



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Control no lineal de micro-redes de  
potencia basado en estimación de  
estados**

Que para obtener el título de  
**Ingeniero Eléctrico Electrónico**

**P R E S E N T A**

Diego Silva Martínez

**DIRECTORA DE TESIS**

Dra. Sofía Magdalena Ávila Becerril



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017

*A mis padres por todo el amor y el apoyo que me han dado, por siempre creer en mí y por formarme en todo lo que soy y darme todo lo que tengo, sin ustedes nada de esto sería posible y en cualquier meta que alcance siempre serán párate de ella.*

*A Mariana por ser la mejor hermana y amiga que puedo tener, por todo el cariño y apoyo que siempre me ha dado, por estar siempre conmigo a pesar de todo, por ser un gran ejemplo como persona y como profesionalista impulsándome siempre a conseguir mis metas.*

*A mis tías Rocío y Marcela por todo el cariño y apoyo que me han brindado desde pequeño, por ser una parte muy importante en mi familia y en mis metas alcanzadas.*

*A Beto y a Anahí gracias por su amistad, por ser los hermanos que elijo tener, por tantos momentos de felicidad y sobre todo por estar siempre que los necesité.*

*A mi querida amiga Jun por ser una gran amiga y confidente y por acompañarme en todo este proceso.*

*A la bonita familia de control, Pablito, Karen, Juan Carlos, Alberto, Luis por ser un gran amigo y sobre todo al Dr. Mich por ser un amigo y en más de una ocasión ser un gran maestro.*

*Gracias a todos por hacer agradable este largo proceso de titulación.*



# Reconocimientos

---

A la Universidad Nacional Autónoma de México, nuestra máxima casa de estudios, por toda la preparación y las oportunidades brindadas.

A la Dr. Sofía Ávila por ser mi tutora, por todo su tiempo y dedicación brindada, por los trabajos realizados en colaboración y sobre todo por tantas enseñanzas.

Agradezco a los miembros del jurado, Ing. Enrique Arenas, Dr. Gerardo Espinosa, Dr. Marcos Ángel González y al Dr. Rubén Tapia por su tiempo y sus valiosas observaciones.

Al Dr. Gerardo Espinosa por su labor como profesor, por sus clases que me inspiraron a estudiar control y enfocarme a los sistemas eléctricos de potencia, por permitirme ser parte de su equipo de trabajo, por todas sus enseñanzas, por todo su apoyo y paciencia brinda.

Al Dr. Hoover Mujica por ser uno de los mejores profesores que haya tenido, por ser un ejemplo como persona y como ingeniero, por apoyarme en justo en los momentos que más lo necesitaba y por todas sus enseñanzas tanto académicas como personales.

# Índice General

---

<b>Índice de figuras</b>	<b>vi</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>viii</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción . . . . .	1
1.2. Motivación . . . . .	2
1.3. Estado del Arte . . . . .	3
1.4. Planteamiento del Problema . . . . .	6
1.5. Organización de la Tesis . . . . .	7
<b>2. Preliminares (Micro-redes)</b>	<b>8</b>
2.1. Micro-redes . . . . .	8
2.2. Líneas de Transmisión de AC . . . . .	13
2.2.1. Modelo $\Pi$ . . . . .	14
2.2.2. Flujos de Potencia . . . . .	16
2.3. Control . . . . .	18
2.3.1. Control Primario . . . . .	18
2.3.2. Control Secundario . . . . .	19
2.4. Estimador . . . . .	21
<b>3. Control de Micro-redes</b>	<b>24</b>
3.1. Control de Convertidores de Potencia . . . . .	25
3.1.1. Modelo del convertidor . . . . .	25
3.1.2. Diseño del controlador . . . . .	27
3.2. Control Droop . . . . .	28
3.2.1. Análisis de transferencia de potencia . . . . .	28
3.2.2. Control Droop con la Micro-red en Modo Aislado . . . . .	30
3.2.3. Control Droop con la Micro-red en Modo Conectado . . . . .	35
3.2.4. Ejemplo Control Droop . . . . .	35
3.3. Estimador . . . . .	39
3.4. Sistema Global . . . . .	42

<b>4. Evaluación Numérica</b>	<b>45</b>
4.1. Primer Escenario . . . . .	48
4.2. Segundo Escenario . . . . .	50
4.3. Tercer Escenario . . . . .	54
4.4. Cuarto Escenario . . . . .	59
4.5. Resultados . . . . .	62
<b>5. Conclusiones</b>	<b>67</b>
<b>A. Apéndices</b>	<b>69</b>
A.1. Estructura de la Matriz de Mediciones Z . . . . .	69
A.2. Sistema por Unidad . . . . .	70
A.3. Filtros LC . . . . .	72
<b>Bibliografía</b>	<b>74</b>

# Índice de Figuras

---

2.1. Sistema eléctrico de potencia convencional . . . . .	9
2.2. Arquitectura simple de una micro-red . . . . .	10
2.3. Equivalente monofásico de una línea de longitud media, los capacitores se omiten para una línea corta . . . . .	14
2.4. Circuito nominal $\pi$ de una línea de transmisión de longitud media . . .	15
2.5. Convertidor de potencia generalizado. . . . .	19
2.6. Esquema de proceso energético . . . . .	20
2.7. Esquema de modulación de señal deseada para los inversores . . . . .	21
3.1. Esquema simplificado de un convertidor DC/AC (inversor) . . . . .	25
3.2. Inversores conectados en paralelo . . . . .	29
3.3. Potencia suministrada mediante una fuente de voltaje y una impedancia	29
3.4. Relación entre P - f y Q-V . . . . .	32
3.5. Comportamiento de un inversor con un control droop . . . . .	33
3.6. Implementación de control droop para inversores con impedancia de salida predominantemente inductiva . . . . .	34
3.7. Implementación del control droop propuesto . . . . .	36
3.8. Inversores conectados en paralelo y a la red principal . . . . .	36
3.9. Comparación de potencia activa deseada y medida en los inversores uno e inversor dos respectivamente . . . . .	37
3.10. Comparación de potencia reactiva deseada y medida en los inversores uno e inversor dos respectivamente . . . . .	37
3.11. Error de potencia activa y reactiva de los inversores . . . . .	38
3.12. Comparación de potencia activa deseada y medida en los inversores uno e inversor dos respectivamente . . . . .	38
3.13. Comparación de potencia reactiva deseada y medida en los inversores uno e inversor dos respectivamente . . . . .	38
3.14. Error de potencia activa y reactiva de los inversores . . . . .	39
3.15. Esquema de control final para la micro-red . . . . .	44
4.1. Red de cinco nodos . . . . .	46
4.2. Esquema de control primer escenario . . . . .	48
4.3. Potencias activas en el sistema . . . . .	50

4.4. Potencias reactivas en el sistema . . . . .	50
4.5. Error de potencias activas en el sistema . . . . .	50
4.6. Error potencias reactivas en el sistema . . . . .	51
4.7. Voltaje en los nodos . . . . .	51
4.8. Ángulo de desfaseamiento de voltaje entre nodo y nodo . . . . .	51
4.9. Frecuencia en los nodos del sistema . . . . .	52
4.10. Potencias activas en el sistema . . . . .	53
4.11. Potencias reactivas en el sistema . . . . .	53
4.12. Error de potencias activas en el sistema . . . . .	53
4.13. Error potencias reactivas en el sistemas . . . . .	53
4.14. Voltaje en los nodos . . . . .	54
4.15. Ángulo de desfaseamiento de voltaje entre nodo y nodo . . . . .	54
4.16. Frecuencia en los nodos del sistema . . . . .	54
4.17. Esquema de control tercer escenario . . . . .	55
4.18. Potencias activas en el sistema . . . . .	56
4.19. Potencias reactivas en el sistema . . . . .	56
4.20. Error de potencias activas en el sistema . . . . .	57
4.21. Error potencias reactivas en el sistemas . . . . .	57
4.22. Voltaje en los nodos . . . . .	57
4.23. Ángulo de desfaseamiento de voltaje entre nodo y nodo . . . . .	58
4.24. Frecuencia en los nodos del sistema . . . . .	58
4.25. Señales de control en los inversores . . . . .	58
4.26. Esquema de control cuarto escenario . . . . .	59
4.27. Potencias activas en el sistema . . . . .	61
4.28. Potencias reactivas en el sistema . . . . .	61
4.29. Error de potencias activas en el sistema . . . . .	61
4.30. Error potencias reactivas en el sistemas . . . . .	62
4.31. Voltaje en los nodos . . . . .	62
4.32. Ángulo de desfaseamiento de voltaje entre nodo y nodo . . . . .	62
4.33. Frecuencia en los nodos del sistema . . . . .	63
4.34. Error de estimación de magnitud de voltaje . . . . .	63
4.35. Error de estimación de magnitud de voltaje . . . . .	63
4.36. Señales de control en los inversores . . . . .	64
4.37. Error cuadrático medio de la potencia activa para cada nodo del sistema	65
4.38. Error cuadrático medio de la potencia activa para cada nodo del sistema	65
4.39. Error cuadrático medio de la potencia activa para cada nodo del sistema	66
4.40. Error cuadrático medio de la potencia activa para cada nodo del sistema	66
A.1. Filtro LC . . . . .	72

# Índice de Tablas

---

2.1. Características básicas de los dispositivos de almacenamiento . . . . .	12
2.2. Equivalente monofásico de una línea de longitud media, los capacitores se omiten para una línea corta . . . . .	13
3.1. Control droop convencional dependiendo su impedancia de salida . . .	31
3.2. Valores de impedancia de las líneas de transmisión por unidad . . . . .	37
4.1. Valores de impedancia de las líneas de transmisión por unidad . . . . .	46
4.2. Valores de impedancia de las líneas de transmisión por unidad . . . . .	47
4.3. Potencias de nodo deseadas . . . . .	49
4.4. Ganancias para el control droop . . . . .	49
4.5. Ganancias para la ley de control asociada a la salida de voltaje en los inversores . . . . .	55
4.6. Ganancias para el control droop . . . . .	60

# Introducción

---

## 1.1. Introducción

Los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP) son los encargados de generar, transmitir, distribuir y consumir la energía eléctrica con la mayor calidad, seguridad y al menor costo posible. Estos sistemas han ido mejorando desde su invención hasta el día de hoy, su evolución se debe al incremento de la demanda energética así como a las fallas que se han presentado en ellos a lo largo de la historia. Un ejemplo de esto es el apagón de 1965 en el noreste de EUA el cual afectó a millones de usuarios por más de 10 horas, por lo que se incrementó el interés de las empresas energéticas en temas como la seguridad y calidad, dando lugar a nuevas técnicas de control y supervisión que permitieran detectar las anomalías presentes en los SEP. Anteriormente, para llevar a cabo la tarea de monitoreo se contaba principalmente con los sistemas de supervisión, control y adquisición de datos (SCADA, por sus siglas en inglés), dichos sistemas tienen la limitante de no poder tener acciones de control o aplicaciones para el análisis del sistema, lo que llevó a la creación de los sistemas de gestión energética (EMS, por sus siglas en inglés) brindando un mejor monitoreo del sistema, así como la posibilidad de desarrollar aplicaciones de análisis y control.

En este sentido, debido a la necesidad de brindar mayor calidad y seguridad energética se crearon nuevas técnicas que pudieran proporcionar seguridad en el monitoreo del sistema ante las múltiples perturbaciones, interrupciones e incertidumbres presentes en las mediciones, dando lugar a los llamados estimadores de estados (SE, por sus siglas en inglés) los cuales, a partir de mediciones redundantes tomadas periódicamente mediante de los sistemas SCADA, generan los valores estimados de los estados del sistema (magnitudes de voltaje y ángulo de desfasamiento entre nodo y nodo de la red) con los que es posible hacer un análisis de seguridad del sistema. La gran aportación de los SE a los SEP es que a pesar de contar con incertidumbres en las mediciones, pérdida temporal o ausencia de alguna de ellas, éstos son capaces de proporcionar los estados estimados del sistema, por lo que los SE han tomado un rol crucial dentro de los EMS, permitiendo tener sistemas más robustos, un conocimiento más completo

del estado en el que se encuentran los SEP y actualmente permiten, entre otras cosas, tener normas regulatorias con un acceso energético abierto, en el cual hay un mayor y mejor intercambio energético entre los diferentes usuarios y proveedores (Grainger et al. (1996)).

Por otro lado, para poder satisfacer las demandas energéticas actuales y aprovechar todas las fuentes de energía disponibles se busca integrar a los diferentes usuarios (consumidores, generadores o compañías energéticas) de manera más eficiente, económica y segura mediante el uso de las redes inteligentes (smart grids), las cuales permiten una mejor integración de los usuarios así como tener más de un proveedor de energía eléctrica. Como parte de estas redes inteligentes surgieron las micro-redes que de acuerdo con Fang et al. (2012), son grupos localizados que combinan cargas, líneas y fuentes de generación distribuida (e.g. paneles solares, pequeñas turbinas de viento entre otras) y que pueden operar de manera aislada o conectada al SEP.

En las micro-redes, como en los SEP, el estudio de la calidad y seguridad energética son de vital importancia ya que al presentar problemas de estabilidad en la micro-red, además de generar problemas de calidad energética para los usuarios conectados a ella, se puede comprometer la estabilidad del sistema completo si es que la micro-red está conectada a ellos, haciendo que el uso de los SE en las micro-redes sea una parte importante para su buen funcionamiento.

## 1.2. Motivación

Las micro-redes presentan una solución para satisfacer la demanda energética actual, así como para la integración de nuevas fuentes de generación, pero al igual que los SEP es necesario un monitoreo adecuado de variables que permitan determinar el funcionamiento de la micro-red, así como llevar acciones de control.

Así que, para poder satisfacer la demanda energética con las fuentes de generación disponibles, las micro-redes cuentan con diversas leyes de control funcionando simultáneamente, en las cuales se requiere satisfacer las mediciones necesarias para su implementación, lo que implica tener un gran número de sensores presentes en la micro-red. En este sentido, uno de los mayores impedimentos es el de no tener disponible todas las mediciones necesarias, por lo que se busca extender los algoritmos y técnicas usadas en los SEP, como los son los SE que pueden ser implementados para generar las mediciones necesarias a pesar de las incertidumbres presentes en la medición. Al implementar los SE en las micro-redes se logra un monitoreo completo del sistema a pesar de la ausencia de algunas de las mediciones por medio de la estimación de estados.

El objetivo de este trabajo de tesis va en dos direcciones: por un lado se presenta una evaluación numérica extensiva del esquema de control reportado en (Avila-Becerril et al. (2017)), buscando mostrar numéricamente la estabilidad de las micro-redes con dicho esquema de control y parte de estos resultados han sido presentados en (Silva-Martínez et al., 2016) donde se usa un SE para poder retroalimentar las me-

dicines requeridas por las leyes de control, esto para satisfacer la demanda energética del sistema.

