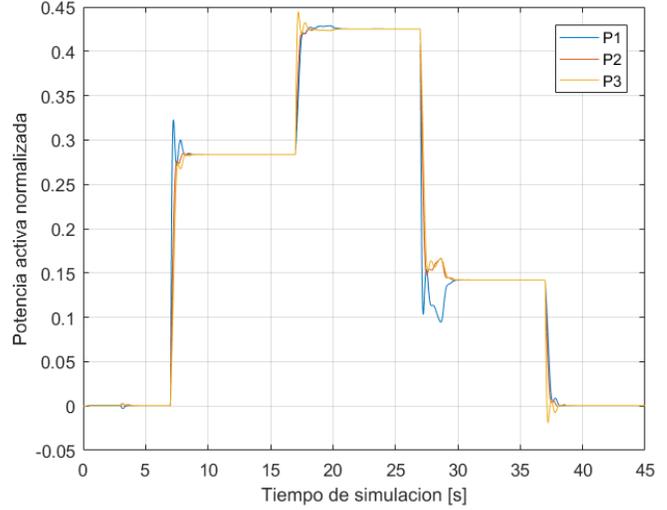
Tabla 10: Caso B - Porcentaje promedio de paquetes recibidos correctamente.

Caso C: Para esta experiencia el canal de comunicaciones nuevamente no presenta tráfico externo, solamente los generadores están conectados al AP. Adicionalmente se agrega la presencia de un *jammer* que introducirá potencia en el canal de aire para dificultar la comunicación *unicast* entre los generadores. El *jammer* está configurado en GNU para enviar potencia en el canal 6 de IEEE 802.11 i.e. los 2.437 GHz. El *jammer* está configurado para enviar potencia aleatoria gaussiana con una potencia de software de 23 dB.

La figura 32 muestra las respuestas para la potencia activa en esta disposición. La figura 32a muestra la respuesta general para el canal de comunicación con el *jammer*. La figura 32b muestra una situación donde se deteriora el enlace de comunicación para el generador 1. Se aprecia el mismo comportamiento de desvío de la señal controlada desde su valor ideal. Esta situación corresponde con la respuesta en frecuencia que tiene el sistema. En la figura 33 se muestra cómo la respuesta en frecuencia promedio se desvía igualmente por el cierre del enlace en su etapa transiente.

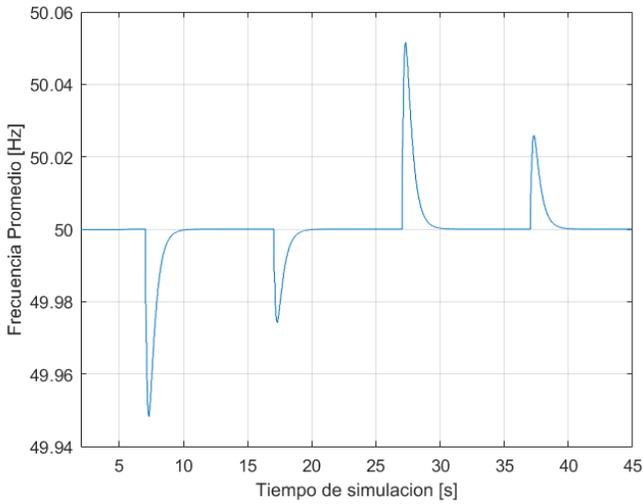


(a) Respuesta promedio para la potencia activa.

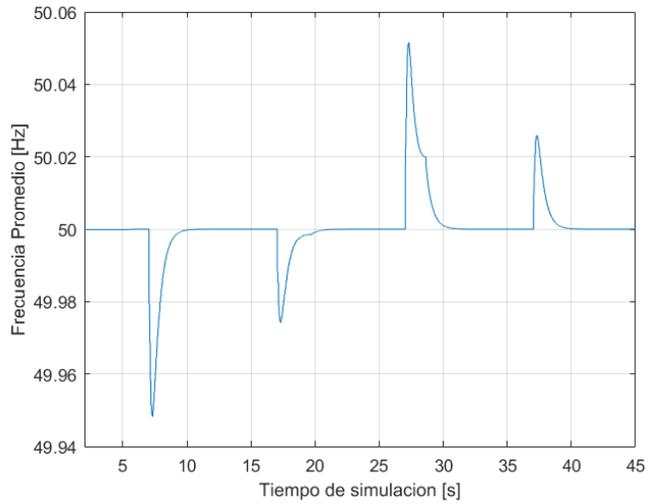


(b) Potencia activa debido a deterioro en el enlace de comunicación.

Figura 32: Caso C - Potencia activa para dos situaciones dentro de la simulación con *jammer*.



(a) Respuesta promedio para la frecuencia.



(b) Frecuencia promedio debido a deterioro en el enlace.

Figura 33: Caso C - Frecuencia promedio para dos situaciones dentro de la simulación con *jammer*.

Para la situación de restitución de tensión y distribución de potencia reactiva pasa algo similar,

en los cambios de carga se presentan mayores oscilaciones pero igualmente se alcanza un estado estacionario correcto. El fenómeno que explica esta alteración de la respuesta, se puede observar en las tablas 11 y 12, donde se aprecia que para el generador 1 baja la cantidad de paquetes enviados correctamente y aumenta el retardo con el que son obtenidos.

La figura 34 muestra la dinámica de recepción para los generadores 2 y 3, de los paquetes enviados por el generador 1. Esencialmente la figura muestra que hay periodos en la transmisión donde se dificulta la entrega correcta de los paquetes, lo que explica los valores de las tablas. Lo segundo que se puede argumentar es que estos periodos donde el retardo aumenta no son constantes y surgen entre esos periodos momentos donde la recepción vuelve a ser normal. Es debido a lo anterior que es posible lograr un estado estacionario en las respuesta de frecuencia y potencia que son correctas sin demasiado tiempo de error.

Paquetes recibidos promedio			
Receptor/Emisor	DG 1	DG 2	DG 3
DG 1	-	99.96 %	99.88 %
DG 2	97.56 %	-	99.32 %
DG 3	98.44 %	99.96 %	-

(a) Promedio de paquetes recibidos para todas las simulaciones.

Paquetes recibidos promedio deterioro de enlace			
Receptor/Emisor	DG 1	DG 2	DG 3
DG 1	-	100 %	100 %
DG 2	88.22 %	-	99.76 %
DG 3	91.35 %	100 %	-

(b) Porcentaje de paquetes recibidos en la simulación con deterioro de enlace.

Tabla 11: Caso C - Porcentajes de paquetes recibidos en la simulación.

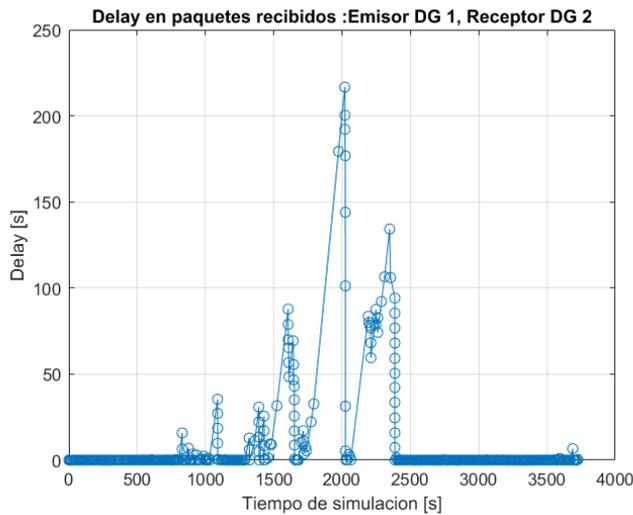
Retardo de comunicación demostrativo			
Emisor/Receptor	DG 1	DG 2	DG 3
DG 1	-	0.062 s	0.157 s
DG 2	0.05 s	-	0.146 s
DG 3	0.098 s	0.103 s	-

(a) Retardo de un caso demostrativo del general de las simulaciones.

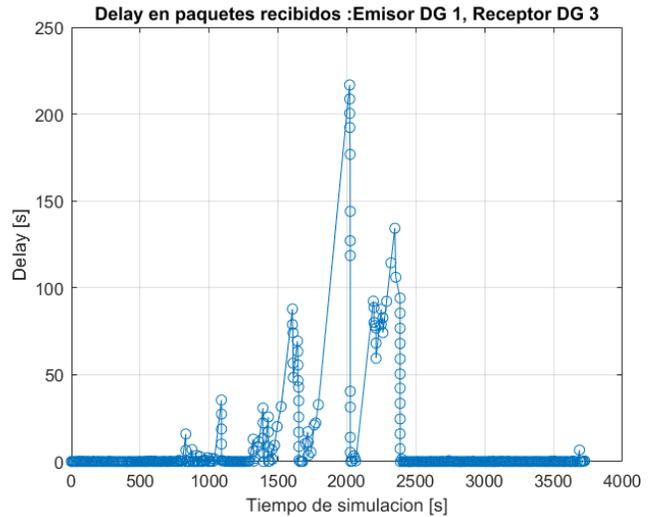
Retardo de comunicación con deterioro del enlace			
Emisor/Receptor	DG 1	DG 2	DG 3
DG 1	-	31.751 s	32.774 s
DG 2	0.059 s	-	0.094 s
DG 3	0.146 s	0.156 s	-

(b) Retardo de comunicación para la simulación con deterioro de enlace.

Tabla 12: Caso C - Retardo de recepción en paquetes recibidos.



(a) Retardo de recepción para generador 2.

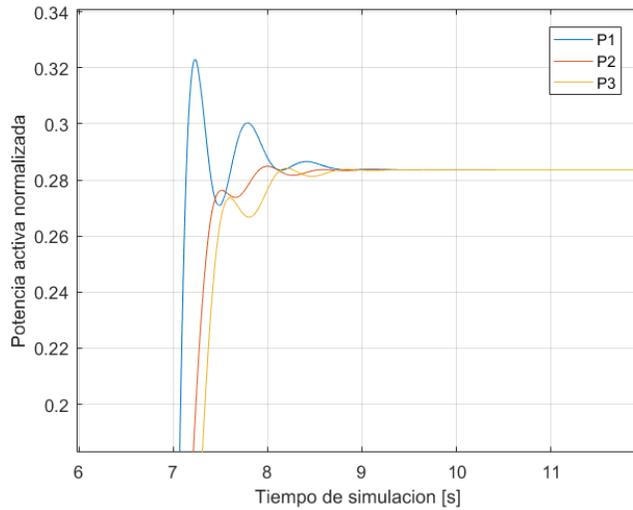


(b) Retardo de recepción para generador 3.

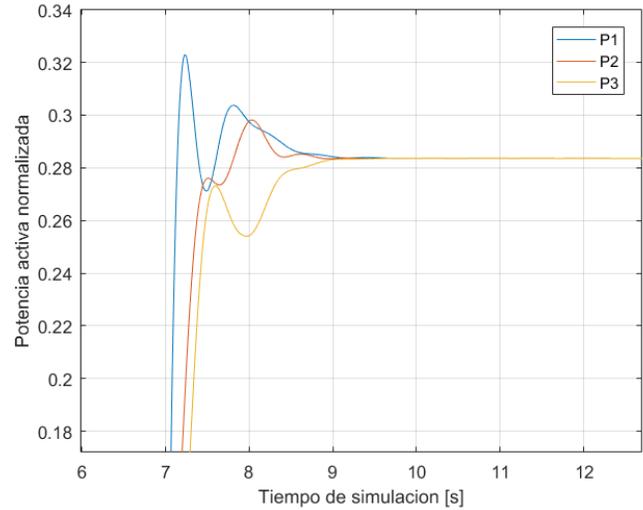
Figura 34: Caso C - Retardo de recepción para los paquetes enviados por el generador 1. Situación de deterioro de enlace.

Caso D: Esta es la misma situación de canal que el caso C. Esta vez el *jammer* está configurado para enviar potencia aleatoria gaussiana con una potencia de software de 24 dB.

Con respecto al efecto que tuvo aumentar el nivel de ruido a 24 dB se puede decir lo siguiente: en general no hubo un deterioro significativo de las respuestas de control ni indicadores de calidad de canal. Sin embargo algo se puede decir de las respuestas recibidas. En la figura 35 se muestra el acercamiento de las respuestas de distribución de potencias activas para dos situaciones, la figura 35a muestra la respuesta típica para este nivel del *jammer*, la figura 35b muestra una respuesta donde se produce una variación en el estado transiente de respuesta. Solamente se muestran los segundos correspondientes al ampliamento, debido a que el resto de la respuesta no difiere notablemente de la situación de respuesta ideal del sistema de control. Esencialmente se puede ver el cambio en la dinámica oscilatoria para el DG 3 y que los otros dos generadores cambian su respuesta para suplir la potencia de este DG.



(a) Respuesta de potencia activa demostrativa.



(b) Respuesta de potencia activa con fallo de enlace.

Figura 35: Caso D - Respuesta de distribución de potencia activa. *jammer* en 24 dB.

Con respecto a los efectos que puede tener este nivel de potencia del *jammer*, se puede observar la tabla 13, mostrando que al menos en promedio los retardos de comunicación para los paquetes recibidos y enviados por el generador 3 aumentan en más de 100 ms; siendo esto sólo el comportamiento promedio del retardos. De la figura 36 se observa que en general los paquetes para ambas situaciones son recibidos con el mismo retardo, y la diferencia en el valor promedio se debe a que los paquetes para la situación con peor retardo (figura 36b) tienen picos donde se presenta mucho retardo de recepción en situaciones aisladas, pero no es el general. Lo anterior es lo que aumenta el valor promedio (tabla 13b).

Retardo de comunicación demostrativo.			
Emisor/Receptor	DG 1	DG 2	DG 3
DG 1	-	0.049 s	0.291 s
DG 2	0.055 s	-	0.303 s
DG 3	0.305 s	0.307 s	-

(a) Retardo de un caso demostrativo del general de las simulaciones.

Retardo de comunicación caída del enlace.			
Emisor/Receptor	DG 1	DG 2	DG 3
DG 1	-	0.461 s	0.415 s
DG 2	0.052 s	-	0.417 s
DG 3	0.502 s	0.507 s	-

(b) Retardo de comunicación para la simulación con deterioro de enlace.

Tabla 13: Caso D - Retardo de recepción en paquetes recibidos.

