

Análisis y Simulación de Estrategias Distribuidas para el Control de Frecuencia en Micro Redes  
Eléctricas

Jose Manuel Arengas Acosta

Trabajo de Grado para Optar por el Título de  
Ingeniero Electricista

Director

Juan Manuel Rey López

Doctor en Ingeniería Electrónica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2021

### **Dedicatoria**

A Dios por darme la sabiduría para cumplir mis sueños

A mis Padres, Noris Rosa y Cristo por su apoyo incondicional en todo el desarrollo de este proceso, siempre estuvieron allí, en todos los altibajos vividos.

### **Agradecimientos**

A la Universidad Industrial de Santander y en especial a la escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, por brindarme una educación de alta calidad.

A mi director Juan Manuel López Rey, por darme la confianza y permitirme realizar este trabajo de grado bajo su dirección, por sus enseñanzas, sus críticas y su motivación para sacar adelante este proyecto.

A mis profesores de todo el proceso de formación, puesto que de cada uno de ellos aprendí invaluable enseñanzas académicas y de vida.

**Tabla de Contenido**

Introducción .....	12
1. Objetivos .....	13
1.1 Objetivo General .....	14
1.2 Objetivos Específicos.....	14
2. Micro Redes Eléctricas y Generación Distribuida.....	14
2.1 Arquitectura Básica de una Micro Red (MR) .....	16
2.2 Modos de Operación de MR.....	17
2.3 Control de MR .....	18
2.4 Inversores .....	23
2.5 Estructura de Comunicaciones para MR.....	25
3. Método .....	28
3.1 Modo de Operación de la Capa Primaria .....	29
3.2 Modo de Operación de Capa Secundaria.....	32
3.3 Estrategias Distribuidas .....	35
3.3.1 Estrategia del Promedio .....	36
3.3.2 Estrategia del Consenso .....	38
3.4 Implementación de las Estrategias .....	40
3.4.1 Implementación Algebraica de las Estrategias .....	40
3.4.2 Implementación en Simulink de las estrategias .....	46

3.5 Escenarios de operación.....	52
4. Simulación y Análisis de los Resultados .....	53
4.1 Discusión de los resultados.....	64
5. Conclusiones.....	67
Referencias Bibliográficas .....	68
Apéndices.....	73

**Lista de Figuras**

Figura 1. Estructura de Control Completa de la MR. ....	19
Figura 2. Arquitectura de Control Centralizada para MR.....	20
Figura 3. Arquitectura de Control Distribuida para MR.....	22
Figura 4. Arquitectura de Control Jerárquico. ....	23
Figura 5. Inversor.....	24
Figura 6. Inversor Trifásico. ....	25
Figura 7. DG1 Envía información.                      Figura 7a. DGj Recibe información.....	26
Figura 8. Metodología: Revisión Bibliográfica. ....	28
Figura 9. Curva Característica de Droop Tradicional. (Ec.droop).....	30
Figura 10. Funcionamiento Capa Secundaria para Control de Frecuencia.....	32
Figura 11. Estrategia del Promedio.....	38
Figura 12. Diagrama de Comunicación de Cada DG de la MR.....	41
Figura 13. Diagrama en Simulink de la MR.....	46
Figura 14. Diagrama en Simulink módulo de Potencia de la MR. ....	47
Figura 15. Diagrama en Simulink de un DG. ....	47
Figura 16. Diagrama en Simulink módulo de control.....	49
Figura 17. Diagrama en Simulink control de un DG.....	49
Figura 18. Diagrama en Simulink control de un DG.....	50
Figura 19. Diagrama en Simulink estrategia distribuida para control de la frecuencia en el control secundario de un DG -PROMEDIO. ....	51
20. Diagrama en Simulink de estrategia distribuida para control de la frecuencia en el control secundario de un DG - CONSENSO.....	51

Figura 21. Configuración de Enlaces de Comunicación.....	53
Figura 22. Frecuencia-Estrategia Consenso Modo Ideal. ....	55
Figura 23. Potencia-Estrategia Consenso Modo Ideal.....	55
Figura 24. Frecuencia-Estrategia Promedio Modo Ideal. ....	56
Figura 25. Potencia-Estrategia Promedio Modo Ideal.....	56
Figura 26. Graficas de frecuencia - Técnica Consenso-Escenario Pérdida de Datos. ....	59
Figura 27. Graficas de Frecuencia - Técnica Consenso-Escenario Retraso envío. ....	60
Figura 28. Graficas de frecuencia - Técnica Consenso-Escenario Salida de línea. ....	61
Figura 29. Graficas de frecuencia - Técnica Promedio-Escenario Pérdida de Datos. ....	62
Figura 30. Graficas de frecuencia - Técnica Promedio-Escenario Retraso envío. ....	63
Figura 31. Graficas de frecuencia - Técnica Promedio-Escenario Salida de línea. ....	64
Figura 32. Nivel de impacto de las fallas en las estrategias implementadas según la configuración seleccionada. ....	66

**Lista de Apéndices**

Apéndice A: Graficas de potencia activa del caso de estudio 2. ....	73
Apéndice B. Graficas de potencia activa del caso de estudio 3.....	74
Apéndice C. Graficas de potencia - Técnica Consenso- Escenario salida de línea. ....	75
Apéndice D. Graficas de potencia - Técnica Promedio- Escenario Pérdida de Datos. ....	76
Apéndice E. Graficas de potencia - Técnica Promedio- Escenario Retraso envío. ....	77
Apéndice F. Graficas de potencia - Técnica Promedio- Escenario Salida de línea.....	78

**Lista de Tablas**

Tabla 1. Parámetros eléctricos módulo de potencia de la microrred. .... 47

## Resumen

**Título:** Análisis y Simulación de Estrategias Distribuidas para el Control de Frecuencia en Micro Redes Eléctricas \*

**Autor:** Jose Manuel Arengas Acosta \*\*

**Palabras Clave:** Control jerárquico, capa secundaria, control con comunicaciones, control de frecuencia, microrred eléctrica aislada.

### Descripción:

En el presente trabajo de grado se evalúan dos estrategias de control distribuidas con comunicaciones (*promedio y conceso*), aplicadas a la capa secundaria para el control de la frecuencia en las microrredes eléctricas aisladas.

En concordancia, se efectúa una revisión bibliográfica en torno a estrategias de control en microrredes, también se describen las dos estrategias evaluadas, se implementan sus modelos en Simulink de Matlab y se simulan diferentes escenarios de operación teniendo en cuenta posibles fallos que puedan llegar a presentarse en las comunicaciones. Adicional a lo anterior, se obtiene el comportamiento de la acción de control de las estrategias en cada caso y se hizo un análisis cualitativo sobre el nivel de impacto de cada escenario sobre las estrategias.

De la discusión de los resultados, surgieron ambas estrategias; las cuales cumplen con el objetivo de restauración del desvío en la frecuencia, además de evidenciar que su rendimiento operativo es robusto tanto ante cambios del valor de referencia de la frecuencia como ante operación con distintos tipos de fallos en las comunicaciones.

Finalmente, se presentan los resultados del análisis cualitativo clasificando en tres categorías (bajo, medio y alto) el nivel de impacto de las fallas implementadas en el rendimiento de la acción de control de cada estrategia.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingeniería Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Juan Manuel Rey López. Doctor en Ingeniería Electrónica.

### Abstract

**Title:** Analysis and Simulation of Distributed Strategies for Frequency Control in Electrical Micro Grids \*

**Author:** Jose Manuel Arengas Acosta\*\*

**Keywords:** Hierarchical control, secondary layer, control with communications, frequency control, islanded electrical microgrid.

### Description:

In this degree work, the performance under communication failures of two distributed frequency control strategies (*average and consensus*) applied to the secondary control layer of isolated microgrids is evaluated. For this purpose, a specialized literature review related to microgrids control strategies is performed to selected and describe two strategies, which are modelled and implemented in Matlab/Simulink. Several operation scenarios considering communications failures are simulated, including communication packages losses, delays and distributed lines failures. Also, two communications architectures are tested: an all-to-all scheme and a ring scheme, for a microgrid with six distributed generators. A qualitative analysis is done to evaluate the impact of the communications failures over the performance of the strategies and schemes, classifying the effects in three categories: low, medium and high. Finally, conclusions about the robustness of each control strategy and communications scheme are presented.

---

\* Degree Work

\*\* Faculty of Physical Mechanical Engineering, School of Electrical, Electronics and Telecommunications Engineering School of Electrical, Electronics and Telecommunications Engineering. Advisor: Prof. Juan Manuel Rey, PhD in Engineering.

## Introducción

Las microrredes eléctricas (MR) son pequeños sistemas de distribución que incorporan fuentes de generación de energía eléctrica de diversas naturalezas (eólica, fotovoltaica, hidrocinética, biomasa, etc.). Las MR tienen la capacidad de operar en forma interconectada a la red eléctrica principal o bien, pueden operar en condición aislada, promoviendo un enfoque de control descentralizado que garantiza la compartición de potencia y la regulación de la frecuencia de operación, haciendo que se obtengan mejores niveles de calidad, seguridad y confiabilidad.

Dentro del estado del arte, se han presentado distintas estrategias de control para microrredes eléctricas, principalmente basadas en las comunicaciones y en el control jerárquico que divide los objetos de control en capas. Por tanto, en este proyecto se evalúan dos estrategias distribuidas aplicadas en la capa secundaria del control de una microrred eléctrica para el control de frecuencia, mediante la simulación en Simulink de Matlab de diferentes escenarios de operación y el análisis del comportamiento del rendimiento operativo del sistema para los casos de estudio. Esto se hace mediante una revisión bibliográfica del estado del arte sobre estrategias de control en microrredes, teniendo en cuenta las siguientes palabras claves: control jerárquico (capa secundaria), con comunicaciones, control de frecuencia, microrred eléctrica aislada; lo que permite describir, seleccionar y evaluar las dos estrategias de control distribuidas con comunicaciones aplicadas en la capa secundaria para el control de la frecuencia.

Luego, se modela una microrred eléctrica aislada en Simulink de Matlab junto con las estrategias seleccionadas y descritas. Posteriormente, se realiza la simulación y el análisis de distintos escenarios de operación propuestos, que nos permite analizar el efecto de dichos escenarios sobre las estrategias de control de frecuencia seleccionadas, es decir, el nivel de impacto desde un punto de vista cualitativo de los escenarios en la operación del sistema con respecto al

control de la frecuencia. Por último, se presentan las conclusiones generadas a partir del desarrollo de este proyecto.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Evaluar dos o más estrategias distribuidas aplicadas en la capa secundaria del control de una microrred eléctrica para el control de frecuencia, mediante la simulación en Simulink de Matlab de diferentes escenarios de operación y el análisis del comportamiento del rendimiento operativo del sistema para los casos de estudio.

### **1.2 Objetivos Específicos**

1. Identificar y describir al menos dos estrategias distribuidas para la capa secundaria que controlen la frecuencia en microrredes eléctricas.
2. Seleccionar e implementar el modelo de las estrategias distribuidas en Simulink de Matlab.
3. Proponer y simular diferentes escenarios de operación del sistema y obtener el comportamiento de las características de operación para las estrategias distribuidas seleccionadas.
4. Analizar los resultados del comportamiento de la microrred eléctrica, evaluando y comparando las características operativas y su rendimiento para cada escenario planteado.

## **2. Micro Redes Eléctricas y Generación Distribuida**

Para el desarrollo del presente trabajo de grado, es necesario comprender varios de los conceptos fundamentales relacionados a la Generación Distribuida (GD) y las Micro Redes Eléctricas, además de su funcionamiento y algunos de los elementos que las conforman. En ese sentido, inicialmente, se realiza una búsqueda de estudios previos que investiguen en torno a la GD, que es una fuente de energía eléctrica que se caracteriza por estar conectada directamente a la red de distribución o lo más cercano al medidor del usuario final, esta fuente sirve de apoyo para suplir la demanda del sistema de forma localizada, integrando distintas tecnologías de generación

que pueden ser o no renovables; ya sean turbinas de gas, microturbinas, motores alternativos, pilas de combustión, energía minihidráulica, eólica, solar, etc. (Trebolle, 2006).

La integración de la GD, *“puede presentar impactos positivos (...) en la red. (...) dentro de los que se pueden encontrar mejoras en los perfiles de tensión, reducción de pérdidas de energía en la red (debido al transporte) y descongestión de las líneas”* (Grisales et al, 2017, p.158).

Por lo mismo, se permite una rápida y fácil expansión de la generación debido a su simplicidad para incorporarse al sistema. Por otro lado, también es importante referir algunas concepciones en torno a Micro Red (MR) Eléctrica; la cual se define como:

Sistema de generación eléctrica bidireccional que permite la distribución de electricidad desde los proveedores hasta los consumidores, utilizando tecnología digital y favoreciendo la integración de las fuentes de generación de origen renovable, con el objetivo de ahorrar energía, reducir costos e incrementar la fiabilidad. (Prieto & Peña, 2018, p. 9).

También se entienden como un *“sistema compuesto por generadores y cargas, capaz de autoabastecerse y funcionar de manera autónoma de la red de distribución eléctrica”* (González et al, 2017, p. 93). En efecto, el sistema permite independencia de la red; las MR son:

Sistemas de distribución eléctrica que contienen cargas y fuentes de energía distribuidas (tales como generadores distribuidos, dispositivos de almacenamiento, o cargas controlables) que pueden funcionar de manera coordinada y controlada, mientras se conectan a la red o en modo aislado. (González et al, 2017, p. 94).

Según Mosquera (2014), son *“sistemas pequeños y autónomos con una combinación de tecnologías de energías renovables y convencionales adaptadas a cada caso particular, que permitan a individuos, comunidades y empresas generar su propia electricidad, así como vender los excedentes a la red principal”* (p. 22). Por ende, son muy versátiles y útiles.

Conjunto de cargas y pequeños generadores que operan como un sistema eléctrico controlable por sí mismo, que provee energía eléctrica y de calor dentro de su área (...) una microrred puede ser considerada como una “célula” controlable dentro del sistema eléctrico de potencia (...) como una pequeña fuente de potencia o de servicios auxiliares, apareciendo como un generador virtual al resto del sistema interconectado”. (Barrera, 2016, p. 4)

En general, las teorías apuntan a que una MR puede presentarse como una agregación de fuentes de generación de energía eléctrica de diversa naturaleza (GD), además de elementos de almacenamiento y de gestión de carga. De modo particular, las MR permiten aprovechar y hacer uso eficiente de los recursos renovables existentes en el territorio y tienen la ventaja de ser más resiliente que los sistemas eléctricos convencionales, esto significa que pueden aumentar su flexibilidad y adaptabilidad ante eventos perturbadores, lo que incide directamente en las características operativas propias del sistema.

### **2.1 Arquitectura Básica de una Micro Red (MR)**

Ahora bien, a partir de los postulados de Zhangjie (2011), Lasseter (2002), Hatziargyriou (2007), Green y Podanovic (2007) y Abbas et al (2002), se obtiene la estructura o arquitectura básica de una MR eléctrica típica, la cual está formada por fuentes de GD de distinta naturaleza y características, cargas (sensibles, no sensibles y térmicas), líneas de interconexión y en algunos casos sistemas de acumulación de energía (bancos de baterías, bancos de condensadores, entre otras).

Como refiere Espina (2017), las MR eléctricas pueden ser catalogadas en dos grandes grupos: MR eléctricas de corriente alterna (AC) y MR eléctricas de corriente continua (DC). Esta clasificación principalmente se debe al tipo de tensiones al que pueden operar AC o DC respectivamente, sin embargo, la mayoría de las cargas en la red operan en corriente alterna.

Como indica Anzures (2018), las MR de CA, son aquellas que entregan al sistema eléctrico la generación en CA, debido a la estandarización ya existente del sistema eléctrico tradicional y a la presencia de las cargas eléctricas en nuestro medio, las cuales en su mayoría, trabajan en CA.

Son las más comunes por los beneficios que este tipo generación ofrece, entre los cuales, se destacan tanto el aumento de la capacidad de transporte de la energía generada, como la reducción de las pérdidas en el transporte y el cubrimiento de la mayoría de las cargas.

El mismo autor señala que las MR de CC, son aquellas que suministran al sistema de distribución la generación en CC, bajo un esquema de generación, almacenamiento y suministro generalmente conectados a un bus de CC evitando la inversión de la corriente. Usualmente proveen la energía necesaria especialmente para las cargas que trabajan en CC. Sin embargo, con el uso de diferentes dispositivos de conversión (convertidores/inversores), las MR de CA, pueden entregar CC y viceversa.

## **2.2 Modos de Operación de MR**

Las MR eléctricas pueden operar primordialmente en dos esquemas básicos de conexión, el que funciona conectado a la red principal de distribución/transmisión (D/T) (Luo, 2012) y el que funciona desconectado de la red principal (modo aislado) (Pogaku, 2017), (Yaoqin, 2011), (Chandorkar, 1993).

Las MR conectadas a la red principal operan de forma acoplada (sincronizada) al sistema de distribución tradicional (Pedrasa & Spooner, 2006), recibiendo energía tanto de la red eléctrica, como de las fuentes de generación (Brearley, 2017). En ese sentido, la mayoría de sus dinámicas (tensión, frecuencia, etc.) quedan establecidas por la red principal la cual es dominante respecto a la GD.

En consecuencia, no es necesario que la MR regule estos parámetros (Pogaku, 2017). Así pues, las unidades de generación distribuida usualmente se encargan de entregar potencia a los consumos (Lasseter, 2002).

Las MR aisladas, operan de manera autónoma, es decir, separadas de la red principal. En consecuencia, toda la dinámica de las variables eléctricas (potencias, tensión, frecuencia, etc.), debe ser gestionada y regulada por la MR (Pogaku, 2017).

De este modo, la GD debe ser capaz de abastecer la potencia demandada por los consumos en todo momento y, en caso de existir excedentes, estos se pueden disipar o almacenar en bancos de baterías o en algún otro tipo de elemento de almacenamiento (Green & Podanovic, 2007). Lo anterior, afecta considerablemente la gestión de control de la MR y le brinda mayor importancia y dependencia puesto que, relativamente, se tienen pocas micro fuentes de baja inercia; las cuales operan con frecuencia variable y son susceptibles a cambios rápidos y repentinos ante perturbaciones (Yaoqin, 2011).

Es por esto por lo que es común el uso de interfaces de electrónica de potencia (como inversores) para regular la frecuencia, la tensión y/o la intensidad de corriente de las señales entregadas a la red (Kim et al, 2011). Por lo tanto, el control local de la frecuencia es uno de los principales temas para considerar durante el modo de operación *aislada* de las MR eléctricas.

Al respecto, cabe resaltar que se han desarrollado numerosos estudios de investigación sobre MR en este modo de operación (aislada), especialmente dirigidos a las técnicas gestión de control (Dobakhshari, 2011) (Mahmoud, 2016); y a la a regulación de frecuencia y tensión (Bevrani, 2016), (Babazadeh, 2011).

### **2.3 Control de MR**

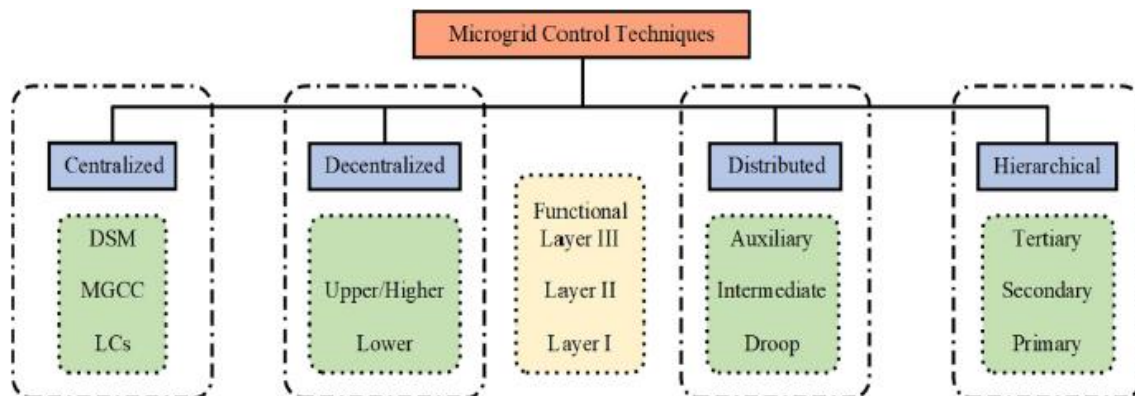
No obstante, los sistemas de control usados para los sistemas eléctricos convencionales no son adecuados para MR eléctricas; en efecto, para que una MR opere de manera óptima, es necesario identificar claramente el tipo de operación y diseñar un sistema de control avanzado

exclusivo para cada aplicación, dependiendo de sus características propias, en tanto existe una gran diversidad de modos de operación y configuraciones posibles (Green & Podanovic, 2007).

Ahora bien, el control de una MR eléctrica, eventualmente implica ciertos procesos que deben ser realizados en coordinación; para ello, se recopila y procesa la información mediante las fuentes y mecanismos disponibles. Para Kaur et al (2016), dentro de las principales tareas o procesos, se resalta la gestión de la demanda de carga y generación eléctrica, control de nivel de tensión y frecuencia, control de potencia activa/reactiva que dependen primordialmente del modo de funcionamiento.

En el caso de MR conectadas a la red, las variables de tensión y frecuencia son impuestas por la red principal, mientras que en modo aislado se requiere que la MR también gestione estas variables (Espina, 2017). Así mismo, es importante señalar que no existe una estrategia de control única para una MR, ya que depende de la estructura, los componentes, el modelo, la configuración y necesidad específica de esta. Además, el control para MR eléctricas puede catalogarse en cuatro grupos: centralizado, descentralizado, distribuido y jerárquico. La siguiente figura, muestra la estructura de control completa de la MR. (Tomada de Sen & Kunar, 2018).