Por otro lado al incorporar los SE al esquema de control se busca aumentar la robustez del sistema ante perturbaciones en las mediciones y prescindir de sensores en el sistema. Mientras que a nivel de investigación se busca tener un acercamiento a un panorama mas completo de las condiciones en las que operan los SEP y las micro-redes.

### 1.3. Estado del Arte

El apagón de 1965 en Estados Unidos concientizó al sector energético en el sentido de que los métodos y herramientas con las cuales se operaban los SEP eran insuficientes para tener un nivel adecuado de seguridad en el servicio eléctrico, generando que temas como análisis, índices y mejoras de seguridad, así como análisis de estabilidad y operación tomaran mayor relevancia, dando lugar a nuevos centros de control, ya que en ese momento las decisiones de control se basaban en sistemas de supervisión en los cuales se manejaban las posiciones de los interruptores de las subestaciones mientras que de manera independiente se controlaba la generación eléctrica y el despacho económico.

Anteriormente, comprobar la seguridad de un sistema era muy complicado debido a que los operadores contaban únicamente con datos de frecuencia del sistema, estado de los interruptores y algunas potencias necesarias para la generación eléctrica. Por lo que se buscó contar con mayor información del sistema en el menor tiempo posible para facilitar el análisis de seguridad dando lugar al uso de los SCADA para el monitoreo del sistema eléctrico y con esto, tener una base de datos actualizada del estado de los SEP con la información que se creyó apropiada para poder llevar a cabo el análisis de seguridad necesario. Sin embargo, esto no fue suficiente debido a que las mediciones presentes en los SCADA contaban con inconsistencias ya sea por la pérdida total o parcial de las mismas o porque presentaban incertidumbres en las mediciones, lo que seguía siendo un impedimento para un buen análisis de seguridad como es mencionado en (Periñán and Expósito (1999)).

Fue hasta que en 1970 en (Schweppe and Wildes (1970)), (Schweppe and Rom (1970)) que se propuso un estimador de estados estático para SEP, estableciendo las bases del problema matemático para la realización de estimación de estados en los SEP aportando una herramienta que proporciona información confiable del sistema a pesar de pérdidas en las mediciones y ruido presente en ellas. Gracias al uso de SE fue posible tener un reparto de cargas en tiempo real a pesar de contar con inconsistencias en las mediciones, asegurando la ejecución de las funciones de seguridad en los centros de control.

De acuerdo con lo presentado por (Gomez-Expósito et al. (2011)), debido a la aportación de los SE al análisis de seguridad de los SEP, los SE han tenido un gran desarrollo teórico y practico para el control y supervision de los SEP documentado

en (Schweppe and Handschin (1974), Monticelli (1999b), Abur and Expósito (2004)). Asimismo, se perfeccionó la técnica de estimación y se encontró la forma de hacer menos pesada la carga computacional para llevar a cabo la estimación de estados, presentándose trabajos de métodos de separación siendo (Tinney and Walker (1967)) el pionero en esta técnica. Posteriormente Motichelli propone en (Monticelli (1999a)) el llamado estimador de estados rápido desacoplado (FEDS por sus siglas en inglés). La cual fue una gran aportación al tema de estimación y se sentó las bases de lo que más adelante se conoció como el *desacople de carga* presentado en (Stott and Alsaç (1974)). Además, con los avances logrados en la estimación de estados también se buscó la mejora en la estabilidad numérica y convergencia con la aproximación de los mínimos cuadrados ponderados (WLS, por sus siglas en inglés). En (Wu (1990)) se observó que la asignación de altas ganancias para mediciones más precisas como lo son las inyecciones cero y ganancias bajas en mediciones menos precisas llevarían a una mala convergencia, asimismo, se mostró que al usar métodos computacionales más complejos como lo es el método de ortogonalidad o la factorización de Cholesky el SE tenía un mejor desempeño lo cual fue mostrado por (Vempati et al. (1991)). Por otro lado, se demostró que las mediciones con mayor exactitud como las inyecciones cero en vez de asignarles altas ganancias se podían incluir como restricciones en la formulación del problema de estimación.

Dos problemas de relevancia que presentaron los SE fue la observabilidad de la red y el procesamiento de datos erróneos, originando el interés de la comunidad científica para dar una solución a estos. Los problemas de observabilidad de un sistema son tomados por dos criterios para su estudio, los cuales determinan si el vector de estados es observable o no (que se pueda llegar a un valor de estados estimados) y en caso de ser un sistema no observable separar las islas observables del sistema de las no observables. Dichos criterios son *observabilidad topológica* y *observabilidad numérica* (Krumpholtz et al. (1980), Wu and Monticelli (1985)) y una implementación de dichos algoritmos es la propuesta en (Clements (1990)).

Asociado con el estudio de observabilidad en (Magnago and Abur (1999)) se presenta la asignación de mediciones óptimas, que aseguran la observabilidad completa del sistema en todo momento a pesar de las pérdidas en las mediciones o en los canales de comunicación. No obstante las pérdidas en la comunicación no son las únicas perturbaciones presentes en las mediciones ya que las mediciones tienen asociadas incertidumbres, las cuales no siempre presentan una distribución normal, cuando las mediciones tienen asociadas errores gruesos y si no son detectados y reemplazados antes de empezar el proceso de estimación, la convergencia en los resultados será fallida.

En este contexto se desarrollaron algoritmos para poder detectar mediciones erróneas, dando lugar a pruebas estáticas como la prueba de *chi cuadrada* y *residuos normalizados* los cuales fueron desarrollados en (Monticelli and Garcia (1983)).

Además se han desarrollado técnicas más elaboradas para la detección de datos erróneos, como la identificación de prueba de hipótesis (**HTI** por sus siglas en inglés). En (Van Cutsem et al. (1984)) se han probado casos en los cuales se tienen presentes varios datos erróneos para los cuales otros métodos de identificación fueron me-

nos efectivos. Aunado a esto, se han tenido más desarrollos importantes dentro de la robustez en la estimación de estados dados en (Celik and Abur (1992), Mili et al. (1996)), desarrollos en áreas de estimación jerárquica (Van Cutsem et al. (1981)), inclusiones de mediciones de corriente a nivel de subtransmisión (Muñoz and Expósito (1992), Abur and Expósito (1997), Expósito and Abur (1998)) y se incorporaron a los SE restricciones de desigualdad (Clements et al. (1995), Singh et al. (1997)), asimismo se agregaron la detección y corrección de errores topológicos (Slutsker et al. (1996), Monticelli (1993)).

Así, en las últimas décadas se ha incrementado el uso en los llamados *estimadores de estados generalizados* (GSE, por sus siglas en inglés), dirigidos al desarrollo de modelos de circuitos interruptores (CB por sus siglas en inglés) y así mejorar la capacidad de los SE en el procesamiento de errores topológicos (Monticelli (1999b)); lo que implica un modelo detallado de los buses de conexión en combinación con las técnicas de reducción de la red para poder trabajar con los modelos de gran tamaño resultantes (Alsac et al. (1997), Gomez-Expósito et al. (2011)). Recientemente se ha desarrollado un modelo GSE, el cual es capaz de identificar errores topológicos, mientras usa un vector de estados ligeramente aumentado (De La Villa Jaen and Gomez-Expósito (2002)). Haciendo uso de la misma idea se puede detectar e identificar errores paramétricos en la red. En los últimos años para mejorar el rendimiento y capacidad de los SE han sido introducidos las unidades de medición fasorial (PMU, por sus siglas en inglés), las cuales proporcionan los fasores de voltaje y corriente de nodo, así como el ángulo de desfase; asociadas con estas mediciones proporcionan la localización exacta de la medición en la red, gracias al GPS con el que cuentan los PMUs.

Por otro lado, las micro-redes son sistemas en los que se encuentran diferentes cargas, así como diferentes fuentes de generación pudiendo ser convencionales o no convencionales y que tienen como objetivo satisfacer la demanda con las fuentes de generación disponibles, lo cual representa un reto teórico y tecnológico importante debido a que algunas fuentes de generación no convencionales (principalmente fuentes de energía renovable) trabajan con corriente directa (DC) y éstas tienen que ser acopladas a la red o micro-red (sistema) las cuales operan en corriente alterna (AC). Para el acoplamiento a las cargas y al sistema de generación se hace uso de electrónica de potencia, específicamente de convertidores de potencia DC/AC comúnmente llamados inversores, los cuales tomarán el voltaje de DC y le darán la forma de onda al voltaje de salida el cual será conectado a las cargas y/o al sistema directamente.

Uno de los problemas asociados a las fuentes de energía renovable es que en su mayoría no presentan una generación constante, ya que la generación de dichas fuentes está asociada a factores climáticos como es el caso de las fuentes de generación fotovoltaica, eólica, etc., debido a esto no es posible tener totalmente el control en dichas fuentes de generación y la repartición de carga generalmente no es constante, aunque las cargas presentes en el sistema sí lo sean. Para lidiar con la problemática de la repartición de carga en las fuentes de generación no convencionales se puede hacer uso del *control droop*, el cual es usado en inversores conectados en paralelo ya que este control modifica la magnitud de voltaje y frecuencia del voltaje de salida, tal que la

repartición de carga sea la deseada.

## 1.4. Planteamiento del Problema

En esta tesis se propone y evalúa numéricamente un esquema de control que dé solución al problema de repartición de cargas en la micro-red, así como los problemas de calidad y seguridad energética mediante el siguiente planteamiento:

Considere una micro-red con fuentes de DC ideales, que representan fuentes de generación las cuales tienen inversores asociados a cada una de ellas, con cargas constantes y lineales en intervalos de tiempo, conectadas mediante líneas de transmisión sin pérdidas, y que las mediciones disponibles de la micro-red cuentan con incertidumbres; dicho lo anterior se busca proponer un esquema de control para tener una repartición de carga deseada y se satisfaga la demanda energética de las cargas, con voltajes dentro de los límites de amplitud de voltaje y frecuencia permitidos. En este sentido, en este trabajo de tesis se busca tener un análisis de los *controladores tipo droop* más utilizados en la literatura, los cuales consisten en un control descentralizado que es capaz de controlar la repartición de carga modificando la frecuencia y magnitud de voltaje en el voltaje de salida de los inversores y en este trabajo de tesis se propone un control tipo droop modificado para mejorar la repartición de carga entre los inversores, a pesar de contar con diferentes incertidumbres en las mediciones, se busca poder implementar las leyes de control que lleven a cabo la repartición de carga, así como tener conocimiento completo del estado de operación en el que se encuentre el sistema por medio de la implementación de un SE, para finalmente presentar un análisis numérico de la micro-red.

En este trabajo de tesis, se consideran varias etapas de control. Como primera etapa se tiene el algoritmo que resuelve el problema de saber qué cantidad de energía se le pide a cada fuente de generación disponible para satisfacer la demanda energética con el menor costo posible, el cual es conocido como despacho económico de carga y que en el presente trabajo de tesis no se lleva a cabo dentro del esquema de control propuesto y se asume que los valores entregados por este algoritmo son conocidos. Los datos entregados por el despacho económico son usados por leyes de control descentralizadas que actúan en los nodos de generación para poder entregar la potencia deseada, esta ley de control descentralizada comúnmente consiste en el llamado control droop, el cual necesita, entre otras mediciones, el valor de potencia activa y reactiva ( $P$  y  $Q$  respectivamente) en el nodo de estudio. De acuerdo con lo reportado en (Avila-Becerril et al. (2017)) el control droop proporciona las señales de voltaje deseadas satisfacer la demanda de potencia en los nodos y con la repartición de carga deseada, dichas señales de voltaje deseadas son generadas por un control secundario y que esta asociado directamente con los convertidores de potencia. Sin embargo, en este trabajo de tesis para poder introducir los valores de potencia  $P$  y  $Q$  medidas en el nodo de estudio, se hace uso del estimador de estados que se encarga de generar la magnitud de voltaje y ángulo de desfase de los nodos del sistema a partir de

todos o algunos valores de mediciones con incertidumbre y dichos estados generados se toman como entradas de las ecuaciones de flujo de potencia, para obtener las potencias P y Q estimadas y así poder implementar el esquema de control propuesto lo cual esta reportado en ((Silva-Martínez et al., 2016)).

## 1.5. Organización de la Tesis

Este trabajo de tesis se encuentra dividido en 5 capítulos y un apéndice, el contenido desarrollado en los capítulos es el siguiente:

- *Capítulo 1:* Se introducen los sistemas eléctricos de potencia, las micro-redes y los estimadores de estados, se da una reseña histórica de los SE, así como el planteamiento del problema a resolver.
- *Capítulo 2:* Se presentan los preliminares necesarios para el estudio de las micro-redes, así como el marco teórico de las técnicas de control usadas más adelante para la resolución del problema.
- *Capítulo 3:* Se presenta el desarrollo matemático usado por las técnicas de control y estimación propuestas para las micro-redes, así como el esquema de interconexión del sistema (micro-red) con las técnicas de control de potencia y estimación propuestas.
- *Capítulo 4:* Se presenta el desarrollo y formulación del sistema donde se evaluó numéricamente las técnicas de control y estimación propuestas, así como los diferentes escenarios en los que se evaluaron. Los resultados de la evaluación de estos esquemas de control están reportados en (Avila-Becerril et al. (2017)), (Silva-Martínez et al. (2016))
- *Capítulo 5:* Se presentan las conclusiones, de los diferentes escenarios evaluados en el capítulo 4.

# Preliminares (Micro-redes)

---

## 2.1. Micro-redes

De acuerdo con (Zhong and Hornik (2012)) el uso de los sistemas eléctricos tiene más de 100 años. Un sistema eléctrico de potencia típico es el mostrado en la Figura 2.1, el cual consiste en una etapa de generación, transmisión y distribución de potencia eléctrica a los consumidores (Karady and Holbert 2004. Este esquema se implementa debido a que las fuentes de generación convencionales (generadores alimentados por combustibles fósiles, hidroeléctrica, nuclear etc.) se encuentran alejadas de los consumidores por lo que la entrega de potencia no es directa y tiene que pasar por una etapa de transmisión y distribución. A pesar de contar con interconexiones en el nivel de transmisión para tener una red robusta, la electricidad fluye en un solo sentido, esto es, de los generadores a las cargas dando lugar a una red unidireccional.