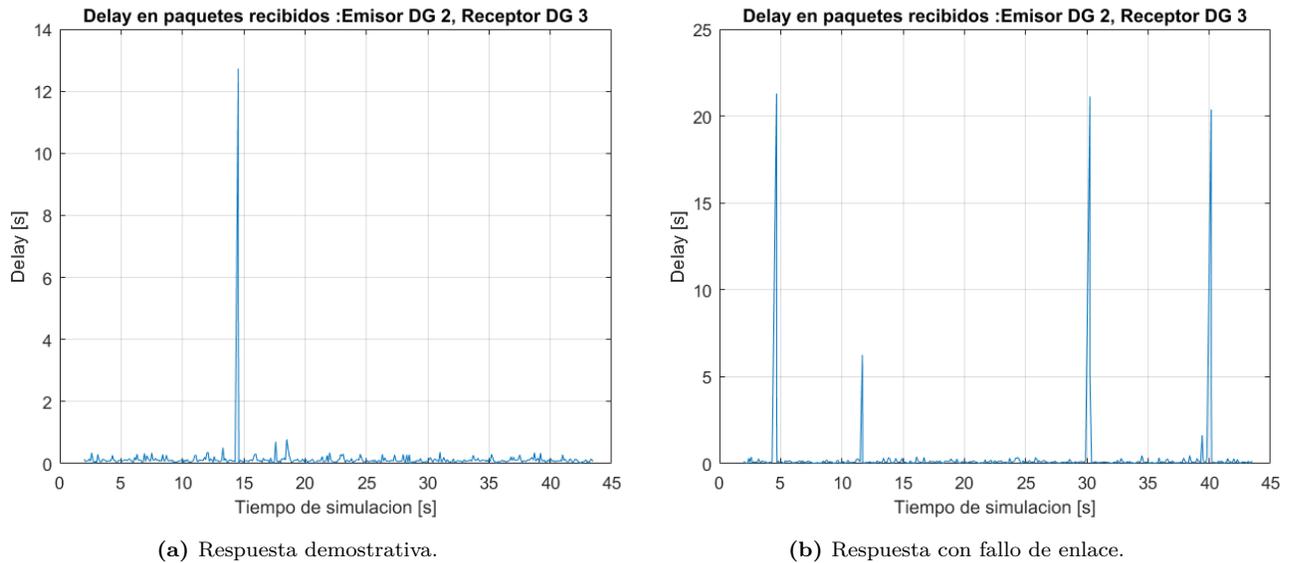


Figura 36: Caso D - Dinámica de recepción para paquetes recibidos por el generador 3. *Jammer* en 24 dB.

Si se tuviera que responsabilizar a algún factor del cambio de respuesta transitoria al comparar las respuestas de la figura 35, se puede observar la situación que se muestra en la figura 37. La figura está mostrando que para la comunicación entre los 7 s a 8 s (donde se produce la diferencia en la respuesta de potencia activa) no hay esencialmente un influencia en el retardo, sino que hay una baja de los paquetes recibidos (deberían recibirse 10 paquetes, la tasa de envío es de 10 Hz). Para el caso de los enlaces de comunicación que involucran al DG 3, se pierden 4 paquetes en ese lapso clave del estado transiente (situación de la figura 35b), que son enviados por el generador 2 (figura 37b). Esto podría tratarse como una pérdida del 40% de paquetes de control en ese lapso corto, pero que repercute en la señal de control no alcanzando el estado estacionario tan rápido como debería, en este caso la pérdida de paquetes muestra que afecta fuertemente la respuesta de control.

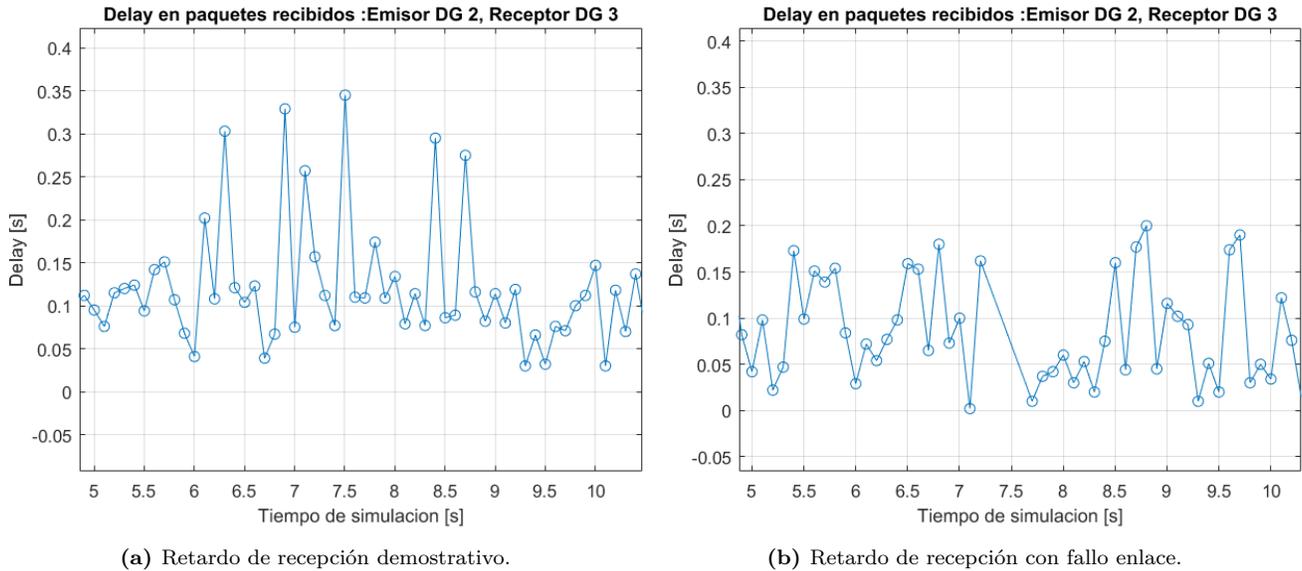


Figura 37: Caso D - Retardo de recepción para DG3, paquetes enviados desde DG2. *Jammer* en 24 dB.

La pérdida de paquetes influye fuertemente en caso de deterioro del enlace de comunicación, parece ser apropiado investigar el efecto de este parámetro de calidad de canal en la respuesta de control. No se puede asignar asimismo una pérdida promedio a cierto nivel de *jammer*, y muchas veces simulaciones distintas con el mismo nivel de potencia pueden resultar en resultados variados. De la misma forma, en ocasiones se producen ráfagas de deterioro del canal y ante estas pérdidas pasajeras el sistema de control podría experimentar errores por un tiempo no deseado.

4.3. Resultados para microrred simulada en comunicación broadcast

Se realizaron experimentos con condiciones de canal similares que los realizados en *unicast*. Se cambió el tipo de envíos para funcionar en *broadcast* y ver si se producían diferencias en la dinámicas.

Caso E: En la figura 38 se presenta la situación donde los generadores están enviando información de control por el método de *broadcast*. El canal de aire no presenta anomalías. Las respuestas para la potencia activa y restauración de frecuencia son similares a las que se tienen en *unicast* para

la misma situación de canal. Igualmente las demás señales de control y restauración de voltajes y potencias reactivas son similares a la situación ideal, el sistema logra su objetivo. En la tabla 14 se ven las medias de retardo para esta situación. Comparando la misma situación de canal con una comunicación del tipo *unicast* (tabla 8), se ve que el caso de *broadcast* se duplica el retardo promedio para la comunicación entre nodos.

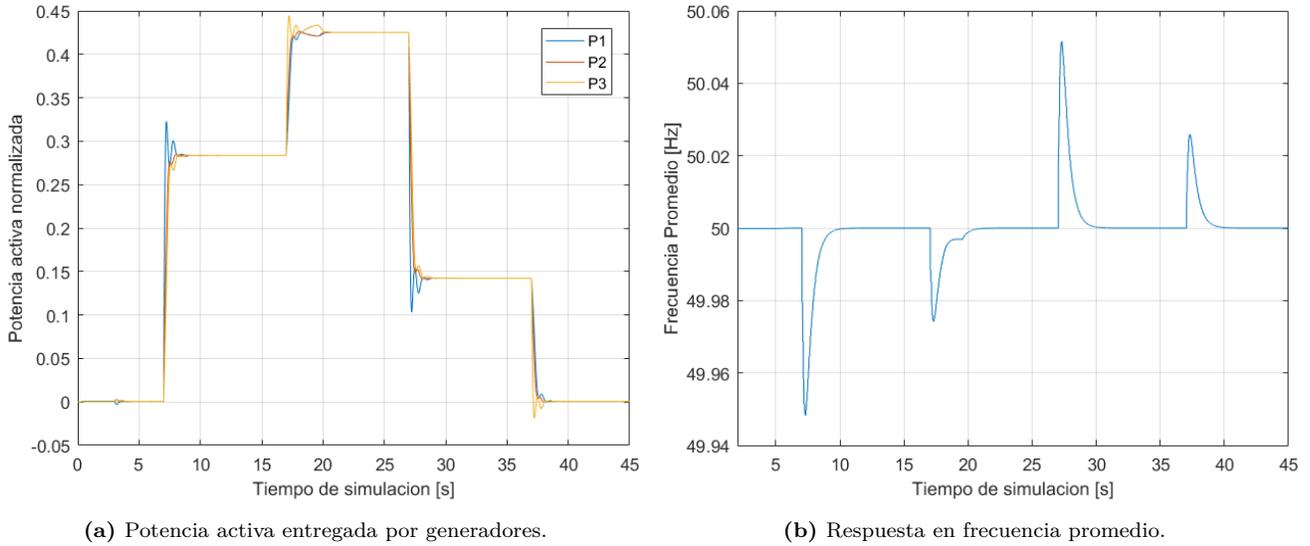


Figura 38: Caso E - Respuestas de distribución para potencia activa y restauración de frecuencia. Comunicación por *broadcast*.

Emisor / Receptor	DG 1	DG 2	DG 3
DG 1	-	0.103 s	0.106 s
DG 2	0.106 s	-	0.113 s
DG 3	0.134 s	0.132 s	-

Tabla 14: Caso E - Retardo promedio de comunicación entre DGs.

A pesar que las respuestas de control son similares a la situación con *unicast*. Una situación que apareció nuevamente se muestra en las figuras 39 y 41. Se produce una caída en la cantidad de paquetes recibidos correctamente para el DG 3, bajando en 58% (tabla 15). No se alcanza la correcta distribución de potencias para los generadores hasta el final de la simulación, y la potencia activa es entregada por los generadores restantes en caso de que uno no entregue lo que debe (DG3). La figura 40 muestra la situación de los paquetes recibidos por el DG 3 que provocan esta

respuesta. Como se ve en la figura hay una ventana de tiempo donde no se reciben paquetes, que coincide con el periodo donde no se alcanza la correcta restauración de frecuencia (sólo *droop*) ni la distribución de potencia activa. La figura también muestra que en el periodo donde sí se reciben paquetes, el retardo que presentan estos están dentro del promedio de todas las simulaciones (tabla 14), entonces el efecto es debido solamente a esta pérdida de paquetes.

La tensión no alcanza a ser afectada en promedio de manera significativa, principalmente por las amplitudes pequeñas de la potencia reactiva con respecto a las amplitudes de la potencia activa, donde en estas últimas se aprecia su efecto en la frecuencia. Sin embargo se puede ver que en la figura 41b que se produce un pequeño cambio en la tensión al finalizar la simulación (≈ 43 s), debido a que empiezan a llegar paquetes nuevamente y se produce la distribución de potencia reactiva correcta.

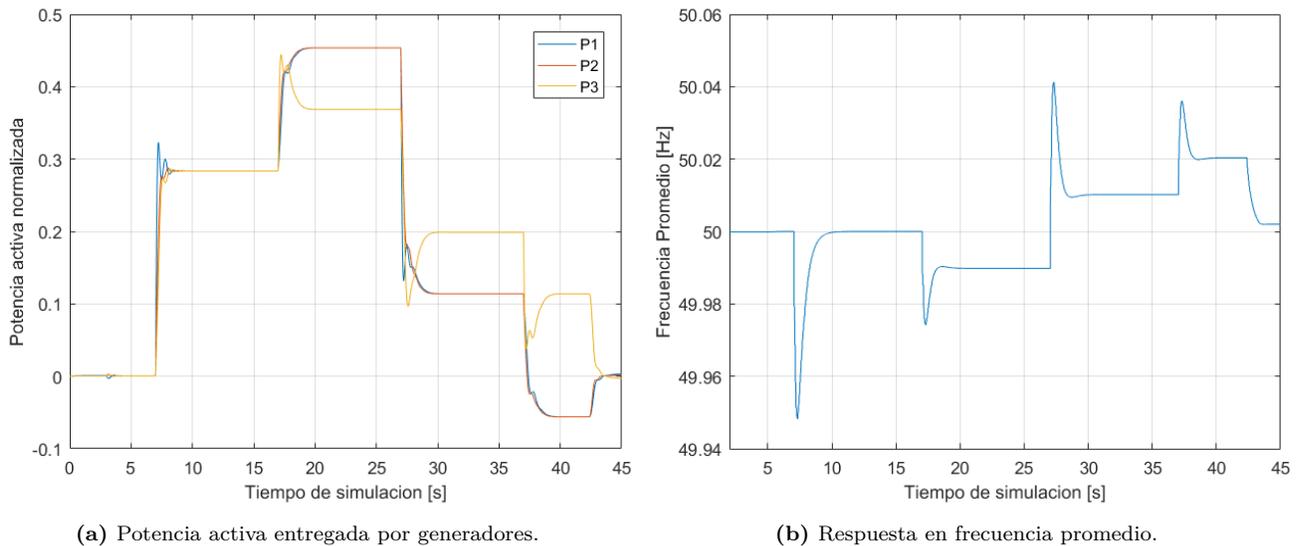


Figura 39: Caso E - Respuesta para restauración y distribución de potencia activa y frecuencia.

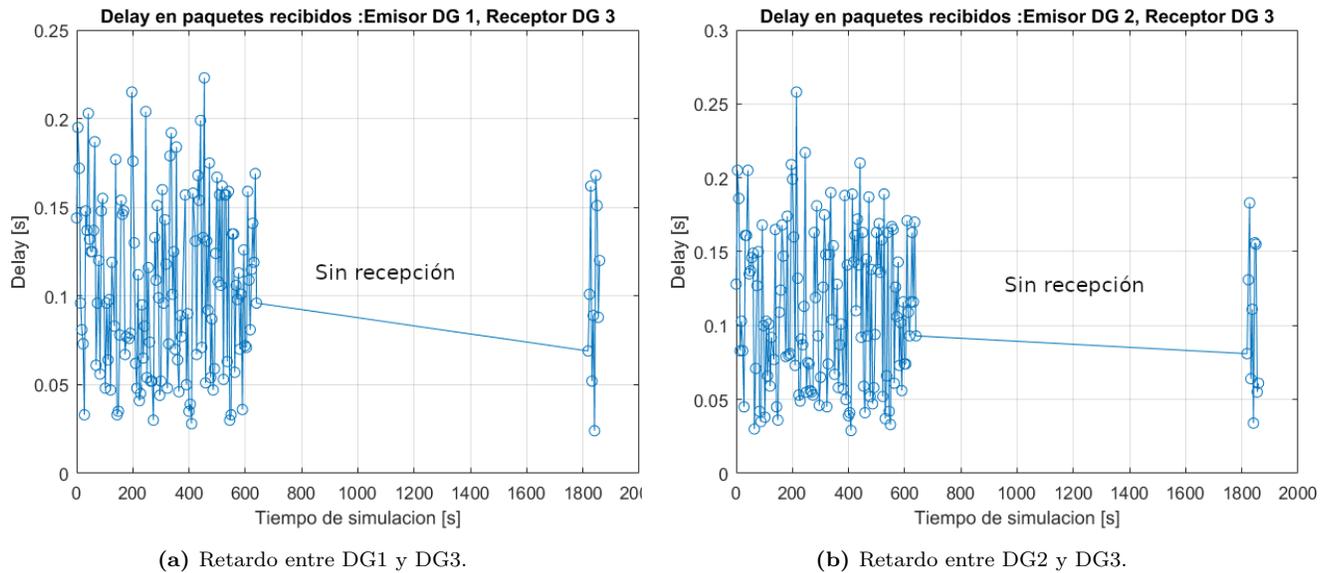


Figura 40: Caso E - Retardo de comunicación para recepción de paquetes por parte del generador 3. Situación de caída del enlace de comunicación.