**Figura 1. Estructura de Control Completa de la MR.**

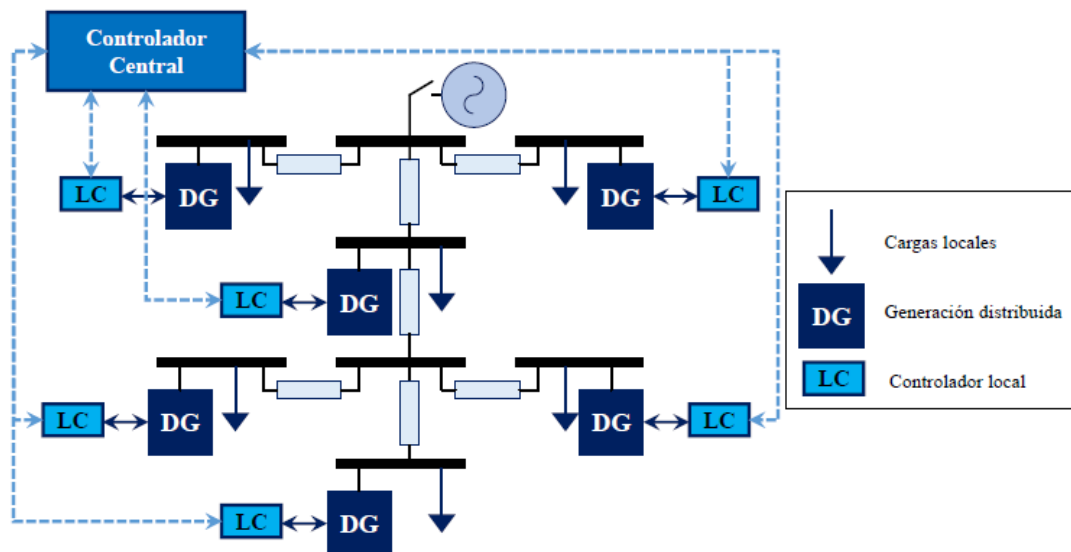


La arquitectura de control centralizada, corresponde a la estructura de control más comúnmente utilizada en las microrredes de pequeña escala, su funcionamiento se basa en la

acción de un controlador central (*Microgrid central controller, MGCC*) que se encarga de modificar las consignas de control de los controladores locales (*Local Controller, LC*) presentes en las unidades de GD (Espina, 2017).

Asimismo, es necesario que la red de comunicaciones existente entre el controlador central y los controladores locales funcione correctamente para obtener una operación óptima de la MR. Lo anterior, se ejemplifica en la siguiente figura (tomada de Espina, 2017, p. 9).

Figura 2. Arquitectura de Control Centralizada para MR.



Básicamente la forma en que opera el control centralizado, según Sen y Kunar (2018), inicia con la medición de la información de las variables globales con ayuda de los controladores locales (LC) en cada GD y el envío de las señales censadas al controlador central (MGCC) de la MR, por medio de un canal de comunicación de alta velocidad.

El MGCC procesa la información y calcula el valor de las variables para garantizar el funcionamiento óptimo de la MR, estas nuevas señales de control o puntos de ajuste hallados son enviados nuevamente a cada MGCC a través del mismo canal de comunicación. Los LC ajustan sus respuestas según la nueva orden recibida y garantizan el correcto funcionamiento de la MR.

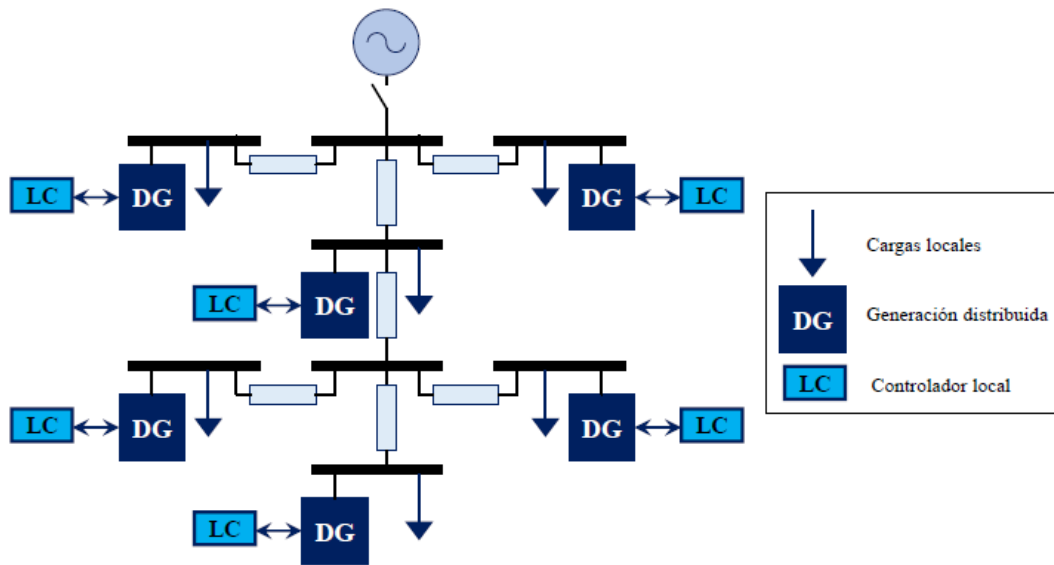
Por lo tanto, la implementación del control centralizado se lleva a cabo en una estructura de tres capas: LC, MGCC y la gestión de los GD.

Por otro lado, el segundo tipo de arquitectura, es el método de control descentralizado, no es necesario el uso del MGCC y existen solamente LC que contienen algoritmos predefinidos incorporados que calculan las nuevas señales de control a nivel local, teniendo en cuenta el Sistema Multi-Agente (MAS).

Este esquema de control tiene principalmente una arquitectura de dos etapas, las cuales en su mayoría, son denominadas controladores de nivel superior/alto e inferior (Sen & Kunar, 2018). El control descentralizado suele aplicarse a las MR de alto nivel con gran número de componentes (cargas y GD) en los que la estructura de control centralizado sería de naturaleza lenta, debido al manejo de enormes datos en un solo lugar.

Específicamente, el control distribuido es una alternativa mejorada de control que incorpora las ventajas de los dos métodos anteriores (centralizado y descentralizado) basado en MAS. La siguiente figura muestra la arquitectura de control distribuida, que pertenece al tercer tipo de control (Sen & Kunar, 2018) y es una derivación del control descentralizado.

Figura 3. Arquitectura de Control Distribuida para MR.



En este método, cada LC es considerado como un agente inteligente ya que hace uso de la información propia y la de sus vecinos, en efecto, cada LC puede comunicarse con sus vecinos (a través de canales de bajo ancho de banda) para poder aplicar algunas ventajas de la arquitectura centralizada, sin necesidad de un intermediario único como el MGCC.

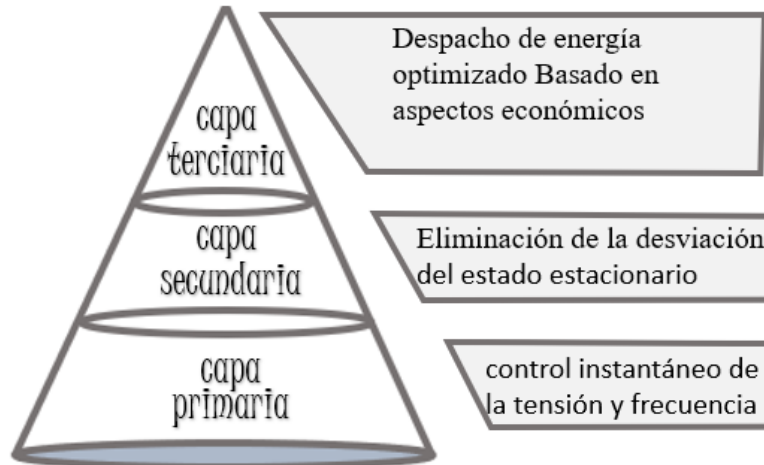
Es decir, en primer lugar, cada dispositivo (LC) censa su propia señal y además recibe información de las señales de los LC adyacentes (vecinos), los dispositivos (LC) se controlan con base en las mediciones locales y a la información de las variables de control globales recibidas de sus vecinos, para una ejecución óptima del sistema. Adicionalmente, no sólo se preserva la autonomía de cada LC, sino que, de manera simultánea, se logra la optimización global dividiendo un gran problema en varios *subproblemas*.

El MAS es la herramienta más usada en la implementación de este esquema donde cada controlador es considerado como un agente inteligente. También tiene una estructura de tres capas: caída/baja, secundaria/intermedia y auxiliar/superior. (Sen & Kunar, 2018).

La cuarta estructura, es la más utilizada por su facilidad y pertenece al método de control jerárquico, el cual se basa en la diferencia de escalas de tiempo de los diversos requisitos de control

(Sen & Kunar, 2018), se deriva de la norma ANSI/ISA-95 (Sociedad Internacional de Automatización), por lo que el control jerárquico está basado y tiene por objetivos la interoperabilidad entre distintos sistemas de control. También se divide en una estructura de tres capas: primaria, secundaria y terciaria.

**Figura 4. Arquitectura de Control Jerárquico.**



La capa primaria está destinada al control instantáneo de las variables de estado del nivel del dispositivo de los MG. La capa de control secundario es más lenta para eliminar las desviaciones de estado estacionario que surgen de la acción de la capa primaria. La capa terciaria o auxiliar es la más lenta que la capa secundaria y gestiona el flujo de energía/intercambios con la red de suministro superior. Implementa el despacho económico y la optimización del sistema general de MG (Sen & Kunar, 2018). Las estrategias de control distribuido y jerárquico se complementan entre sí. Ambas necesitan el mismo tipo de infraestructura de comunicación y control.

## 2.4 Inversores

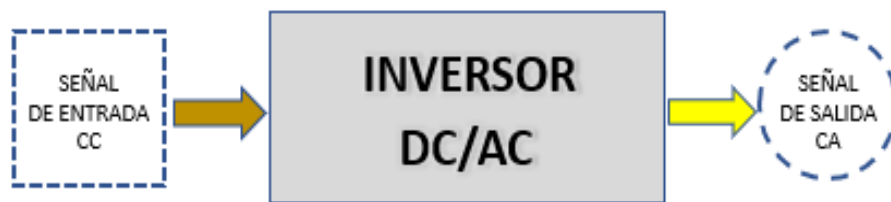
Para la correcta operación de las MR, se requiere de convertidores basados en electrónica de potencia, los cuales se pueden clasificar según el diseño y las características operativas de la

MR. En el caso de MR eléctricas de AC, se emplean en gran medida los inversores y se consideran parte fundamental de su operación, dado que:

Los inversores son una pieza fundamental en el funcionamiento de una microrred, ya que estos elementos son los que permiten, entre otros, que las unidades generadoras que normalmente operan con frecuencia y/o tensión variable (generadores eólicos, etc.), o con corriente continua, se puedan conectar a la MR y puedan interactuar de forma correcta con las otras unidades que componen el sistema. (Espina, 2017, p. 10).

El objetivo principal del inversor es “convertir una señal de corriente continua (*Direct Current*, DC) a la entrada, en corriente alterna (*Alternating Current*, AC) a su salida” (Espina, 2017, p. 10), lo cual es esencial en el funcionamiento de la microrred de CA, puesto que permite la entrega de la energía demandada en AC y de este modo alimentar las cargas con estas especificaciones de alimentación. La siguiente figura, lo ilustra:

Figura 5. Inversor.



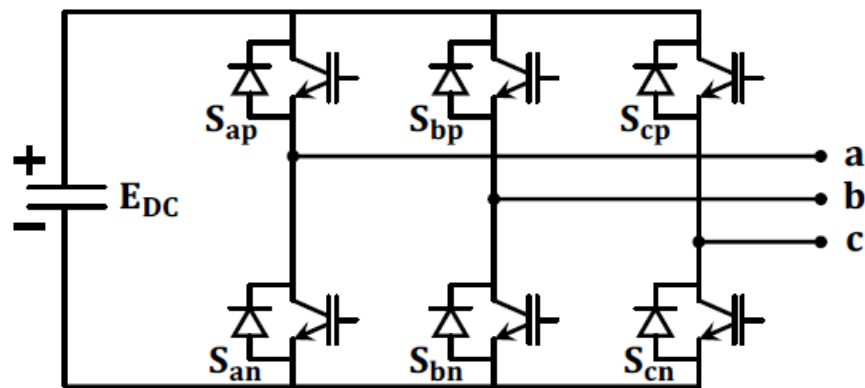
Con estas técnicas de modulación se puede obtener la forma de onda deseada a la salida controlando parámetros como la amplitud y la frecuencia, “para generar la(s) onda(s) a la salida del inversor, se utilizan diferentes técnicas de modulación; (...) la modulación por ancho de pulsos (o PWM, *Pulse Width Modulation*) (...) y la modulación por vectores espaciales (o SVM, *Space Vector Modulation*)” (Espina, 2017, p. 10).

Por otro lado, existen dos modos básicos de operación de los inversores “los llamados inversores fuente de tensión (o VSI, *Voltage Source Inverter*) en que la variable controlada es la tensión y los denominados inversores fuente de corriente (o CSI, *Current Source Inverter*) en los que se controla la corriente” (Espina, 2017, pp. 10-11). Los primeros, son modelados como fuentes

de tensión y generalmente usados en microrredes aisladas, mientras los segundos son modelados como fuentes de corriente y usualmente son usados en MR conectadas a la red.

Para el presente proyecto, se toma en cuenta el inversor de tres piernas, el cual se caracteriza principalmente por poseer una entrada que corresponde a una fuente de tensión de corriente continua y una salida que brinda una señal trifásica de AC, tal como se ilustra en la figura 6. (Tomada de Espina, 2017, p. 11).

Figura 6. Inversor Trifásico.



## 2.5 Estructura de Comunicaciones para MR

Como se mencionó anteriormente, las comunicaciones son parte esencial del control distribuido, por lo que la implementación de las estrategias distribuidas para el control de frecuencia de MR aisladas requiere también de un esquema de comunicación en el cual, por medio de una matriz de  $C$  (también llamada matriz de adyacencia), se codifiquen los enlaces de comunicación entre los DG de la MR, además se tiene un vector  $A$  que indica si los generadores están activos o no.

De acuerdo con el esquema de conexión de comunicaciones que se tenga entre los DG pertenecientes a la MR, se puede construir una matriz de conexiones  $C$ , la cual codifica la capa de comunicaciones, para indicar -por medio de enlaces de interconexión-, entre cuales DG hay compartición de información.

Figura 7. DG1 Envía información.

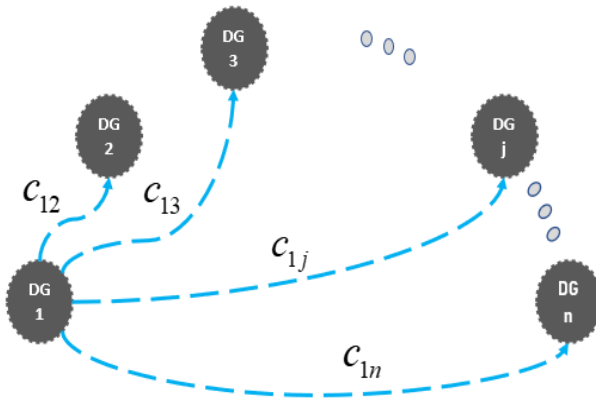
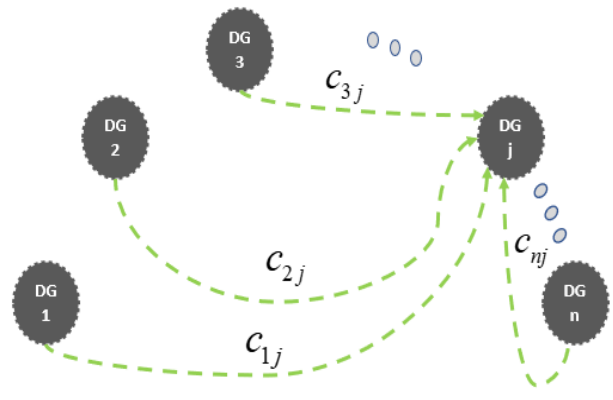


Figura 7a. DGj Recibe información.



La figura 7 ilustra quien está transmitiendo la información para todos: el  $DG_1$ . Por el contrario, la figura 7<sup>a</sup>, ilustra quien está recibiendo la información de todos: el  $DG_j$ . De acuerdo con la figura 7 y suponiendo un número  $n$  de DG se puede expresar la matriz de conexión  $C$  de la siguiente manera:

Sí  $DG_1$  envía información a  $DG_2$ , el elemento de la matriz  $c_{12} = 1$ , en caso contrario es cero

Sí  $DG_1$  envía información a  $DG_3$ , el elemento de la matriz  $c_{13} = 1$ , en caso contrario es cero

•  
•  
•

Sí  $DG_1$  envía información a  $DG_j$ , el elemento de la matriz  $c_{1j} = 1$ , en caso contrario es cero

•  
•  
•

Sí  $DG_1$  envía información a  $DG_n$ , el elemento de la matriz  $c_{1n} = 1$ , en caso contrario es cero.

De lo anterior, se puede generalizar la construcción de la matriz  $C$ , para las demás filas, teniendo en cuenta lo siguiente:

Sí  $DG_i$  envía información a  $DG_j$ , el elemento de la matriz  $c_{ij} = 1$ , en caso contrario es cero.

Quedando finalmente la matriz de conexión  $C$  así:

$$C = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & \cdots & c_{1j} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & \cdots & c_{2j} & \cdots & c_{2n} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & \cdots & c_{3j} & \cdots & c_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ c_{i1} & c_{i2} & c_{i3} & \cdots & c_{ij} & \cdots & c_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & c_{n3} & \cdots & c_{nj} & \cdots & c_{nn} \end{pmatrix}$$

Nótese además que el elemento  $c_{ij}$  es diferente al elemento  $c_{ji}$  por lo que se puede presentar el caso en el que  $DG_i$  si envía información al  $DG_j$ , pero  $DG_j$  no envía a  $DG_i$ .

Otro fenómeno para considerar, es reconocer si los DG conectados a la MR están en operación o no, es decir si están encendidos o apagados. Para ello, se genera un vector  $\mathbf{A}$  de unos (1) y ceros(0), donde 1 indica encendido y 0 apagado. Es decir:

Sí  $DG_1$  está activo, el elemento  $a_1 = 1$ , en caso contrario es cero.

Sí  $DG_2$  está activo, el elemento  $a_2 = 1$ , en caso contrario es cero.

$$A = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_i \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix}, \text{ así pues}$$

$a_1, a_2, a_i, a_n$ , representa el estado (*encendido/apagado*, es decir,  $\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ ) de los generadores  $DG_1, DG_2, DG_i, DG_n$  respectivamente.

Para concluir, cabe resaltar que en el momento de realizar un control distribuido, es primordial la información de los elementos vecinos, además de un esquema de comunicación robusto que puede facilitar el proceso de control. En este caso, se describe una estructura de

comunicación que contiene: la matriz de conexión entre DG y el vector de estado (activo/inactivo) de los DG, lo que permite una arquitectura personalizable para un mejor análisis de diferentes escenarios de operación.

### 3. Método

La metodología desarrollada en este proyecto es la Revisión Bibliográfica, cuyas fases son ilustradas en la siguiente figura:

Figura 8. Metodología: Revisión Bibliográfica.



El desarrollo de este proyecto de grado se centra en el análisis y simulación de estrategias distribuidas para el control de frecuencia en MR eléctricas. Para ello, se evalúan dos o más estrategias distribuidas aplicadas en la capa secundaria del control de una MR eléctrica para el control de frecuencia; esto, mediante la simulación de diferentes escenarios de operación en el programa *Simulink* (de Matlab) y el posterior análisis del comportamiento del rendimiento operativo del sistema para los casos de estudio.

Esta propuesta toma como base el control jerárquico, en el que la capa primaria y la capa secundaria están sumamente ligadas entre sí, como se describe a continuación:

En el sistema eléctrico tradicional se utilizan las máquinas síncronas como fuentes de generación; éstas poseen una componente de inercia en el movimiento del rotor que limita los

cambios de velocidad y las variaciones de la frecuencia eléctrica en el sistema. Además, existe una conexión natural entre la frecuencia de operación del sistema y la potencia activa de salida de las máquinas; permitiendo que las diferentes unidades generadoras -conectadas en paralelo- compartan la potencia activa demandada de acuerdo con sus capacidades nominales y brindando la estabilidad necesaria para la operación del sistema (Alves, 1999).

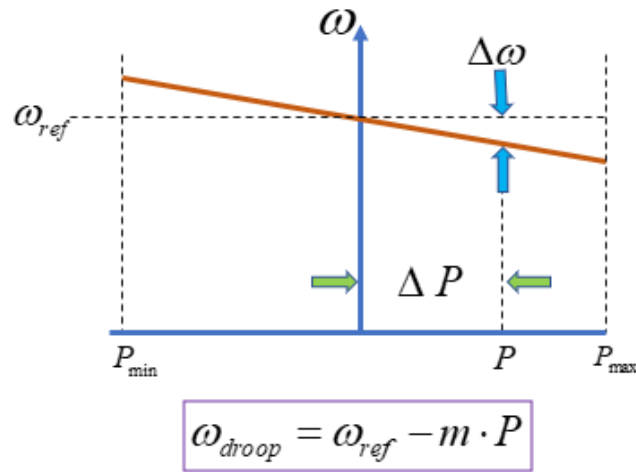
Por otro lado, en los convertidores de potencia (inversores o rectificadores) usados en MR no existe esta relación natural entre la frecuencia eléctrica y la potencia activa; por lo mismo, se hace necesario crear estas relaciones mediante el sistema de control de la MR que permita su operación estable (Espina, 2017).

La estrategia más utilizada para estos fines, es el método de control Droop (aplicado en la capa primaria del control jerárquico), el cual se basa en la imitación del generador síncrono produciendo una desviación de frecuencia intencional debido a que emula el estatismo de las máquinas síncronas en la operación de los inversores, permitiendo que dos o más unidades de GD compartan la potencia demandada a una determinada frecuencia.