Sin embargo, los SEP tienen que ir evolucionando y mejorando a la par de las necesidades de la demanda energética actual, por lo que se busca que en el futuro la red eléctrica sea flexible, confiable y económica. Con el fin de alcanzar dichos objetivos y reducir las emisiones de gas de efecto invernadero, el desarrollo de las redes inteligentes se convierte en una pieza fundamental de los nuevos SEP. De acuerdo con (Fang et al. (2012)), las micro-redes forman parte de esta nueva generación de redes, y son grupos localizados que combinan cargas, líneas y fuentes de Generación Distribuida (e.g. paneles solares y pequeñas turbinas de viento) provistas de convertidores de potencia que acondicionan la energía generada. Las micro-redes dependen de los recursos disponibles, ubicación geográfica, demanda de carga y el sistema de transmisión y distribución eléctrica existente y estas pueden operar de manera aislada o interconectadas a la red principal.

Por razones económicas, técnicas y ambientales, en la actualidad está la tendencia del uso de pequeñas unidades generadoras conectadas a sistemas de distribución de baja tensión, al mismo tiempo de contar con una conexión (controlada) con los generadores convencionales presentes en los sistemas de transmisión de alta tensión.

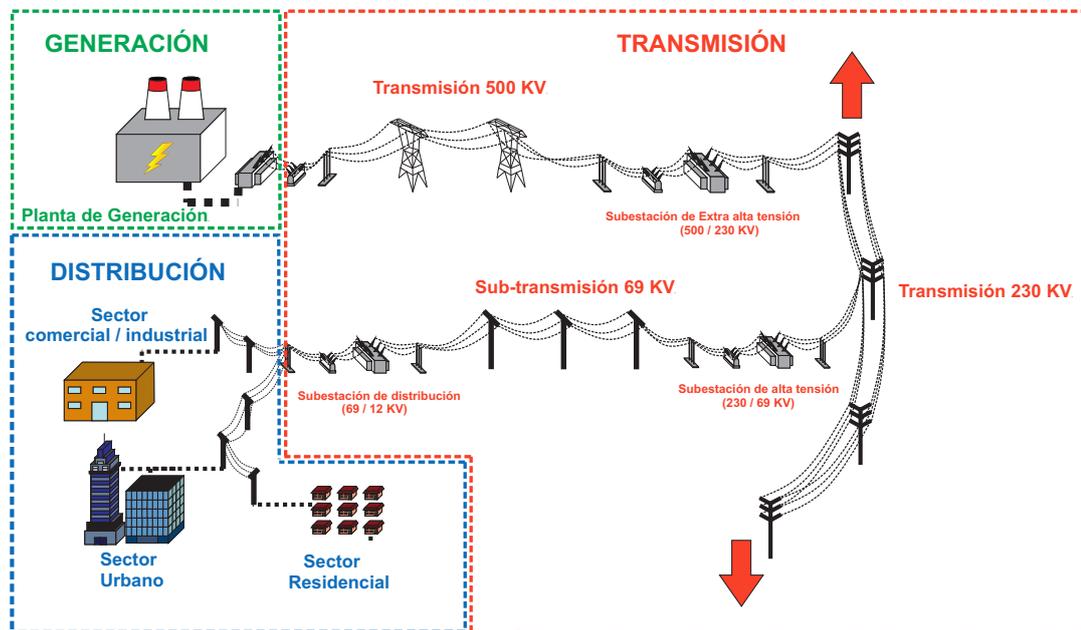


Figura 2.1: Sistema eléctrico de potencia convencional

Por un lado la desatención en la generación convencional mediante generadores síncronos y por otro lado, el interés en el uso de energías renovables y equipo de almacenamiento energético, ha propiciado un cambio tecnológico consecuente con la incorporación de fuentes que generan energía, las cuales pueden ser a diferentes frecuencias y voltajes pudiendo ser inclusive en corriente directa, se busca que dichas fuentes de generación se conecten cerca de las cargas para tratar de evitar pérdidas en las líneas de transmisión, a este tipo de fuentes de generación instaladas cerca de las cargas se les llama fuentes de *generación distribuida* (DG por sus siglas en inglés). Algunos ejemplos de generación distribuida pueden ser las turbinas de viento en las que se requiere una transformación de AC a AC cambiando la frecuencia a la que se genera la frecuencia de la red, o las pequeñas turbinas de gas que trabajan a altas frecuencias y en las que es necesario la conversión de AC a DC y posteriormente de DC a AC para poder conectar a la red principal. Otro ejemplo es el de las celdas fotovoltaicas en las que es necesario convertir de DC a AC.

Existen dos modos de operación para una micro-red; el primero de ellos es la micro-red en modo aislado, en el cual los consumidores son suministrados por las fuentes de generación distribuida, donde la responsabilidad de calidad energética recae directamente en las fuentes de generación distribuida. El otro modo de operación es con la micro-red conectada a la red principal donde los excedentes o faltantes de energía son compensados por la red principal.

De acuerdo con lo presentado en (Mariam et al. (2013)), la arquitectura básica de la micro-red está dada en la Figura 2.2, donde se muestra que está compuesta por fuen-

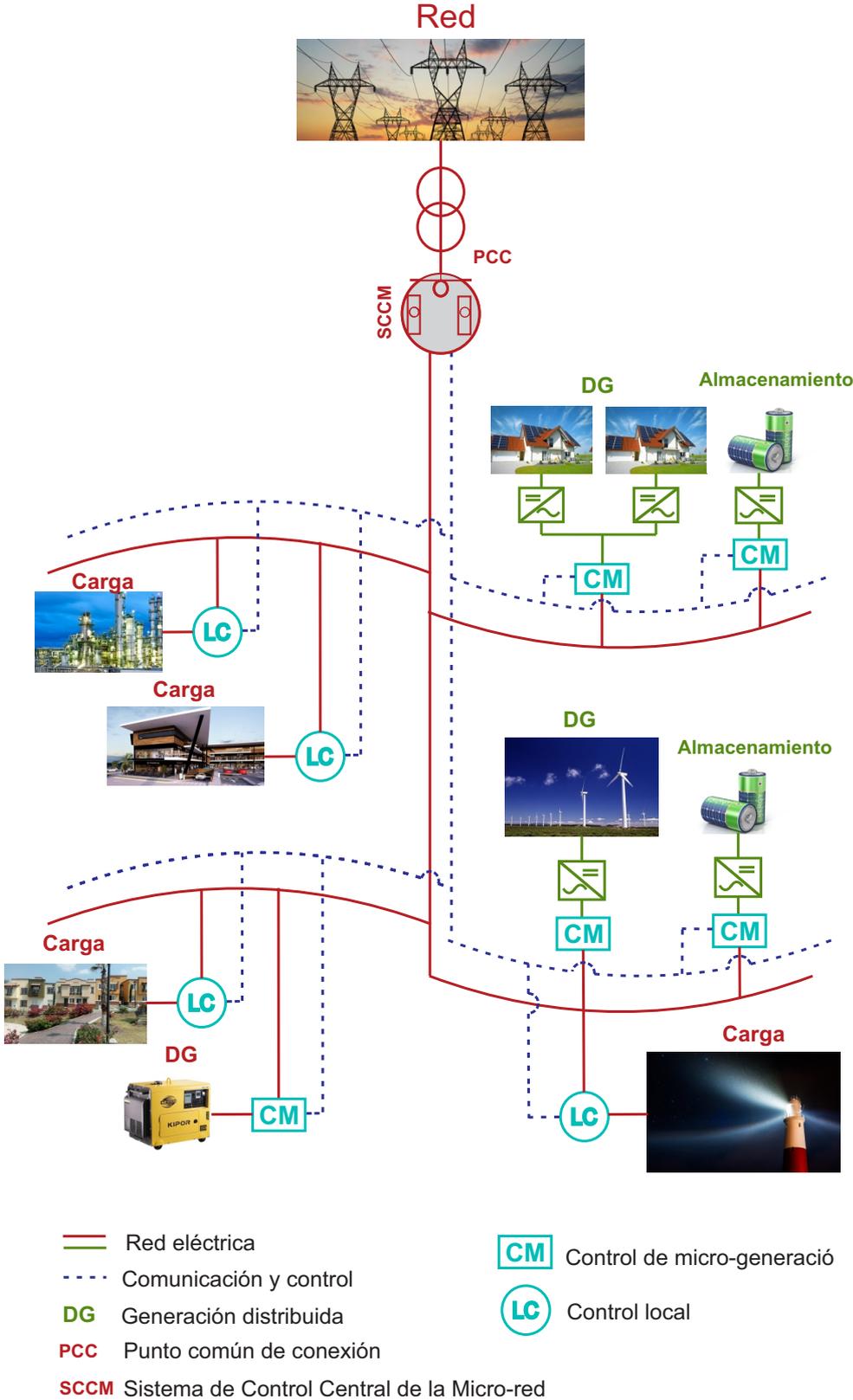


Figura 2.2: Arquitectura simple de una micro-red

tes de generación distribuida, sistemas de almacenamiento, sistemas de distribución y sistemas de comunicación y control. Sus partes se describen a continuación:

- **Generación Distribuida:** DG (por sus siglas en inglés), son unidades con pequeñas capacidades de generación, las fuentes pueden ser generadores de diesel convencionales, microturbinas (generalmente de gas, hidrógeno y biocombustibles); aunque en mayor parte se usan fuentes de energía renovable, como pueden ser paneles solares y turbinas de viento.
  
- **Sistemas de almacenamiento:** Una micro-red con varias fuentes DG necesita tener dispositivos de almacenamiento para asegurar el balance de energía y un servicio ininterrumpido. En el caso de algunas fuentes como las microturbinas o las celdas de combustible, que cuentan con una constante de tiempo en el rango de 10 a 200 [s] los dispositivos de almacenamiento son necesarios para equilibrar los flujos de potencia después de una perturbación en el sistema o cambios de carga significativos. Los elementos de almacenamiento energético usados pueden ser baterías, volantes de inercia o supercondensadores, en la Tabla 2.1 se muestran las características de dichos elementos de almacenamiento. Otra fuente de almacenamiento de energía pueden ser las celdas de combustible que convierten energía química de un combustible directamente a energía eléctrica, estas pueden ser descritas como baterías que no se descargan siempre que tengan un suministro constante de hidrógeno y oxígeno. Los rangos de salida de estos dispositivos puede estar entre 1 [kW]-10 [MW] y su eficiencia eléctrica entre los 30 y 60%. Además pueden usarse otro tipo de combustibles semejantes como lo son gas natural, propano, diesel, nafta, metanol e hidrógeno.
  
- **Sistema de distribución:** La distribución de energía en la red puede clasificarse en líneas de DC y líneas de AC:
  - *Líneas DC:* En muchas de las fuentes de energía renovable la generación es en DC y los sistemas de DC presentan menores problemas de calidad. Por ello, el estudio de los sistemas en DC está ganando importancia sin embargo, debido a que la mayoría de las cargas actuales y la infraestructura está diseñada para trabajar en AC, el uso e implementación predominante en los sistemas eléctricos de potencia es en AC.
  - *Líneas de AC (50/60) [Hz]:* Son líneas de transmisión que están a la misma frecuencia que la red principal, normalmente su frecuencia es de 50-60 [Hz].
  
- **Cargas:** Son los elementos que consumen energía en la Micro-red, de naturaleza lineal o no lineal.

Elementos de almacenamiento			
Características	Baterías	Volantes de inercia	Supercondensador
Potencia continua [w/kg]	50-100	200-500	500-2000
Tiempo de respaldo	5-30 [min]	10-30[s]	10-30 [s]
Pérdidas en standby	muy bajas	variable	alta
Impacto ambiental	medio-alto	bajo	bajo
Mantenimiento	1/año	1/5 años	0/año
Eficiencia de carga (%)	75-95	90	85-95
Precio (s/kWh)	150-800	3000-4000	4000-5000
Vida útil	5	20	> 10

**Tabla 2.1:** Características básicas de los dispositivos de almacenamiento

- **Convertidores de potencia:** Son dispositivos de electrónica de potencia que transfieren potencia desde una fuente de corriente continua a una carga de corriente alterna, los cuales son usados para el acoplamiento de las fuentes DG con la red microrred.
- **Sistemas de comunicación:** Para el control y protección de la micro-red, los sistemas de comunicación son de vital importancia. Algunos métodos de comunicación comúnmente usados en las micro-redes son: banda ancha sobre líneas eléctricas (BPL por sus siglas en inglés), sistema global para comunicaciones móviles (GSM por sus siglas en inglés), comunicación LAN/WAN/Internet (TCP/IP), fibra óptica, WiFi 802.11b, WiMAX 802.11b, entre otras.
- **Sistema administrador de energía**  
El sistema administrador de energía (MGcc por sus siglas en inglés), utiliza la información disponible por los sistemas de comunicación para brindar la calidad energética deseada, así como tomar la decisión de trabajar la micro-red de manera aislada o conectada a la red principal.
- **Controladores:** Están asociados a la etapa de generación como convertidores de potencia o generadores síncronos y son los encargados de dar la forma de onda de salida deseada así como la potencia entregada por la fuente.
- **Protecciones:** Es la parte encargada de proteger tanto a la micro-red, como a la red principal de cualquier falla que se presente. Si la falla se presenta del lado de la red principal el objetivo de la protección es aislar a la micro-red para proteger

las cargas en la misma. Sin embargo si la falla es dentro de la micro-red se busca que las protecciones aislen la mínima sección para eliminar la falla.

Las ventajas que proporciona una micro-red sobre un SEP convencional están dados en la Tabla 2.2.

<i>Características</i>	<i>SEP actual</i>	<i>Red inteligente</i>
Participación activa de los consumidores	<i>Los consumidores no tienen información del sistema y no participan con el</i>	<i>Los consumidores están informados del estado del sistema y pueden tener una participación activa con el flujo de potencia en el sistema</i>
Opciones de generación y almacenamiento energético	<i>Dada por la central de generación con problemas de distribución e interconexión</i>	<i>Variedad de fuentes de generación con la posibilidad de trabajar en línea o fuera de línea con el sistema</i>
Posibilidad de nuevos productos y servicios de mercado	<i>Mercado energético limitado y opciones para los consumidores limitados</i>	<i>Mercado energético abierto para los consumidores</i>
Calidad energética y económica	<i>Prioridad ante interrupciones, respuesta lenta ante calidad energética</i>	<i>Prioridad a la calidad energética a diferentes costos, respuesta más rápida ante problemas</i>
Anticipación y reacción ante perturbaciones	<i>Respuesta después de una falla para evitar daños en el sistema</i>	<i>Detección y corrección de fallas, con prioridad en la prevención de las mismas y minimiza el impacto a los consumidores</i>
Robustez ante desastres naturales	<i>Vulnerable ante desastres naturales</i>	<i>Resistente ante desastres naturales con una capacidad de reacción rápida</i>

**Tabla 2.2:** Equivalente monofásico de una línea de longitud media, los capacitores se omiten para una línea corta

## 2.2. Líneas de Transmisión de AC

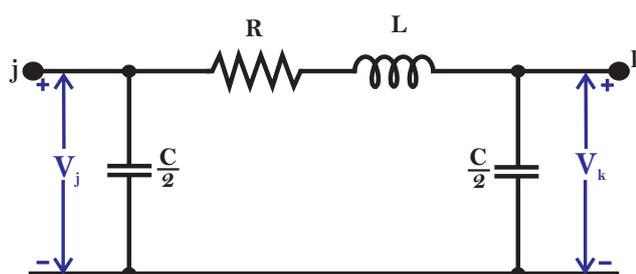
Se les llama líneas de transmisión al conjunto de dispositivos para transportar o guiar la energía eléctrica desde una fuente de generación a los centros de consumo. Una línea de transmisión tiene tres parámetros principales que afectan su capacidad para cumplir su función, los cuales son: resistencia, inductancia y capacitancia por unidad de longitud.