Porcentaje de paquetes recibidos promedio			
Emisor / Receptor	DG 1	DG 2	DG 3
DG 1	-	94 %	83 %
DG 2	94 %	-	83 %
DG 3	94 %	93 %	-

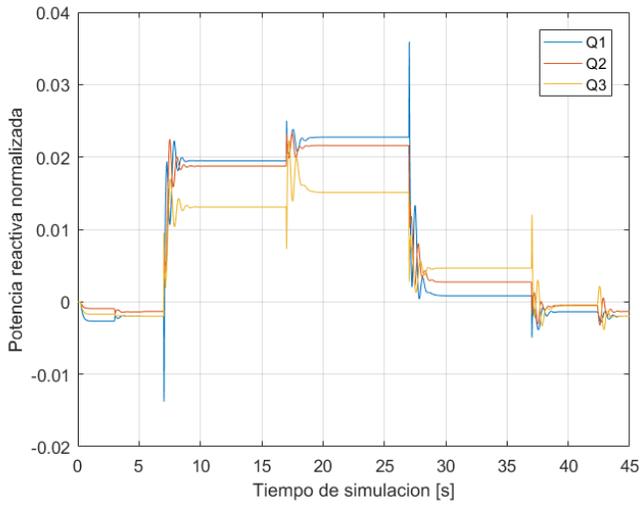
(a) Porcentaje de paquetes recibidos promedio.

Porcentaje de paquetes recibidos, caso caída canal			
Emisor / Receptor	DG 1	DG 2	DG 3
DG 1	-	96 %	35 %
DG 2	97 %	-	35 %
DG 3	96 %	95 %	-

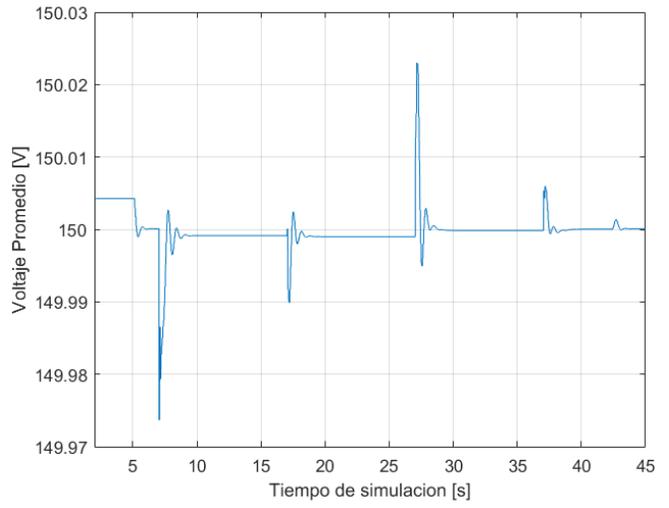
(b) Porcentaje de paquetes recibidos en el caso donde se pierde la comunicación.

Tabla 15: Caso E - Porcentaje de paquetes recibidos por los nodos en el caso de *broadcast*.

Con respecto a las señales de control para la restauración en frecuencia y tensión, se muestran las curvas en la figura 42. Las señales de control muestran que principalmente para el DG 3 se producen las diferencias, los otros DGs logran situarse cercanos a los valores ideales de restauración. De la misma forma, la señal de control para restauración de tensión difiere levemente y se produce un salto cuando comienzan a recibirse paquetes nuevamente. Sigue presentándose la robustez de la restitución de tensión.

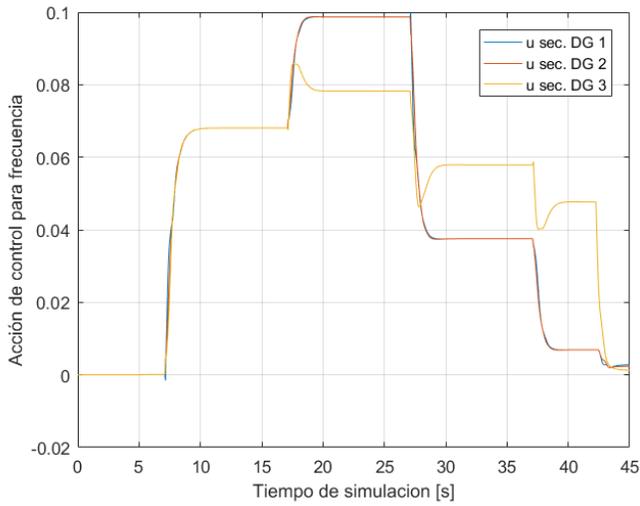


(a) Potencia reactiva entregada por generadores.

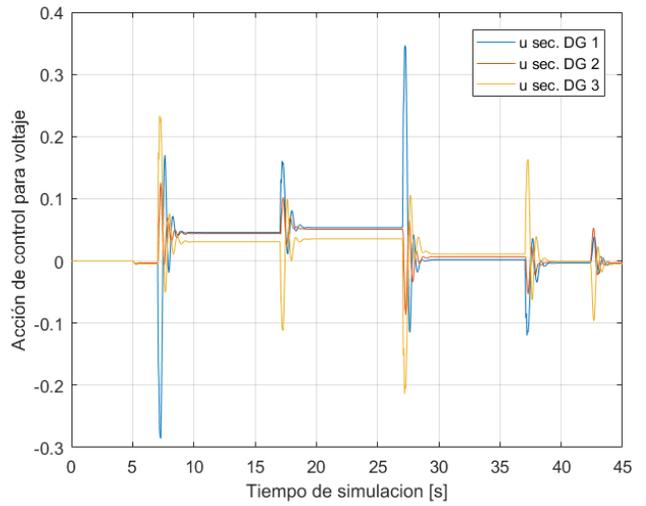


(b) Respuesta en tensión promedio.

Figura 41: Caso E - Respuesta para restauración y distribución de potencia reactiva y tensión.



(a) Acción de control secundario para distribución de potencia activa.



(b) Acción de control secundario para distribución de potencia reactiva.

Figura 42: Caso E - Señales de control para tensión y frecuencia. Comunicación por *broadcast*.

Caso F: Se repitió el experimento con el nivel de *jammer* a 23 dB con un tipo de comunicación *broadcast* entre los DGs.

Nuevamente se repite una situación demostrativa del promedio de las simulaciones, y una donde se deteriora fuertemente la calidad de comunicación del enlace. La figura 43 muestra estas dos situaciones. Con respecto a esta última situación, se puede apreciar que la diferencia de paquetes de control recibidos correctamente para el DG 3 es grande (tabla 17) además de ser el retardo no muy diferente al caso promedio y para el DG 3 particularmente menor que el promedio (tabla 16).

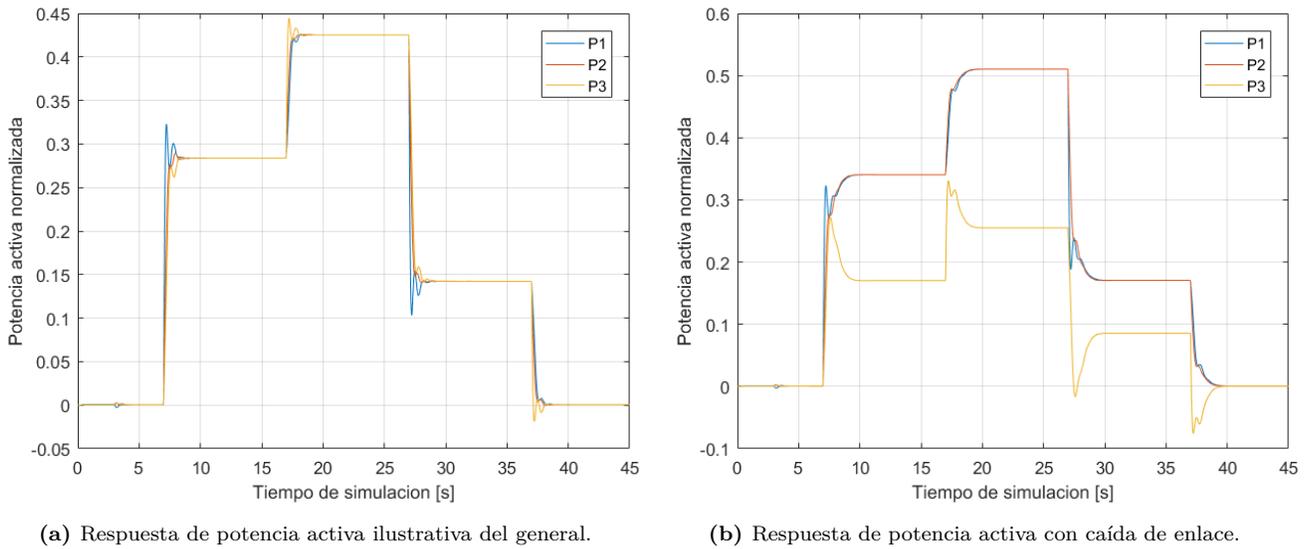


Figura 43: Caso F -Respuestas de distribución de potencias activas. *Jammer* con 23 dB.

Con respecto al valor del retardo en sí, comparado con los retardos experimentados por *unicast* con un *jammer* a 23 dB (tabla 12) para el retardo promedio de comunicación, se puede apreciar que los valores para *broadcast* no siguen un patrón definido, y en particular para el DG 3 son mayores que los alcanzados por *unicast*. Para el caso de la pérdida de paquetes promedio es claro que la situación con *broadcast* (tabla 17) empeora la misma situación de canal con *unicast* (tabla 11).

Retardo promedio			
Emisor / Receptor	DG 1	DG 2	DG 3
DG 1	-	0.096 s	0.0981 s
DG 2	0.102 s	-	0.111 s
DG 3	0.224 s	0.219 s	-

(a) Retardo promedio de las simulaciones.

Retardo para el caso con deterioro de enlace			
Emisor / Receptor	DG 1	DG 2	DG 3
DG 1	-	0.097 s	0.102 s
DG 2	0.103 s	-	0.109 s
DG 3	0.135 s	0.133 s	-

(b) Retardo promedio caso con deterioro del enlace.

Tabla 16: Caso F - Retardo de recepción.

Porcentaje de paquetes recibidos promedio			
Receptor / Emisor	DG 1	DG 2	DG 3
DG 1	-	98 %	94.57 %
DG 2	95.64 %	-	92.21 %
DG 3	85.43 %	86.5 %	-

(a) Porcentaje de paquetes recibidos para el promedio de las simulaciones.

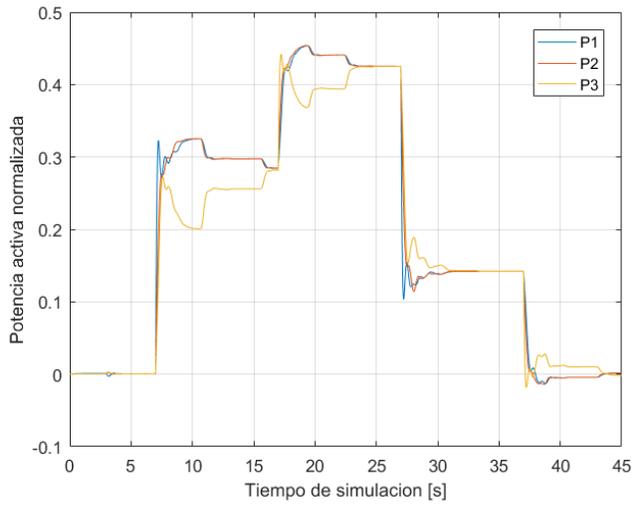
Porcentaje de paquetes recibidos caso deterioro enlace			
Receptor / Emisor	DG 1	DG 2	DG 3
DG 1	-	99.27 %	94.4 %
DG 2	95.86 %	-	92.46 %
DG 3	5.11 %	5.84 %	-

(b) Porcentaje de paquetes recibidos para la simulación con deterioro de enlace.

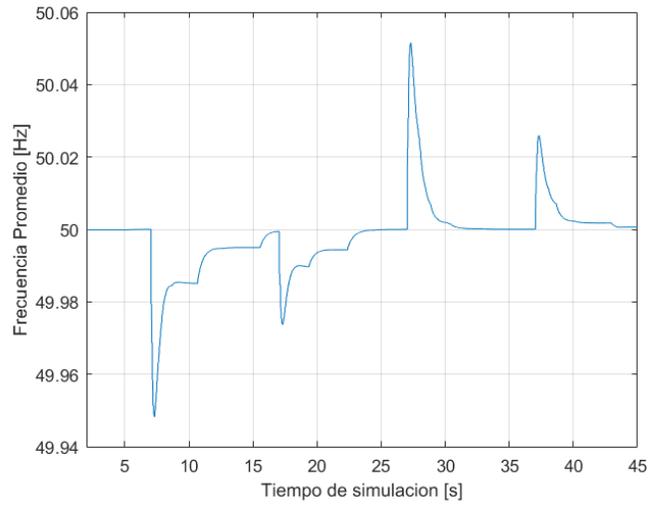
Tabla 17: Caso F - Porcentaje de paquetes recibidos correctamente.

Caso G: Ahora se realiza un experimento con el *jammer* dispuesto a 24 dB. La figura 44 muestra una situación presente en una simulación con esta disposición. Como se ve en la figura se presenta en cada periodo de cambio de carga una desviación notable de la distribución de potencias activas. Esta desviación tiene la característica de que primeramente se alcanza un estado estacionario desviado, luego se mejora el error a un segundo estado estacionario y por último se corrige tanto la distribución de potencia activa como la restauración de frecuencia (para los cambios de cargas en 7 s y 17 s).

En la figura 45 se muestra la situación para la restauración de tensión. El comportamiento de la potencia reactiva debido a los paquetes recibidos por el controlador es similar al de la potencia activa. Nuevamente el controlador de tensión parece inmune mayormente a estas variaciones. Se puede argumentar que esta respuesta es debida a que el cambio de carga resistivo no afecta de mayor manera el comportamiento de la potencia reactiva y el controlador es más robusto.

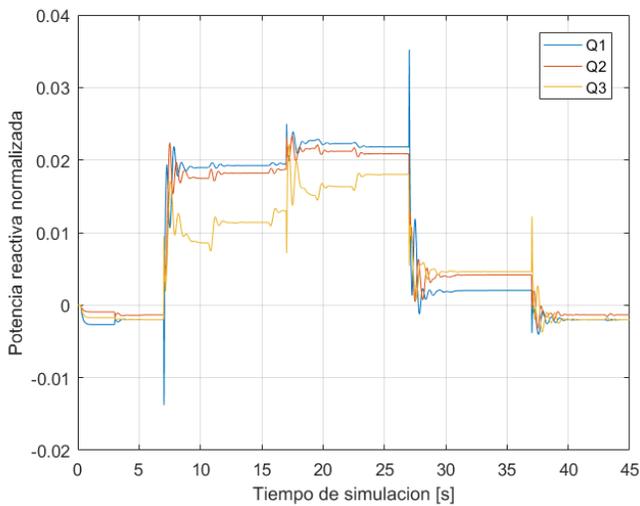


(a) Distribución de potencia activa.