### **3.1 Modo de Operación de la Capa Primaria**

El método Droop consiste en sustraer una parte proporcional de la potencia activa de una referencia de frecuencia para emular una inercia virtual, lo que garantiza la convergencia de una frecuencia desviada común con respecto al valor nominal en la MR. (Borup, 2001) (Guerrero et al, 2004). La siguiente figura ilustra lo dicho:

Figura 9. Curva Característica de Droop Tradicional. (Ec.droop).



La imagen evidencia la relación lineal entre (*potencia activa /frecuencia*) ya que una variación en la potencia activa implica un cambio proporcional en frecuencia. Esto mismo, es descrito matemáticamente mediante la ecuación para el método droop (ec.droop) así:

$$\omega_{droop} = \omega_{ref} - m \cdot P \quad \text{Donde}$$

$\omega_{droop}$  : frecuencia de salida

$\omega_{ref}$  : valor máximo permisible de frecuencia

$P$  : potencia activa entregada por el inversor

$m$  : es la pendiente de la curva de estatismo o droop

Ahora bien, desarrollando la ec.droop para cada uno de los generadores ( $DG_1, DG_2, DG_3, DG_4, DG_5, DG_6$ ) de la MR que se va a utilizar en las simulaciones; se obtiene:

$$\text{Para } DG_1, \quad \omega_1 = \omega_{ref_1} - m_1 \cdot P_1$$

$$\text{Para } DG_2, \quad \omega_2 = \omega_{ref_2} - m_2 \cdot P_2$$

$$\text{Para } DG_3, \quad \omega_3 = \omega_{ref_3} - m_3 \cdot P_3$$

$$\text{Para } DG_4, \quad \omega_4 = \omega_{ref_4} - m_4 \cdot P_4$$

$$\text{Para } DG_5, \quad \omega_5 = \omega_{ref_5} - m_5 \cdot P_5$$

$$\text{Para } DG_6, \quad \omega_6 = \omega_{ref_6} - m_6 \cdot P_6$$

Además, suponiendo que el control droop está emulando un control tradicional, se puede considerar que la frecuencia de referencia para cada DG es la misma. Por lo tanto:

$$\omega_{ref_1} = \omega_{ref_2} = \omega_{ref_3} = \omega_{ref_4} = \omega_{ref_5} = \omega_{ref_6}$$

Igualmente, teniendo en cuenta el sistema en estado estable, donde la frecuencia de operación y la compartición de potencia es la misma para cada DG, se puede expresar lo siguiente:

$$m_1 \cdot P_1 = m_2 \cdot P_2 = m_3 \cdot P_3 = m_4 \cdot P_4 = m_5 \cdot P_5 = m_6 \cdot P_6$$

De lo anterior, se puede notar la estrecha relación existente entre el diseño de la ganancia del control droop y la potencia activa suministrada por cada DG. Así mismo, si todos los generadores se implementan con la misma ganancia de control droop, se puede lograr un perfecto reparto de la potencia; es decir, todos entregan el mismo valor de potencia activa.

Por consiguiente, al implementar el control droop en la capa primaria del control jerárquico en una MR, se logra el objetivo propuesto; que apunta a la compartición de potencia por parte de las unidades de GD gracias a la emulación del estatismo de las maquinas síncronas, caracterizada mediante la relación lineal que describe la curva droop ( $\omega = \omega_o - mP$ ), permitiendo además, que el sistema opere de manera estable.

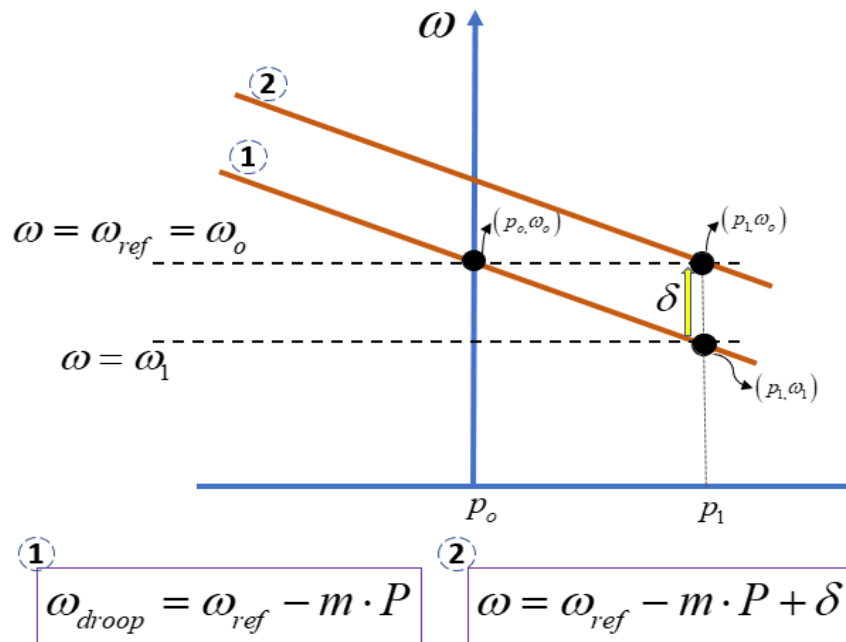
Sin embargo, como consecuencia de este hecho, es importante señalar que: debido a la relación lineal que implica la curva droop al momento de presentarse una variación en la demanda (potencia entregada), se genera un cambio en la frecuencia; lo que produce que ésta sea desviada de su valor optimo (o valor nominal de referencia) de operación ( $\omega \neq \omega_o$ ).

Para contrarrestar dicho efecto, es decir, para lograr corregir (o restablecer) el valor de la frecuencia a su valor de referencia nominal después de una variación, es necesario implementar el control en la capa secundaria del control jerárquico.

### 3.2 Modo de Operación de Capa Secundaria

Básicamente, el objetivo de implementar un control en la capa secundaria es hacer que el sistema opere con las variables globales en sus valores nominales de referencia, en este caso, la referencia es la frecuencia ( $\omega = \omega_o$ ). Se puede ilustrar el funcionamiento de la capa secundaria del control jerárquico para el control de frecuencia de MR aisladas, de la siguiente manera:

Figura 10. Funcionamiento Capa Secundaria para Control de Frecuencia.



Lo que presenta la imagen 10, es la operación de un inversor que inicialmente se encuentra operando en el punto  $(p_o, \omega_o)$ , de esta manera el inversor entrega una Potencia activa inicial  $(p_o)$ , para suplir una demanda  $(D_o)$  a una frecuencia nominal de referencia  $(\omega_o)$ . No obstante, tras ocurrir una variación de aumento de demanda  $(D_o a D_1)$ , la nueva potencia a entregar  $(p_1)$  es

mayor que  $(p_o)$ . En consecuencia, la frecuencia también se ve afectada en una disminución proporcional al aumento de la potencia, puesto que la ecuación lineal del control droop  $(\omega = \omega_o - mP)$ , las relaciona de manera directa.

Dicho de otro modo, el sistema está operando en su punto inicial  $(p_o, \omega_o)$ , así mismo cuando se presenta la variación de la demanda, el sistema pasa a operar del punto  $(p_o, \omega_o)$ , al punto  $(p_1, \omega_1)$  mostrado en la figura 10. En este punto de operación  $(p_1, \omega_1)$  también se cumple el objetivo de control del control droop (compartir la potencia entregada por los DG a una misma frecuencia), pero el valor de referencia de la frecuencia se ve alterado (desplazado de su valor nominal de  $\omega = \omega_o$  a  $\omega = \omega_1$ ).

Ahora bien, en este proyecto, el objetivo de control en la capa secundaria es restaurar el valor de la frecuencia del sistema a su valor nominal de referencia  $(\omega = \omega_o)$ . Es decir, llevar el sistema al punto de operación  $(p_1, \omega_o)$  en la figura 10. En resumen, para llevar el sistema a su nuevo punto de operación óptimo  $(p_1, \omega_o)$ , es necesario realizar un desplazamiento vertical hacia arriba a la coordenada de la variable dependiente de la curva droop, en este caso  $\omega_1$ .

Matemáticamente lo anterior se puede describir de la siguiente forma:

Se tiene una función lineal, con ecuación  $(\omega = \omega_o - mP)$ , a la que debe realizarse una transformación rígida (desplazamiento verticalmente hacia arriba); esto se puede lograr sumando un término constante  $(\delta > 0)$  a dicha función. Por lo tanto, la ecuación puede ser expresada así:

$$(\omega = \omega_o - mP + \delta)$$

Siendo  $mP$  el factor de desviación y  $\delta$  el factor de recuperación.

En ese orden de ideas, cabe señalar que el desvío del valor de la frecuencia está dado por el factor  $mP$ , que pertenece a la capa primaria del control jerárquico; mientras que el factor de recuperación de la frecuencia a su valor nominal  $\delta$ , está implementado en la capa secundaria del control jerárquico.

En este punto, es importante recordar que estas capas de control trabajan desacopladas, lo que implica que primero suceda un efecto (la desviación) y; un tiempo después, con una velocidad distinta, ocurra el otro (la restauración), esto para evitar ingresar inconvenientes en la operación del sistema. Por lo tanto, de este modo se consigue que el valor de la frecuencia sea restaurado a su valor nominal  $\omega = \omega_o$  para todo punto de operación.

A continuación, de forma general, se enuncian las ecuaciones a implementar en esta propuesta, dirigida al control de la frecuencia de la MR:

$$\text{Para } DG_1, \quad \omega_1 = \omega_{ref_1} - m_1 \cdot P_1 + \delta_1$$

$$\text{Para } DG_2, \quad \omega_2 = \omega_{ref_2} - m_2 \cdot P_2 + \delta_2$$

$$\text{Para } DG_3, \quad \omega_3 = \omega_{ref_3} - m_3 \cdot P_3 + \delta_3$$

$$\text{Para } DG_4, \quad \omega_4 = \omega_{ref_4} - m_4 \cdot P_4 + \delta_4$$

$$\text{Para } DG_5, \quad \omega_5 = \omega_{ref_5} - m_5 \cdot P_5 + \delta_5$$

$$\text{Para } DG_6, \quad \omega_6 = \omega_{ref_6} - m_6 \cdot P_6 + \delta_6$$

Donde  $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, \delta_6$ , son los términos de corrección agregados a la curva droop de cada uno de los generadores  $DG_1, DG_2, DG_3, DG_4, DG_5, DG_6$  respectivamente.

En síntesis, cada vez que se presenta una desviación de la potencia demandada en el sistema, también se genera una desviación en la frecuencia de operación debido a la curva droop

(capa primaria de control), sin embargo, dicha desviación es corregida en la capa secundaria de control; cuando se suma un término correctivo  $\delta$ , el cual permite el restablecimiento de la frecuencia a su valor nominal de referencia nuevamente.

### 3.3 Estrategias Distribuidas

Existen algunas estrategias distribuidas aplicadas al control secundario para encontrar el término correctivo  $\delta$  haciendo uso del sistema de comunicación de la MR. A continuación, se presenta una selección bibliográfica en torno a las estrategias de control distribuidas con comunicaciones, aplicadas a la capa secundaria para el control de la frecuencia en MR aisladas:

En primer lugar, se considera el estudio realizado por John W. Simpson-Porco (2015), el cual aborda nuevos controladores inspirados en las técnicas del control cooperativo para el control secundario de la frecuencia y el voltaje en microrredes aisladas, argumentando que los controladores propuestos utilizan información local y la comunicación con el vecino más cercano para realizar las acciones de control secundarias.

El controlador de frecuencia propuesto (DAPI), por sus siglas en inglés: distributed-averaging proportional–integral, regula rápidamente la frecuencia de la MR a su valor nominal de referencia mientras se mantiene el reparto de potencia activa entre los generadores distribuidos. El estudio arroja extensos resultados experimentales que validan su diseño, verificando un rendimiento robusto bajo fallo de comunicación y durante la operación de salida y entrada de un DG.

Por otro lado, se selecciona el estudio titulado *Performance Evaluation of Secondary Control Policies With Respect to Digital Communications Properties in Inverter-Based Islanded Microgrids* (Martí et al, 2018), que se refiere al desafío de las MR aisladas para mantener la frecuencia en su valor de referencia nominal, mientras se regula la compartición de potencia activa

entre los generadores y cargas distribuidas, teniendo en cuenta que las estrategias distribuidas para la restauración de la frecuencia, a menudo, requieren de una red de comunicación para el intercambio de datos en tiempo real.

En concordancia, los autores describen algunas de las estrategias distribuidas (promedio y consenso), además de otras centralizadas para control en la capa secundaria; para realizar un análisis del efecto que tienen las posibles fallas en las comunicaciones que podrían ocurrir. Con los resultados experimentales y simulados, los autores concluyen que las estrategias analizadas son capaces de restaurar la frecuencia, aunque algunas no garantizan el reparto de potencia.

Finalmente, se toma como referencia el sexto capítulo (*Secondary Control for Islanded Microgrids*), del libro titulado *Microgrids Design and Implementation* (Souza et al, 2018); el cual presenta algunas de las estrategias de control distribuidas con comunicaciones más conocidas (promedio y consenso) y analiza algunos aspectos relacionados con los efectos de las comunicaciones en estas estrategias, además de hacer un análisis de los pro y los contra de un control sin comunicaciones y realizar algunas demostraciones experimentales en una MR de laboratorio.

En efecto, como resultado de la búsqueda de estrategias de control distribuidas con comunicaciones aplicadas a la capa secundaria para el control de la frecuencia en MR aisladas, se seleccionan las estrategias del promedio y del consenso, las cuales son descritas enseguida:

### ***3.3.1 Estrategia del Promedio***

También llamada estrategia DAPI, es una técnica de control distribuido aplicada al error de frecuencia en cada DG, la cual plantea la implementación de un control que combina el método droop y el control proporcional integral (PI).

Esta estrategia requiere de una robusta estructura de comunicación, ya que las unidades DG intercambian información de la frecuencia de operación con las unidades vecinas para realizar colectivamente las acciones del control secundario, es decir, para efectuar el cálculo del término correctivo  $\delta$ , que permite restaurar la frecuencia de operación a su valor de referencia nominal.

En esta técnica, cada inversor mide el valor de frecuencia  $\omega_i$  local y lo envía a todos los demás inversores con los cuales haya un enlace de comunicación establecido. Después de esto, se promedian los valores de frecuencia local con los valores recibidos de los demás inversores con los cuales existe comunicación, aplicando la siguiente ecuación:

$$\omega_{i\_prom} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \omega_k$$

Donde  $n$  es el número de DG con los cuales se intercambia la información recibida.

Posteriormente, con el valor de frecuencia promedio  $\omega_{i\_prom}$  y el valor de referencia nominal de la frecuencia  $\omega_o$ , se estima del error de frecuencia  $e_i$ , de la manera:

$$e_i = \omega_o - \omega_{i\_prom}$$

Una vez calculado el error de frecuencia, es tratado por un controlador PI, así:

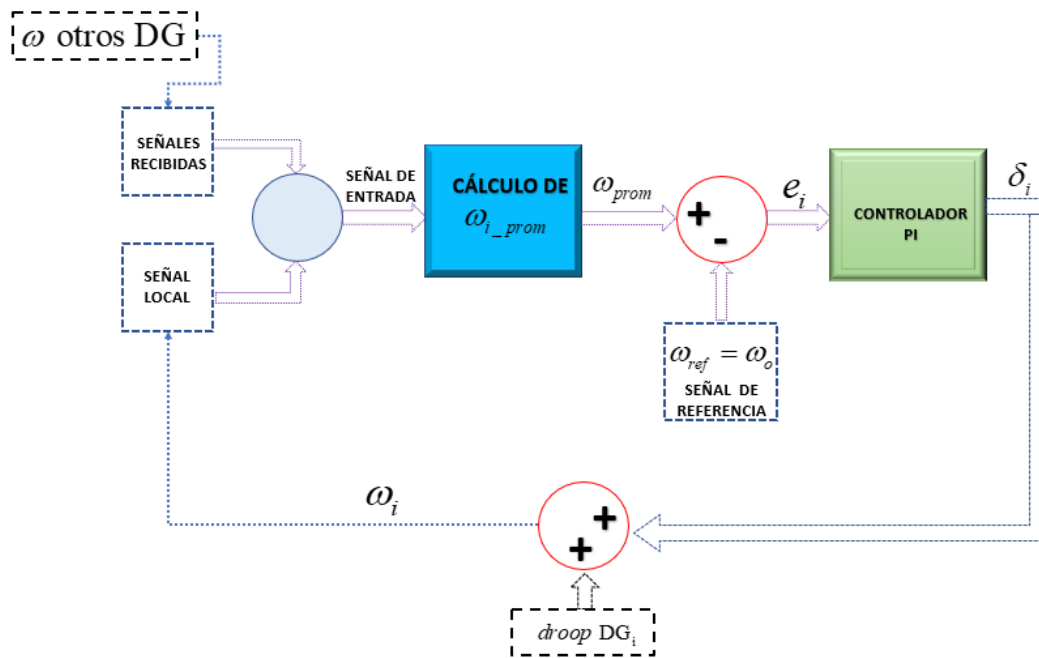
$$\delta_i = k_{p,i} \cdot e_i + k_{I,i} \int e_i dt$$

Donde  $k_{p,i}$ ,  $k_{I,i}$  son las ganancias del control proporcional y el control integral del generador  $DG_i$  respectivamente.

Finalmente, se obtiene el término  $\delta$ , que es agregado a la curva del droop para la restauración de la frecuencia a su valor de referencia nominal. Este proceso se repite periódicamente durante el tiempo de operación de la MR.

Como lo ilustra el gráfico 11, esta técnica del promedio incrementa el tráfico de información, pues todos los inversores deben enviar información de la frecuencia medida localmente al resto de los inversores de la MR con los que se tiene enlace de conexión de intercambio de información.

Figura 11. Estrategia del Promedio.



Dado un caso ideal, en donde todos los DG estén conectados con todos, podría decirse que se aplica un esquema de transmisión de todos a todos.

### 3.3.2 Estrategia del Consenso

En este esquema de control, el cálculo del valor correctivo  $\delta_i$  para el restablecimiento de la frecuencia a su valor nominal de referencia, se hace por medio de un algoritmo que involucra tanto las señales de la frecuencia  $\omega_i$  como los valores de los términos de corrección  $\delta_i$  de los DG

activos en la MR. Es decir, la estrategia de consenso para el control secundario de frecuencia requiere que cada DG comunique a sus vecinos la frecuencia de salida del inversor  $\omega_i$  y el término de corrección del Droop  $\delta_i$ .

Por lo tanto, al igual que en la estrategia anterior, se requiere de una estructura robusta de comunicación, pues las unidades DG intercambian información de la frecuencia de operación y del término de corrección  $\delta_i$  con las unidades vecinas para realizar colectivamente las acciones del control secundario.

En esta técnica, cada inversor mide localmente el valor de frecuencia  $\omega_i$  y del término de corrección  $\delta_i$ ; enseguida, estos valores son enviados a los demás inversores con los cuales hay un enlace de comunicación establecido. Posteriormente, cada DG procede a calcular el término de corrección  $\delta_i$  como se expresa en la siguiente ecuación:

$$\delta_i = \alpha_i \cdot \left( \int (\beta_i \cdot e_i + \gamma_i \cdot \varepsilon_i) dt - \omega_i \right)$$

Donde  $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \chi_i \in \mathbb{R}^+$ , son los parámetros del control, cuyos valores específicos pueden ser ajustados para mantener el sistema estable, mientras que  $e_i, \varepsilon_i$  son el error relacionado a la frecuencia y al término  $\delta_i$  de la capa secundario respectivamente.

Cabe resaltar que  $\delta_i$  está compuesto por la integral de suma de dos errores  $e_i, \varepsilon_i$ .

El primero de ellos, se expresa de la manera:

$$e_i = \sum_{k \in \mathbb{N}} (\omega_i - \omega_k) + \chi_i (\omega_i - \omega_o)$$

Está compuesto por dos términos; uno relacionado con la desviación de la frecuencia entre el inversor local y sus vecinos; el otro, relacionado con el error entre la frecuencia del inversor local y la frecuencia nominal de referencia.

El segundo error, se puede ser expresado de este modo:

$$\varepsilon_i = \sum_{k \in \square} (\delta_i - \delta_k)$$

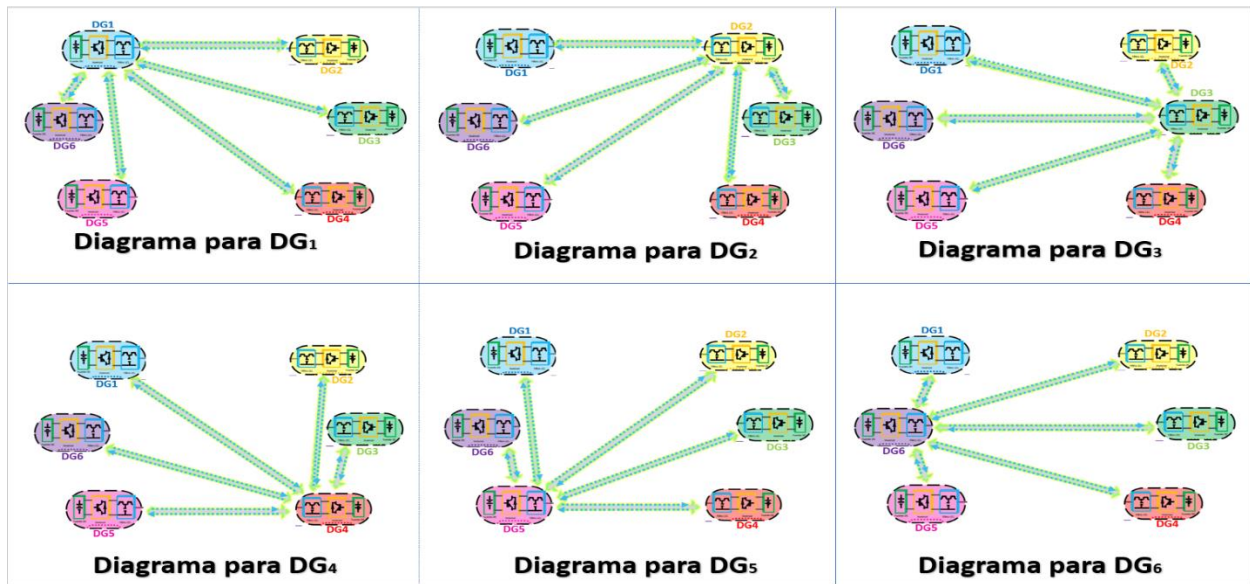
Está relacionado con la desviación entre el término de corrección de frecuencia del inversor local y el de sus vecinos.