Las ecuaciones generales que relacionan el voltaje y la corriente de las líneas de transmisión establecen el hecho de que los parámetros de una línea de transmisión están distribuidos uniformemente a lo largo de la línea. En esta sección tomando los conceptos de (Grainger et al. (1996)), se usará un modelo aproximado mediante parámetros concentrados que dan resultados con una buena exactitud en líneas cortas y medias. Si las líneas de transmisión se clasifican como cortas, la capacitancia en derivación es tan pequeña que se puede omitir por completo con una pérdida de exactitud pequeña y

sólo se requiere considerar la resistencia  $R$  y la inductancia  $L$  en serie para la longitud total de la línea.

Como se muestra en la Figura 2.3 una línea de longitud media se puede representar con  $R$  y  $L$  como parámetros concentrados, con la mitad de la capacitancia al neutro de la línea conectada en cada terminal del circuito equivalente.

Si se omiten los capacitores del circuito mostrado en la Figura 2.3, el circuito repre-



**Figura 2.3:** Equivalente monofásico de una línea de longitud media, los capacitores se omiten para una línea corta

senta una línea corta. Cabe mencionar que se consideran como líneas cortas, las líneas de 60 [Hz] de conductor abierto que tiene menos de 80 [km] (50 millas) de longitud, las líneas de longitud media son las que están entre 80 [km] (50 millas) y 240 [km] (150 millas) de longitud, mientras que las líneas largas son las que tienen más de 240 [km] (150 millas) y requieren de cálculos en términos de constantes distribuidas si se necesita un alto grado de exactitud, aunque para algunos propósitos se pueden usar una representación de parámetros concentrados para líneas hasta de 320 [km] (200 millas) de largo, de acuerdo con (Grainger et al. (1996)).

### 2.2.1. Modelo $\Pi$

Para los cálculos de una línea de longitud media se incluye la admitancia en paralelo, la cual se divide en dos partes iguales y cada una se coloca en los extremos generador y receptor de la línea, a dicha representación de líneas de transmisión es llamada circuito nominal  $\pi$  la cual es representada por Figura 2.4 donde  $Y_{jk} = \frac{1}{2}$  y  $Y_s = \frac{Y}{2}$ .

Ahora bien, con la finalidad de obtener una expresión que relacione el voltaje de nodo  $V_j$  con la corriente de línea  $I_{in}$  dados en la Figura 2.4, se expresará la corriente en la capacitancia del extremo generador de la línea  $I_j$  y la corriente en la rama en serie de la línea  $I_{jk}$  como:

$$I_j = V_j \frac{Y_s}{2} \quad (2.1)$$

$$I_{jk} = I_{out} + V_k \frac{Y_s}{2} \quad (2.2)$$

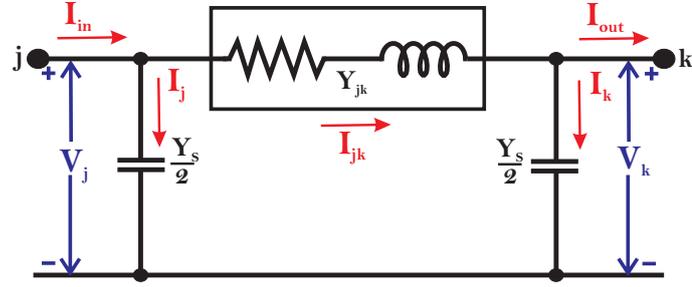


Figura 2.4: Circuito nominal  $\pi$  de una línea de transmisión de longitud media

Mientras que el modelo para  $V_j$  está dado por la siguiente expresión

$$V_j = I_{jk}Z + V_k \quad (2.3)$$

donde  $Z$  es la impedancia en la rama serie de la línea de transmisión.

Al sustituir la ecuación (2.2) en la ecuación anterior y reagrupándola, la expresión para  $V_j$  se puede expresar como:

$$V_j = ZI_{out} + V_k \left( \frac{Y_s Z}{2} + 1 \right) \quad (2.4)$$

Por otro lado, la expresión para la corriente  $I_{in}$  puede obtenerse de la ley de corrientes de Kirchhoff como

$$I_{in} = I_j + I_{jk} \quad (2.5)$$

sustituyendo las ecuaciones (2.1) y (2.2) en la ecuación anterior se tiene que

$$I_{in} = V_j \frac{Y_s}{2} + V_k \frac{Y_s}{2} + I_{out} \quad (2.6)$$

Finalmente al sustituir la ecuación (2.4) en la ecuación anterior y al reagrupar términos, se obtiene la siguiente expresión para  $I_{in}$

$$I_{in} = V_k Y_s \left( 1 + \frac{ZY_s}{4} \right) + \left( \frac{ZY_s}{2} + 1 \right) I_{out}. \quad (2.7)$$

De forma general las ecuaciones 2.4 y 2.7 pueden escribirse como

$$V_j = AV_k + BI_k, \quad (2.8)$$

$$I_j = CV_k + DI_k \quad (2.9)$$

donde

$$A = D = \frac{ZY_s}{2} + 1 \quad (2.10)$$

$$B = Z, \quad C = Y \left( 1 + \frac{ZY_s}{4} \right)$$

A las constantes  $A, B, C$  y  $D$  se les llama *constantes generalizadas de circuito* de la línea de transmisión y en general son números complejos,  $A$  y  $D$  son adimensionales mientras que  $B$  y  $C$  tienen como unidades ohms y siemens, respectivamente. Las constantes se aplican a cualquier red lineal, pasiva y con cuatro terminales en dos lados, y cada una tiene un par de ellas, a este circuito se le conoce como la *red de dos puertos*.

Finalmente, se puede dar un significado físico a las constantes. Si en la ecuación (2.4)

$I_{out}$  es cero, se observa que  $A$  es la relación  $\frac{V_j}{V_k}$  sin carga, de igual forma si  $V_k$  es cero,

$B$  es la relación  $\frac{V_j}{I_k}$  cuando el extremo receptor está en cortocircuito (Grainger et al. (1996)).

### 2.2.2. Flujos de Potencia

Sea una línea de transmisión con un modelo  $\pi$  como el presentado en la Figura 2.4, el flujo de potencia activa  $P$  y reactiva  $Q$  que circula a través de la línea, se puede obtener mediante un modelo matemático que relacione la amplitud de voltaje y ángulo de desfase entre nodos.

De la Figura 2.4 la corriente  $I_{in}$  está dada por:

$$I_{in} = V_j Y_s + (V_j - V_k) Y_{jk}$$

donde  $Y_{jk} = \frac{1}{Z}$  y  $Y_s = \frac{Y}{2}$ , al reescribir la ecuación anterior y agrupando términos

$$I_{in} = V_j(Y_s + Y_{jk}) - V_k Y_{jk} \quad (2.11)$$

recordando que los valores para admitancia son números complejos se hace el siguiente cambio de variable

$$Y_{jj} = Y_s + Y_{jk} = G + Bi$$

$$Y_{jk} = -Y_{kj} = g + bi$$

con  $G, B \in \mathbb{R}$ ; al sustituir el cambio de variable anterior en la ecuación (2.11), la corriente de generación está dada por

$$I_{in} = V_j Y_{jj} + V_k Y_{jk} \quad (2.12)$$

y el flujo de potencia que fluye del bus  $j$  al bus  $k$  es

$$S_{jk} = P_{jk} + iQ_{jk} = V_j I_{in}^* \quad (2.13)$$

Mientras que al sustituir la corriente inyectada por el nodo  $j$ , ecuación (2.12) en la ecuación anterior se obtiene la siguiente expresión

$$S_{jk} = V_j(V_j Y_{jj} + V_k Y_{jk})^* \quad (2.14)$$

Si se reescribe el valor de los voltajes en su forma polar ( $V_j = |V_j|e^{i\theta_j}$  y  $V_k = |V_k|e^{i\theta_k}$ ) la ecuación anterior puede reescribirse como

$$P_{jk} + iQ_{jk} = |V_j|^2 Y_{jj} + |V_j||V_k|Y_{jk}e^{i(\theta_j - \theta_k)} \quad (2.15)$$

y tomando los valores de impedancias  $Y_{jj}$  y  $Y_{jk}$  en su forma rectangular, la ecuación anterior se puede reescribir como

$$P_{jk} + iQ_{jk} = V_j^2(G + iB) + V_j V_k(g + ib)e^{i(\theta_j - \theta_k)}. \quad (2.16)$$

Al hacer un nuevo cambio de variable el cual está dado por  $\theta_{jk} = \theta_j - \theta_k$  y se usa la notación trigonométrica para números complejos ( $e^{i\theta_{jk}} = \cos\theta_{jk} + i\sin\theta_{jk}$ ), es posible reescribir la ecuación anterior con la siguiente estructura

$$P_{jk} + iQ_{jk} = V_j^2(G - iB) + V_j V_k(g - ib)(\cos\theta_{jk} + i\sin\theta_{jk}) \quad (2.17)$$

donde al desarrollar, simplificar y separar la ecuación anterior en su parte real y su parte imaginaria se pueden dar las ecuaciones de flujo de potencia en la línea de transmisión

$$\begin{aligned} P_{jk} &= -V_j^2 G + V_j V_k(g \cos\theta_{jk} + b \sin\theta_{jk}) \\ Q_{jk} &= V_j^2 B + V_j V_k(g \sin\theta_{jk} - b \cos\theta_{jk}). \end{aligned} \quad (2.18)$$

Note que si no hay admitancia en derivación  $Y_{jj} = Y_{jk}$  y entonces las ecuaciones de flujo de potencia se pueden expresar como

$$P_{jk} = V_j^2 G + V_j V_k(G \cos\theta_{jk} + B \sin\theta_{jk}) \quad (2.19)$$

$$Q_{jk} = -V_j^2 B + V_j V_k(G \sin\theta_{jk} - B \cos\theta_{jk}). \quad (2.20)$$

En una red eléctrica para conocer la potencia total  $P$  y  $Q$  inyectada en un nodo, basta con sumar todos los flujos de potencia de las líneas que llegan al nodo, dando lugar a las siguientes ecuaciones

$$P_j = V_j \sum_{k=1}^n (G_{jk} V_k \cos(\theta_{jk}) + B_{jk} V_k \sin(\theta_{jk})) \quad (2.21)$$

$$Q_j = V_j \sum_{k=1}^n (G_{jk} V_k \sin(\theta_{jk}) - B_{jk} V_k \cos(\theta_{jk})) \quad (2.22)$$

donde  $j$  representa el nodo de interés,  $k$  representa el nodo de la red al que se hace referencia en el estudio,  $n$  son el número total de nodos, finalmente  $G$  y  $B$  son la parte real e imaginaria de la matriz de admitancia que representa a la red.

## 2.3. Control

Para que la micro-red pueda operar bajos los criterios de seguridad deseados y al mismo tiempo satisfacer los niveles energéticos demandados por las cargas, se hace uso de diferentes leyes de control que en muchas ocasiones retroalimentan todo el estado. Asimismo, en la generación energética se distinguen dos problemas: por un lado no saber la cantidad de potencia que se le pedirá a las fuentes de generación, ya sean fuentes de generación convencionales o fuentes de generación distribuida y por otro lado está el problema de seguridad y calidad energética, el cual consiste en satisfacer la demanda energética sin sobrepasar los niveles de tolerancia permitida en las señales de voltaje generadas (que la magnitud de voltaje no exceda el  $\pm 10\%$  de su valor nominal, la frecuencia no exceda el  $\pm 0.01\%$  de su valor nominal y que el ángulo de desfasamiento de voltaje entre nodo y nodo no exceda los  $\frac{\pi}{2}$ ). Para poder dar solución a los problemas antes mencionados se hace uso de leyes y algoritmos de control que trabajan en conjunto para obtener el desempeño deseado del sistema.

### 2.3.1. Control Primario

El presente trabajo de tesis se enfoca al caso específico de fuentes de generación distribuida en las que se tienen asociados convertidores de potencia (inversores), los cuales directa o indirectamente trabajan en paralelo unos con otros. Los inversores comúnmente se operan en paralelo debido a diversas razones, como pueden ser la limitada corriente soportada por la electrónica de potencia asociada a ellos, la robustez que se gana al funcionar en paralelo, mejor disipación de calor y un diseño más simple para potencias altas. Lo anterior da lugar al problema de repartición de carga entre ellos, mismo que se busca resolver mediante el llamado *control droop* el cual a hace una repartición de carga entre los inversores conectados, la repartición de carga es conseguida variando la magnitud de voltaje y frecuencia de cada uno de los inversores, el *control droop* presenta un comportamiento diferente dependiendo el estado en el que se encuentre la micro-red (modo aislado o conectado a la red). Algunos de los objetivos de dicho control es darle al inversor un comportamiento similar al que tiene una máquina síncrona para que a diferentes cambios de carga en el sistema todas las fuentes de generación tengan el mismo tipo de respuesta (caída de tensión y frecuencia). Más aún cuando la red se encuentra en modo aislado, el control droop mantiene una repartición de carga deseada para cada uno de los inversores conectados y cuando la micro-red se encuentra conectada a la red principal el control droop permite operar los inversores a una potencia deseada (generalmente la potencia nominal del inversor).

### 2.3.2. Control Secundario

Para un eficiente control o acondicionamiento de la potencia eléctrica, es necesario convertir la potencia de una forma a otra, como es el caso de algunas fuentes de energía renovable, en las cuales su generación es de corriente continua por lo que es necesario tener un convertidor de potencia (inversor), para poder transferir potencia desde una fuente continua a las cargas de alterna conectas a la red.