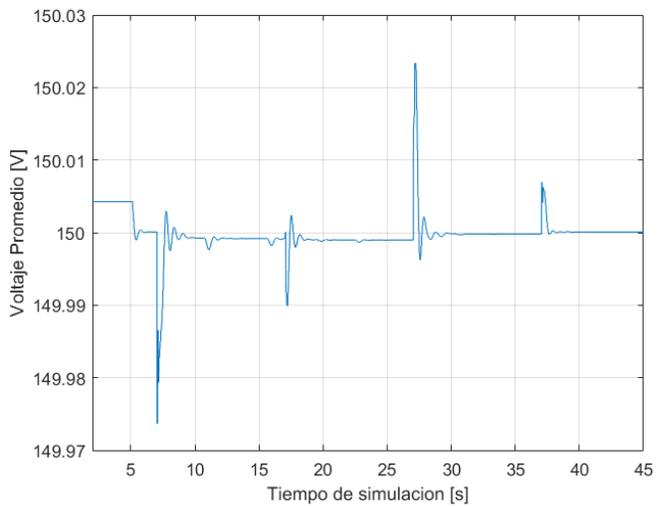


(b) Restauración de frecuencia.

Figura 44: Caso G - Respuesta en distribución de potencia activa y restitución de frecuencia. Situación con deterioro de enlace.



(a) Distribución de potencia reactiva.



(b) Restauración de tensión.

Figura 45: Caso G - Respuesta en distribución de potencia reactiva y restitución de tensión. Situación con deterioro de enlace.

La figura 46 muestra una posible explicación a las respuestas de las figuras 44 y 45. Estas figuras muestran el retardo de comunicación para la recepción de paquetes del generador 3, generador que presenta la mayor pérdida de paquetes y retardos de los mismos. La figura primeramente muestra que los paquetes presentan un retardo promedio que no es grande (menor a 0.2 s) y no distinto al valor promedio de retardo de las demás simulaciones (tabla 19).

La explicación posible al fenómeno de estados estacionarios distintos para la respuestas de potencia se puede explicar por la dinámica de recepción mostrada en la figura 46. La figura 44a muestra que para la respuesta de potencia activa hay 3 estados estacionarios. En los 7 s se produce el primer cambio de carga, donde en la recepción del generador 3 se reciben un par de paquetes correctos que no alcanzan a mantener a la recepción de paquetes acompañando la respuesta de restitución (figura 46), y por lo tanto se alcanza una situación donde virtualmente se cae la comunicación receptora del generador 3 (primer estado estacionario). El segundo estado estacionario se puede explicar por cómo se recibe un flujo de paquetes en $t = 10$ s (figura 46b) solamente desde el generador 2. Desde el generador 1 no se reciben paquetes de control en ese tiempo (figura 46a). Esa recepción parcial de paquetes solamente desde el generador 2 produce un nuevo estado estacionario (el segundo) que no es el deseado pero se acerca al ideal; asimismo, solamente se reciben 3 paquetes desde los 10 s a los 15 s de simulación, situación que no logra mostrar si se podría lograr un estado estacionario deseado solamente recibiendo paquetes desde este generador 2. Finalmente, en el tercer estado estacionario (tiempo 16 s a 17 s en el cambio de carga en la figura 44a) se produce un alcance al estado estacionario deseado. Esto sólo se logra con la recepción nuevamente de 3 paquetes de control emitidos por el generador 1 (figura 46a). Suficientes son estos paquetes para alcanzar el estado estacionario; esto es válido porque mientras se reciben esta poca cantidad de paquetes de control no hay cambios de carga en el sistema y las señales de control de los generadores 2 y 1 están establecidas en un valor fijo, sólo faltan los datos finales del DG1 para que el generador 3 ajuste su control y se los comunique a los demás.

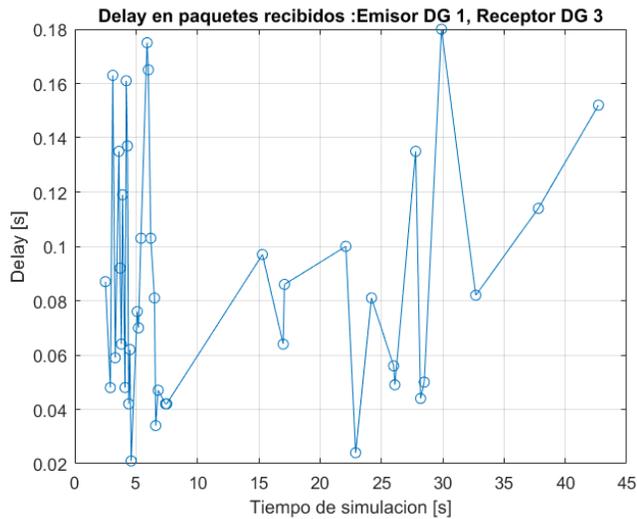
Paquetes promedio			
Receptor / Emisor	DG 1	DG 2	DG 3
DG 1	-	94.94 %	79.08 %
DG 2	95.57 %	-	77.49 %
DG 3	40.56 %	43.16 %	-

(a) Paquetes recibidos para el promedio de las simulaciones.

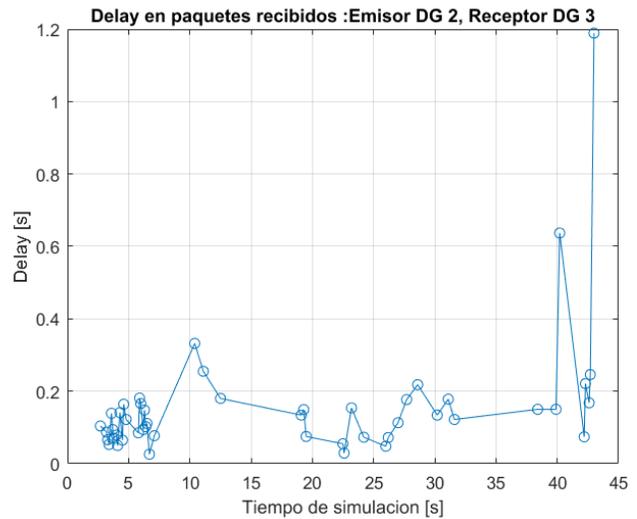
Paquetes para el caso de la figura 44a			
Receptor / Emisor	DG 1	DG 2	DG 3
DG 1	-	77.86 %	98.05 %
DG 2	96.84 %	-	96.11 %
DG 3	9.73 %	11.68 %	-

(b) Paquetes recibidos para la simulación con deterioro de enlace.

Tabla 18: Caso G - Paquetes recibidos correctamente.



(a) Recepción desde el generador 1.



(b) Recepción desde el generador 2.

Figura 46: Caso G - Retardo de comunicación para simulación particular del *jammer* a 24 dB. Recepción del generador 3.

Retardo promedio			
Emisor / Receptor	DG 1	DG 2	DG 3
DG 1	-	0.096 s	0.094 s
DG 2	0.114 s	-	0.113 s
DG 3	1.676 s	1.438 s	-

(a) Retardo para el promedio de las simulaciones.

Retardo para el caso de la figura 44a			
Emisor / Receptor	DG 1	DG 2	DG 3
DG 1	-	0.098 s	0.087 s
DG 2	0.158 s	-	0.157 s
DG 3	0.184 s	0.188 s	-

(b) Retardo para la simulación con deterioro de enlace.

Tabla 19: Caso G - Retardo de recepción.

Si se observan los valores de retardo promedio para este escenario (tabla 19) se aprecia que no aumentan desmedidamente por el efecto del mayor ruido del canal. Sin embargo la pérdida de paquetes promedio (tabla 18a) es notablemente mayor que el caso de *jammer* a 23 dB. Este efecto se puede esperar debido a la no confirmación de paquetes que posee el *broadcast* y que no hay reintentos. En ese sentido al utilizar *broadcast* la pérdida de paquetes y los efectos que se han podido mostrar que tiene esta variable son a tomar en consideración para canales de comunicación difíciles.

Caso H: En este punto se realiza un experimento donde la matriz de adyacencia actualiza su valor dependiendo de si han recibido paquetes de control en el tiempo estipulado. La potencia de software del *jammer* está en 24 dB.

El primer resultado tiene que ver con la predictibilidad de los retardos de comunicación (ver tabla 20), ellos no son distintos en mayor medida del experimento sin actualización de la matriz de adyacencia (tabla 19a). Una situación que muestra el efecto distinto que puede tener esta actualización de estado de la comunicación de los DGs se muestra en la figura 47. En la figura se expone un caso donde falla en enlace de comunicación con este esquema de control.

Retardo promedio			
Emisor / Receptor	DG 1	DG 2	DG 3
DG 1	-	0.096 s	0.096 s
DG 2	0.106 s	-	0.118 s
DG 3	1.379 s	0.13 s	-

Tabla 20: Caso H - Retardo para el promedio de las simulaciones.

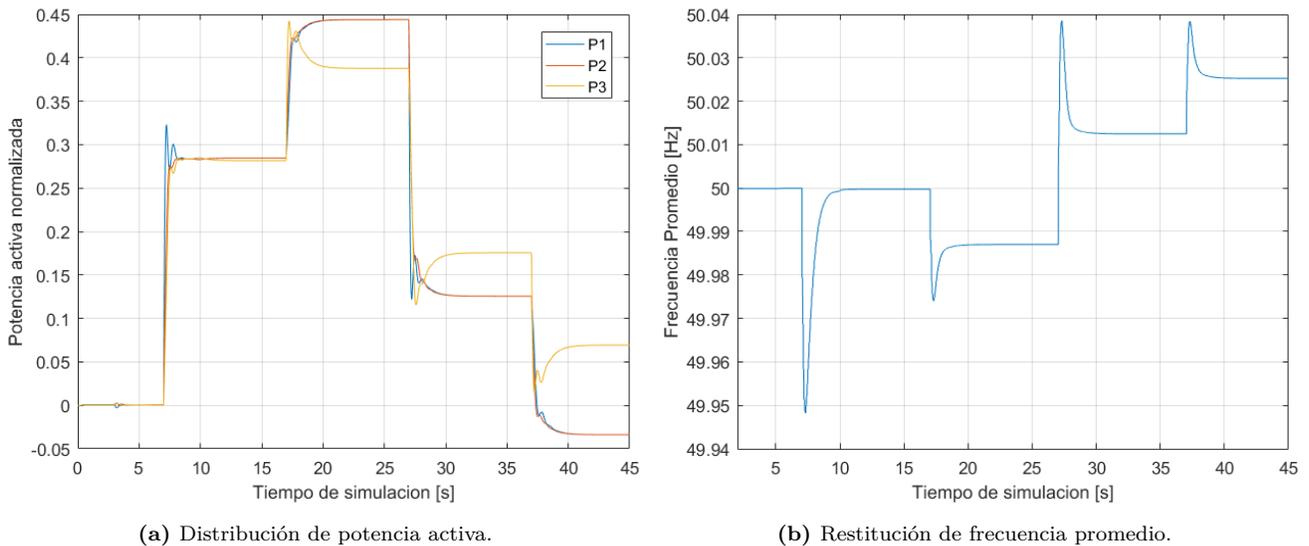
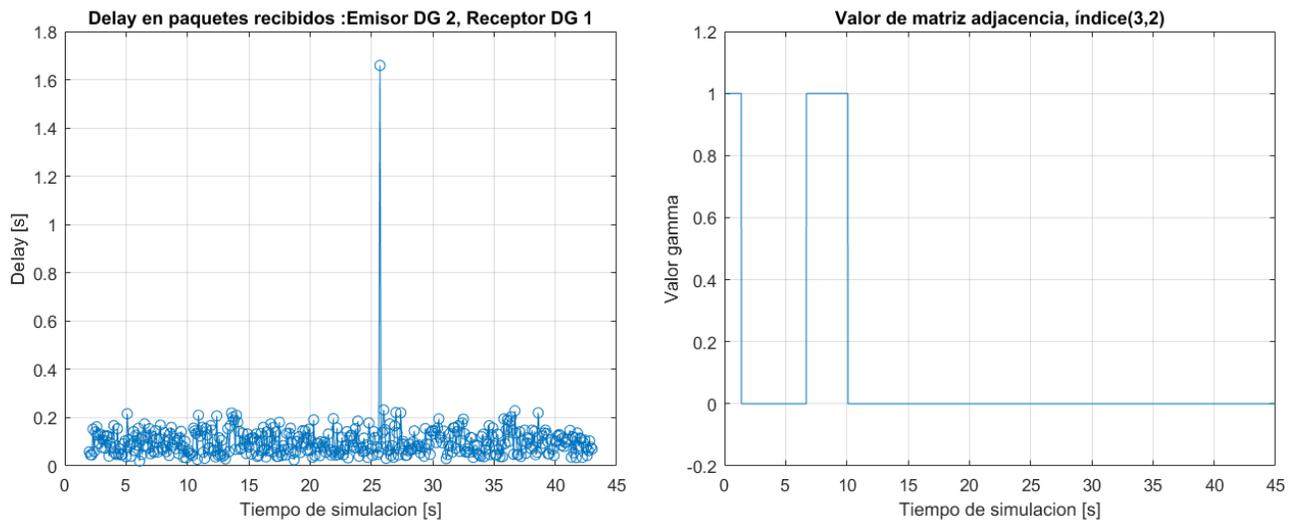


Figura 47: Caso H - Restitución de frecuencia y distribución de potencia activa, caso de fallo de enlace. Control con actualización de matriz de adyacencia.

El esquema de control con actualización del estado del enlace cambia el valor de la matriz adyacencia si no se han recibido paquetes de control. En el caso de la figura 47, fallan todos los enlaces

de comunicación excepto el enlace entre el DG1 y el DG2 (funciona *full-duplex*). En la figura 48 se muestra la situación ilustrativa de la comunicación. La figura 48a muestra la situación para el enlace *full-duplex* entre el DG 1 y DG 2; ambos enlaces están recibiendo mensajes con pérdidas aceptables y dentro de los valores de retardo promedio de la este nivel de *jammer*. La figura 48b muestra el estado de todos los demás enlaces de comunicación. Los otros enlaces dejan de funcionar en el aproximado de 10 s, actualizando el sistema de control ese índice de comunicación en la matriz de adyacencia como un 0.

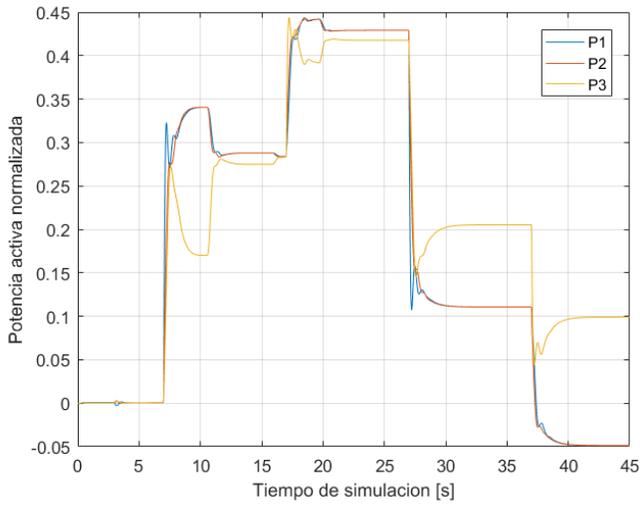


(a) Retardo de comunicación para el enlace entre el DG 1 y el DG 2.