### **3.4 Implementación de las Estrategias**

#### ***3.4.1 Implementación Algebraica de las Estrategias***

Como ya se ha dicho, las estrategias de control distribuido para el control de frecuencia seleccionadas requieren de una estructura de comunicación, en concordancia, a continuación se presenta la estructura de comunicación adecuada para la MR seleccionada para el análisis y simulación de este proyecto. Respectivamente, corresponden al diagrama de comunicación para DG1, DG2, DG3, DG4, DG5 Y DG6.

Figura 12. Diagrama de Comunicación de Cada DG de la MR.



Basados tanto en la estructura de comunicación descrita en el apartado 2.1.5, como en los diagramas de comunicación de los 6 DG presentados en la figura 12, se construye la matriz de conexión **C**, de la siguiente manera:

$$C = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} & c_{56} \\ c_{61} & c_{62} & c_{63} & c_{64} & c_{65} & c_{66} \end{pmatrix}$$

Adicionalmente, es importante resaltar que la matriz de conexión **C**, permite personalizar diferentes escenarios de comunicación en los que se puede elegir a cuáles DG enviar información y de cuales DG recibir información.

Así mismo, el vector **A** esta dado por:

$$A = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ a_6 \end{bmatrix}$$

El cual presenta los estados de los DG (*activado/desactivado*)

Una vez descrito el esquema de comunicación, se procede a desarrollar las estrategias seleccionadas, de la siguiente forma:

Para la implementación de la estrategia del promedio (*DAPI*) se desarrollan las ecuaciones

para hallar el promedio  $\omega_{i\_prom} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \omega_k$ , estimar el error  $e_i = \omega_o - \omega_{i\_prom}$  y controlar

$\delta_i = k_{p,i} \cdot e_i + k_{I,i} \int e_i dt$ , respectivamente, los 6 DG de la MR DG<sub>1</sub>, DG<sub>2</sub>, DG<sub>3</sub>, DG<sub>4</sub>, DG<sub>5</sub>, DG<sub>6</sub>.

Lo anterior, teniendo en cuenta los enlaces de comunicación entre los DG y sus estados (*activado/desactivado*).

Como punto de partida, es necesario encontrar los valores  $\omega_{prom}$  de cada DG

Para DG1:

$$\omega_{1\_prom} = \frac{\omega_1 \cdot c_{11} \cdot a_1 + \omega_2 \cdot c_{12} \cdot a_2 + \omega_3 \cdot c_{13} \cdot a_3 + \omega_4 \cdot c_{14} \cdot a_4 + \omega_5 \cdot c_{15} \cdot a_5 + \omega_6 \cdot c_{16} \cdot a_6}{c_{11} \cdot a_1 + c_{12} \cdot a_2 + c_{13} \cdot a_3 + c_{14} \cdot a_4 + c_{15} \cdot a_5 + c_{16} \cdot a_6}$$

Para DG2

$$\omega_{2\_prom} = \frac{\omega_1 \cdot c_{21} \cdot a_1 + \omega_2 \cdot c_{22} \cdot a_2 + \omega_3 \cdot c_{23} \cdot a_3 + \omega_4 \cdot c_{24} \cdot a_4 + \omega_5 \cdot c_{25} \cdot a_5 + \omega_6 \cdot c_{26} \cdot a_6}{c_{21} \cdot a_1 + c_{22} \cdot a_2 + c_{23} \cdot a_3 + c_{24} \cdot a_4 + c_{25} \cdot a_5 + c_{26} \cdot a_6}$$

Para DG3

$$\omega_{3\_prom} = \frac{\omega_1 \cdot c_{31} \cdot a_1 + \omega_2 \cdot c_{32} \cdot a_2 + \omega_3 \cdot c_{33} \cdot a_3 + \omega_4 \cdot c_{34} \cdot a_4 + \omega_5 \cdot c_{35} \cdot a_5 + \omega_6 \cdot c_{36} \cdot a_6}{c_{31} \cdot a_1 + c_{32} \cdot a_2 + c_{33} \cdot a_3 + c_{34} \cdot a_4 + c_{35} \cdot a_5 + c_{36} \cdot a_6}$$

Para DG4

$$\omega_{4\_prom} = \frac{\omega_1 \cdot c_{41} \cdot a_1 + \omega_2 \cdot c_{42} \cdot a_2 + \omega_3 \cdot c_{43} \cdot a_3 + \omega_4 \cdot c_{44} \cdot a_4 + \omega_5 \cdot c_{45} \cdot a_5 + \omega_6 \cdot c_{46} \cdot a_6}{c_{41} \cdot a_1 + c_{42} \cdot a_2 + c_{43} \cdot a_3 + c_{44} \cdot a_4 + c_{45} \cdot a_5 + c_{46} \cdot a_6}$$

Para DG5

$$\omega_{5\_prom} = \frac{\omega_1 \cdot c_{51} \cdot a_1 + \omega_2 \cdot c_{52} \cdot a_2 + \omega_3 \cdot c_{53} \cdot a_3 + \omega_4 \cdot c_{54} \cdot a_4 + \omega_5 \cdot c_{55} \cdot a_5 + \omega_6 \cdot c_{56} \cdot a_6}{c_{51} \cdot a_1 + c_{52} \cdot a_2 + c_{53} \cdot a_3 + c_{54} \cdot a_4 + c_{55} \cdot a_5 + c_{56} \cdot a_6}$$

Para DG6

$$\omega_{6\_prom} = \frac{\omega_1 \cdot c_{61} \cdot a_1 + \omega_2 \cdot c_{62} \cdot a_2 + \omega_3 \cdot c_{63} \cdot a_3 + \omega_4 \cdot c_{64} \cdot a_4 + \omega_5 \cdot c_{65} \cdot a_5 + \omega_6 \cdot c_{66} \cdot a_6}{c_{61} \cdot a_1 + c_{62} \cdot a_2 + c_{63} \cdot a_3 + c_{64} \cdot a_4 + c_{65} \cdot a_5 + c_{66} \cdot a_6}$$

Luego se estima el error para cada DG, aplicando la ecuación:

$$e_1 = \omega_o - \omega_{1\_prom}$$

$$e_2 = \omega_o - \omega_{2\_prom}$$

$$e_3 = \omega_o - \omega_{3\_prom}$$

$$e_4 = \omega_o - \omega_{4\_prom}$$

$$e_5 = \omega_o - \omega_{5\_prom}$$

$$e_6 = \omega_o - \omega_{6\_prom}$$

Posteriormente, se calculan los términos de corrección de la desviación de frecuencia con ayuda del controlador PI.

$$\delta_1 = k_{p,1} \cdot e_1 + k_{I,1} \int e_1 dt$$

$$\delta_2 = k_{p,2} \cdot e_2 + k_{I,2} \int e_2 dt$$

$$\delta_3 = k_{p,3} \cdot e_3 + k_{I,3} \int e_3 dt$$

$$\delta_4 = k_{p,4} \cdot e_4 + k_{I,4} \int e_4 dt$$

$$\delta_5 = k_{p,5} \cdot e_5 + k_{I,5} \int e_5 dt$$

$$\delta_6 = k_{p,6} \cdot e_6 + k_{I,6} \int e_6 dt$$

Cabe señalar que, ante un caso ideal donde todos están comunicados con todos, los valores de frecuencia promedio son los mismos para cada uno de los DG, así:

$$\left( \omega_{1\_prom} = \omega_{2\_prom} = \omega_{3\_prom} = \omega_{4\_prom} = \omega_{5\_prom} = \omega_{6\_prom} = \omega_{prom} \right)$$

Por lo tanto, los errores también serían iguales:

$$(e_1 = e_2 = e_3 = e_4 = e_5 = e_6 = e)$$

Ahora bien, si se aplica el mismo control PI a cada uno de ellos, obtenemos el mismo  $\delta$  para cada curva Droop:

$$(\delta_1 = \delta_2 = \delta_3 = \delta_4 = \delta_5 = \delta_6 = \delta)$$

Lo anterior, garantiza un perfecto reparto de potencia activa entre los DG y una óptima restauración de frecuencia a su valor de referencia nominal.

Este resultado es el mismo que se obtendría con una estrategia de control centralizado, excepto que tiene la ventaja de realizar el cálculo DG a nivel local, por lo que no hay ninguna dependencia de un único intermediario de los enlaces de comunicación.

Para la implementación de la estrategia del consenso, se desarrollan las ecuaciones para calcular el término de corrección  $\delta_i = \alpha_i \cdot \left( \int (\beta_i \cdot e_i + \gamma_i \cdot \varepsilon_i) dt - \omega_i \right)$ , y los dos errores que están relacionados a la frecuencia:  $e_i = \sum_{k \in \square} (\omega_i - \omega_k) + \chi_i (\omega_i - \omega_o)$  y  $\varepsilon_i = \sum_{k \in \square} (\delta_i - \delta_k)$ ; esto, para los 6

DG de la MR  $DG_1$ ,  $DG_2$ ,  $DG_3$ ,  $DG_4$ ,  $DG_5$ ,  $DG_6$  respectivamente; de igual manera se tienen en cuenta los enlaces de comunicación entre los DG, además de sus estados (*activado/desactivado*).

En primer lugar, para estimar los errores  $e_i$  es necesario encontrar los dos términos que lo componen:

$$e_1 = [(\omega_1 - \omega_2) \cdot c_{21} \cdot a_2 + (\omega_1 - \omega_3) \cdot c_{31} \cdot a_3 + (\omega_1 - \omega_4) \cdot c_{41} \cdot a_4 + (\omega_1 - \omega_5) \cdot c_{51} \cdot a_5 + (\omega_1 - \omega_6) \cdot c_{61} \cdot a_6] + \chi_1 (\omega_1 - \omega_0)$$

$$e_2 = [(\omega_2 - \omega_1) \cdot c_{12} \cdot a_1 + (\omega_2 - \omega_3) \cdot c_{32} \cdot a_3 + (\omega_2 - \omega_4) \cdot c_{42} \cdot a_4 + (\omega_2 - \omega_5) \cdot c_{52} \cdot a_5 + (\omega_2 - \omega_6) \cdot c_{62} \cdot a_6] + \chi_2 (\omega_2 - \omega_0)$$

$$e_3 = [(\omega_3 - \omega_1) \cdot c_{13} \cdot a_1 + (\omega_3 - \omega_2) \cdot c_{23} \cdot a_2 + (\omega_3 - \omega_4) \cdot c_{43} \cdot a_4 + (\omega_3 - \omega_5) \cdot c_{53} \cdot a_5 + (\omega_3 - \omega_6) \cdot c_{63} \cdot a_6] + \chi_3 (\omega_3 - \omega_0)$$

$$e_4 = [(\omega_4 - \omega_1) \cdot c_{14} \cdot a_1 + (\omega_4 - \omega_2) \cdot c_{24} \cdot a_2 + (\omega_4 - \omega_3) \cdot c_{34} \cdot a_3 + (\omega_4 - \omega_5) \cdot c_{54} \cdot a_5 + (\omega_4 - \omega_6) \cdot c_{64} \cdot a_6] + \chi_4 (\omega_4 - \omega_0)$$

$$e_5 = [(\omega_5 - \omega_1) \cdot c_{15} \cdot a_1 + (\omega_5 - \omega_2) \cdot c_{25} \cdot a_2 + (\omega_5 - \omega_3) \cdot c_{35} \cdot a_3 + (\omega_5 - \omega_4) \cdot c_{45} \cdot a_4 + (\omega_5 - \omega_6) \cdot c_{65} \cdot a_6] + \chi_5 (\omega_5 - \omega_0)$$

$$e_6 = [(\omega_6 - \omega_1) \cdot c_{16} \cdot a_1 + (\omega_6 - \omega_2) \cdot c_{26} \cdot a_2 + (\omega_6 - \omega_3) \cdot c_{36} \cdot a_3 + (\omega_6 - \omega_4) \cdot c_{46} \cdot a_4 + (\omega_6 - \omega_5) \cdot c_{56} \cdot a_5] + \chi_6 (\omega_6 - \omega_0)$$

Adicionalmente, el error  $\varepsilon_i$  se describe a continuación para cada DG

$$\varepsilon_1 = (\delta_1 - \delta_2) \cdot c_{21} \cdot a_2 + (\delta_1 - \delta_3) \cdot c_{31} \cdot a_3 + (\delta_1 - \delta_4) \cdot c_{41} \cdot a_4 + (\delta_1 - \delta_5) \cdot c_{51} \cdot a_5 + (\delta_1 - \delta_6) \cdot c_{61} \cdot a_6$$

$$\varepsilon_2 = (\delta_2 - \delta_1) \cdot c_{12} \cdot a_1 + (\delta_2 - \delta_3) \cdot c_{32} \cdot a_3 + (\delta_2 - \delta_4) \cdot c_{42} \cdot a_4 + (\delta_2 - \delta_5) \cdot c_{52} \cdot a_5 + (\delta_2 - \delta_6) \cdot c_{62} \cdot a_6$$

$$\varepsilon_3 = (\delta_3 - \delta_1) \cdot c_{13} \cdot a_1 + (\delta_3 - \delta_2) \cdot c_{23} \cdot a_2 + (\delta_3 - \delta_4) \cdot c_{43} \cdot a_4 + (\delta_3 - \delta_5) \cdot c_{53} \cdot a_5 + (\delta_3 - \delta_6) \cdot c_{63} \cdot a_6$$

$$\varepsilon_4 = (\delta_4 - \delta_1) \cdot c_{14} \cdot a_1 + (\delta_4 - \delta_2) \cdot c_{24} \cdot a_2 + (\delta_4 - \delta_3) \cdot c_{34} \cdot a_3 + (\delta_4 - \delta_5) \cdot c_{54} \cdot a_5 + (\delta_4 - \delta_6) \cdot c_{64} \cdot a_6$$

$$\varepsilon_5 = (\delta_5 - \delta_1) \cdot c_{15} \cdot a_1 + (\delta_5 - \delta_2) \cdot c_{25} \cdot a_2 + (\delta_5 - \delta_3) \cdot c_{35} \cdot a_3 + (\delta_5 - \delta_4) \cdot c_{45} \cdot a_4 + (\delta_5 - \delta_6) \cdot c_{65} \cdot a_6$$

$$\varepsilon_6 = (\delta_6 - \delta_1) \cdot c_{16} \cdot a_1 + (\delta_6 - \delta_2) \cdot c_{26} \cdot a_2 + (\delta_6 - \delta_3) \cdot c_{36} \cdot a_3 + (\delta_6 - \delta_4) \cdot c_{46} \cdot a_4 + (\delta_6 - \delta_5) \cdot c_{56} \cdot a_5$$

Con los valores anteriores se puede entonces encontrar los términos correctivos de la desviación de la frecuencia para los DG, así:

$$\delta_1 = \alpha_1 \cdot \left( \int (\beta_1 \cdot e_1 + \gamma_1 \cdot \varepsilon_1) dt - \omega_1 \right)$$

$$\delta_2 = \alpha_2 \cdot \left( \int (\beta_2 \cdot e_2 + \gamma_2 \cdot \varepsilon_2) dt - \omega_2 \right)$$

$$\delta_3 = \alpha_3 \cdot \left( \int (\beta_3 \cdot e_3 + \gamma_3 \cdot \varepsilon_3) dt - \omega_3 \right)$$

$$\delta_4 = \alpha_4 \cdot \left( \int (\beta_4 \cdot e_4 + \gamma_4 \cdot \varepsilon_4) dt - \omega_4 \right)$$

$$\delta_5 = \alpha_5 \cdot \left( \int (\beta_5 \cdot e_5 + \gamma_5 \cdot \varepsilon_5) dt - \omega_5 \right)$$

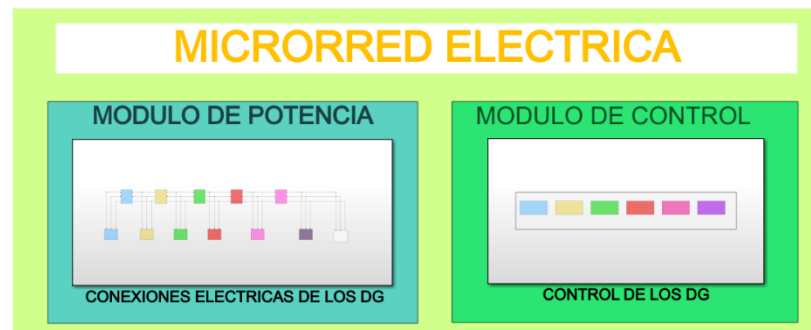
$$\delta_6 = \alpha_6 \cdot \left( \int (\beta_6 \cdot e_6 + \gamma_6 \cdot \varepsilon_6) dt - \omega_6 \right)$$

En efecto, con estos valores de  $\delta_i$ , se logra el restablecimiento de la frecuencia a su valor de referencia nominal.

### 3.4.2 Implementación en Simulink de las estrategias

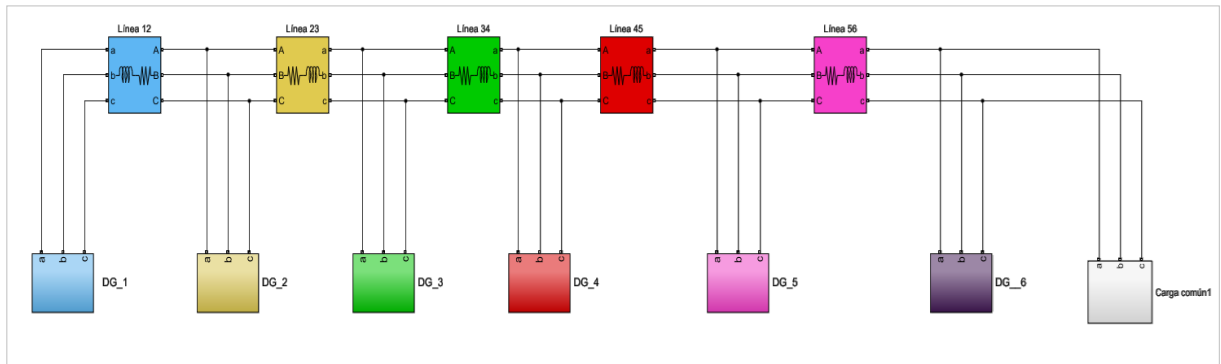
La MR implementada en Simulink para el desarrollo de este trabajo, está compuesta por un módulo de potencia y un módulo de control, tal como se observa en la figura 13

Figura 13. Diagrama en Simulink de la MR.



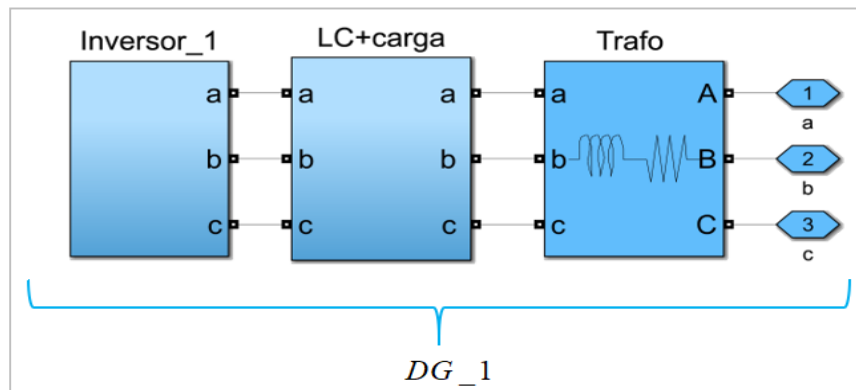
En el módulo de potencia se encuentran los elementos y componentes de una carga común y 6 unidades generadoras, denominadas DG1, DG2, DG3, DG4, DG5, DG6. Las cuales están conectadas entre sí, por medio de líneas de transmisión, tal como se ilustra en la figura 14.

Figura 14. Diagrama en Simulink módulo de Potencia de la MR.



En particular, cada DG está integrado por: Inversor, Carga local y Transformador, tal y como se presenta en la siguiente figura.

Figura 15. Diagrama en Simulink de un DG.



Los parámetros generales del módulo de potencia de la MR se mencionan detalladamente a continuación:

Tabla 1. Parámetros eléctricos módulo de potencia de la microrred.