El funcionamiento de un convertidor de potencia se basa en la conmutación de dispositivos semiconductores, por lo que introducen armónicos de corriente y de voltaje en el sistema de alimentación y en la salida de los convertidores, dichos armónicos pueden provocar interferencia en los circuitos de comunicación y señalización. Para reducir la magnitud de los armónicos generados, se agregan filtros en la salida y entrada de un sistema convertidor. El diagrama de bloques de un convertidor de potencia generalizado es mostrado en la Figura 2.5

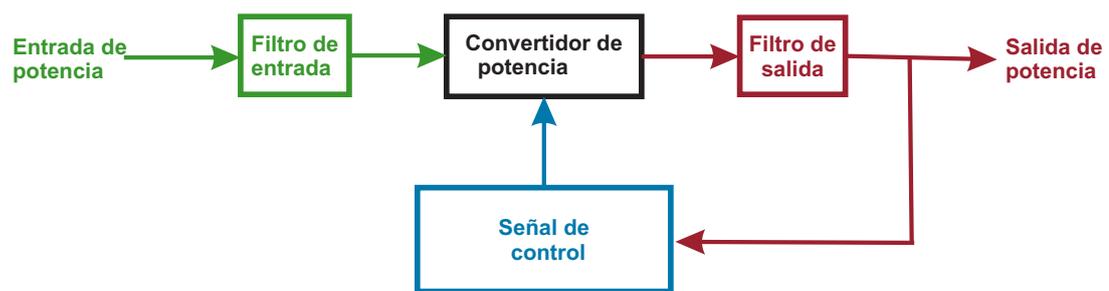


Figura 2.5: Convertidor de potencia generalizado.

En la Figura 2.6 se muestra de forma general el proceso de conversión de energía desde una fuente hasta el voltaje y la corriente deseados por la carga; dicho proceso integra controladores y dispositivos de electrónica de potencia. Existen varios tipos de conversión energética como lo son la conversión de AC-DC, conversión de DC-DC, conversión DC-AC y finalmente conversión de AC-DC, por simplicidad en esta tesis se asumirá que cualquiera de estos dispositivos es ideal.

El presente trabajo se enfoca a convertidores de DC-AC también llamados inversores y generan una salida de AC a partir de una fuente DC. Dependiendo del tipo de suministro de DC dependerá el tipo de inversor utilizado, si el inversor es alimentado por una fuente de corriente entonces el inversor es conocido como inversor de corriente (CSI) y si es alimentado por una fuente de voltaje, el inversor es conocido como unversor de voltaje (VSI). Si un inversor es del tipo VSI tendrá en su puerto de salida un capacitor, en caso de que el inversor sea un inversor de corriente contará con un inductor en el puerto de salida. De acuerdo con el tipo de salida un inversor es llamado de corriente controlada si la salida es controlada por una fuente de corriente y de voltaje controlado cuando la salida es controlada por una fuente de voltaje. Por lo tanto los inversores pueden ser VSIs controlados por corriente, VSIs controlados

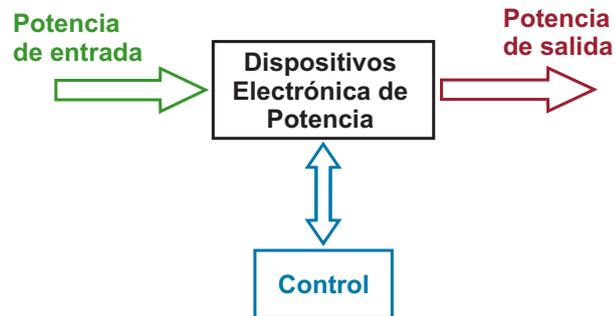


Figura 2.6: Esquema de proceso energético

por voltaje y también puede ser CSIs controlados por voltaje y CSIs controlados por corriente. La amplitud de salida de un inversor puede ser variable o fija, ya sea en amplitud o frecuencia, lo cual puede ser logrado mediante la modulación de ancho de pulso (**PWM** por sus siglas en inglés), habiendo varias técnicas para llevarlo a cabo.

La salida deseada de la mayoría de los inversores tiene una frecuencia fija o variable, la cual es comúnmente más baja que la frecuencia de conmutación. En este caso la señal senoidal de salida es llamada señal modulada, la cual puede estar montada en una señal triangular o un tren de pulsos como se muestra en la Figura 2.7, por lo que la señal de salida del inversor tendrá los principales armónicos alrededor de los múltiplos de la señal de conmutación, si los pulsos son amplificados para generar la señal **VSI** entonces la señal de salida del inversor tendrá la misma forma, sin embargo cuando la frecuencia de la señal portadora es lo suficientemente alta a comparación de la modulada los armónicos pueden ser filtrados fácilmente mediante un filtro paso-bajas (filtros LC o LCL), a este tipo de modulación es llamada una modulación PWM senoidal. La frecuencia de la señal de referencia determina la frecuencia de la señal de salida mientras que la amplitud pico de la señal de salida esta controlada por el índice de modulación así como el valor RMS de la señal de salida. Como resultado la frecuencia de la señal de salida así como su amplitud pueden ser modificadas fácilmente controlando la señal de modulación.

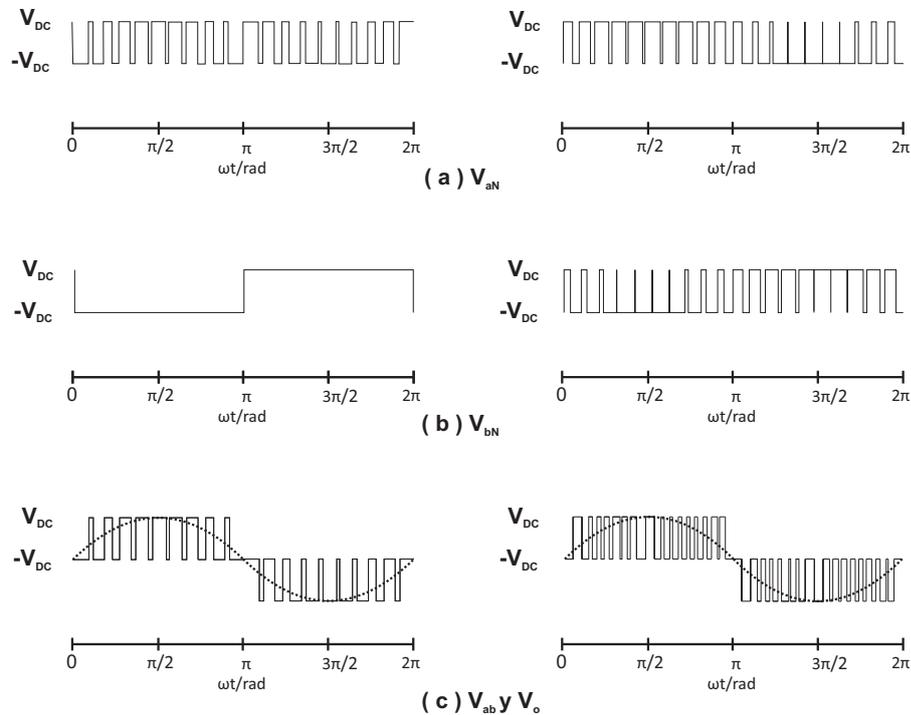


Figura 2.7: Esquema de modulación de señal deseada para los inversores

## 2.4. Estimador

La complejidad de las redes de potencia interconectadas es cada día mayor, por lo que mantenerlas operando con los parámetros de seguridad necesarios para su buen funcionamiento es de vital importancia. Para poder evaluar la seguridad del sistema o se tomen decisiones de control, se debe tener una medición confiable del estado del sistema y un análisis de los flujos de potencia en el SEP. En este sentido, son indispensables las mediciones de potencia  $P$  y  $Q$  (potencia real y potencia reactiva respectivamente) en los nodos de carga y los valores de potencia  $P$  y  $|V|$  en los nodos de voltaje de generación, si no se dispone de estas mediciones, no se puede obtener de manera directa la solución de los flujos de potencia, además si alguna o varias de estas mediciones son erróneas la solución de flujos de potencia obtenida también lo será.

Para poder dar una solución fiable de los flujos de potencia, se hace uso de métodos de estimación de estados, las cuales hacen uso de las mediciones disponibles y toman en cuenta los posibles errores presentes en las mismas.

Schweppe definió la estimación de estados como “un algoritmo de datos que convierte las medidas redundantes y otra información disponible en un estimado del sistema eléctrico” (Periñán and Expósito (1999)).

El objetivo de un estimador de estados en el SEP, es estimar los valores de magnitud y ángulo de desfase de los voltajes entre nodos de la red, a dichos valores se

les denomina *estados del sistema*, debido a que son los datos mínimos suficientes con los cuales se puede obtener el estado de operación en el que se encuentra el SEP. **Las fuentes de información necesaria** para poder implementar el algoritmo de estimación de estados son:

- Valores de los parámetros de diseño (resistencia  $R$ , inductancia  $L$ , etc.) de las líneas de transmisión.
- La información topológica o estructural (posición de interruptores, etc.).
- Modelo matemático del sistema
- Diferentes tipos de mediciones son necesarias para la estimación de estados, de las cuales son necesarios todos o algunos valores de inyecciones de potencia, flujos de potencia en las líneas de transmisión, valores de magnitud y fase de por lo menos en un nodo (el cual es conocido como *nodo slack* o nodo de referencia). Las mediciones antes mencionadas pueden ser:

- Telemidas: Son mediciones que se hacen remotamente y normalmente son capturadas por los sistemas SCADA.
- Pseudomedidas: Son valores de mediciones que se predicen basados en los datos históricos existentes por lo que tiene una precisión menor a las telemidas.
- Virtuales: Son valores de mediciones que no requieren ser medidas, como lo son la inyección cero en las subestaciones de transporte.

Dentro de las telemidas necesarias para la estimación de estados se presentan incertidumbres debido a errores en la exactitud de los instrumentos de medición (vatímetro, vármetros, vóltmetros y amperímetros), errores en la conversión analógica digital, canales de comunicación con ruido, etc. Dichas incertidumbres en la medición son compensadas y filtradas por el estimador de estados.

Las suposiciones necesarias para llevar a cabo la estimación de estados mediante el método presentado en esta tesis son las siguientes:

- Líneas de transmisión balanceadas.
- El sistema trifásico se puede modelar por un circuito monofásico equivalente.
- Todos los parámetros de la red son invariantes en el tiempo y conocidos.
- La topología de la red es conocida, así como todos los interruptores de la misma.
- Las mediciones son tomadas al mismo tiempo.
- El error en las mediciones presenta las siguientes características:
  - El valor medio del error es cero.

- El error tiene una distribución gaussiana.
- El error presenta un comportamiento aleatorio e independiente de otras mediciones, esto es:  $E(e_i e_j) = 0$  por lo que se puede formar una matriz diagonal  $R \in \mathbb{R}^{m \times m}$  cuyas entradas son las varianzas de cada elemento y  $m$  es el número de mediciones

$$R = E(ee^T) = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & & & \\ & \sigma_2^2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \sigma_m^2 \end{bmatrix}$$

- Se conoce el valor de la varianza de cada instrumento de medición, con el que se forma la matriz  $W = R^{-1}$ , dicho valor de varianza representa la exactitud de la medición tomada, el uso e importancia de la matriz  $W$  sera explicado con mayor detalle en el *Capítulo 3*.

Asimismo existen diferentes criterios para el cálculo de la desviación estándar del error de medición, con la cual se formara la matriz  $R$  y se dará la ponderación a la mediciones tomadas, dichos criterios pueden ser:

- $\sigma$  con valor constante
- $\sigma$  es función del valor medio.
- $\sigma$  es función del valor medio y del fondo de la escala.

Véase Periñán and Expósito (1999) y sus referencias para mayor información.

## Control de Micro-redes

---

Uno de los mayores problemas en los inversores asociados a las fuentes de generación conectadas a la micro-red es el problema de sincronización, donde son posibles los siguientes escenarios

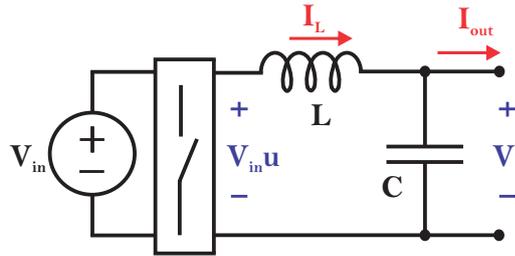
- **Primer escenario:** Cuando la micro-red se encuentra desconectada de la red principal suministrando la potencia requerida por las cargas, si uno de los inversores no está sincronizado con la red u otra fuente de energía a la que va a conectarse se pueden generar grandes corrientes transitorias que pueden generar daños en los dispositivos conectados a ellas durante la operación normal, en el cual todos los inversores tienen que estar sincronizados para que puedan trabajar correctamente en conjunto.
- **Segundo escenario:** Es cuando se desea conectar la micro-red con la red principal y el voltaje de salida en los inversores tiene que estar sincronizado con la red, ya que de no estarlo, pueden causarse daños o inestabilidad tanto en la micro-red como en la red principal.

Para dar solución a los problemas antes mencionados se utiliza una ley de control (también llamado control primario) el cual es explicado con detalle en este capítulo, el cual proporciona la señal de voltaje deseada en los inversores para llevar a todos los inversores a trabajar sincronizados entre ellos y con la red principal a la cual se va a conectar, para obtener la señal de control dada por el control primario (voltaje deseado) se hace uso de un control secundario también descrito en el presente capítulo y que actúa directamente el inversor modificando su voltaje de salida.

Finalmente, para poder tener un conocimiento completo del sistema (micro-red) se hace uso de un estimador de estados, con el cual además de monitorear al sistema se obtienen la información requerida para retroalimentar las leyes de control antes mencionadas.

### 3.1. Control de Convertidores de Potencia

#### 3.1.1. Modelo del convertidor



**Figura 3.1:** Esquema simplificado de un convertidor DC/AC (inversor)

Los convertidores de potencia generalmente están asociados a cada fuente de generación distribuida, como ya se mencionó las fuentes de generación distribuida en su mayoría generan energía en corriente continua, por lo que para poder acoplar tanto las fuentes como las cargas a la red, es necesario un dispositivo basado en electrónica de potencia, conocido como inversor, que convierta las señales de DC a AC.

En esta sección, se presenta un modelo simplificado y una ley de control para el inversor, tomados de (Becerril (2016) y Avila-Becerril and Espinosa-Pérez (2016)) para la obtención del modelo promedio se considera la Figura 3.1, donde  $V_{in}$  es una fuente de DC ideal con la cual se representa una fuente DC de generación distribuida ideal,  $u$  es la señal de control para el inversor,  $L$  es la inductancia asociada al inductor del filtro de salida,  $C$  es la capacitancia del capacitor del filtro de salida,  $I_L$  es la corriente en el inductor,  $I_{out}$  es la corriente que será inyectada a la carga o a la red según sea el caso y  $V_c$  es el voltaje en el capacitor.