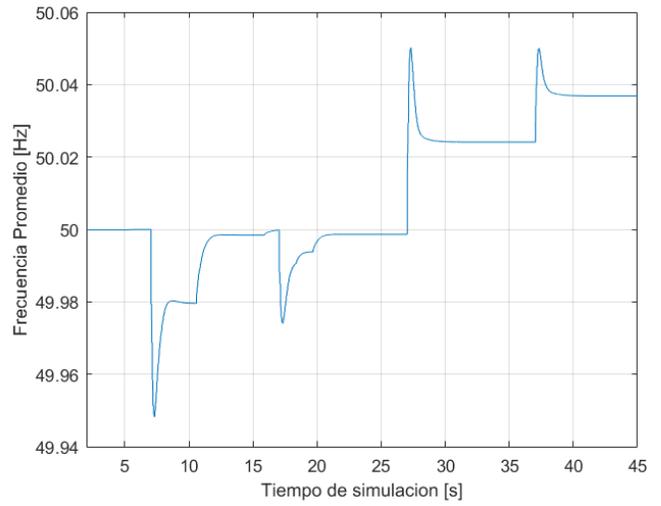
(b) Estado para la comunicación (valor de la matriz de adyacencia) de los demás enlaces de comunicación.

Figura 48: Caso H - Estado ilustrativo de la comunicación para la situación con fallo de enlace.

Se puede comparar esta situación con lo sucedido en una simulación donde el sistema de control no actualiza la matriz de adyacencia y el *jammer* igualmente está en 24 dB. La figura 49 muestra las respuestas de control secundario para esa situación. En esta situación el estado de comunicación es similar que para el mostrado en la figura 48. La figura 50 muestra que la comunicación entre el DG1 y el DG2 nuevamente funciona de buena manera (ver figura 50a); la comunicación entre los demás nodos pierde el enlace alrededor de los 20 s (figura 50b). Si se compara la respuesta de la figura 47 con la de la figura 49, se nota que para las perturbaciones de cargas después de los 20 s (ambas simulaciones con fallo de enlace en los mismos DGs), para la situación con actualización de matriz de adyacencia mejora bastante la desviación de control, llevando en su mejor caso a una mejora de distribución o restitución de casi el doble de la perturbación.

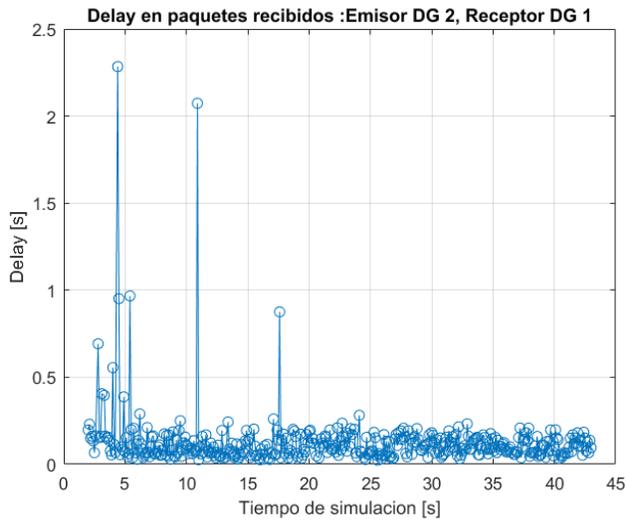


(a) Distribución de potencia activa.

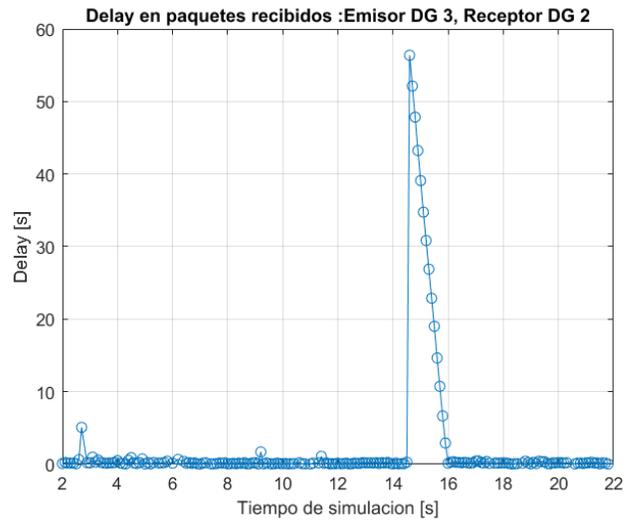


(b) Restitución de frecuencia.

Figura 49: Caso H - Restitución de frecuencia y distribución de potencia activa, caso de fallo de enlace. Control sin actualización de matriz de adyacencia.



(a) Retardo de comunicación para el enlace entre el DG 1 y el DG 2.



(b) Retardo de comunicación ilustrativo de los demás enlaces.

Figura 50: Caso H - Estado ilustrativo de la comunicación para la situación con fallo de enlace. Control sin actualización de matriz de adyacencia.

Nuevamente los experimentos simulados parecen mostrar un impacto mayor de la pérdida de paquetes sobre el esquema de control DAPI. Este último caso muestra que en la situación de actualización del estado de la comunicación a través del cambio de los valores de la matriz de adyacencia, mejora la respuesta en general ante pérdidas de paquetes. La tabla 21 muestra los valores de pérdidas para las simulaciones comparadas. No se pudo apreciar sin embargo, si ante el retardo actuaba de la misma forma el esquema de control, mejorando las desviaciones del valor deseado.

Porcentaje paquetes recibidos. Situación figura 47				Porcentaje paquetes recibidos. Situación figura 49			
Emisor / Receptor	DG 1	DG 2	DG 3	Emisor / Receptor	DG 1	DG 2	DG 3
DG 1	-	96.35 %	14.84 %	DG 1	-	95.86 %	45.99 %
DG 2	94.89 %	-	14.11 %	DG 2	96.11 %	-	45.26 %
DG 3	7.54 %	7.54 %	-	DG 3	1.22 %	1.22 %	-

(a) Sistema de control con actualización de matriz adyacencia.

(b) Sistema de control sin actualización de matriz adyacencia.

Tabla 21: Caso H - Porcentaje de paquetes recibidos en simulaciones a comparar. Situaciones con y sin actualización de matriz de adyacencia. Ambas simulaciones no presentan recepción entre algunos nodos después de los 20 s.

La experimentación simulada entrega en resumen lo siguiente: pareciera que en pico de retardo los valores que puede tomar el mismo en *unicast* son mayores en que los que toma *broadcast*. En la respuesta de control pasa lo siguiente: El retardo en general viene acompañado con pérdidas de paquetes y en este experimento simulado el retardo tiende a afectar menos (debido al retardo que introduce el cálculo de el estado de la red en el tiempo mismo del simulador), el efecto de las pérdidas es más comprobable. Con las pérdidas pasa esencialmente lo siguiente, si se cae un enlace funciona solamente el *droop*. Dado una caída de enlace, si los requerimientos en carga no cambian grandemente, con una recepción de 30 % aproximadamente de datos se puede recuperar el control nuevamente. En caso de cambio de requerimientos, con un 30-40 % de pérdidas basta para hacerlo mas oscilatorio y lento. Al parecer en *broadcast* las pérdidas también tienden a ser más en situación de deterioro de enlace que con *unicast*. Por otra parte, con la matriz de adyacencia, la simulación comparable muestra que la distribución de potencia es mejor hasta el doble que sin usar esta actualización del estado de la red.

4.4. Resultados para la microrred en el laboratorio

La configuración de la MG del laboratorio está expuesta en la sección 3.2.4. Consta básicamente de 3 DGs donde uno de ellos es el maestro. El *jammer* y los DGs se sitúan como se ve en la figura 20. Dentro de los trece casos de medición del desempeño de la red, descritos en la tabla 25, el primero a discutir es la comunicación por medio del enlace cableado CAN.

La figura 51 muestra la respuesta en frecuencia para los casos 1 y 2 (tabla 25). Como se puede ver, el forzamiento de cargas es en el tiempo 0 s y ≈ 7.5 s. Ambas respuestas son similares en dinámicas, y a pesar del cambio en la naturaleza del enlace no hay cambios apreciables en la respuesta, salvo un pequeño aumento en el sobrepaso ante el cambio de carga en el enlace Wi-Fi.

No se presentan grandes cambios en la respuesta en frecuencia a medida que se aumenta la potencia del *jammer*, hasta llegar a los 9 dB (caso 9). La figura 52 muestra la respuesta para los casos 3 y 9. El caso 3 no difiere mucho de los casos 1 y 2 al menos en la forma de la curva, los valores medios de retardo (tabla 23) o de desviación en frecuencia (tabla 22) lo corroboran.

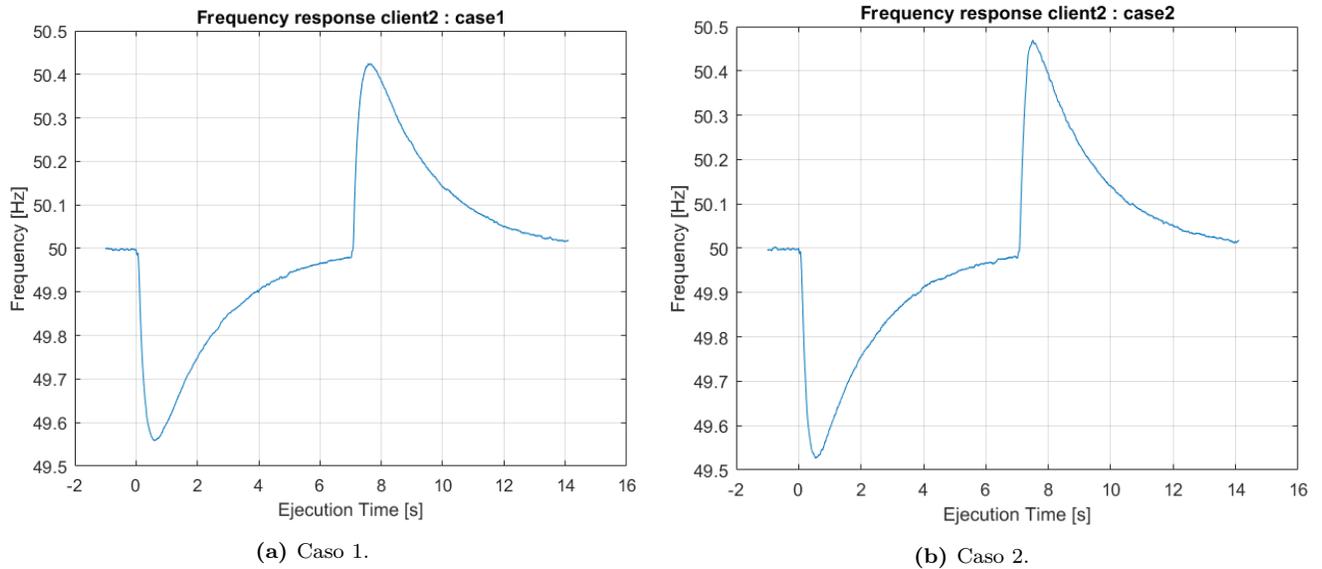


Figura 51: Respuesta en frecuencia casos 1 y 2.

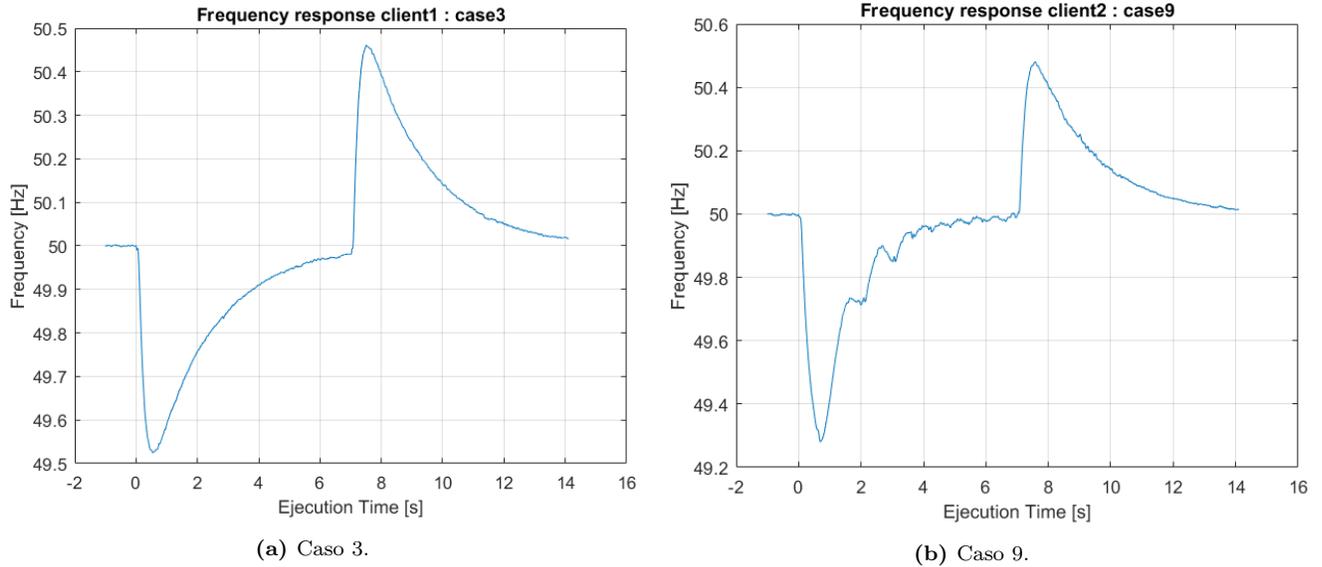


Figura 52: Respuesta en frecuencia casos 3 y 9.

El caso 9 (figura 52b) muestra diferencias entre la respuesta en frecuencia de este caso con respecto a niveles menores de potencia del *jammer*. Se observa un comportamiento oscilatorio más pronunciado en la estabilización del primer cambio de carga. Asimismo, se puede ver que el valor de desviación máxima de frecuencia y el retardo promedio para este caso, aumentan de forma notoria con respecto a los niveles más bajos de ruido. Una variable que puede explicar este comportamiento es el retardo de comunicación (figura 53). Se puede ver que en la figura 53a que el retardo se encuentra dentro de límites similares a la parte final (10 s a 14 s) de la figura 53b, es decir, que la respuesta para el caso 3 no presenta oscilaciones, al igual que la respuesta para el caso 9 en el tiempo donde el retardo es similar. En el otro sentido, el caso 9 (figura 52b) muestra diferencias entre la respuesta en frecuencia de este caso, con respecto a niveles menores de potencia del *jammer*. Se observa un comportamiento oscilatorio más pronunciado en la estabilización del primer cambio de carga. Asimismo, se puede ver que el valor de desviación máxima de frecuencia y el retardo promedio para este caso aumenta. Las oscilaciones son largas (caso 9, tiempo desde 0s a 6s), cuando el retardo es mayor (figura 53b) y disminuye a medida que disminuyen las oscilaciones.