Parámetros eléctricos módulo de potencia de la microrred		
Parámetro	Símbolo	Valor
<b>Valores Nominales</b>		
Frecuencia Nominal	Fo	60 Hz
Tensión DC	Vdc	400 V
Tensión nominal	Vo	110 V
<b>Impedancias de Línea de Transmisión</b>		
Impedancia de la línea (1-2)	$Z_{L12}$	$R_{Línea\_12} = 65 \cdot 10^{-3} \Omega$ ; $L_{Línea\_12} = 2 \cdot 10^{-3} \Omega$
Impedancia de la línea (2-3)	$Z_{L23}$	$R_{Línea\_23} = 110 \cdot 10^{-3} \Omega$ ; $L_{Línea\_23} = 0.8 \cdot 10^{-3} \Omega$
Impedancia de la línea (3-4)	$Z_{L34}$	$R_{Línea\_34} = 110 \cdot 10^{-3} \Omega$ ; $L_{Línea\_34} = 0.8 \cdot 10^{-3} \Omega$

Impedancia de la línea (4-5)	$Z_{L45}$	$R_{Linea\_45} = 110 \cdot 10^{-3} \Omega$ ; $L_{Linea\_45} = 0.8 \cdot 10^{-3} \Omega$
Impedancia de la línea (5-6)	$Z_{L56}$	$R_{Linea\_56} = 110 \cdot 10^{-3} \Omega$ ; $L_{Linea\_56} = 0.8 \cdot 10^{-3} \Omega$
<b>Impedancias de Cargas Locales</b>		
Impedancia carga local DG1	$Z_{local\_DG_1}$	$R_{Local\_1} = 96 \Omega$ ; $L_{Local\_1} = 0 \Omega$
Impedancia carga local DG2	$Z_{local\_DG_2}$	$R_{Local\_2} = 97 \Omega$ ; $L_{Local\_2} = 0 \Omega$
Impedancia carga local DG3	$Z_{local\_DG_3}$	$R_{Local\_3} = 95 \Omega$ ; $L_{Local\_3} = 0 \Omega$
Impedancia carga local DG4	$Z_{local\_DG_4}$	$R_{Local\_4} = 97 \Omega$ ; $L_{Local\_4} = 0 \Omega$
Impedancia carga local DG5	$Z_{local\_DG_5}$	$R_{Local\_5} = 98 \Omega$ ; $L_{Local\_5} = 0 \Omega$
Impedancia carga local DG6	$Z_{local\_DG_6}$	$R_{Local\_6} = 98 \Omega$ ; $L_{Local\_6} = 0 \Omega$
<b>Impedancias de los Transformadores</b>		
Impedancia del Transformador 1	$Z_{Trafo\_DG_1}$	$R_{Trafo\_1} = 0.5 \Omega$ ; $L_{Trafo\_1} = 1 \cdot 10^{-3} \Omega$
Impedancia del Transformador 2	$Z_{Trafo\_DG_1}$	$R_{Trafo\_2} = 0.5 \Omega$ ; $L_{Trafo\_2} = 1 \cdot 10^{-3} \Omega$
Impedancia del Transformador 3	$Z_{Trafo\_DG_1}$	$R_{Trafo\_3} = 1.13 \Omega$ ; $L_{Trafo\_3} = 0.6 \cdot 10^{-3} \Omega$
Impedancia del Transformador 4	$Z_{Trafo\_DG_1}$	$R_{Trafo\_4} = 1.13 \Omega$ ; $L_{Trafo\_4} = 0.6 \cdot 10^{-3} \Omega$
Impedancia del Transformador 5	$Z_{Trafo\_DG_1}$	$R_{Trafo\_5} = 0.9 \Omega$ ; $L_{Trafo\_5} = 0.8 \cdot 10^{-3} \Omega$
Impedancia del Transformador 6	$Z_{Trafo\_DG_1}$	$R_{Trafo\_6} = 0.9 \Omega$ ; $L_{Trafo\_6} = 0.8 \cdot 10^{-3} \Omega$

Por otro lado, el módulo de control está conformado por los 6 controladores de cada DG. Los cuales se encargan de recibir la información censada de las variables, realizar el control y generar los pulsos que son enviados al inversor, como se muestra en las figuras 16 y 17, respectivamente.

Figura 16. Diagrama en Simulink módulo de control.

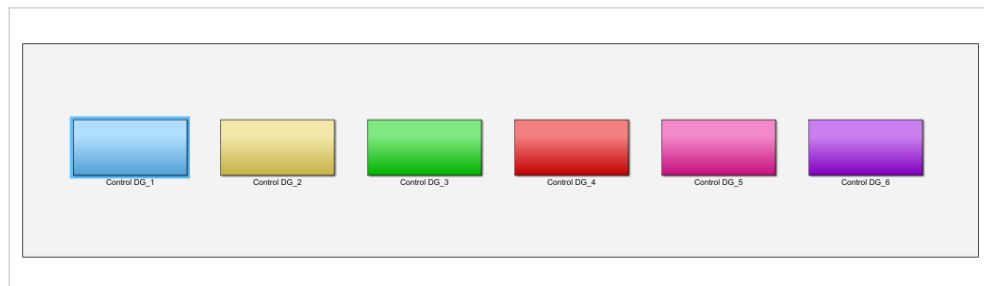
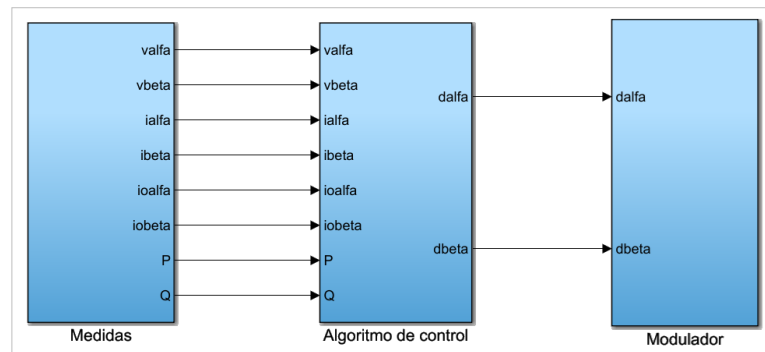
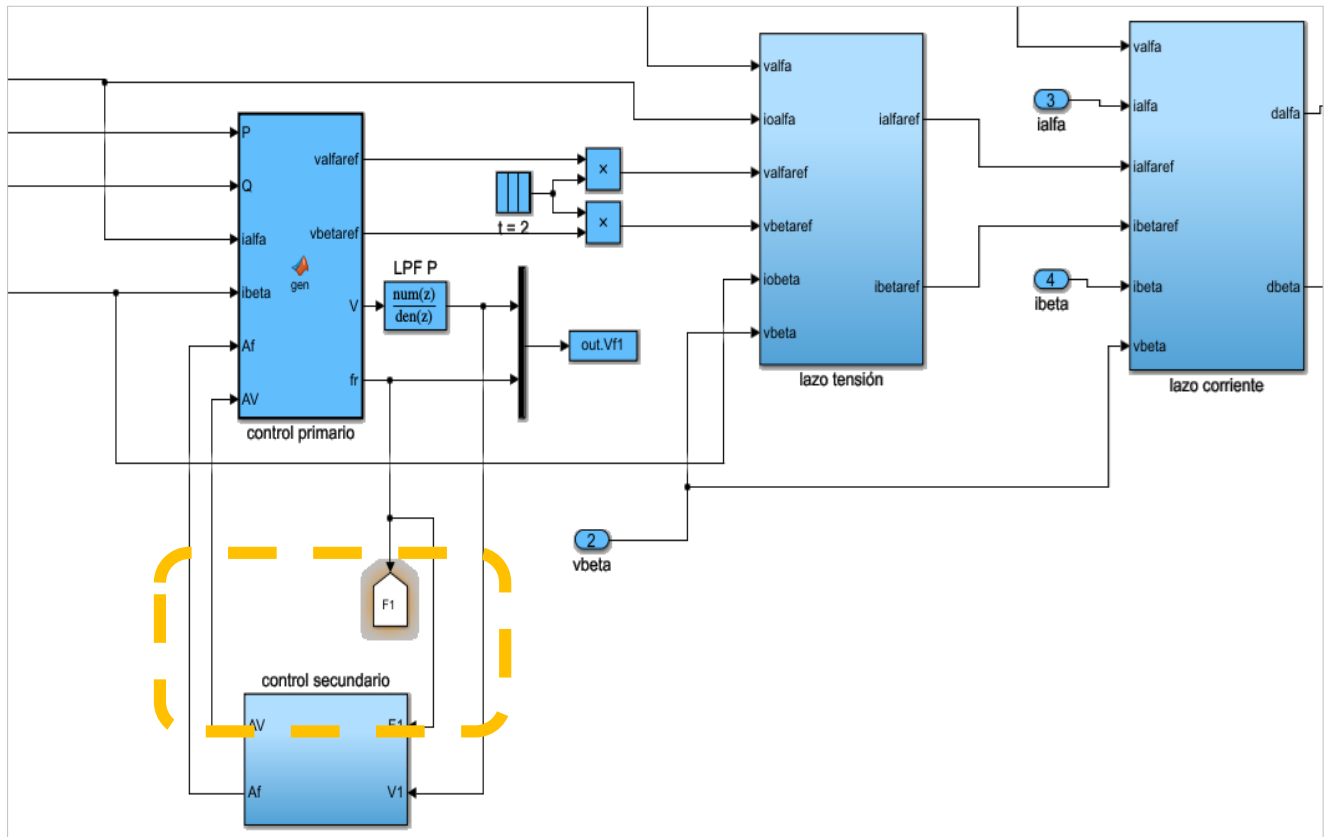


Figura 17. Diagrama en Simulink control de un DG.



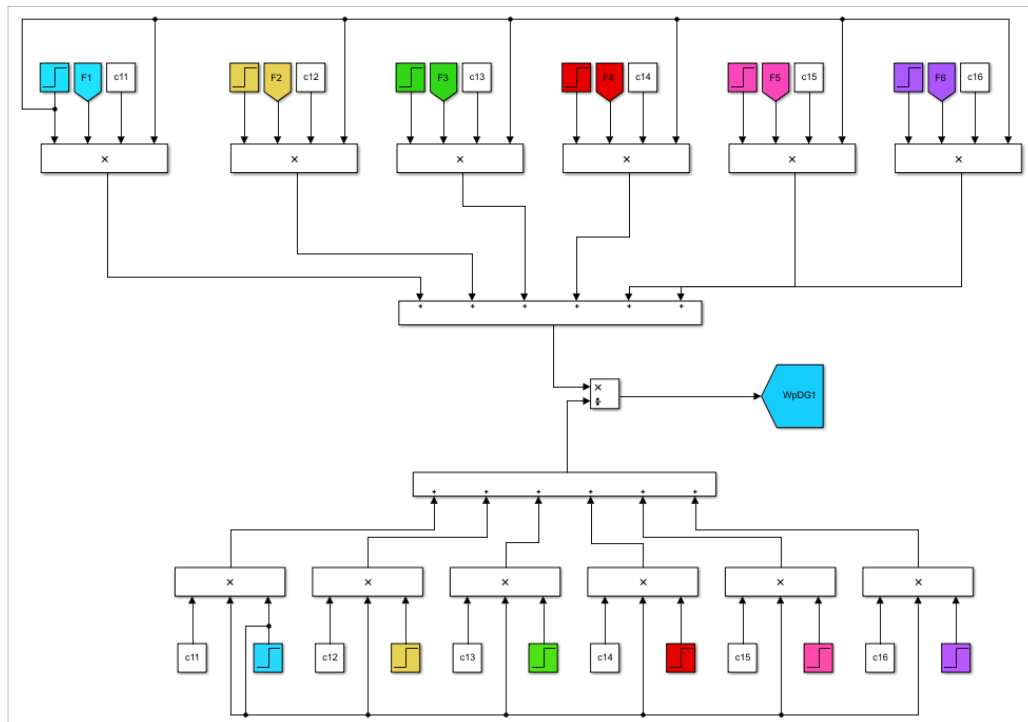
En particular, cada algoritmo de control está integrado por un lazo de control de corriente y uno de tensión, igualmente, por el control primario y el control secundario. El control secundario es el objeto de estudio y análisis de este proyecto, específicamente la variable “frecuencia”. Por consiguiente, se implementan las estrategias distribuidas para el control de frecuencia en el control secundario de esta MR. Dicho esquema se puede apreciar en la figura 18.

Figura 18. Diagrama en Simulink control de un DG.

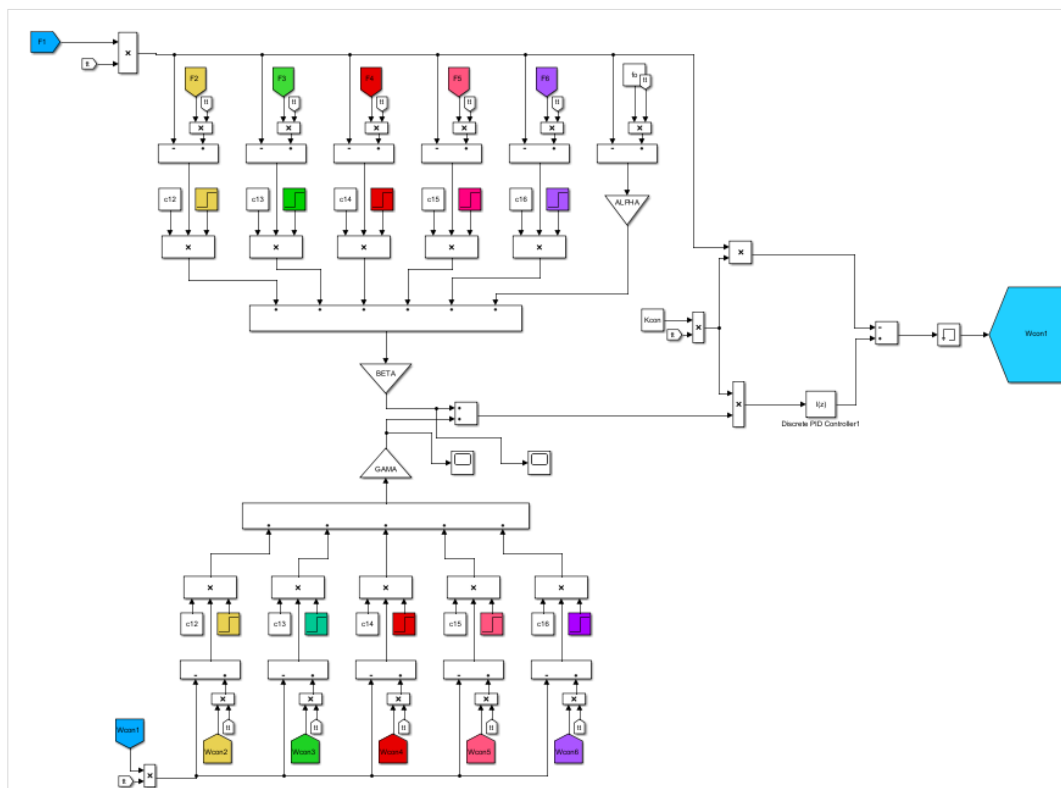


Anteriormente se mencionó que las estrategias seleccionadas para la implementación son las de promedio y las de consenso. En concordancia, a continuación, las figuras 19 y 20 presentan sus diagramas en Simulink; seguidas de los escenarios de operación.

Figura 19. Diagrama en Simulink estrategia distribuida para control de la frecuencia en el control secundario de un DG -PROMEDIO.



20. Diagrama en Simulink de estrategia distribuida para control de la frecuencia en el control secundario de un DG - CONSENSO.



### 3.5 Escenarios de operación

Los diferentes escenarios presentados en este proyecto, se proponen principalmente con base en los criterios que afectan a las comunicaciones y durante los cuales se presentan algunos eventos; tales como comunicaciones ideales, retardos en las comunicaciones, pérdidas de un porcentaje de la información enviada y líneas de comunicaciones que dejan de operar. Sin embargo, cabe aclarar que el escenario ideal se cumple cuando en la operación de la MR no se presentan fallos en los enlaces de comunicación.

Con relación a los posibles fallos en los enlaces de comunicación en la operación de la MR, se pueden presentar tres diferentes casos; los cuales se especifican a continuación:

- **Caso A:** Pérdida de paquetes de información en algunos enlaces de comunicación. En éste caso, a cada DG le corresponde enviar su información local a los demás DG, según el modo de configuración de las comunicaciones (*anillo - todos con todos*, entre otros). En algunos enlaces de comunicación, se pueden presentar pérdidas de información durante el envío y recepción simultánea de datos. Por lo tanto, se implementó en Simulink un bloque de pérdidas que permite controlar la restricción del envío de información, logrando que se pueda seleccionar el porcentaje de pérdidas de datos deseado. En este escenario, se tiene en cuenta que los demás DG mantienen el último dato enviado en las operaciones de control, mientras que se recibe un nuevo dato.
- **Caso B:** Retraso en el envío de información en algunos de los enlaces de comunicación. Este escenario existe, precisamente, cuando se presenta un retraso en la recepción y el envío de la información hacia los otros DG en algunos enlaces de comunicación. Por consiguiente, se implementa una simulación de éste en Simulink, mediante el bloque de

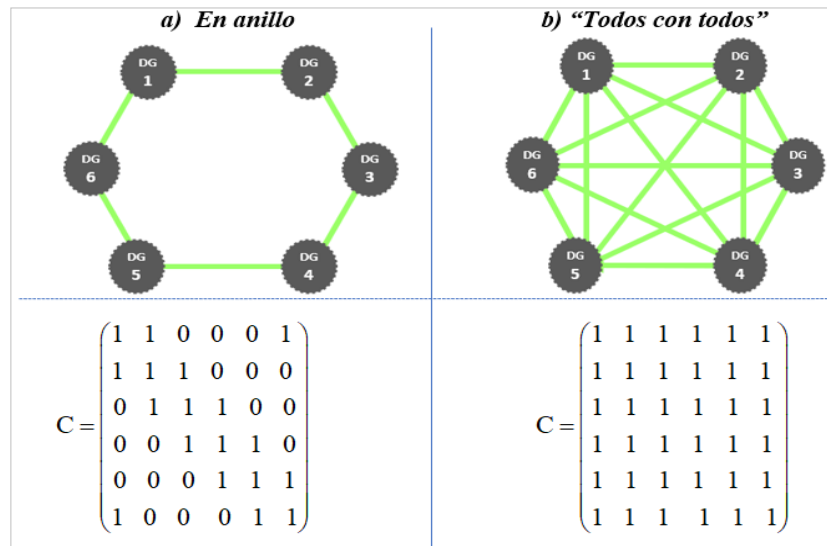
“Delay”; el cual permite el retardo de una señal en algunos enlaces de comunicación de la MR a lo largo de un tiempo determinado, que es definido durante la simulación.

- **Caso C:** Salida o pérdida total de algunos enlaces de comunicación. En este escenario se permite tanto la salida como la pérdida total de algunos enlaces de comunicación durante determinado tiempo. En contraste con el escenario A, en este caso, cuando el enlace esté fuera o desconectado; la información que los demás DG reciben de él es cero, aunque, el generador se mantiene activo para el cálculo de las variables de control.

#### 4. Simulación y Análisis de los Resultados

Se realizaron simulaciones en Simulink de Matlab para validar las estrategias de control (promedio y consenso) presentadas en el apartado 2.2.3. Para ello se ajustaron los valores de los elementos de matriz de conexión **C** (ver capítulo 2.2.4.1), obteniendo dos configuraciones para los enlaces de comunicación, las cuales se denominan *en anillo* y *todos con todos*. Enseguida, la figura 21 muestra los esquemas y la matriz correspondiente.

Figura 21. Configuración de Enlaces de Comunicación.



Las simulaciones están organizadas en siete casos de estudio, los cuales inician con una comprobación del rendimiento de las estrategias distribuidas para el control de frecuencia en modo

ideal. Posteriormente, se examina la robustez de cada estrategia implementada para los tres escenarios de fallos en los enlaces de comunicación descritos en la sección 2.2.5.

A continuación, se describen los resultados de los casos de estudio correspondientes:

**Caso de estudio 1**, en el cual, con relación a la comprobación del rendimiento en modo ideal, se realizó la simulación para tres diferentes valores de referencia nominal de la frecuencia. En los tres sub-estudios (1A, 1B, 1C), se encuentra activo solo el control primario de cada DG durante los primeros 12 segundos y, justo en este momento, se activan los controladores secundarios.

Ahora bien, considerando la dinámica de la frecuencia en las gráficas presentadas a continuación (ver figuras 22, 23, 24 y 25), la desviación de frecuencia experimentada bajo el control primario es rápidamente corregida por el control secundario mediante las estrategias de control de consenso y promedio; lo cual se cumple para las configuraciones mencionadas anteriormente. Por otro lado, la potencia activa se reparte con precisión entre los generadores durante el tiempo de simulación, es decir, el control de la MR es funcional y robusto.

Figura 22. Frecuencia-Estrategia Consenso Modo Ideal.

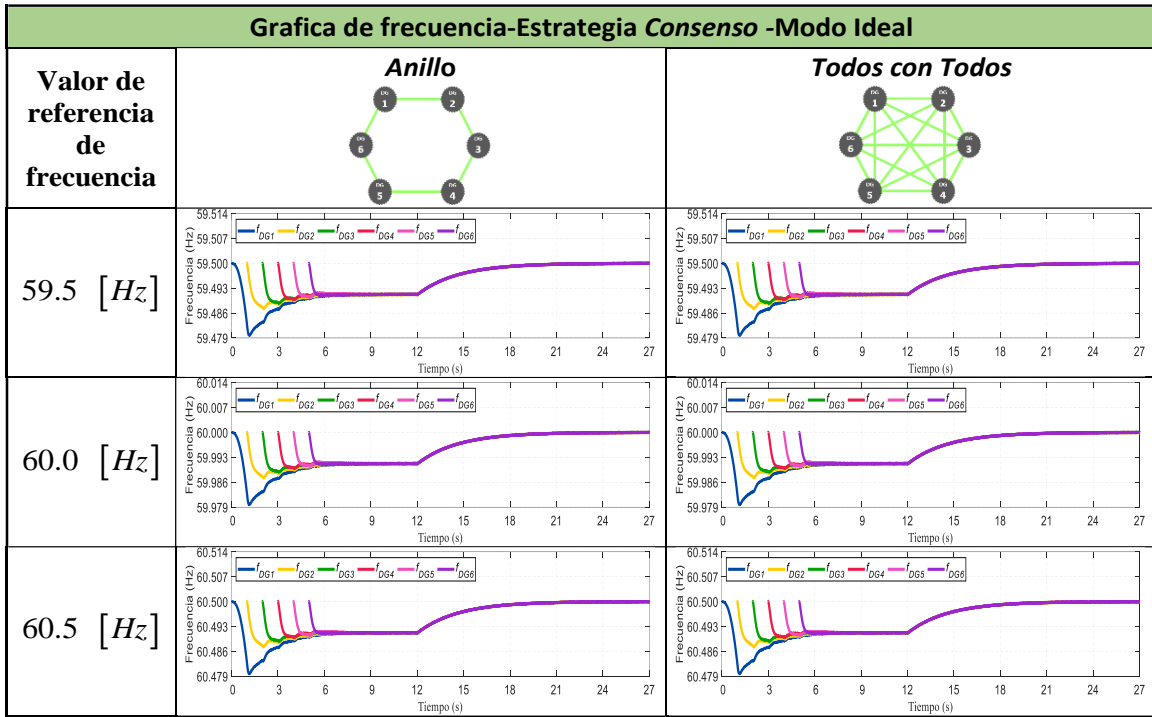


Figura 23. Potencia-Estrategia Consenso Modo Ideal.