Para el modelo de dicho inversor se tomarán como variables de estado el flujo en el inductor  $\phi_L$  y carga en el capacitor  $q_c$  tal que,

$$\begin{aligned} x_1 &= \phi_L \\ x_2 &= q_c \end{aligned} \quad (3.1)$$

y mediante leyes corrientes y voltajes de kirchhoff, las ecuaciones para voltaje en el inductor y corriente en el capacitor pueden escribirse como

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= V_L = V_{in} - V_c \\ \dot{x}_2 &= I_C = I_L - I_{out} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Los elementos almacenadores de energía tienen asociados una función que depende de la carga del capacitor y del flujo magnético en el inductor respectivamente. De esta

forma, la función de energía del circuito eléctrico puede escribirse como

$$H = \frac{1}{2}L^{-1}x_1^2 + \frac{1}{2}C^{-1}x_2^2 \quad (3.3)$$

con la finalidad de obtener un modelo matemático del convertidor, se obtiene las derivadas parciales de la ecuación anterior

$$\frac{\partial H}{\partial x_1} = L^{-1}x_1 \quad y \quad \frac{\partial H}{\partial x_2} = C^{-1}x_2 \quad (3.4)$$

*i.e*

$$\frac{\partial H}{\partial x_1} = L^{-1}\phi_L = I_L \quad \frac{\partial H}{\partial x_2} = C^{-1}q_c = V_c \quad (3.5)$$

sustituyendo las ecuaciones anteriores en (3.2), está se puede rescribir como

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= V_{in}u - V_c = V_{in}u - \frac{\partial H}{\partial x_2} \\ \dot{x}_2 &= i_C = I_L - I_{out} = \frac{\partial H}{\partial x_1} - I_{out} \end{aligned} \quad (3.6)$$

representando las ecuaciones anteriores en su forma matricial se tiene que

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial H}{\partial x_1} \\ \frac{\partial H}{\partial x_2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{in}u \\ -I_{out} \end{bmatrix}. \quad (3.7)$$

Finalmente, reescribiendo la ecuación anterior en su forma compacta da como resultado un modelo matemático para el inversor mostrado en la Figura(3.1), el cual estará asociado de manera individual a cada fuente de DC que se desee conectar a la red, dado por:

$$\dot{x}_{12} = \mathbb{J}_{12}\nabla_{x_{12}}H + G_{12}u - \begin{bmatrix} 0 \\ I_L \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

donde  $\mathbb{J}_{12}$  es una matriz antisimétrica de  $2 \times 2$ ,  $\nabla_{x_{12}}H_c$  es el gradiente de la función de energía  $H$ ,  $G_{12}$  es una matriz de  $2 \times 1$  la cual indica la influencia de la ley de control en el sistema y  $u$  es la señal de control. Este modelo es llamado modelo promedio y su estructura matemática es común a la de una gran clase de dispositivos.

Por otro lado, para poder generar una ley de control que logre llevar al sistema a un valor deseado es necesario definir la clase de señales que el dispositivo es capaz de reproducir, a lo que llamaremos trayectorias admisibles del sistema. Para poder definir las trayectorias admisibles del sistema se hace una copia del modelo del sistema evaluado en los valores deseados también llamados estados deseados, los cuales

tendrán una ley de control deseada y un gradiente de energía y serán representados con el superíndice  $*$ .

Así, para el inversor mostrado en la Figura 3.1, las trayectorias admisibles están dadas por

$$\dot{x}_{12}^* = \mathbb{J}_{12} \nabla_{x_{12}}^* H^* + G_{12} u^* - \begin{bmatrix} 0 \\ i_L \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Dada la ecuación anterior y suponiendo que el sistema se encuentra en estados  $x_{12}$  con valores cualquiera, es posible definir el siguiente error de seguimiento

$$\tilde{x}_{12} = x_{12} - x_{12}^* \quad (3.10)$$

sustituyendo la ecuación (3.8) y (3.9) en (3.10) se tiene que

$$\dot{\tilde{x}}_{12} = \mathbb{J}_{12} \nabla_{x_{12}} H + G_{12} u - \begin{bmatrix} 0 \\ i_L \end{bmatrix} - \mathbb{J}_{12} \nabla_{x_{12}}^* H^* + G_{12} u^* + \begin{bmatrix} 0 \\ i_L \end{bmatrix}, \quad (3.11)$$

y reescribiendo la ecuación anterior en términos de la dinámica del error del error, es posible escribir la dinámica del error como

$$\dot{\tilde{x}}_{12} = \mathbb{J}_{12} \nabla_{\tilde{x}_{12}} \tilde{H} + G_{12} \tilde{u} \quad (3.12)$$

$$H = \frac{1}{2} L^{-1} \tilde{x}_1^2 + \frac{1}{2} C^{-1} \tilde{x}_2^2 \quad (3.13)$$

### 3.1.2. Diseño del controlador

En este punto, el objetivo es diseñar una ley de control tal que las trayectorias del sistema tiendan a las trayectorias deseadas. Para esto, considere que  $\tilde{u} = u - u^*$  y que es tal que

$$\tilde{u} = -G_{12}^{-1} K_{12} \nabla_{\tilde{x}_{12}} \tilde{H} \quad (3.14)$$

con

$$K_{12} = \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix}$$

y donde  $k_1$  y  $k_2$  son las ganancias del controlador. Sustituyendo la ecuación anterior en (3.12) se obtiene

$$\dot{\tilde{x}}_{12} = [\mathbb{J}_{12} - K_{12}] \nabla_{\tilde{x}_{12}} \tilde{H} \quad (3.15)$$

Esta ecuación representa a la dinámica de lazo cerrado. Ahora, recordando que  $\tilde{u} = u - u^*$  y sustituyendo dicha igualdad en la ecuación (3.14) se tiene que

$$u = G_{12} u^* - K_{12} \nabla_{\tilde{x}_{12}} \tilde{H} \quad (3.16)$$

despejando  $G_{12} u^*$  de la ecuación (3.9) y sustituyendo en la ecuación anterior se tiene que la ley de control puede escribirse de la siguiente manera

$$G_{12} u = \dot{x}_{12}^* - \mathbb{J}_{12} \nabla_{x_{12}}^* H^* + \begin{bmatrix} 0 \\ i_L \end{bmatrix} - K_{12} \nabla_{\tilde{x}_{12}} \tilde{H} \quad (3.17)$$

Finalmente la ecuación para la ley de control escrita de manera explícita en función de los estados es

$$\begin{aligned} u &= V_{in}^{-1}[\dot{x}_1^* + C^{-1}x_2^* - k_1 L^{-1}\tilde{x}_1] \\ \dot{x}_2^* - Lx_1^* + I_L - k_2 C^{-1}\tilde{x}_2 &= 0 \end{aligned} \quad (3.18)$$

Cabe mencionar que para poder implementar la ley de control  $u$  dada en (3.18) es necesaria la medición del estado  $x_1$  asociada a la corriente en el inductor del filtro, y los valores deseados  $x_1^*$  y  $x_2^*$ . En este sentido, el valor deseado de  $x_1^*$  puede ser obtenido de la segunda parte la ecuación (3.18) si se cuenta con la medición  $x_2$  asociada al voltaje en el capacitor del filtro y un valor para  $x_2^*$  el cual es el voltaje deseado a la salida del filtro, el cual será obtenido por el control droop que está explicado en la siguiente sección, mientras que los valores para  $x_1^*$  y  $x_2^*$  pueden ser obtenidas derivando  $x_1^*$  y  $x_2^*$  directamente.

## 3.2. Control Droop

Con la finalidad de que las fuentes de generación distribuida (GD), emulen el comportamiento de los generadores síncronos se emplea el control Droop, para dar la forma de la señal de voltaje deseada que será generada por los inversores. Con la ventaja de que en los inversores se puede hacer un control directo de la amplitud y frecuencia de voltaje de manera independiente, logrando así tener un mayor control de la potencia suministrada.

El control Droop es un control proporcional, el cual actúa de manera independiente en la frecuencia y amplitud de voltaje, dichos parámetros están relacionados directamente con la diferencia de potencia (P y Q) demandada y potencia generada respectivamente.

### 3.2.1. Análisis de transferencia de potencia

Para hacer un análisis de la transferencia de potencia se considera el sistema presentado en la Figura 3.2 en la que se tienen dos inversores conectados en paralelo a una carga, con los voltajes asociados a cada inversor dados por:

$$\begin{aligned} v_{r1} &= \sqrt{2}E_1 \sin(\omega_1 t + \delta_1) \\ v_{r2} &= \sqrt{2}E_2 \sin(\omega_2 t + \delta_2) \end{aligned} \quad (3.19)$$

donde la potencia entregada por cada inversor está dada por  $S_1^* = E_1 I_1^*$  y  $S_2^* = E_2 I_2^*$  y el voltaje de la carga es el mismo y dado por

$$V_o = v_{r1} - Z_{o1}i_1 = v_{r2} - Z_{o2}i_2. \quad (3.20)$$

A partir de la Figura 3.2 la caída de voltaje  $V_o$  esta asociada al incremento de la carga conectada, fenómeno conocido como *efecto carga*.

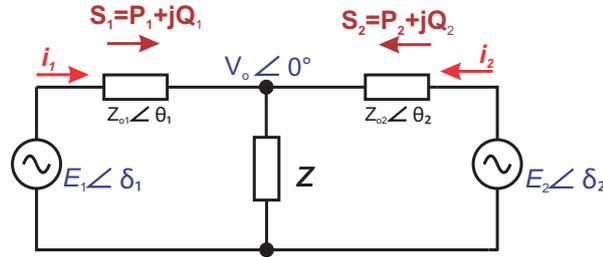


Figura 3.2: Inversores conectados en paralelo

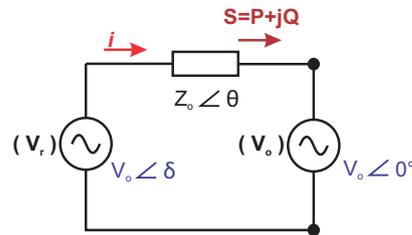


Figura 3.3: Potencia suministrada mediante una fuente de voltaje y una impedancia

Para analizar la potencia entregada por cada inversor a la carga de manera individual, se tomará a la carga como una fuente de voltaje con una amplitud y ángulo de desfase propio y el suministro de potencia estará dado por una fuente de voltaje conectada a la carga mediante una impedancia dada por  $Z\angle\theta$ , como se muestra en la Figura 3.3 y donde la corriente que fluye a través de la impedancia  $Z\angle\theta$  puede expresarse como

$$I = \frac{E\angle\delta - V_0\angle 0^\circ}{Z_0\angle\theta} \quad (3.21)$$

$$I = \frac{E\cos\delta - V_0 + jE\sin\delta}{Z_0\angle\theta}$$

Recordando que la potencia en CA está dada por  $S = VI^*$  y siguiendo un procedimiento similar al presentado en la sección 2.2.2, la potencia activa y reactiva entregada por la fuente de voltaje del lado izquierdo está dada por

$$P = \left( \frac{EV_0}{Z_0} \cos\delta - \frac{V_0^2}{Z_0} \right) \cos\theta + \frac{EV_0}{Z_0} \sin\delta \sin\theta \quad (3.22)$$

$$Q = \left( \frac{EV_0}{Z_0} \cos\delta - \frac{V_0^2}{Z_0} \right) \cos\theta - \frac{EV_0}{Z_0} \sin\delta \cos\theta \quad (3.23)$$

donde  $\delta$  es el ángulo de desfase de voltaje entre la fuente y la carga, el cual es comúnmente llamado ángulo de potencia.

La ecuación (3.22) y (3.23) inspiran las bases para el comportamiento del controlador droop en una micro-red, dicho comportamiento está caracterizado por el estado en el que se encuentre la micro-red, como se presenta a continuación.

### 3.2.2. Control Droop con la Micro-red en Modo Aislado

Cuando la micro-red se encuentra trabajando en modo aislado el suministro de las cargas tiene que ser satisfecho por las fuentes de generación disponibles dentro de la micro-red, las cuales en caso de ser fuentes de energía renovable están limitadas por factores climáticos, razón por la cual no se puede tener un control sobre su generación energética, por lo que el control que se hace en los inversores asociados a las fuentes de generación es únicamente para cambiar su comportamiento ante el cambio de carga presente en la micro-red y no para satisfacer una demanda energética determinada.

Para poder entender el comportamiento de los inversores hay que recordar que un inversor de voltaje puede ser modelado como una fuente de voltaje constante ( $V_r$ ) en serie con una impedancia de salida  $Z_0 \angle \theta$  como la mostrada en la Figura 3.3, para el cual es posible controlar la potencia suministrada por el inversor mediante el uso del control droop en el que la estructura para la ley de control varía dependiendo de la impedancia de salida conectada al inversor.

Recordando las ecuaciones (3.22) y (3.23) en las que se dan las expresiones matemáticas para la potencia activa y reactiva tomando en cuenta el ángulo  $\theta$  asociado a la impedancia de salida, se pueden desarrollar las ecuaciones para el control droop. Haciendo la suposición que el ángulo  $\delta$  es muy cercano a cero, se puede tomar la siguiente aproximación

$$\cos\delta \approx 1$$

$$\sin\delta \approx \delta$$

y considerando el ángulo de impedancia de salida  $\theta$  y la suposición dada anteriormente, la estructura y comportamiento del control droop mostrado en la Tabla 3.1.

Los términos  $n$  y  $m$  presentes en las ecuaciones de la Tabla (3.1) son las respectivas funciones de transferencia de cada inversor. El diseño de los valores de  $m$  y  $n$ , se puede obtener mediante diferentes técnicas de síntesis de control, sin embargo las ganancias  $m$  y  $n$  toman en cuenta las desviaciones estáticas  $\frac{\Delta P}{\Delta f}$  y  $\frac{\Delta Q}{\Delta V}$  necesarias para mantener el sistema sincronizado y dentro de los límites de estabilidad de voltaje. El valor de las ganancias  $m$  y  $n$  se pueden diseñar de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} m &= \frac{\Delta f}{P_{max}} \\ n &= \frac{\Delta V}{2Q_{max}} \end{aligned} \quad (3.24)$$

donde  $\Delta f$  y  $\Delta V$  son los valores máximos de voltaje y frecuencia permitidos,  $P_{max}$  y  $Q_{max}$  son los valores de potencia activa y reactiva máxima respectivamente, que pueden entregar los inversores. Si el inversor puede absorber potencia activa (cuando carga baterías), entonces el término  $m = \frac{\Delta f}{2P_{max}}$ .