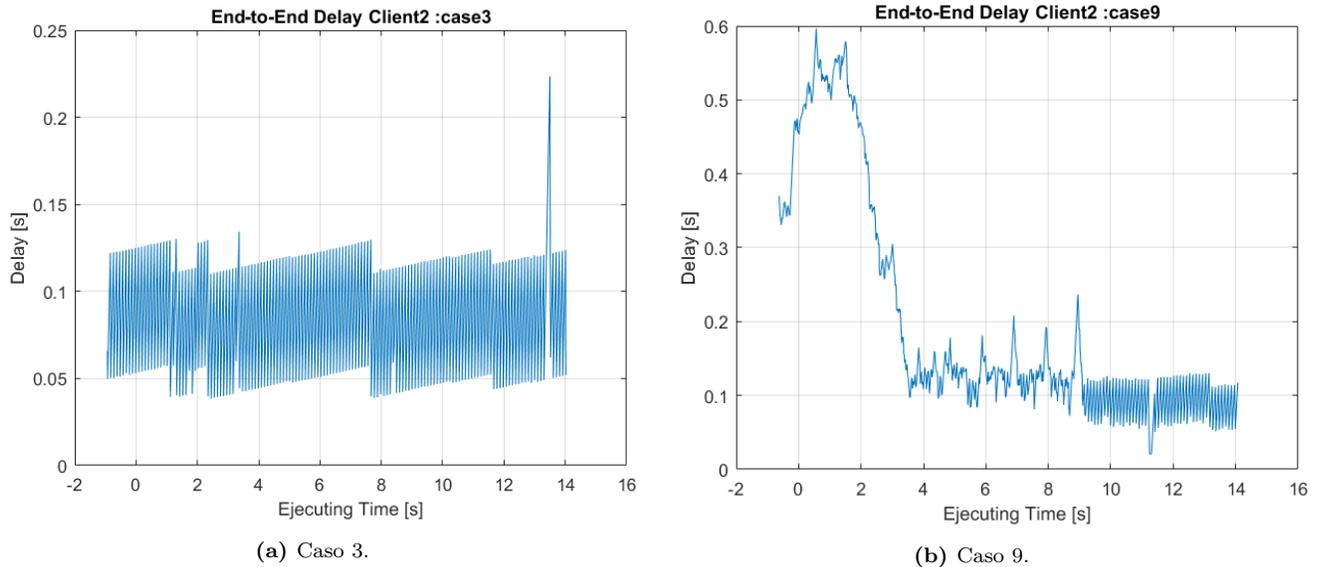
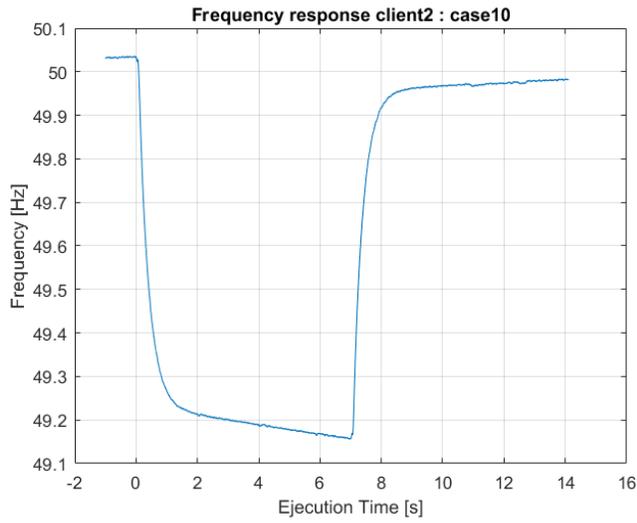


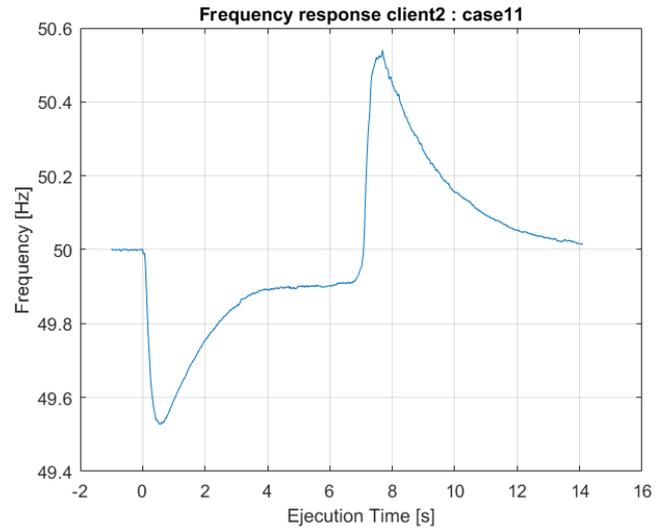
Figura 53: Retardo en recepción casos 3 y 9.

La figuras 54 y 55 muestran la situación para los casos 10 y 11, en el caso de la respuesta de frecuencia y el retardo de los paquetes en el tiempo. El caso 10 corresponde al máximo alcanzado por el *jammer* en el cual la comunicación Wi-Fi se ve bloqueada, los paquetes no logran recibirse y la señal de frecuencia se ve fuertemente alterada. La figura 55a muestra que esta respuesta es producto del conjunto entre una cantidad mínima de paquetes recibidos y el alto retardo que tiene cada uno en la recepción. Por otro lado la figura 55b muestra la situación de los paquetes para el caso 11. Se produce un cambio en las condiciones de potencia del *jammer* pasando de 3 dB a 10 dB y se vuelve a 3 dB (*Burst*). El retardo asociado a la condición de 10 dB muestra claramente cómo el retardo y la pérdida de paquetes aumenta en esa condición ($\approx 3 s$ a $\approx 7.5 s$), resultando en la respuesta de frecuencia que no es posible alcanzar una correcta restauración (figura 54b), sólo funcionando el control *droop*.

Es importante notar que el caso de la experimentación con la MG del laboratorio, la máxima potencia de software del *jammer* es de 10 dB, y en la experimentando con la MG simulada se alcanzan los 24 dB. Ese comportamiento es asimilable con el hecho que en ausencia de *jammer*, la calidad de señal Wi-Fi señalada por las Raspberry Pi ya era pobre, sea eso debido a que las antenas de las Raspberry eran peores que las NICs utilizadas en la simulación, o porque la disposición espacial del AP (bloqueado por metal) reducía esta capacidad de comunicación.

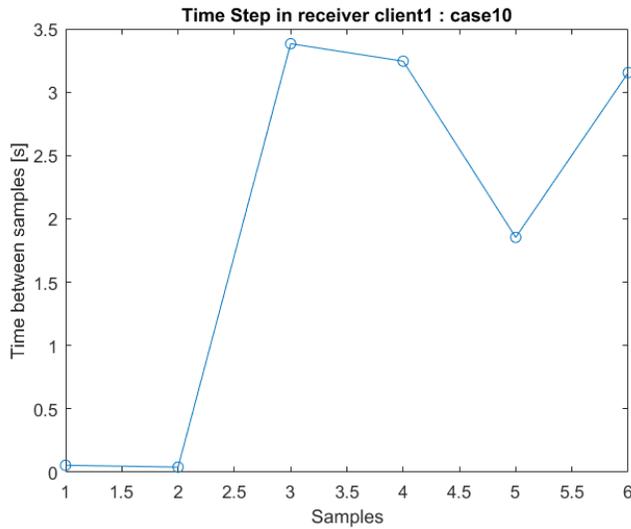


(a) Caso 10.

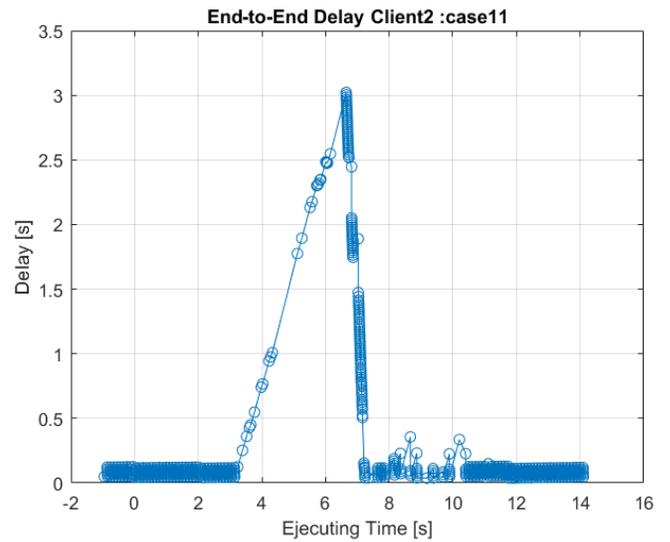


(b) Caso 11.

Figura 54: Respuesta en frecuencia casos 10 y 11.



(a) Caso 10.



(b) Caso 11.

Figura 55: Retardo en recepción casos 10 y 11.

La figura 56 muestra la respuesta para la restauración de frecuencia en los casos 12 y 13. La

figura 56a muestra que el tráfico continuo deteriora igualmente fuerte la respuesta de control de frecuencia, así como la ráfaga (burst, caso 13) logra aumentar los niveles de retardo con los cuales los paquetes son procesados por el receptor (figura 57b). Este aumento de retardo no alcanza a deteriorar en este caso la respuesta de una manera tan grande y ante la despreciable pérdida de paquetes la respuesta es aceptable.

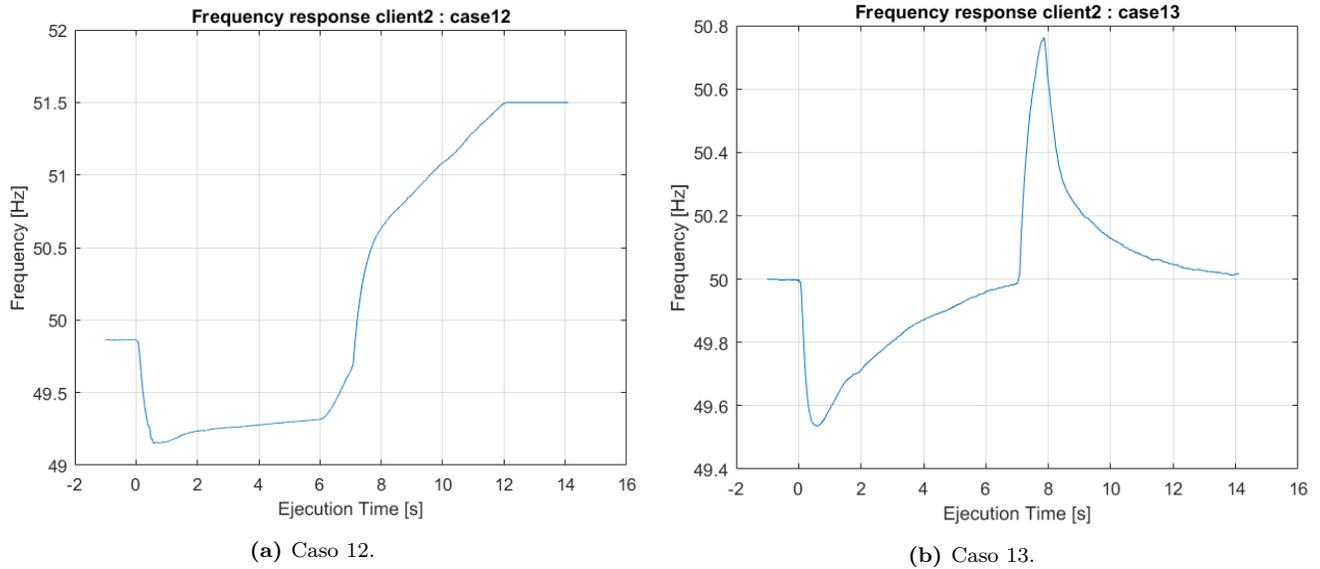
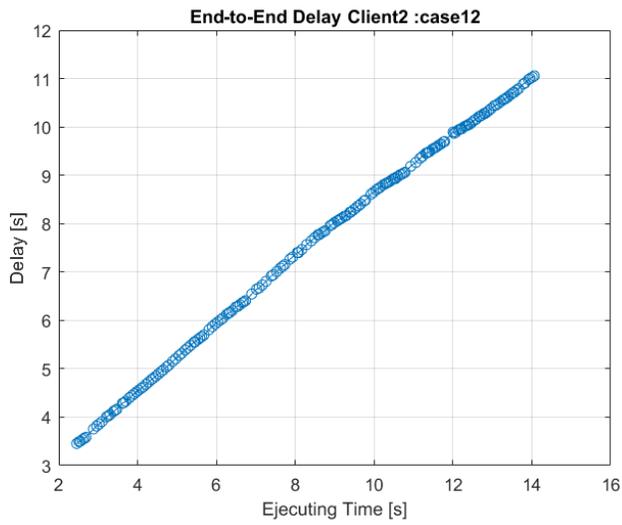


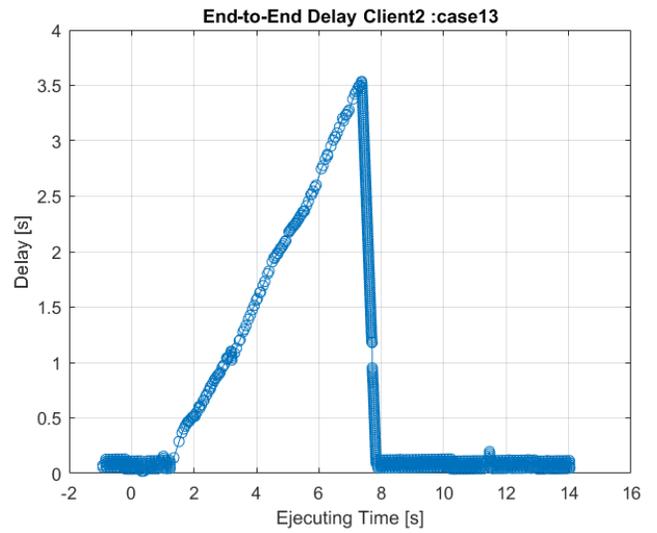
Figura 56: Respuesta en frecuencia casos 12 y 13.

Con respecto a las respuestas en tensión, las figuras 58, 59 y 61 muestran los resultados obtenidos. La figura 58 muestra la respuesta para los casos más ideales. En el caso de voltaje se puede apreciar que en el caso 2 las oscilaciones aumentan bastante en el cambio de carga, el Wi-Fi si crea una diferencia apreciable aún en su caso no forzado. La figura 59 muestra la situación para los casos 9 y 10. El caso 9 muestra una respuesta incapaz de alcanzar una apropiada restauración, oscilaciones grandes que son mucho más pronunciadas y sensibles al retardo (figura 53b) que la respuesta en frecuencia (figura 52b).

La figura 59b muestra la respuesta para el caso 10. La respuesta es sorprendentemente buena, dado la cantidad de paquetes perdidos y el retardo de los mismos. La figura 60b muestra la señal de control secundario para ese caso. Hay muy pocos paquetes recibidos, pero están todos dentro del valor de control que presentan los otros casos en la restauración correcta, tal vez por eso la respuesta parece inmune a los malos indicadores de comunicación.

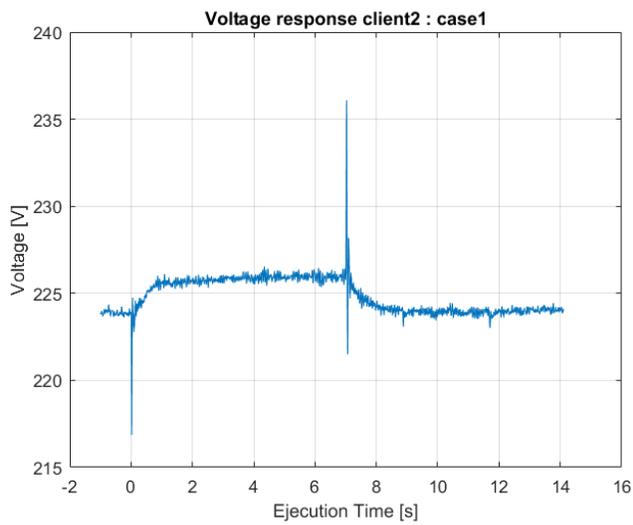


(a) Caso 12.