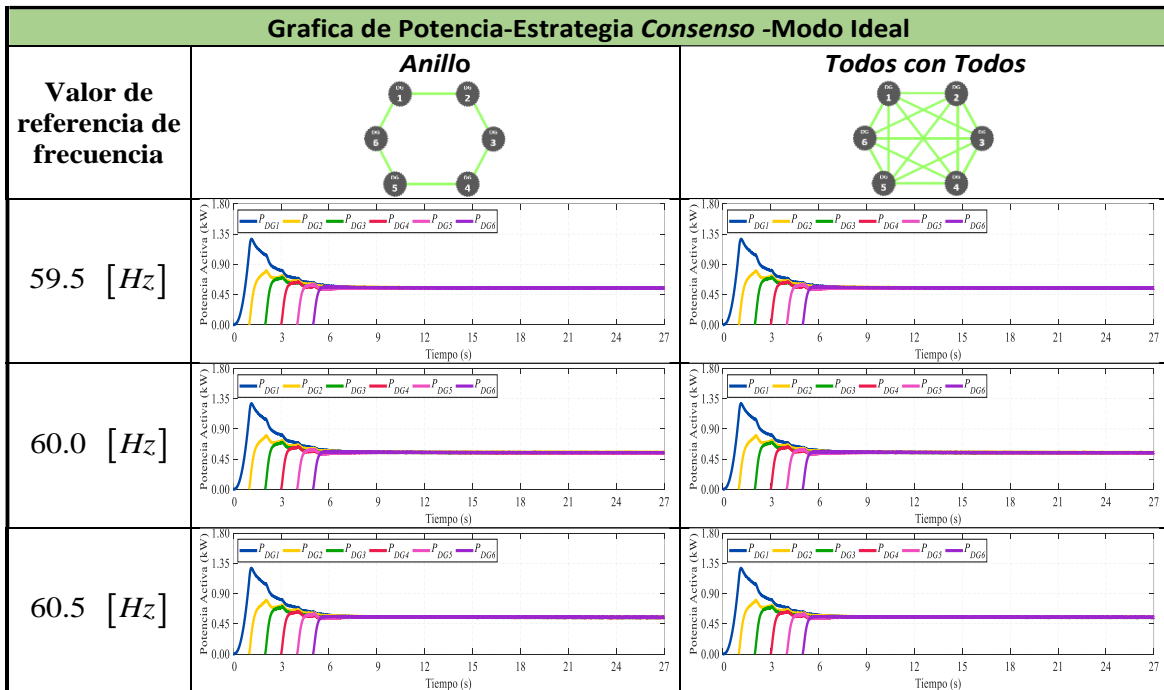


Figura 24. Frecuencia-Estrategia Promedio Modo Ideal.

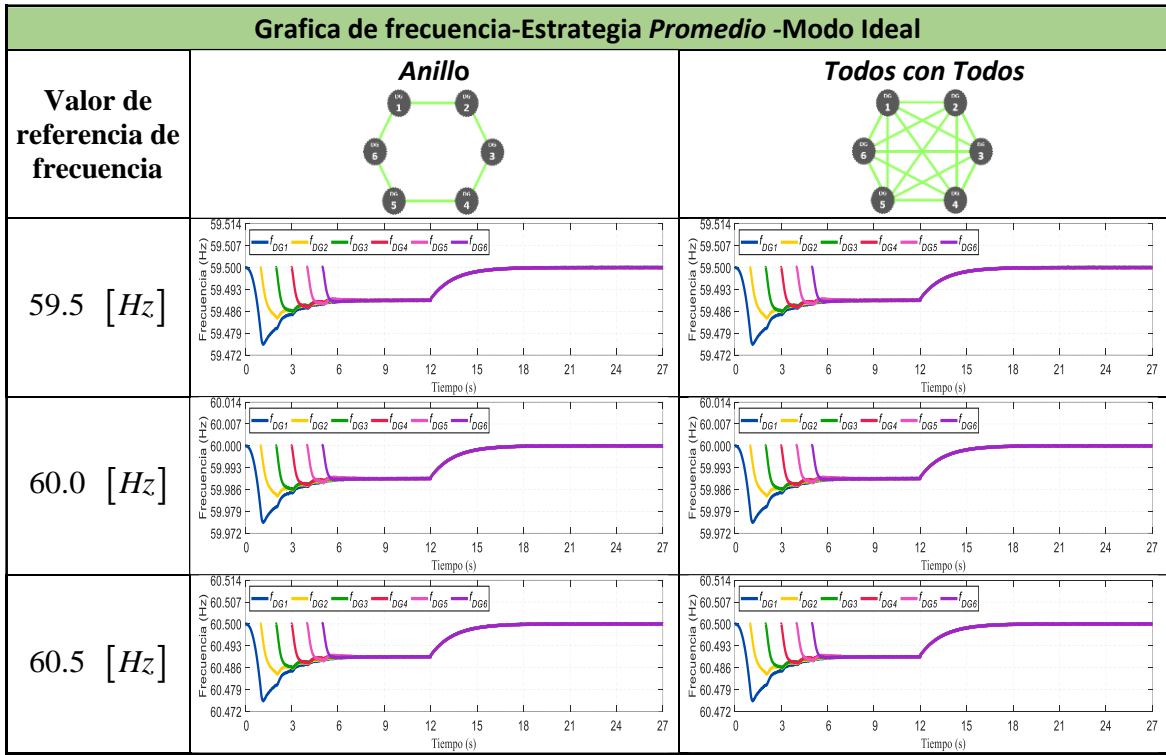
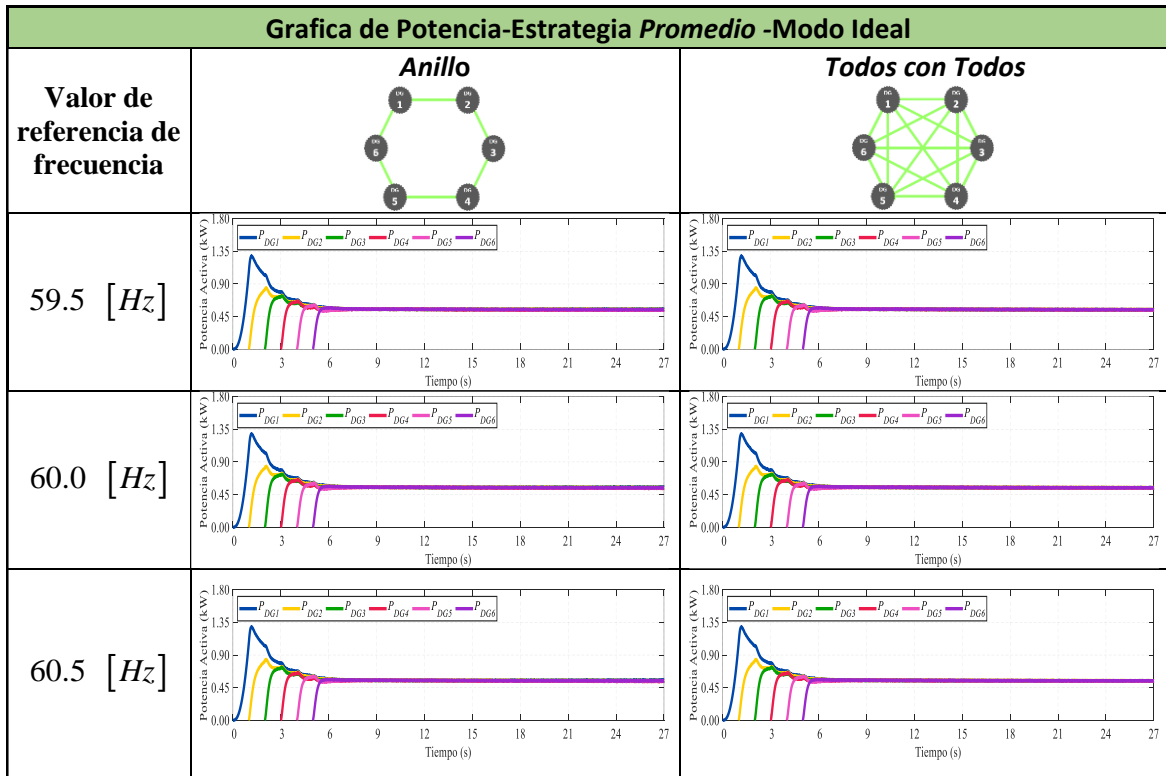


Figura 25. Potencia-Estrategia Promedio Modo Ideal.





Para el Caso de estudio 2 y para los posteriores -que se amplían enseguida-, se evalúa la robustez de las estrategias implementadas ante fallos en los enlaces de comunicación. Del mismo modo, se tienen en cuenta los mismos parámetros de control y los tiempos de activación de los controladores (primario y secundario), establecidos para el caso ideal.


A partir de la figura 26 hasta la 31, se observa el nivel de impacto de la falla en las características de la MR, es decir, la forma en la que se afecta el rendimiento del comportamiento operativo ideal del sistema; en ellas se omite la información desde el segundo 0 hasta el 9, dado que son los mismos resultados del Caso 1. Esta omisión se realiza con la finalidad de enfatizar el impacto de la falla en el comportamiento de las estrategias implementadas en el control secundario, el cual es el objeto de estudio de este proyecto.

De manera complementaria, se realiza un análisis cualitativo que permite clasificar en tres diferentes categorías el nivel de impacto de las perturbaciones en las estrategias de control implementadas *consenso y promedio*.

Dichas categorías se expresan según el siguiente código de color:

Color 1:  Bajo impacto, que implica que la gráfica de la frecuencia no se vea alterada.

Color 2:  Mediano impacto, cuando la gráfica de la frecuencia se ve alterada, pero el control sigue siendo robusto, concretamente, cuando la frecuencia, a pesar de las desviaciones presentadas en el fallo, vuelve a su valor de referencia nominal en el mismo tiempo que el caso ideal, es decir antes de los 21 segundos.

Color 3:  Alto impacto, implicando que hay desviación en la frecuencia y el control no es capaz de llevar el valor de la frecuencia a su valor de referencia en el tiempo antes de 21 segundos.

Por su parte, el siguiente diagrama muestra la forma en la que se conforman el segundo, tercer, cuarto y quinto caso.

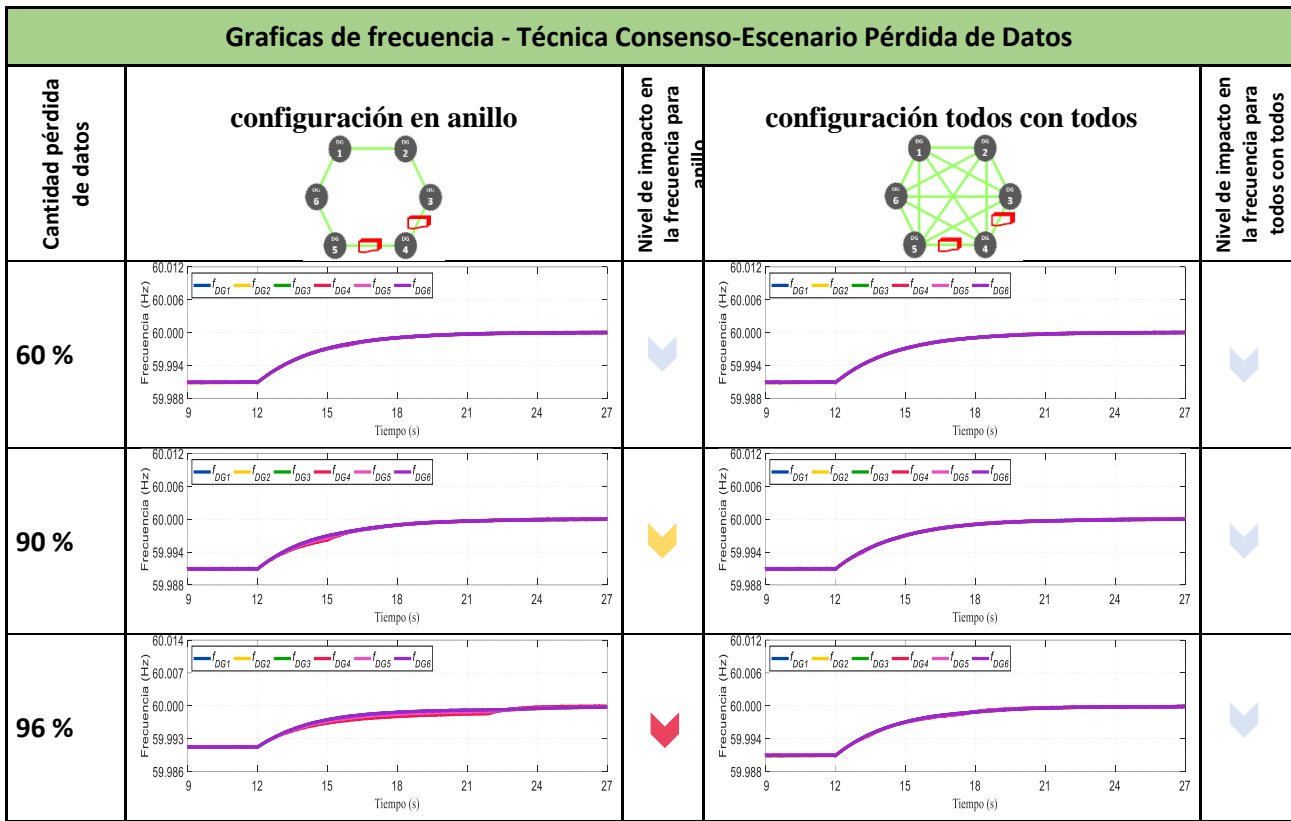


**Caso de estudio 2:** En este escenario, se evaluó el impacto de la perturbación *pérdida de un porcentaje de datos enviados* en los enlaces de comunicación entre  $DG_3 \square DG_4$  y  $DG_4 \square DG_5$ , sobre la estrategia de control *consenso*; para la que se tomaron el 60, 90 y 96%, respectivamente, como porcentajes de pérdidas para la prueba.

Así pues, observamos que en la configuración *en anillo*, con el 60% de pérdida de datos, la frecuencia no se desvía; con el 90%, la frecuencia se desvía poco, pero se recupera antes de los 21 segundos y, con el 96% observamos una desviación en la frecuencia, la cual no se recupera antes de los 21 segundos.

Por otro lado, en la configuración de *todos con todos*, para los tres diferentes porcentajes observamos que la gráfica de frecuencia sufre muy poca desviación, indicando así, que la configuración *todos con todos* tiene mayor robustez ante este escenario.

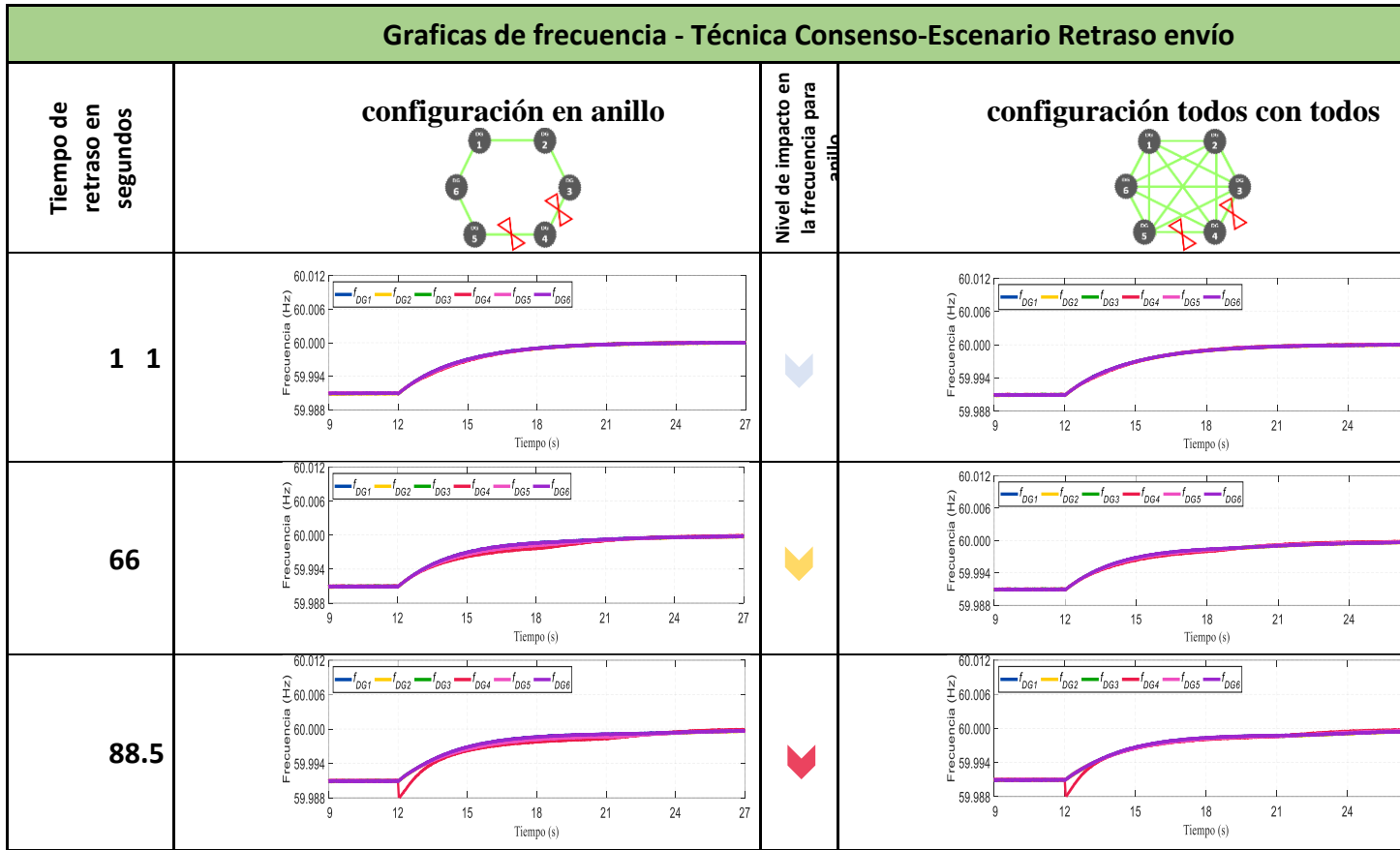
Figura 26. Graficas de frecuencia - Técnica Consenso-Escenario Pérdida de Datos.



**Caso de estudio 3:** En continuidad con el experimento, el siguiente escenario evaluó el impacto de la perturbación *retraso en el envío de la información* de los enlaces de comunicación que conectan  $DG_3 \square DG_4$  y  $DG_4 \square DG_5$ , para la estrategia de control *consenso*, tal y como se muestra en la figura 27. Para la configuración *en anillo* un retraso de un milisegundo es poco significativo, mientras que, en un retraso de 6 milisegundos, se presenta un impacto medio en la frecuencia y con un retraso de 8,5 milisegundos, se presenta una mayor desviación en la frecuencia, que no se recupera sino hasta después de los 21 segundos.

Por otra parte, en la configuración de *todos con todos*, se puede notar cómo se afecta la frecuencia en menor grado para los tres tiempos de retraso; sin embargo, en el tercer tiempo, la gráfica de frecuencia presenta un nivel de impacto medio, tal como se muestra a continuación:

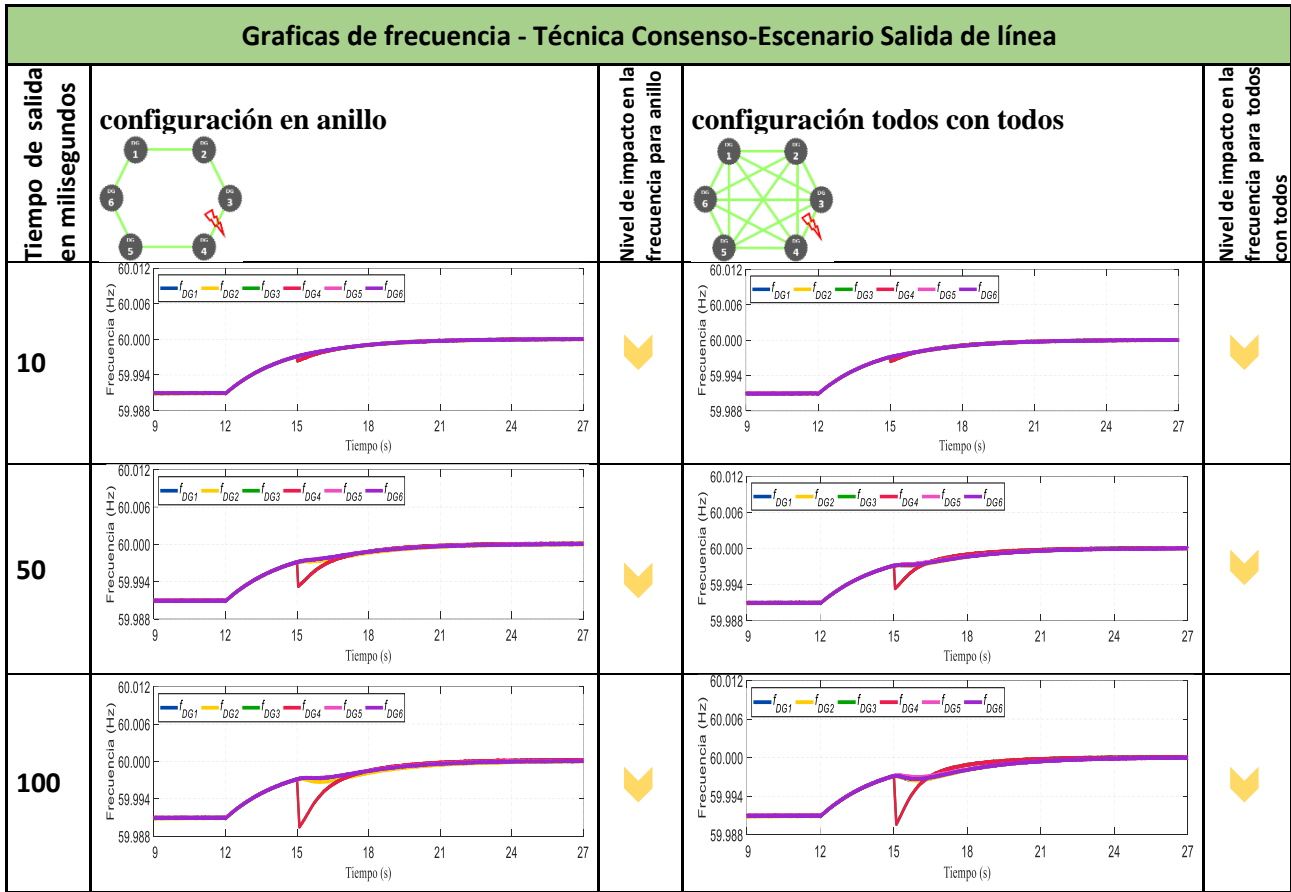
Figura 27. Graficas de Frecuencia - Técnica Consenso-Escenario Retraso envío.