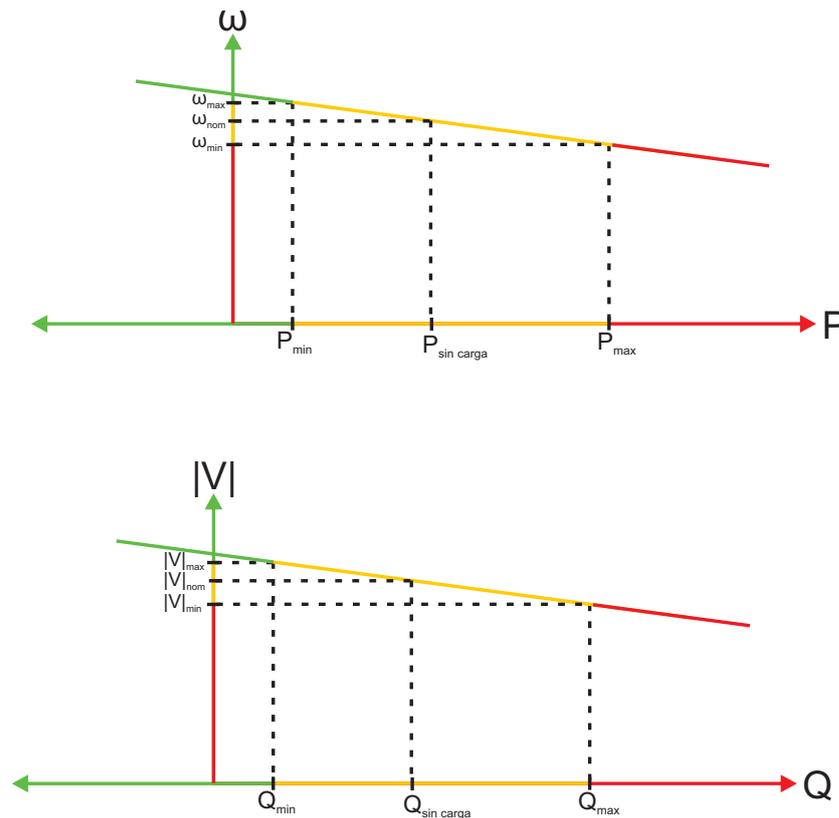
Impedancia de salida	Valor de $\theta$	Ecuaciones de potencia	Control Droop	Comportamiento caída de frecuencia y voltaje
Predominantemente resistiva	$\theta = 0$	$P \approx \frac{V_0}{Z_0} E - \frac{V_0^2}{Z_0}$ $Q \approx -\frac{EV_0}{Z_0} \delta$	$E = E^* - nP$ $\omega = \omega^* + mQ$	
Predominantemente inductiva	$\theta = 90$	$P \approx \frac{EV_0}{Z_0} \delta$ $Q \approx \frac{V_0}{Z_0} E - \frac{V_0^2}{Z_0}$	$E = E^* - nQ$ $\omega = \omega^* - mP$	
Predominantemente capacitiva	$\theta = -90$	$P \approx -\frac{EV_0}{Z_0} \delta$ $Q \approx -\frac{V_0}{Z_0} E + \frac{V_0^2}{Z_0}$	$E = E^* + nQ$ $\omega = \omega^* + mP$	

Tabla 3.1: Control droop convencional dependiendo su impedancia de salida



potencia consumida por las cargas aumentará la frecuencia y voltaje de la micro-red. En ambos casos se deberá conectar la micro-red a la red principal ya sea para inyectar potencia a la red o para consumirla.

Dado que todos los inversores van a tener el mismo comportamiento ante la variación

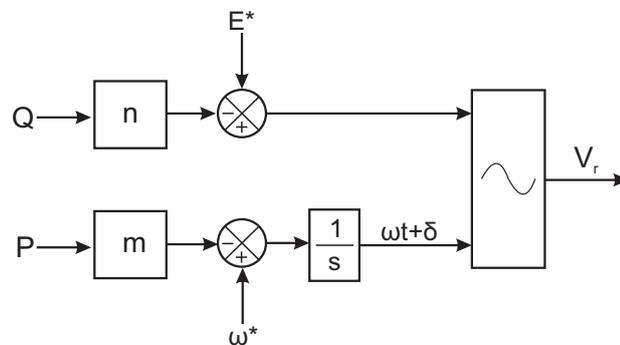


**Figura 3.5:** Comportamiento de un inversor con un control droop

de carga conectada a la micro-red, también la micro-red tendrá ese comportamiento, esto es, salirse de los valores permitidos de voltaje y frecuencia cuando la potencia demandada por las cargas se sale de los valores de operación. De la Figura 3.5 todas las potencias que se encuentren en la parte roja del eje de las ordenadas llevarán a la micro-red a caer en la parte roja de las abscisas (la frecuencia mínima y voltaje mínimo permitido) por lo cual será necesario conectar la micro-red a la red principal para tomar la potencia que haga falta en la micro-red y en el caso de estar en la parte verde del eje de las ordenadas los valores de voltaje y frecuencia caerán en la parte verde de las abscisas (por encima de los valores permitidos de voltaje y frecuencia), en este caso se deberá conectar la micro-red a la red principal para inyectar la potencia sobrante.

De acuerdo con (Zhong and Hornik (2012)) y (Schiffer et al. (2014)) modificar el ángulo  $\delta$  es un tema complejo debido a que dicho ángulo es un ángulo relativo que depende del valor en el que se encuentre al ángulo de referencia, por ejemplo si se

buscara aumentar un ángulo  $\delta$  de algún nodo del sistema y el ángulo de referencia también aumentara la diferencia angular entre ellos sería cero, esto quiere decir que no se garantiza que al variar directamente el ángulo  $\delta$  la potencia entregada por el inversor cambie del modo deseado, dado que si el ángulo  $\delta$  en el que se encuentre la carga o el punto al que se quiera modificar el flujo de potencia activa es el mismo al del inversor no habrá flujo de potencia. Para dar una solución a esta problemática se modifica el ángulo  $\delta$  de manera indirecta mediante la frecuencia logrando así poner una referencia para el ángulo  $\delta$  en cero cuando la frecuencia es la deseada ( $\omega^*$ ). Finalmente para ejemplificar la implementación del control droop visto en esta sección se tomará el control droop para inversores con impedancia de salida predominantemente inductiva y su esquema de implementación es mostrado en la Figura 3.2.2.



**Figura 3.6:** Implementación de control droop para inversores con impedancia de salida predominantemente inductiva

### 3.2.3. Control Droop con la Micro-red en Modo Conectado

Cuando la micro-red se encuentra conectada a la red principal se asegura un balance de potencias adecuado, por lo que en este escenario es posible pedir la potencia que se dese a los inversores (siempre que estos la puedan satisfacer) con la seguridad que la potencia en las cargas será satisfecha y que no se caerá en valores de frecuencia y voltaje no permitidos, por lo que haciendo un análisis similar al presentado en el control droop con la micro-red en modo aislado, para inversores con impedancias de salida predominantemente inductivas se tienen las siguientes ecuaciones para potencias activas y reactivas entregadas por el inversor (Schiffer et al. (2014)).

$$\begin{aligned}\omega &= \omega^* - m(P - P^*) \\ V &= V^* - n(Q - Q^*)\end{aligned}\tag{3.25}$$

donde  $\omega$  y  $V$  son la frecuencia y amplitud de voltaje de salida,  $\omega^*$  y  $V^*$  son la frecuencia y amplitud voltaje deseados,  $P$  y  $Q$  son los valores de potencias generadas,  $P^*$  y  $Q^*$  son los valores de potencias deseados (normalmente se escogen como deseados los valores nominales de los inversores), mientras que los valores de  $m$  y  $n$  son las ganancias de droop las cuales se pueden escoger de manera similar a las ganancias de droop dadas anteriormente, donde  $m$  y  $n$  serán la pendiente de la recta formada de la gráfica de caída de frecuencia y voltaje como la mostrada en la Figura 3.4.

El comportamiento del inversor dado en la ecuación (3.25) por ser un control proporcional cuenta con un error importante en estado estacionario sobre todo en la parte de potencia reactiva. Sin embargo, de la teoría de control se sabe que al integrar el error y retroalimentarlo en la ley de control, el error en estado estacionario disminuirá, por lo que la nueva ley de control droop modificada queda de la siguiente manera

$$\begin{aligned}\omega &= \omega^* - m(P - P^*) \\ V &= V^* - n(Q - Q^*) - k_Q \int (Q - Q^*) dt\end{aligned}\tag{3.26}$$

donde  $k_Q$  es el valor de ganancia para la parte integral del control droop modificado, y la implementación de dicho control se muestra en la Figura 3.7.

### 3.2.4. Ejemplo Control Droop

Con la finalidad de mostrar una comparación entre el comportamiento del control convencional y control droop propuesto dados en (3.25) y (3.26), se propone el siguiente ejemplo ilustrativo. Sean dos fuentes de DC ideales asociadas a inversores DC/AC que suministraran potencia eléctrica a una carga mediante una impedancia de salida predominantemente inductiva y que a su vez están conectados a un bus infinito para simular una micro-red conectada a la red principal como se muestra en la Figura 3.8. Las impedancias de salida para los inversores, así como para el bus infinito

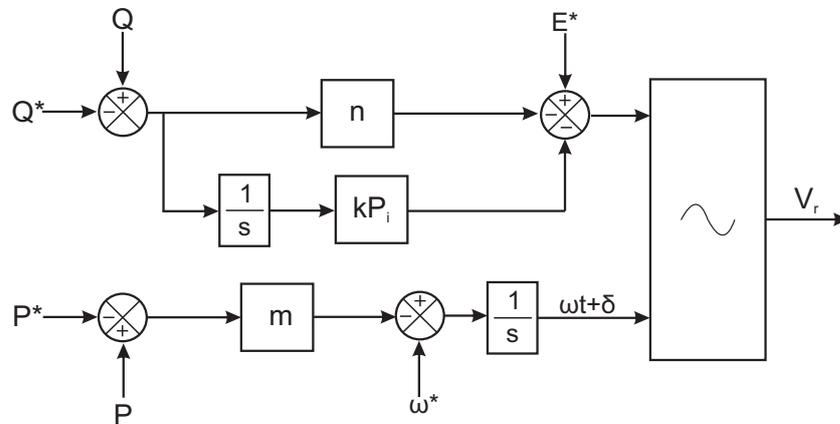


Figura 3.7: Implementación del control droop propuesto

se modelan como un inductor ideal con un valor de  $40[\mu H]$  y las potencias deseadas para cada inversor, así como las potencias para las cargas están dadas en la Tabla 3.2.

El comportamiento de los inversores con el control droop convencional dado en (3.25) se muestra en la Figura 3.9 y la Figura 3.10, mientras que la gráfica del error para potencias activas y reactivas de los inversores 1 y 2 se presenta en la Figura 3.11.

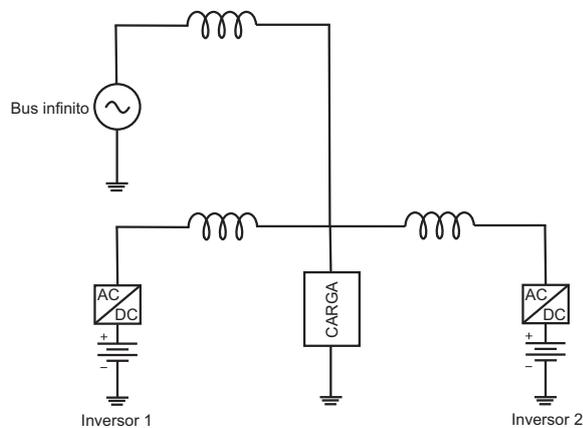
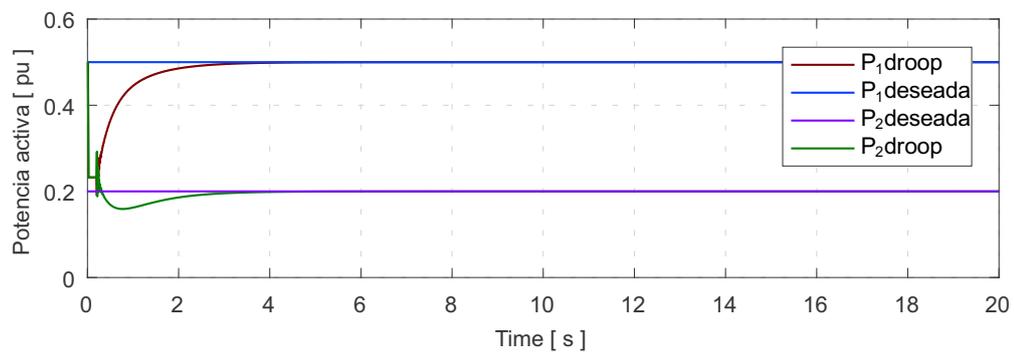


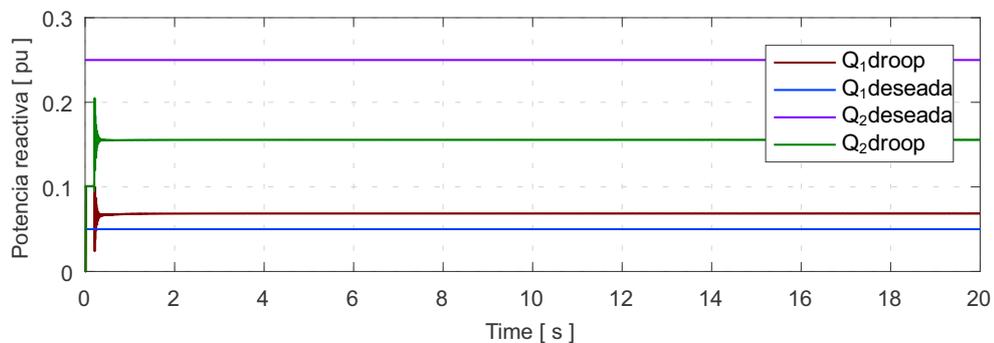
Figura 3.8: Inversores conectados en paralelo y a la red principal

	Voltaje [ pu ]	P [ pu ]	Q [ pu ]
Inversor 1	1	0.2	0.25
Inversor 2	1	0.5	0.05
Carga	1	0.7	0.3