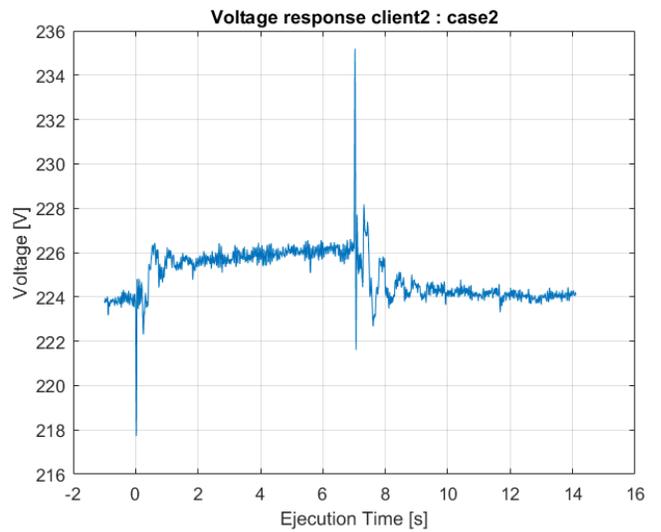


(b) Caso 13.

Figura 57: Retardo en recepción casos 12 y 13.

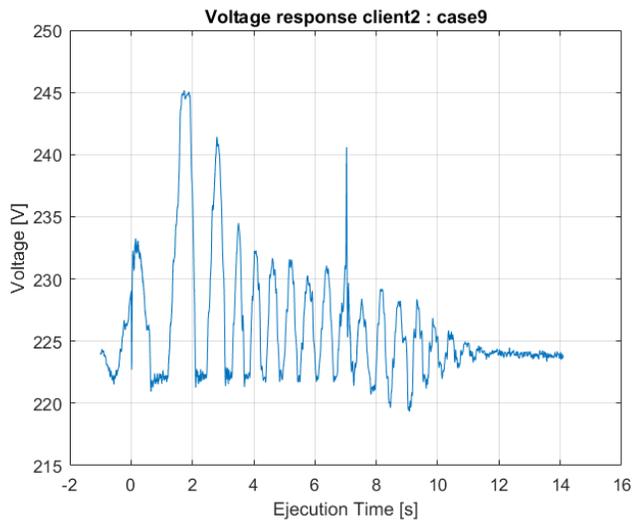


(a) Caso 1.

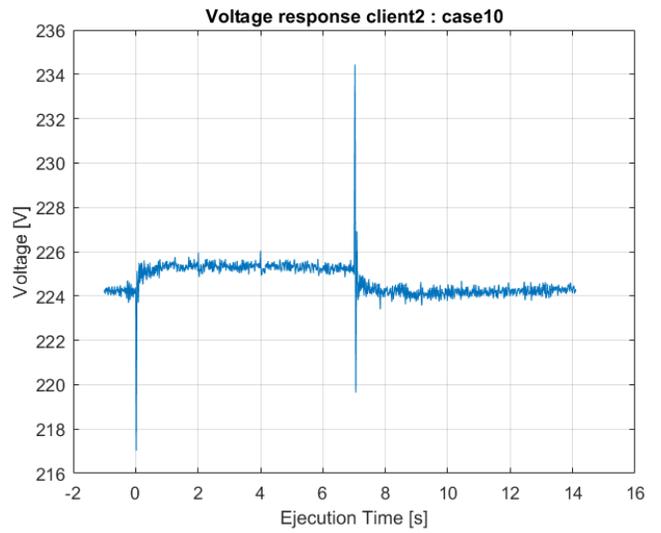


(b) Caso 2.

Figura 58: Respuesta en tensión casos 1 y 2.

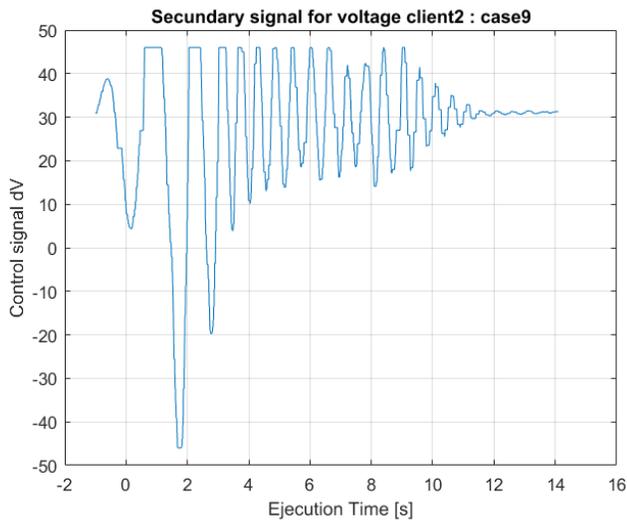


(a) Case 9.

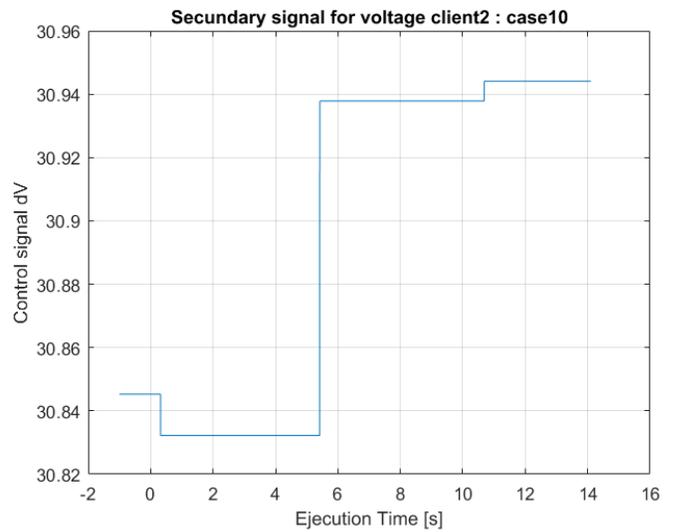


(b) Caso 10.

Figura 59: Respuesta en tensión casos 9 y 10.



(a) Caso 9.



(b) Caso 10.

Figura 60: Señal de control secundario casos 9 y 10.

La figura 61 muestra la respuesta para los casos 11 y 12. El caso 11 es similar al caso dos en el

sentido que aumentan las oscilaciones en el cambio de carga con respecto al caso 1. El caso 12 es un caso donde el tráfico continuo afectó de manera grande la respuesta en frecuencia. No se alcanza el mismo valor de voltaje estacionario, este efecto parece explicarse por el retardo con el que se reciben los paquetes de control (figura 57a). La figura 62a muestra que la señal de control difiere grandemente en sus valores de control ideales (cerca de 30). Parece ser que el retardo es menos importante que la pérdida de paquetes, si los paquetes recibidos son correctos en su acción de control. La figura 62b muestra que la respuesta para el *burst* de tráfico repercute nuevamente en la oscilaciones en el cambio de carga, pero no son significantes si se recupera un estado de canal adecuado.

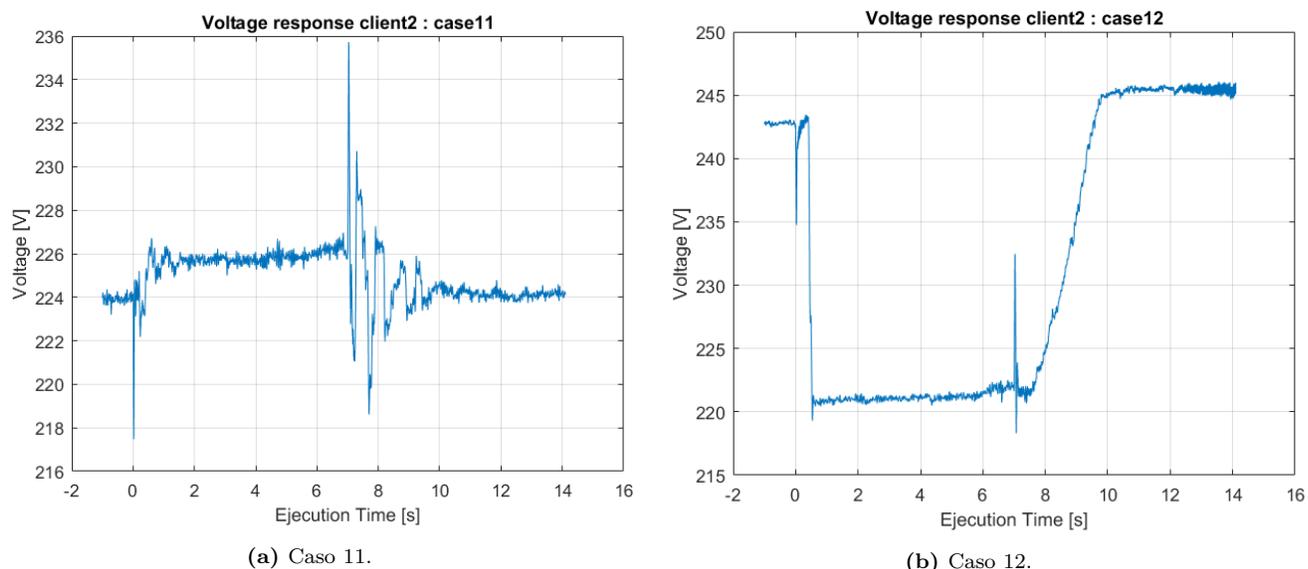
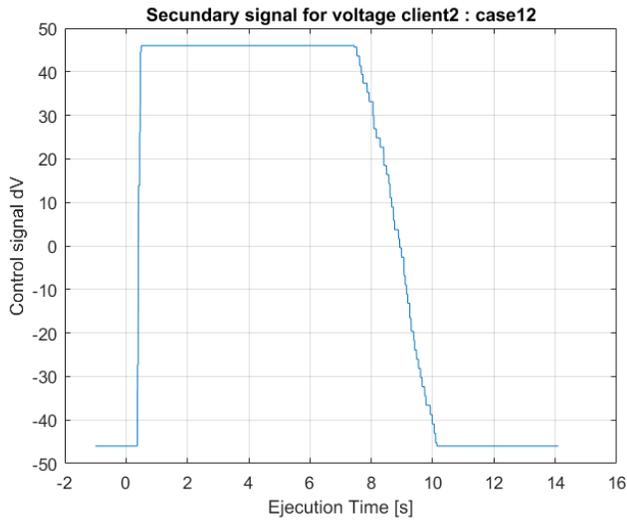
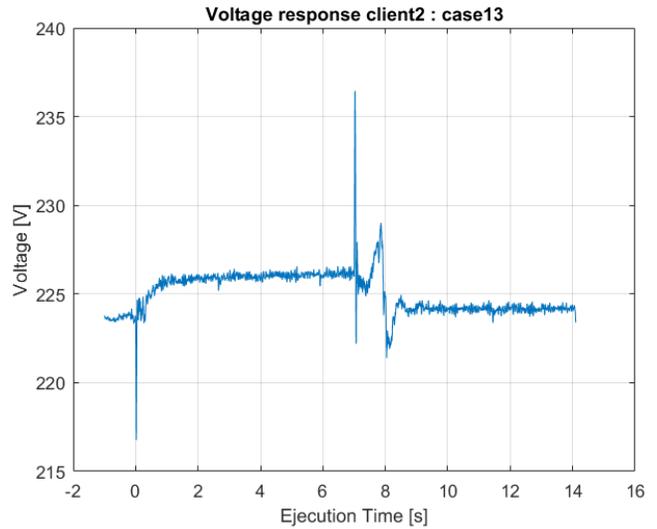


Figura 61: Respuesta en tensión casos 11 y 12.



(a) Caso 12.



(b) Caso 13.

Figura 62: Respuesta en tensión caso 13, acción de control caso 12.

De la experimentación se puede extraer que el efecto del *jammer* en el canal estático afecta fuertemente la cantidad de paquetes perdidos y el retardo de los mismos. En los casos extremos es tanto el deterioro que los pocos paquetes que llegan les cuesta mucho recibirse con bajo retardo. El tráfico afecta fuertemente la recepción de paquetes (pero mucho menos que el *jammer*, tal vez por el efecto de paquetización a diferencia del continuo del *jammer*). Igualmente no es esperable que el tráfico aumente demasiado si no hay comunicaciones cercanas, debido al esquema centralizado que envía en *broadcast* un sólo paquete independiente de la cantidad de nodos. En caso de utilizar *unicast* podría aumentar el tráfico, pero queda como propuesto investigar esa dinámica. La hipótesis propia es que igualmente no debería aumentar hasta tomar los efectos expuestos del caso 12.

	Cliente 1	Cliente 2
Caso1	0.444 <i>Hz</i>	0.442 <i>Hz</i>
Caso2	0.474 <i>Hz</i>	0.474 <i>Hz</i>
Caso3	0.476 <i>Hz</i>	0.481 <i>Hz</i>
Caso4	0.497 <i>Hz</i>	0.495 <i>Hz</i>
Caso5	0.492 <i>Hz</i>	0.494 <i>Hz</i>
Caso6	0.469 <i>Hz</i>	0.471 <i>Hz</i>
Caso7	0.465 <i>Hz</i>	0.464 <i>Hz</i>
Caso8	0.47 <i>Hz</i>	0.471 <i>Hz</i>
Caso9	0.716 <i>Hz</i>	0.719 <i>Hz</i>
Caso10	0.844 <i>Hz</i>	0.845 <i>Hz</i>
Caso11	0.533 <i>Hz</i>	0.54 <i>Hz</i>
Caso12	1.5 <i>Hz</i>	1.5 <i>Hz</i>
Caso13	0.765 <i>Hz</i>	0.763 <i>Hz</i>

Tabla 22: Desviación Máxima de frecuencia en experimentación.

	Cliente 1	Cliente 2
Caso1	0.086 <i>s</i>	0.084 <i>s</i>
Caso2	0.095 <i>s</i>	0.093 <i>s</i>
Caso3	0.088 <i>s</i>	0.085 <i>s</i>
Caso4	0.086 <i>s</i>	0.087 <i>s</i>
Caso5	0.056 <i>s</i>	0.057 <i>s</i>
Caso6	0.064 <i>s</i>	0.066 <i>s</i>
Caso7	0.07 <i>s</i>	0.069 <i>s</i>
Caso8	0.088 <i>s</i>	0.086 <i>s</i>
Caso9	0.197 <i>s</i>	0.197 <i>s</i>
Caso10	-	-
Caso11	0.482 <i>s</i>	0.434 <i>s</i>
Caso12	7.66 <i>s</i>	7.617 <i>s</i>
Caso13	0.825 <i>s</i>	0.816 <i>s</i>

Tabla 23: Retardo promedio.