**Caso de estudio 4:** Para el siguiente escenario, se evaluó el impacto de la perturbación *salida de un enlace de comunicación* por un tiempo definido sobre la estrategia de control *consenso*, en este caso el enlace de comunicación desconectado durante la simulación es quien comunica a  $DG_3$  y  $DG_4$ .

En la figura 28, se puede apreciar el impacto tanto en la *configuración de anillo* como la de *todos con todos* cuando la línea se sale durante 10, 50 y 100 milisegundos respectivamente; además, considerando que en este escenario, ambas configuraciones tienen la misma desviación, se puede inferir que para la salida de una línea, la configuración es poco significativa respecto a los resultados obtenidos.

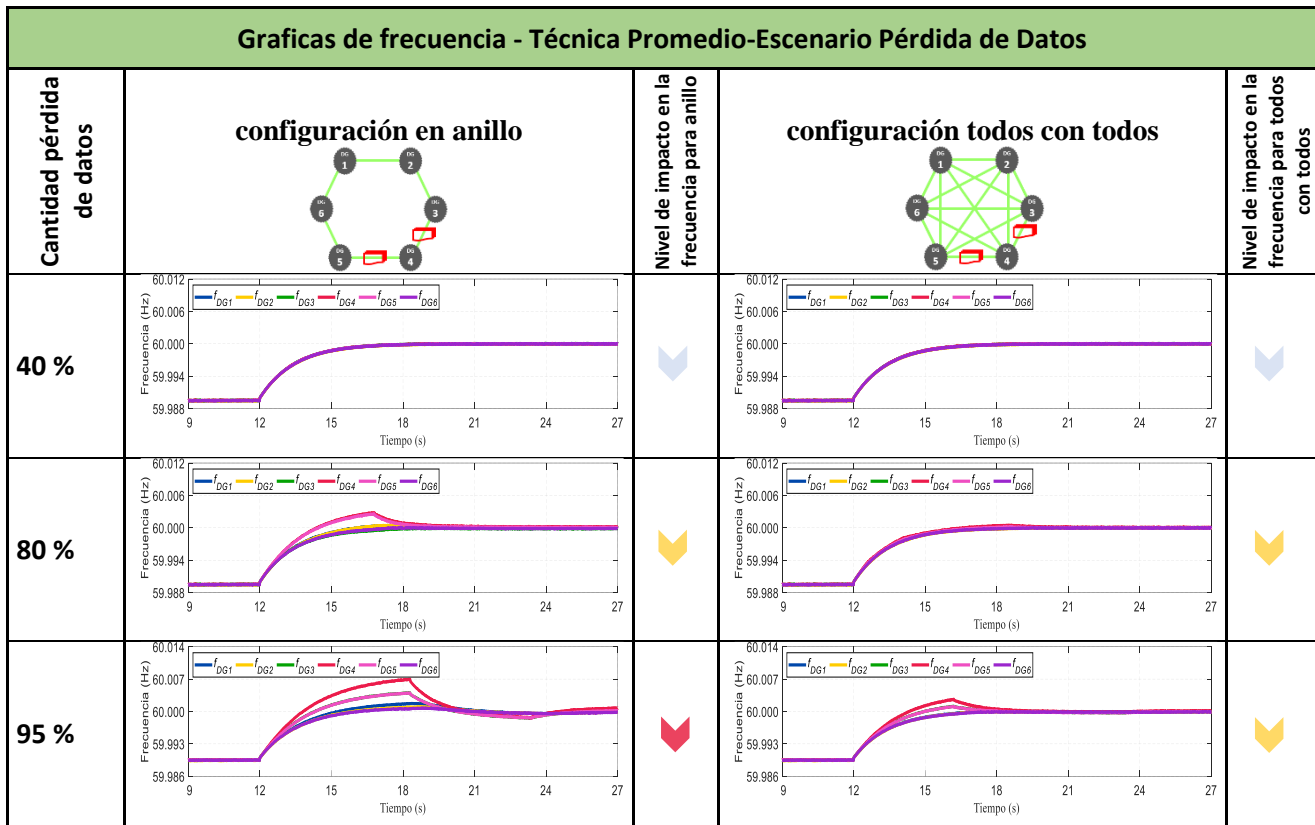
Figura 28. Graficas de frecuencia - Técnica Consenso-Escenario Salida de línea.



**Caso de estudio 5:** En el próximo escenario se muestra el impacto de la perturbación *pérdida de un porcentaje de datos enviados* en los enlaces de comunicación entre  $DG_3 \square DG_4$  y  $DG_4 \square DG_5$ , sobre la estrategia de control *Promedio*.

En esta estrategia, se puede observar una mayor desviación de las frecuencias durante la recuperación del valor nominal de referencia. Los porcentajes tenidos en cuenta en esta prueba son del 40, 80 y 95% respectivamente, donde el 40% representa bajo impacto, el 80% mediano impacto y el 95% el mayor impacto para la configuración de anillo. En contraste con lo anterior, en la configuración de *todos con todos*, se presenta solo nivel de impacto bajo y medio, como lo ilustra la siguiente figura.

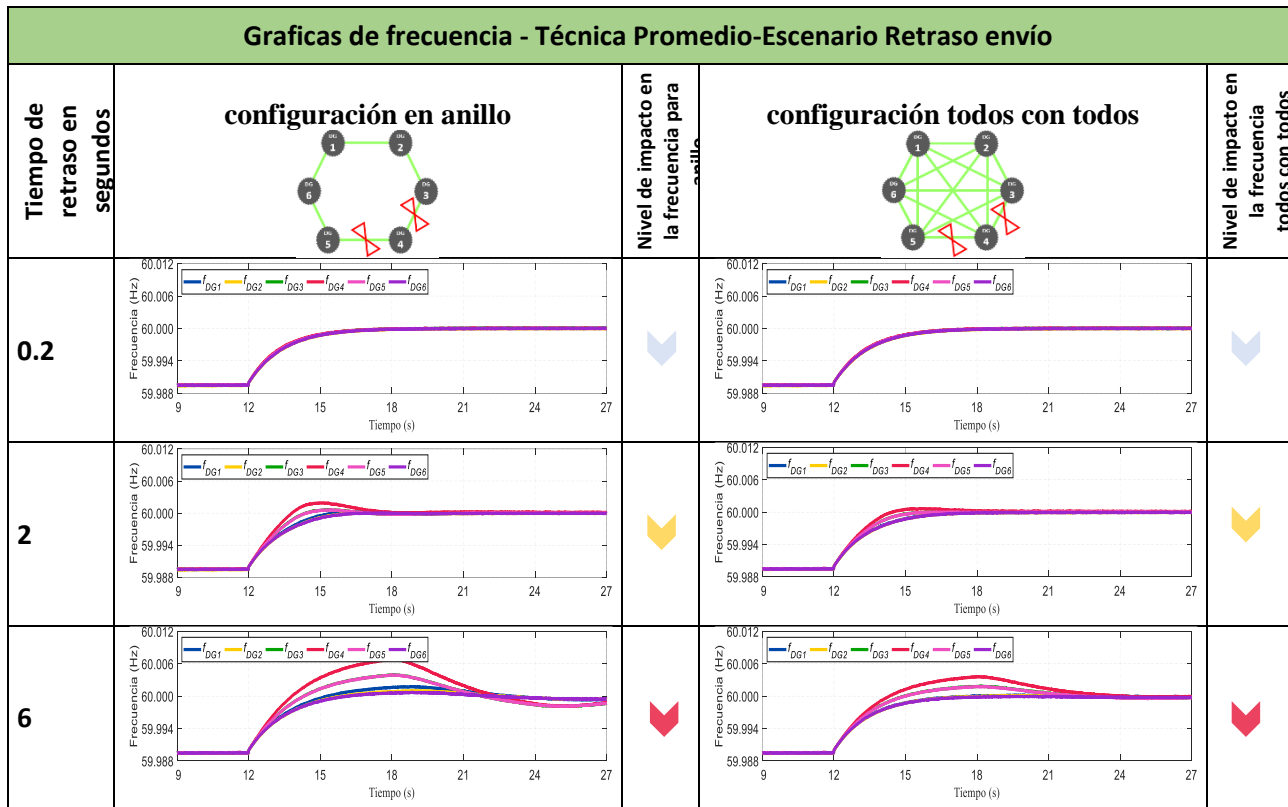
Figura 29. Graficas de frecuencia - Técnica Promedio-Escenario Pérdida de Datos.



**Caso de estudio 6:** A continuación, se muestra un escenario donde se evaluó el impacto de la perturbación *retraso en el envío de la información* de los enlaces de comunicación que conectan  $DG_3 \square DG_4$  y  $DG_4 \square DG_5$ , para la estrategia de control *Promedio*. El tiempo de retardo de las señales fue de 0.2, 2 y de 6 segundos respectivamente.

Como se puede apreciar en la imagen 30, para la *configuración en anillo* se presentan niveles de impacto bajo, medio y alto, igual que en la configuración *todos con todos*; aunque en la última, la desviación en la frecuencia es menor, lo cual indica que en la estrategia del promedio y el retraso en el envío de la información, se afectan ambas configuraciones del mismo modo.

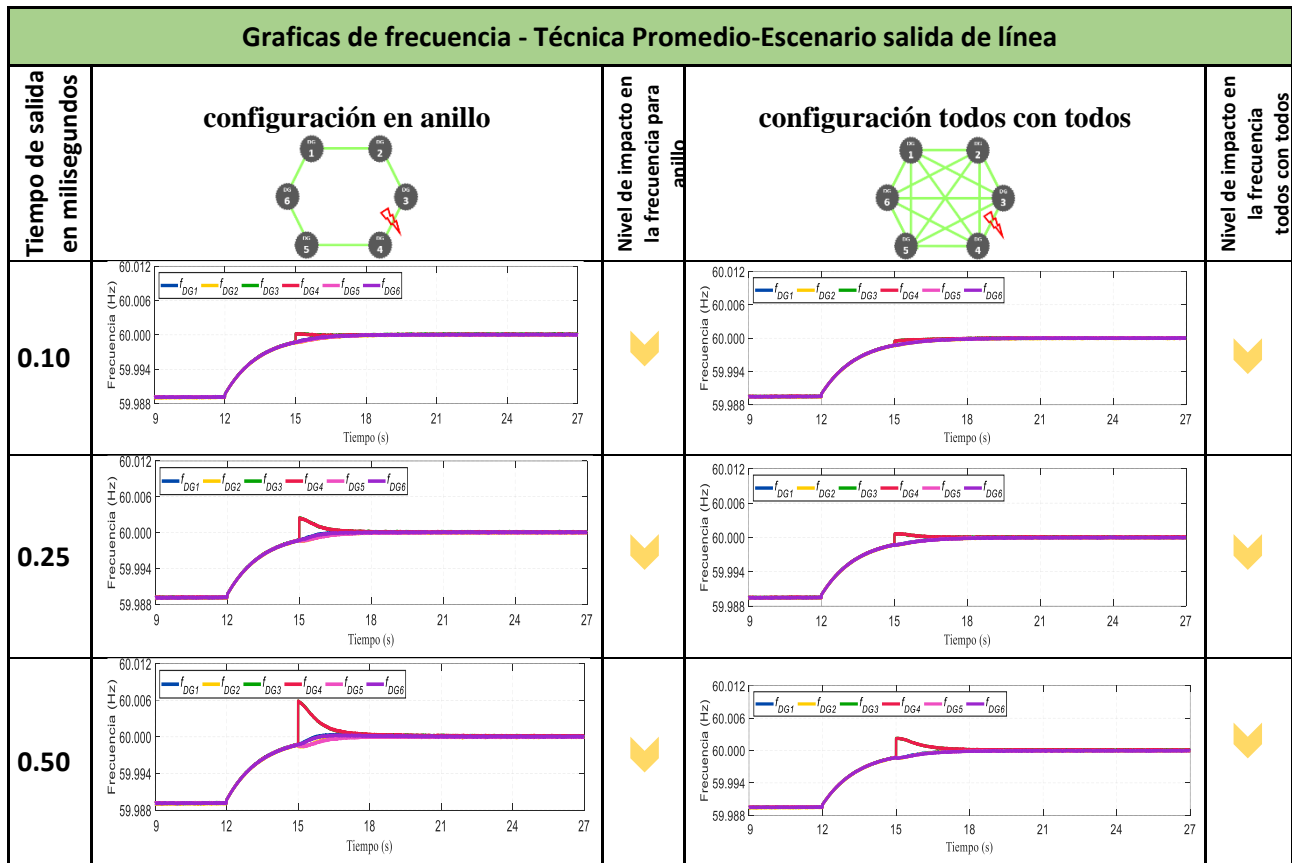
Figura 30. Graficas de frecuencia - Técnica Promedio-Escenario Retraso envío.



**Caso de estudio 7:** Aquí, se evaluó el impacto de la perturbación *salida de un enlace de comunicación* por un tiempo definido para la estrategia de control *Promedio*. En este caso el enlace de comunicación desconectado durante la simulación es quien comunica a  $DG_3$  y  $DG_4$ .

Como se ilustra enseguida, en la figura 31, el tiempo en que se programó la salida de enlace de comunicación fue  $t=15$  segundos, con duración de desconexión de 0.10, 0.25 y 0.50 segundos respectivamente. Así mismo, se puede observar que, para la *configuración en anillo* las desviaciones en la recuperación de la frecuencia a su valor de referencia nominal respecto al ideal son más significativas que en la *configuración todos con todos*.

Figura 31. Graficas de frecuencia - Técnica Promedio-Escenario Salida de línea.



Las gráficas de *potencia activa*, son presentadas en el Apéndice A, éstas ilustran la potencia para cada uno de los escenarios descritos anteriormente.

#### 4.1 Discusión de los resultados

Las estrategias de control evaluadas son la del *consenso* y la del *promedio*, las cuales, también se describen e implementan en Simulink de Matlab. Ambas estrategias, cumplen con el objetivo de restauración del desvío en la frecuencia que se presenta debido a la dinámica que se mantiene durante el arranque de los generadores y la acción del control primario. Con este fin, se simularon diferentes escenarios de operación y posibles fallas que pueden presentarse en los enlaces de comunicación durante la operación de la MR.

Como primer escenario de evaluación, se verifica la robustez de las estrategias de control cambiando los valores de referencia de la frecuencia y se analiza la capacidad de corregir las desviaciones posibles en un escenario ideal sin fallos en los enlaces de comunicación. De acuerdo con los resultados obtenidos en las simulaciones se valida tanto la robustez como la fiabilidad de las estrategias, teniendo en cuenta que ambas lograron corregir y llevar la frecuencia a su valor de frecuencia nominal en cada caso.

Por otro lado, estas estrategias revelaron ser robustas ante la operación con posibles fallos que pueden llegar a presentarse en los enlaces de comunicación, como pérdida de datos, retraso en el envío de las señales y salida o desconexión de un enlace por un tiempo definido. Ambas fueron sometidas a estos distintos casos de operación y, de acuerdo con los resultados obtenidos en las simulaciones, se logra evidenciar la capacidad de éstas para corregir las desviaciones presentadas en la frecuencia debidas a la acción del control primario. Para ello, se tuvieron en cuenta dos configuraciones diferentes de los enlaces de comunicación entre los generadores de la MR, *en anillo* y *todos con todos*; logrando en las dos, recuperar la frecuencia a su valor de referencia nominal.

Cabe resaltar que, estas estrategias de control evaluadas dependen de las comunicaciones; es decir, la configuración de conexión de los enlaces de comunicación es importante a la hora de ejecutarse la acción de control. En ese sentido, dentro de las dos configuraciones evaluadas en este proyecto, se evidencia que en la configuración de *todos con todos*, las desviaciones de la frecuencia presentadas con respecto al caso ideal eran de menor impacto que las presentadas en la configuración de *en anillo*. Esto es debido a que estas estrategias de control usan la información de los demás generadores, por lo tanto, a mayor número de enlaces de conexión, más información

y; al presentarse un fallo en alguno de ellos, la repercusión es menos significativa, lo cual brinda un mejor rendimiento en el control y operación del sistema.

Adicionalmente, se puede concluir que la estrategia de control *consenso* es más robusta que la estrategia de control *promedio*, aunque ambas cumplen satisfactoriamente con el objetivo de control debido al algoritmo de control que la conforma; el cual, además de hacer uso de las medidas de las señales de la frecuencia de los generadores vecinos con los cuales tienen enlaces de conexión activos, se comparten también los valores de las desviaciones de cada uno de ellos, las cuales son tenidas para realizar la acción de control. Por lo mismo, en la estrategia de control *consenso*, la elección de la configuración es menos significativa, puesto que, para ambas configuraciones evaluadas en este estudio, los resultados fueron medianamente parecidos.

Finalmente, se presenta la siguiente imagen, donde se resume el nivel de impacto de las fallas implementadas en la acción de control de las estrategias durante la operación de la MR, de acuerdo con los resultados obtenidos en las simulaciones.

Figura 32. Nivel de impacto de las fallas en las estrategias implementadas según la configuración seleccionada.

Estrategia del Consenso											
pérdida de datos	Porcentaje de pérdida	Configuración		retraso en envío de información	Tiempo de retraso en segundos	Configuración		salida de un enlace de comunicación	Tiempo de salida en milisegundos	Configuración	
		impacto bajo	impacto bajo			impacto bajo	impacto bajo			impacto medio	impacto medio
		impacto alto	impacto bajo			impacto alto	impacto medio			impacto medio	impacto medio
	40%				1.0 s				1 ms		
	60%				6.0 s				50 ms		
	95%				8.5 s				100 ms		
Estrategia del Promedio											
pérdida de datos	Porcentaje de pérdida	Configuración		retraso en envío de información	Tiempo de retraso en segundos	Configuración		salida de un enlace de comunicación	Tiempo de salida en milisegundos	Configuración	
		impacto bajo	impacto bajo			impacto medio	impacto medio			impacto medio	impacto medio
		impacto alto	impacto bajo			impacto alto	impacto alto			impacto medio	impacto medio
	40%				0.2 s				0.10 ms		
	80%				2.0 s				0.25 ms		
	95%				6.0 s				0.50 ms		

## 5. Conclusiones

En este proyecto se identificaron, describieron y evaluaron dos estrategias distribuidas con comunicaciones para el control de frecuencia aplicadas en la capa secundaria del control de una MR eléctrica aislada (*promedio* y *conceso*), mediante la simulación en Simulink de Matlab de diferentes tipos de fallos que afectan las comunicaciones; además de exponer la esencia de las estrategias de control seleccionadas y las ecuaciones que las definen matemáticamente.

Al implementar la MR y los modelos de las estrategias *promedio* y *consenso* en Simulink de Matlab, es necesario conocer el comportamiento de cada modelo de los elementos y la selección de los parámetros correctos para la emulación del comportamiento de las características de la MR; por ende, se implementó un modelo de la parte de conexión física o de potencia de los elementos que integran la MR y un modelo de control encargado de comunicaciones y operación entre los elementos del sistema.

En consecuencia, se plantearon diferentes escenarios de operación de la MR y se simularon distintos tipos de fallas teniendo en cuenta criterios que afectan las comunicaciones, como la pérdida de datos, los retrasos y la desconexión de un enlace; para lo que, la elección de la configuración de los enlaces de comunicación y el lugar donde se registra la falla son lo más relevante. Adicionalmente, se obtuvo el comportamiento de las características de operación de la frecuencia y potencia para las estrategias distribuidas del *promedio* y el *consenso*.

Por último, el análisis cualitativo de los resultados obtenidos en las simulaciones de los escenarios planteados, evaluó el nivel de impacto de las fallas simuladas en el rendimiento de la acción de control de las estrategias para la gráfica de frecuencia.

**Referencias Bibliográficas**

- Abbas, A. Lasseter, R. Marnay, C. Stephens, J. Dagle, J. Guttromson, R. Meliopoulos, A. Yinger, R. & Eto, J. (2002). *Integration of distributed energy resources. The CERTS Microgrid Concept*. <https://escholarship.org/uc/item/9w88z7z1#main>
- Alvez, E. (1999). Small Signal Stability For Single Phase Inverter Connected to Stiff AC System. *Conference Record of the 1999 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Forth IAS Annual Meeting*. (4). 2180-2187. <https://ieeexplore.ieee.org/document/798756>
- Anzures, C. (2018). *Análisis y Diseño de una Micro Red Eléctrica*. Universidad de Quintana Roo. División de Ciencias e Ingeniería. <http://risisbi.uqroo.mx/handle/20.500.12249/1594>
- Babazadeh, M. (2011). Robust decentralized control for islanded operation of a microgrid. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*. 1-8. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6039646>
- Barrera, F. (2016). *Control primario con pendiente variable aplicado en microrredes aisladas*. Universidad de Chile <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/140620>
- Bevrani, H. (2016). Robust Frequency Control in an Islanded Microgrid:  $H_\infty$  and  $\mu$  - Synthesis Approaches. *IEEE Transactions on Smart Grid*. (7)2. 706-717. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7159089>
- Brearley, J. & Prabu, R. (2017). A Review on Issues and Approaches for Microgrid Protection. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. (67). 988-997. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032116305354>

- Borup, U. (2001). Sharing of Nonlinear Load in Parallel-Connected Three-Phase Converters. *IEEE Transactions on Industry Applications*. (37)6. 1817-1823.  
<https://ieeexplore.ieee.org/document/968196>
- Chandorkar, M. (1993). Control of Parallel Connected Inverters in Standalone ac Supply Systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*. (29)1. 136-143.  
<https://ieeexplore.ieee.org/document/195899>
- Che, L. (2015). Hierarchical Coordination of a Community Microgrid With AC and DC Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*. (6)6. 3042-3051.  
<https://ieeexplore.ieee.org/document/7055892>
- Dobakhshari, S. (2011). Control of microgrids: Aspects and prospects. *International Conference on Networking, Sensing and Control*. 38-43. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5874892>
- Espina, E. (2017). *Control Droop por Fase Aplicado a Micro Redes de 4 Hilos*. Universidad de Chile. <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/146665>
- Farhangi, H. (2009). The Path of the Smart Grid. *IEEE Power and Energy Magazine*. (8)1.18-28.  
<https://ieeexplore.ieee.org/document/5357331>
- González, N. Cusgüen, C. Mojica-Nava, E. Pavas, A. (2017). Estrategias de control de calidad de energía en microrredes rurales. *Revista UIS Ingenierías*. (16), 2. pp. 93-104.  
<https://doi.org/10.18273/revuin.v16n2-2017009>
- Green, T. & Podanovic, M. (2007). Control of inverter-based micro-grids. *Electric Power Systems Research*. (77)9. 1204-1213.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S037877960600191X>

- Grisales, L. Restrepo, B. & Jaramillo, F. (2017). Ubicación y dimensionamientos de generación distribuida: una revisión. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*. (27)2. 157-176.  
<https://revistas.unimilitar.edu.co/index.php/rcin/article/view/2344>
- Guerrero, J. Vicuna, L. Matas, J. Castilla, M. & Miret, J. (2004). A Wireless Controller to Enhance Dynamic Performance of Parallel Inverters in Distributed Generation Systems *IEEE Transactions on Power Electronics*. (19)5. 1205-1213.  
<https://ieeexplore.ieee.org/document/1331481>
- Hatziargyriou, H. (2007). Microgrids. *IEEE Power and Energy Magazine*. (5)4. 78-94.  
<https://ieeexplore.ieee.org/document/4263070>
- Kaur, A. Kaushal, J. & Basak, P. (2016). A review on microgrid central controller. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. (55). 338-345.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032115012204>
- Kostova, H. (2005). New protection concepts for distribution systems with dispersed generation. *IEEE Russia Power Tech*. pp. 1-6. <https://ieeexplore.ieee.org/document/4524398>
- Lasseter, R. (2002). MicroGrids. *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings*. 305-308. <https://ieeexplore.ieee.org/document/985003>
- Lee, J. (2010). Smart Grid Solutions, Services, and Business Models Focused on Telco. *IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium Workshops*. 323-326.  
<https://ieeexplore.ieee.org/document/5486554>
- Luo, F. (2012). A Triple-Droop Control Scheme for Inverter-Based Microgrids. *38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*. 3368-3375.  
<https://ieeexplore.ieee.org/document/6389357>

- Mina, J. Caicedo, E. & Lozano, C. (2017). Una propuesta de integración de arquitecturas de generación descentralizada en ambientes de micro-redes. *Entre ciencia e ingeniería*. (11)22. 9-17. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S1909-83672017000200009](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1909-83672017000200009)
- Mosquera, P. (2014). *Operación confiable de una microrred aislada con generador principal Diesel, aplicando un sistema de control difuso en el deslastre de sus cargas*. Universidad Politécnica Salesiana de Cuenca.  
<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/7290/1/UPS-CT004221.pdf>
- Nejabatkhah, F. (2015). Overview of Power Management Strategies of Hybrid AC/DC Microgrid. *IEEE Transactions on Power Electronics*. (30)12. 7072-7089.  
<https://ieeexplore.ieee.org/document/6994843>
- Pedrasa, M & Spooner, T. (2006). A Survey of Techniques Used to Control Microgrid Generation and Storage during Island Operation. Proceedings of the Australian Universities Power Engineering Conference. 1-6.  
<https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.129.7253&rep=rep1&type=pdf>
- Pogaku, N. (2017). Modeling, Analysis and Testing of Autonomous Operation of an Inverter-Based Microgrid. *IEEE Transactions on Power Electronics*. (22)2. 613-625.  
<https://ieeexplore.ieee.org/document/4118327>
- Prieto & Peña. (2018). *Diseño y simulación de las diferentes etapas de control en una micro red eléctrica*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.  
<https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/7980>

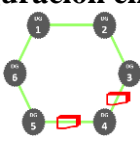
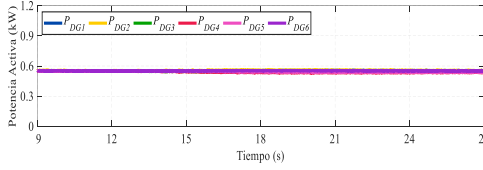
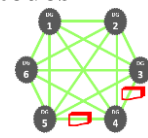
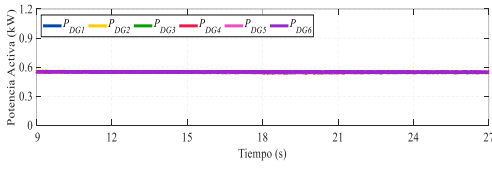
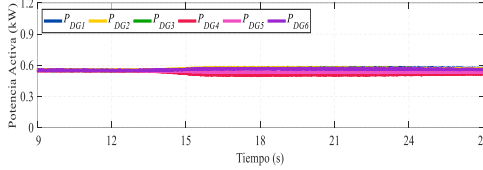
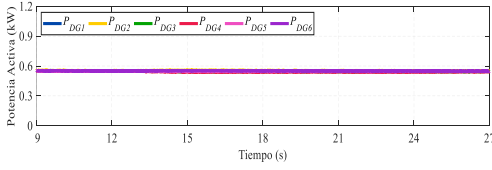
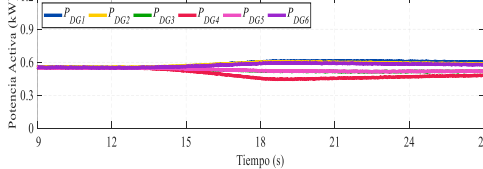
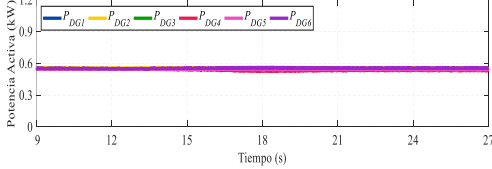
- Sen, S & Kunar, V. (2018). Microgrid control: A comprehensive survey. *Annual Reviews in Control*. 45. 118-151.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1367578818300373>
- Trebolle, D. (2016). *La Generación Distribuida en España*. Universidad Pontificia de Madrid.  
[https://www.ingenieros.es/files/proyectos/Generacion\\_Distribuida.pdf](https://www.ingenieros.es/files/proyectos/Generacion_Distribuida.pdf)
- Yaokin, J. (2011). Improved Droop Control of Parallel Inverter System in Standalone Microgrid. *8th International Conference on Power Electronics*. 1506-1513.  
<https://ieeexplore.ieee.org/document/5944493>
- Kin, Y. Park, H & Lee, H. (2011). Coordinated Control Strategy for Microgrid in Grid-Connected and Islanded Operation. *International Federation of Automatic Control IFAC Proceedings Volumes*. (44)1. 14766-14771.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016460015>
- Zhangjie (2011). Control Strategy of Microgrid Inverter Operation In Grid-connected and Grid-disconnected Modes. *International Conference on Electric Information and Control Engineering*. 1257-1260 <https://ieeexplore.ieee.org/document/5777376>

Apéndices

Apéndice A:

Graficas de potencia activa del caso de estudio 2

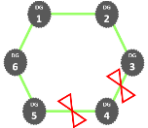
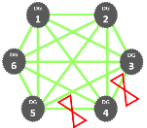
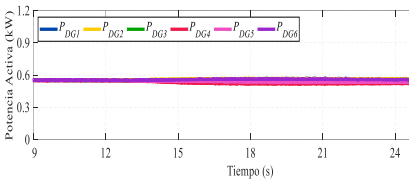
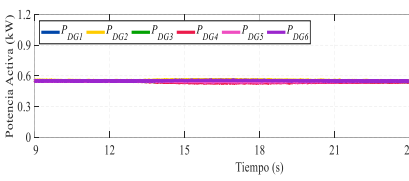
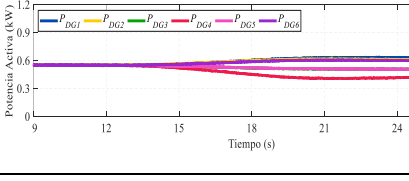
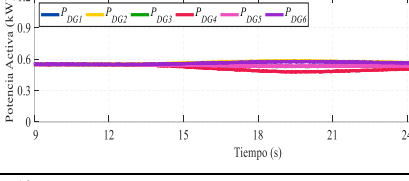
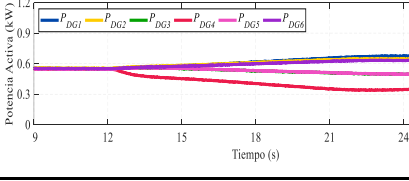
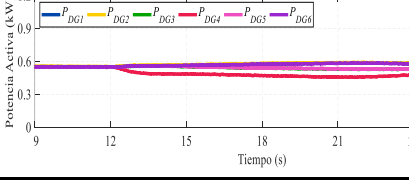
Apéndice A: Graficas de potencia activa del caso de estudio 2.

Graficas de potencia - Técnica Consenso-Escenario Pérdida de Datos				
Cantidad pérdida de datos	configuración en anillo	Nivel de impacto en la frecuencia para anillo	configuración todos con todos	Nivel de impacto en la frecuencia para todos con todos
60 %				
90 %				
96 %				

Apéndice B:

Graficas de potencia activa del caso de estudio 3

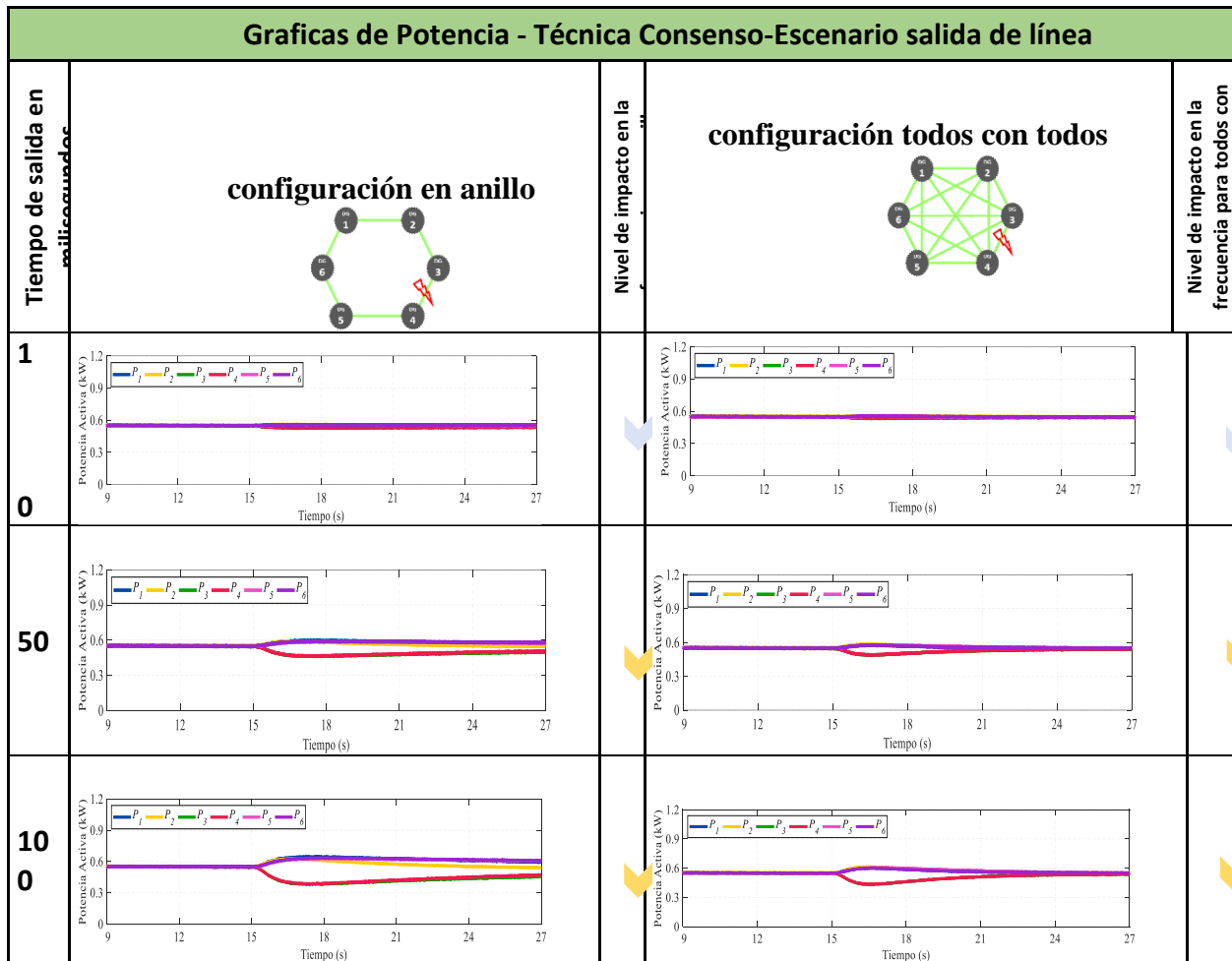
Apéndice B. Graficas de potencia activa del caso de estudio 3.

Graficas de potencia - Técnica Consenso-Escenario Retraso envío				
Tiempo de retraso en segundos	configuración en anillo 	Nivel de impacto en la frecuencia para anillo	configuración todos con todos 	Nivel de impacto en la frecuencia para todos con todos
1		↓		↓
6		↓		↓
8.5		↓		↓

Apéndice C:

Graficas de potencia activa del caso de estudio 4

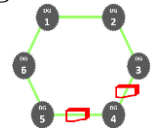
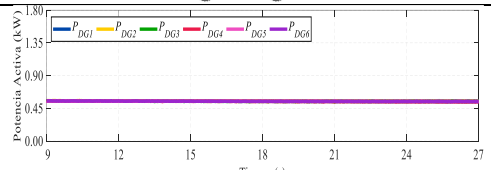

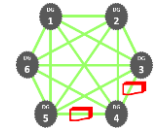
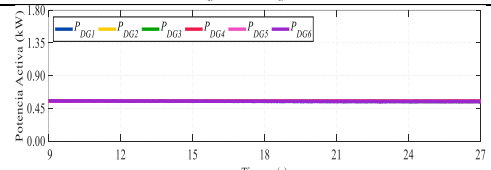

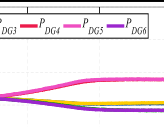
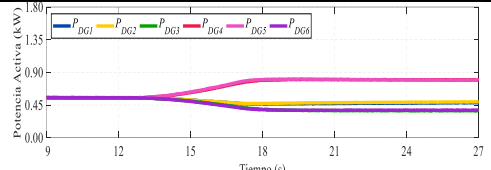

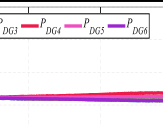
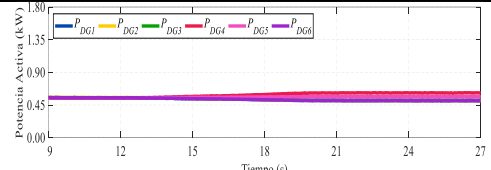

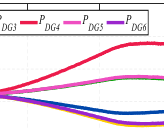
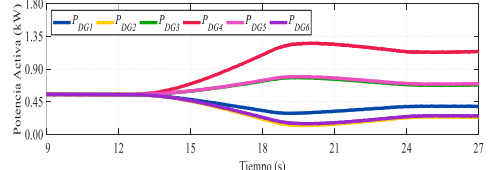

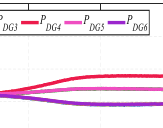
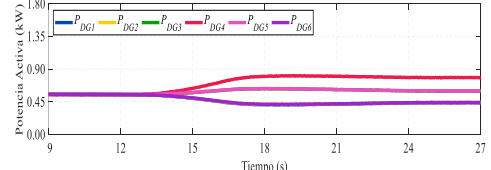

Apéndice C. Graficas de potencia - Técnica Consenso- Escenario salida de línea.



Apéndice D:

Graficas de potencia activa del caso de estudio 5

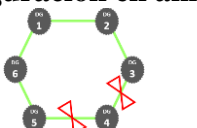

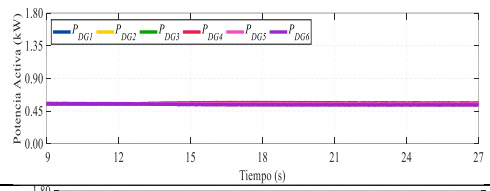

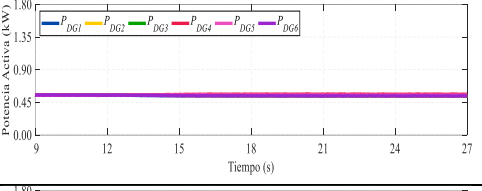
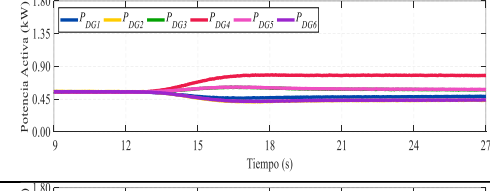

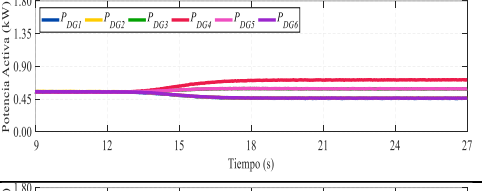
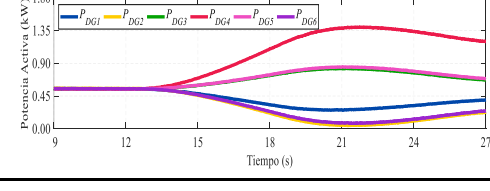

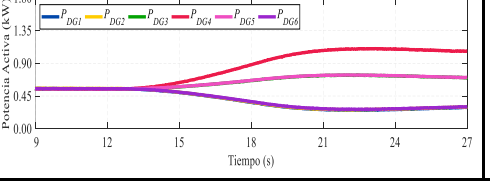
Apéndice D. Graficas de potencia - Técnica Promedio- Escenario Pérdida de Datos.

Graficas de Potencia - Técnica Promedio-Escenario Pérdida de Datos						
Cantidad pérdida de datos	configuración en anillo		Nivel de impacto en la frecuencia para anillo	configuración todos con todos		Nivel de impacto en la frecuencia para todos con todos
40 %						
80 %						
95 %						

Apéndice E:

Gráficas de potencia activa del caso de estudio 6

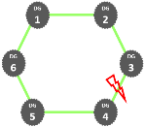

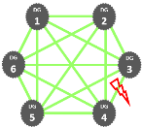

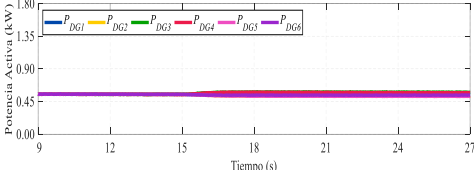
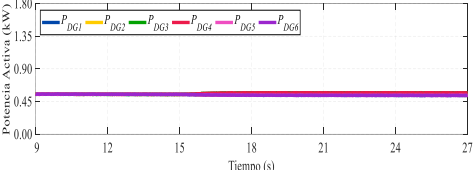
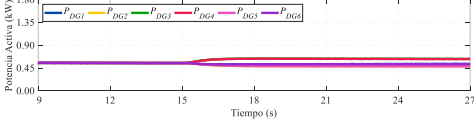

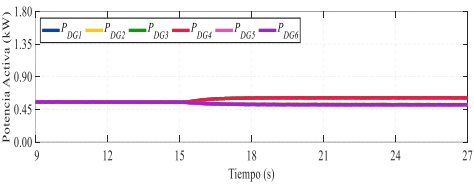

Apéndice E. Gráficas de potencia - Técnica Promedio- Escenario Retraso envío.

Gráficas de Potencia - Técnica Promedio-Escenario Retraso envío			
Tiempo de retraso en segundos	configuración en anillo 	Nivel de impacto en la frecuencia para anillo	configuración todos con todos 
0.2			
2			
6			

Apéndice F:

Graficas de potencia activa del caso de estudio 7

Apéndice F. Graficas de potencia - Técnica Promedio- Escenario Salida de línea.

Graficas de Potencia - Técnica Promedio-Escenario salida de línea				
Tiempo de salida en milisegundos	configuración en anillo	Nivel de impacto en la frecuencia para anillo	configuración todos con todos	Nivel de impacto en la frecuencia todos con todos
0.10				
				
0.25				
0.50	