	PR Cliente 1	PR Cliente 2	PP Cliente 1	PP Cliente 2
Caso1	1487	1483	0	3
Caso2	1477	1479	0	3
Caso3	1477	1475	47	152
Caso4	1429	1343	47	152
Caso5	1475	1281	0	193
Caso6	1433	1339	42	138
Caso7	1501	1501	0	1
Caso8	1479	1479	0	0
Caso9	1497	1497	0	0
Caso10	7	7	0	0
Caso11	1483	1153	0	333
Caso12	529	541	49	38
Caso13	1475	1451	2	27

Tabla 24: Paquetes perdidos. PR es la cantidad de paquetes recibidos correctamente. PP es la cantidad de paquetes perdidos.

Case	Link Type	Noise	Traffic
1	CAN	-	-
2	WIFI	-	-
3	WIFI	3 dB	-
4	WIFI	4 dB	-
5	WIFI	5 dB	-
6	WIFI	6 dB	-
7	WIFI	7 dB	-
8	WIFI	8 dB	-
9	WIFI	9 dB	-
10	WIFI	10 dB	-
11	WIFI	Burst 3-10 dB	-
12	WIFI	-	Continuos
13	WIFI	-	Burst

Tabla 25: Casos de experimentación para MG en el laboratorio.

5. Conclusiones

Los despliegues reales de estaciones de generación a baja escala como las microrredes, y la necesidad de introducir en estos sistemas esquemas inteligentes, autogestionados y robustos de comunicación para una operación eficiente, hace necesario prever las dificultades que pueden surgir utilizando sistemas de comunicación dentro de estas redes. Esta necesidad de tener presente las dinámicas de un sistema real de comunicación, hace que al igual que se realiza investigación teórica o simulada acerca de eventuales escenarios de deterioro de enlace, estas sean complementadas con la experimentación con tecnologías reales sugerentes de funcionalidad. La experimentación real puede entregar datos acerca de cómo estos eventuales escenarios pueden provocarse o cómo se correlacionan con otras variables.

En el trabajo expuesto anteriormente se buscaba evaluar cómo se generaban dinámicas de deterioro de enlace y sus características no determinísticas, para no generar escenarios donde siempre se presentaran los mismos indicadores de calidad de canal. Se propuso un sistema experimental para generar deterioro del canal y que el funcionamiento real de un sistema de comunicación inalámbrica probado como IEEE 802.11 tuviera que realizar la comunicación bajo esas perturbaciones controladas. El sistema de control tendría entonces que verse enfrentado a indicadores no constantes de retardo o pérdida de paquetes para así entregar información sobre la robustez del sistema de control.

Se propuso un sistema que lograba aislar la necesidad de una microrred real para evaluar los efectos de la calidad de canal en la experimentación con un sistema de control secundario. Este sistema de control podría modificarse para utilizar distintas estrategias de control y así acercarse a una evaluación más realista de las situaciones típicas a las cuales se someten en las investigación que se llevan a cabo en la literatura.

De la misma forma, la experimentación con una microrred en el laboratorio hace posible eliminar ciertas asunciones que la simulación hace, para generar resultados mucho más exactos del efecto sobre un despliegue real con comunicación inalámbrica. Es en este sentido que hace sentido ver si el esquema de control es apropiado para un despliegue utilizando esas tecnologías inalámbricas, con un impacto en la necesidad de aumentar costos utilizando tecnología cableada o con un impacto en la potencialidad de escalabilidad de despliegue.

En términos de los resultados obtenidos, se puede decir en generalidad que para IEEE 802.11 se cumple con tener un esquema capaz de recuperarse de cambios de estado de canal. Se puede observar igualmente que el enlace inalámbrico es muchas veces proclive a deterioros en ráfagas, que no hacen posible predecir con exactitud en qué momento ocurrirá la falla de canal, aún para las mismas condiciones generales en el tiempo. Parece importante señalar que la pérdida de paquetes de control es importante en sistemas distribuidos (en caso que un nodo quede incomunicado de

los demás), así como los indicadores de retardo pueden llevar al sistema a respuestas peores que podrían hacer preferible cerrar el enlace de comunicación o descartar los paquetes que presenten este indicador muy alto; igualmente para el esquema centralizado la presencia de un retardo alto hace preferible dejar de usar los paquetes de control con estos valores y descartarlos. El trabajo sugiere que una pérdida mayor al 30 % de paquetes en una situación de cambios de requerimientos de potencia de la red, es suficiente para no lograr un estado estacionario correcto. En el caso del control distribuido DAPI la experimentación muestra que la actualización en vivo de la matriz de adyacencia mejora la robustez ante pérdida de paquetes. El trabajo también muestra que para retardos inferiores a 1 s los sistemas de control usados son capaces de entregar una respuesta de control correcta y no son importantes. Los retardos superiores a 1 s generalmente vienen asociados a un deterioro completo del enlace y aumentan demasiado, haciendo difícil extraer el comportamiento de control con valores de retardos intermedios en el límite del segundo. Este tipo de aumento del retardo viene mayormente asociado con pérdidas de paquetes y esa pérdida prima en la respuesta de control.

En IEEE 802.11 se puede esperar según el trabajo, que sólo para altos índices de tráfico el deterioro de comunicación sea perceptible, aún con un *router* que es adquirible por cualquier particular que desee ponerlo en su casa. De la misma forma, las antenas utilizadas por los generadores no son antenas precisamente pensadas para el efecto de comunicación a grandes distancias, invertir en antenas un poco mejores puede llevar a que la robustez del sistema aumente considerablemente. Las distancias largas podrían llevar a ser un un problema en un despliegue real, y en ese sentido podría encontrarse una relación entre el deterioro de canal con la distancia para ver si las situaciones expuestas en los resultados serían posibles dado que se eligen las antenas correctas para el despliegue.

Finalmente, parece interesante pensar que algunas de las funcionalidad de IEEE 802.11 no fueron usadas, como el cambio de canal ante perturbaciones, lo anterior podría generar una respuesta más rápida de recuperación de la comunicación correcta. Queda pendiente evaluar la emulación de mayores distancias de comunicación, tomando en cuenta como se podría predecir ciertas características de la calidad de canal dado esas distancias o la utilización del tipo de antena. Asimismo, se podría introducir cambios menores al sistema de control, para que mida las estadísticas de retardo o pérdidas dentro de una ventana de tiempo, para evaluar con esto la necesidad de ignorar ciertos paquetes o cambiar tasas de envíos para recuperar la comunicación. Experimentación como la de este trabajo podrían dar datos interesantes sobre que tipo de estas modificaciones al sistema de control podrían ser más efectivos para este sistema de control particular.

Acrónimos

ACK - Acknowledgement
AIFS - Arbitrary InteFrame Space
AP - Access Point
BAN - Business/Building Area Network
CAN - Controller Area Network
CSMA/CA - Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
CTS - Clear to Send
CW - Contention Window
DAPI - Distributed Averaging Proportional-Integral
DCF - Distributed Coordination Function
DFIS - DFC InterFrame Space
DG - Distributed Generetor
DMPC - Distributed Model-Based Predictive Control
EPA - Enhanced Performance Architecture
FAN - Field Area Network
GRC - GNU Radio Companion
HAN - Home Area Networks
IAN - Industrial Area Networks
IFS - InterFrame Space
ISM - Industrial, Scientific and Medical
LTE - Long Term Evolution
LAN - Local Area Network
MG - Microgrid
MGCC - Microgrid Control Center
MGLI - MG Leading Inverter
MPC - Model predictive controller
MIMO - Multiple Input Multiple Output
NIC - Network Interface Card
NAN - Neighbourhood Area Network
OSI - Open System Interconnection
PCF - Point Coordination Function
PI - Proportional-Integral
PIFS - PCF InterFrame Space
PLC - Power Line Communication
PWM - Pulse-Width Modulation
RTS - Request to Send
SCADA - Supervisory Control and Data Acquisition

SDR - Software Defined Radio
SIFS - Short InterFrame Space
SG - Smart Grid
SP - Smith Predictor
TCP - Transmission Control Protocol
UDP - User Datagram Protocol
USR - Universal Software Radio Peripheral
VSG - Virtual Synchronous Generator
WAN - Wide Area Network
WiMAX - Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN - Wireless Local Area Network
WMAN - Wireless Metropolitan Area Network

BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Hegde, “Microgrid market to witness over 19% growth from 2017 to 2024.” <https://markets.businessinsider.com/news/stocks/microgrid-market-to-witness-over-19-growth-from-2017-to-2024-1012919460>. Accessed: 2019-05-20.
- [2] L. Cozzi, “Population without access to electricity falls below 1 billion.” <https://www.iea.org/newsroom/news/2018/october/population-without-access-to-electricity-falls-below-1-billion.html>. Accessed: 2019-05-21.
- [3] O. M. L. et al., “Renewable energy sources microgrid design for rural area in south africa,” in *ISGT*, 2014. doi: <https://doi.org/10.1109/ISGT.2014.6816378>.
- [4] D. S. J. Rosa, P. A. Madduri, “Efficient microgrid management system for electricity distribution in emerging regions,” in *IEEE Global Humanitarian Technology Conference*, 2012. doi: <https://doi.org/10.1109/GHTC.2012.63>.
- [5] Y. V. M. et al., “Sizing energy storage to accommodate high penetration of variable energy resources,” *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 3, no. 1, pp. 34 – 40, 2012. doi: <https://doi.org/10.1109/TSTE.2011.2164101>.
- [6] D. E. O. et. al, “Trends in microgrid control,” *IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID*, vol. 5, no. 4, pp. 1905 – 1919, 2014. doi: <https://doi.org/10.1109/TSG.2013.2295514>.
- [7] A. B.-A. et al., “Microgrid communications: State of the art and future trends,” in *International Conference on Renewable Energy Research and Application (ICRERA)*, 2014. doi: <https://doi.org/10.1109/ICRERA.2014.7016491>.
- [8] X. Z. et al., “Scada system for islanded dc microgrids,” in *IECON - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2017. doi: <https://doi.org/10.1109/IECON.2017.8216449>.
- [9] E. L. et al., “Scada development for an islanded microgrid,” in *International Conference on Renewable Energy Research and Application (ICRERA)*, 2015. doi: <https://doi.org/10.1109/SIITME.2015.7342314>.
- [10] D. E. O. et. al, “Evaluation of zigbee wireless sensor networks under high power disturbances,” *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, vol. 9, no. 1, 2014. doi:10.1109/TPWRD.2013.2290300.

- [11] M. A. S. et. al, “Zigbee-based communication system for data transfer within future microgrids,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, no. 5, pp. 2343 – 2355, 2014. doi:<https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2402678>.
- [12] H. E. . K. Grayaa, “Smart micro grid power with wireless communication architecture,” in *International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM)*, 2014. doi: <https://doi.org/10.1109/CISTEM.2014.7077037>.
- [13] N. Hatziargyriou, *Microgrids Architectures and Control*. The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, PO19 8SQ, United Kingdom: John Wiley and Sons Ltd, 2014.
- [14] V. K. Sachidananda Sen, “Microgrid control: A comprehensive survey,” *Annual Reviews in Control*, vol. 45, pp. 118–151, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2018.04.012>.
- [15] J. W. S.-P. et. al, “Secondary frequency and voltage control of islanded microgrids via distributed averaging,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 11, pp. 7025 – 7038, 2015. doi: <https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2436879>.
- [16] J. M. G. et. al, “Hierarchical control of droop-controlled ac and dc microgrids — a general approach toward standardization,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 1, pp. 158 – 172, 2011. doi: <https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2066534>.
- [17] U. B. T. et. al, “A review of droop control techniques for microgrid,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 76, pp. 717–727, 2017. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.028>.
- [18] J. L. et. al., “A novel distributed control strategy for optimal dispatch of isolated microgrids considering congestion,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 10, pp. 6595 – 6606, 11 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSG.2019.2908128>.
- [19] S. Banerji and R. Chowdhury, “On ieee 802.11: Wireless lan technology,” *International Journal of Mobile Network Communications & Telematics*, vol. 3, no. 4, 2013.
- [20] Tektronix, “Wi-fi: Overview of the 802.11 physical layer and transmitter measurements.” Primer. Available in <https://www.tek.com/document/primer/wi-fi-overview-80211-physical-layer-and-transmitter-measurements>.
- [21] H. Zhai, Y. Kwon, and Y. Fang, “Performance analysis of ieee 802.11 mac protocols in wireless lans,” *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 4, pp. 917–931, 12 2004.
- [22] IEEE 802.11 Working Group, *Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*. ANSI/IEEE Std. 802. Sep. 1999.
- [23] T. Ta, “Brief survey of ieee 802.11 (mac),”

- [24] S. R. Santosh Kumar, “Survey on transport layer protocols: Tcp & udp,” *International Journal of Computer Applications*, vol. 46, no. 7, pp. 20 – 25, 2012.
- [25] K. B. C. Mavrokefalidis, D. Ampeliotis, “A study of the communication needs in micro-grid systems,” in *2017 XXXIInd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS)*, 2017. doi: <https://doi.org/10.23919/URSIGASS.2017.8104979>.
- [26] K. B. C. Mavrokefalidis, D. Ampeliotis, “Review on microgrid communications solutions: a named data networking – fog approach,” in *2017 16th Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop (Med-Hoc-Net)*, 2017. doi: <https://doi.org/10.1109/MedHocNet.2017.8001656>.
- [27] K. G. Habib Elkhorchani, “Smart micro grid power with wireless communication architecture case of a hybrid power system pv/wind/ battery,” in *International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM)*, 2014. doi: <https://doi.org/10.1109/CISTEM.2014.7077037>.
- [28] L. M. J. M. G. P. P. P. Danzi, C. Stefanovic, “On the impact of wireless jamming on the distributed secondary microgrid control,” in *2016 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, 2016. doi: <https://doi.org/10.1109/GLOCOMW.2016.7848980>.
- [29] Y. X. H. L. Rukun Mao, Huijuan Li, “Wireless communication for controlling microgrids: Co-simulation and performance evaluation,” in *2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, 2013. doi: <https://doi.org/10.1109/PESMG.2013.6673056>.
- [30] P. X. L. Shichao Liu, Xiaoyu Wang, “Impact of communication delays on secondary frequency control in an islanded microgrid,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 4, pp. 2021 – 2031, 2015. doi: <https://doi.org/10.1109/TIE.2014.2367456>.
- [31] D. S. J. M. G. C. Ahumada, R. Cárdenas, “Secondary control strategies for frequency restoration in islanded microgrids with consideration of communication delays,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, no. 3, pp. 1430 – 1441, 2016. doi: <https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2461190>.
- [32] J. S. G. et. al., “Distributed predictive control for frequency and voltage regulation in microgrids,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. PP, pp. 1–1, 8 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSG.2019.2935977>.
- [33] J. S. Gómez, *Diseño de estrategias de control predictivo distribuido para el nivel secundario de micro-redes eléctricas*. PhD thesis, Universidad de Chile, 2017.

- [34] S. F. et. al., “Experimental study on performance of ieee 802.11n and impact of interferers on the 2.4 ghz ism band,” pp. 47–51, 06 2010. DOI: <https://doi.org/10.1145/1815396.1815408>.
- [35] N. Instruments, “Usrc-2922. dispositivo de radio definido por software usrp.” <https://www.ni.com/es-cl/support/model.usrp-2922.html>.
- [36] G. Radio, “Gnu radio companion wiki.” <https://wiki.gnuradio.org/index.php/GNURadioCompanion>.
- [37] I. Serban, “A control strategy for microgrids: Seamless transfer based on a leading inverter with supercapacitor energy storage system,” *Applied Energy*, vol. 221, pp. 490–507, 7 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.122>.