**Tabla 3.2:** Valores de impedancia de las líneas de transmisión por unidad

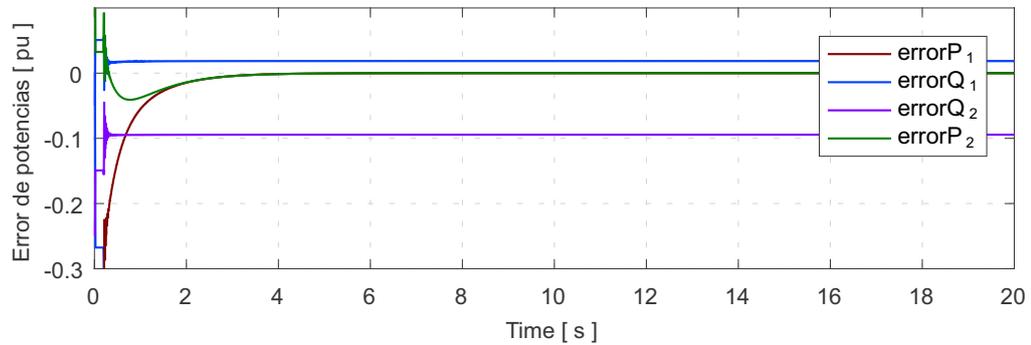


**Figura 3.9:** Comparación de potencia activa deseada y medida en los inversores uno e inversor dos respectivamente

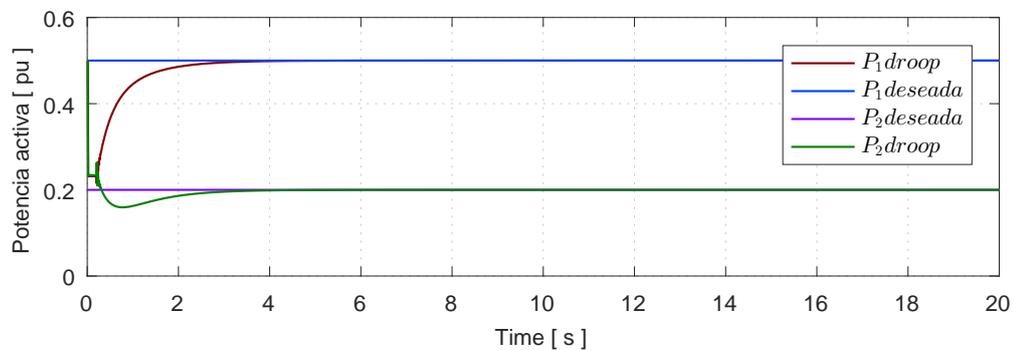


**Figura 3.10:** Comparación de potencia reactiva deseada y medida en los inversores uno e inversor dos respectivamente

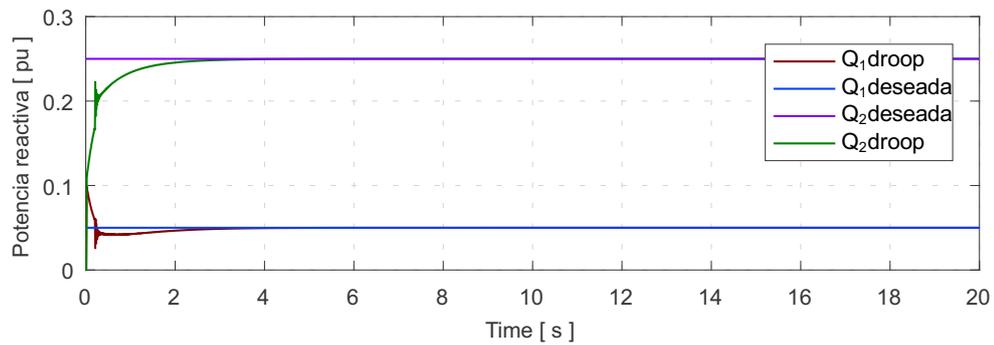
Como puede observarse en la Figura 3.11 existe un error mayor al 20 % en estado estacionario de las potencias reactivas entregadas por los inversores. Para dar solución a este problema se implementa el control droop propuesto en (3.26) teniendo el comportamiento mostrado en las Figuras 3.12 y 3.13, mientras que el error de potencias es mostrado en la Figura 3.14.



**Figura 3.11:** Error de potencia activa y reactiva de los inversores



**Figura 3.12:** Comparación de potencia activa deseada y medida en los inversores uno e inversor dos respectivamente



**Figura 3.13:** Comparación de potencia reactiva deseada y medida en los inversores uno e inversor dos respectivamente

Como puede observarse en la Figura 3.14 el control dado en (3.26) gracias a la parte integral de la ley de control, mejora las propiedades del error en estado estacionario. En este caso después del segundo 4 se hace evidente que el error en las potencias acti-

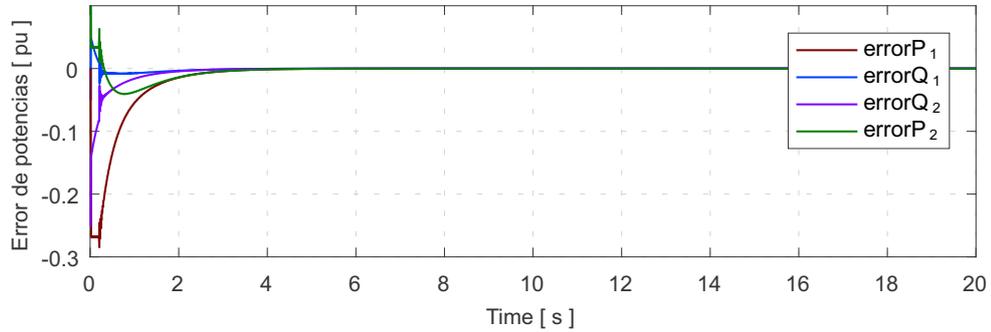


Figura 3.14: Error de potencia activa y reactiva de los inversores

vas y reactivas tiende a cero, logrando así tener un control más preciso de las potencias en los inversores.

### 3.3. Estimador

A partir de esta sección se introducen nuevos estados, dando lugar a dos tipos de estados los cuales pueden ser los estados del estimador (magnitud de voltaje y desfase angular) y los estados del modelo del inversor (flujo magnético en el inductor y carga en el capacitor)

En la implementación de los estimadores de estados estáticos, es usada la función estática de los SEP para monitorear al sistema durante una operación normal del mismo (estado estacionario), donde el sistema tiene un comportamiento cuasi-estático en el cual los valores de los estados cambian muy lentamente y las cargas del sistema están balanceadas, permitiendo representar al sistema con un modelo monofásico de secuencia positiva.

Dado el modelo de la red, se pueden expresar las mediciones descritas anteriormente como una función de todos los estados del sistema, dicha función va a ser una función no lineal la cual toma en cuenta los errores en las mediciones.

Los estimadores de estados consideran un vector  $z$  de mediciones, el cual puede ser expresado en función de los estados del sistema

$$z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ h_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \vdots \\ h_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_m \end{bmatrix} = h(x) + e \quad (3.27)$$

donde  $x^t = [x_1, x_2, \dots, x_3]$  es el vector de estados del sistema,  $h_i(x)$  es la función no lineal que relaciona la medición  $i$  con el vector de estados  $x$  (ecuaciones (2.19) y (2.20) del Capítulo 2, que representan los flujos de potencia en red), mientras que

$e^T = [e_1, e_2, \dots, e_m]$  es el vector de errores de medición.

La formulación del problema de estimación de estados está basado en el concepto de estimación de probabilidad máxima (**MLE** por sus siglas en inglés), el cual maximiza la función de probabilidad de una variable aleatoria. Esta suposición que refiere a los errores de medición en una distribución normal (o Gaussiana), permite expresar la variable de error como una variable aleatoria, con la siguiente función densidad de probabilidad (**pdf** por sus siglas en inglés):

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{z-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (3.28)$$

donde  $z$  es la variable aleatoria,  $\mu$  es el valor esperado o media de la variable  $z$  y  $\sigma$  es la desviación estándar de  $z$ . Al suponer que los errores de medición son independientes uno de otro, implica que la función densidad de probabilidad conjunta puede ser obtenida multiplicando las **pdfs** correspondientes a cada medición, dando como resultado una función de probabilidad para un conjunto de mediciones  $m$

$$f_m(z) = f(z_1)f(z_2)f(z_3)\dots f(z_i) \quad (3.29)$$

donde  $z_i$  es la  $i$ -ésima medición y  $f_m(z)$  es la función de probabilidad de  $z$ . Para simplificar la aritmética, se usarán funciones logarítmicas base 10 para expresar la función anterior y se denotará como  $\mathcal{L}$ , quedando de la siguiente forma

$$\mathcal{L} = \log f_m(z) = -\frac{m}{2} \log(2\pi) - \sum_{i=1}^m \log(\sigma_i) - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \left(\frac{z_i - \mu_i}{\sigma_i}\right)^2 \quad (3.30)$$

Se puede observar que la estimación de probabilidad máxima del estado, se encuentra al maximizar la función de probabilidad logarítmica  $\mathcal{L}$ , para un conjunto de observaciones  $z_1, z_2, \dots, z(m)$ . Este problema se puede reformular minimizando la ecuación

$$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \left(\frac{z_i - \mu_i}{\sigma_i}\right)^2. \quad (3.31)$$

Para abordar el problema de minimización presentado, se reescribirá la ecuación anterior en términos del residuo  $e_i$  o error de medición, expresado como

$$e_i = z_i - \mu_i \quad (3.32)$$

donde  $\mu_i$  es el valor esperado de la medición  $z_i$ , el cual se puede expresar  $h_i(x)$ . El recíproco de desviaciones estándar de las mediciones, se puede tomar como el peso (ponderación) asociado a cada medición, lo que genera que a las mediciones más precisas se les dará un peso mayor que las mediciones menos precisas, a dichos pesos o ponderaciones se les denotará como  $W_{ii} = \sigma^{-2}$  para cada medición  $i$ . Usando la

notación anterior, el problema de **MLE**, se puede tomar como un problema de optimización, que consiste en minimizar

$$J(x) = \sum_{i=1}^m w_{ii}(e_i)^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \left( \frac{z_i - h_i(x)}{\sigma_i} \right)^2 \quad (3.33)$$

la expresión anterior se puede reescribir en su forma matricial como

$$J(x) = \frac{1}{2} [z - h(x)]^T W [z - h(x)] \quad (3.34)$$

donde la matriz  $W = R^{-1}$  es la matriz de ponderación, que está relacionada con la precisión de los instrumentos de medición.

Las solución del problema de optimización planteado en la ecuación anterior se conoce como **mínimos cuadrados ponderados**, para resolver el problema de optimización dado (minimización de la función objetivo), la solución de la ecuación (3.34) debe de cumplir con la siguiente condición de optimización

$$g(x) = \frac{\partial J(x)}{\partial x} = -H^T(x)W[z - h(x)] = 0 \quad (3.35)$$

donde  $H(x) = \frac{\partial h(x)}{\partial x}$  es la matriz jacobiana de  $m \times n$ ,  $m$  es el número de mediciones y  $n$  son el número de variables a calcular.

Para encontrar los valores de  $x$  (estados del sistema) que hagan válida la ecuación anterior, se hace uso del método de Newton Raphson, por lo que expande la ecuación anterior en su serie de Taylor evaluada en el punto  $x^k$

$$g(x^{k+1}) = g(x^k) + g'(x^k)(x^{k+1} - x^k) + \frac{g''(x^k)}{2!}(x - x^k)^2 + \dots + \frac{g^n(x^k)}{n!} = 0 \quad (3.36)$$

al despreciar los términos con segundas derivadas o mayores y despejando a  $x^{k+1}$  se obtiene

$$x^{k+1} = x^k - [G(x^k)]^{-1} g(x^k) = x^k - \Delta x^k \quad (3.37)$$

donde  $k$  es el índice de la iteración,  $x^k$  es el vector de estados que es solución en la iteración  $k$  y  $G(x)$  es la matriz hesiana de la ecuación (3.34), a partir de esta ecuación es posible calcular un valor de estimación nuevo a partir de los valores de la estimación anterior. Si se reagrupa la ecuación anterior y se sustituye en ella la ecuación (3.35) se puede llegar a

$$\Delta x^k = G(x^k)^{-1} H^T(x)W[z - h(x)] \quad (3.38)$$

donde  $\Delta x^k$  es  $(x^{k+1} - x^k)$ .

De acuerdo con lo planteado en Gómez-Expósito et al. (2016), el cálculo de la matriz  $G(x)$  esta dado por

$$G(x) = H^T(x)WH(x) \quad (3.39)$$

a la ecuación anterior se le conoce como matriz de ganancia  $G(x)$ , si la matriz  $H(x)$  es de rango completo, entonces la matriz  $G(x)$  es simétrica y de rango completo, por lo

que la ecuación (3.38) tiene una única solución, una vez resuelto el sistema de ecuaciones presentado en (3.38), es posible actualizar el vector de estados estimados

$$x^{k+1} = x^k + \Delta x^k$$

De forma general el proceso de estimación de estados se puede resumir en el siguiente algoritmo de estimación:

1. Iniciar el vector de estados  $x = x_0$  con condiciones iniciales ( $V_i = 1, \theta_i = 0$ )
2. Iniciar el contador de iteraciones  $k$  en 0
3. Asignar los valores de varianzas en la matriz  $W$  correspondientes a cada medición con la que se cuenta
4. Hacer el cálculo de las mediciones estimadas, dadas por la función  $h(x)$ , véase el Apéndice A.1 1
5. Construir la matriz Jacobiana  $H(x)$ , véase el apéndice 1
6. Calcular la matriz de ganancia  $G(x)$ , mediante la ecuación (3.39)
7. Resolver para  $\Delta x$  el sistema de ecuaciones, presentado en la ecuación (3.38)

$$G(x^k)\Delta x^k = H^T(x)W[z - h(x)]$$

para la resolución del sistema de ecuaciones dado, véase el Apéndice A.1

8. Actualizar el vector de estados ( $x^{k+1} = x^k + \Delta x^k$ ), así como el contador de iteraciones ( $k=k+1$ )
9. Realizar la prueba de convergencia ( $|\Delta x_i^k| \leq 10^{-6}$ ), si ningún valor de  $\Delta x$  rebasa el valor de tolerancia permitido, se finaliza el algoritmo de estimación, de caso contrario regresar al paso 4

### 3.4. Sistema Global

El esquema global que presenta la microrred es una serie de leyes de control conectadas en cascada para resolver los diferentes problemas de generación.

El algoritmo que resuelve el problema de saber qué cantidad de energía se le pide a cada fuente de generación disponible para satisfacer la demanda energética con el menor costo posible es el llamado *despacho económico de carga*, (el cual no se desarrolla en el presente trabajo y los valores entregados por éste se toman como datos conocidos). El despacho económico necesita diversos datos de generación y demanda como pueden ser la demanda de potencia en los nodos de carga, la capacidad de las fuentes de generación disponibles, los costos de generación, entre otras cosas y tiene

como salida un valor específico de generación deseada para cada una de las fuentes del sistema. Los datos entregados por el despacho económico son usados por leyes de control descentralizadas que actúan en los nodos de generación para poder entregar la potencia deseada, esta ley de control descentralizada, para este trabajo de tesis, es el llamado *Control Droop Modificado* abordado anteriormente en este capítulo, el cual necesita entre otras cosas el valor de potencia P y Q deseadas, para que a partir de las potencias medidas en el nodo de estudio entregue la forma de onda de la señal de voltaje deseada que deberá ser entregada por la fuente de generación a partir de una etapa de electrónica de potencia. Para poder introducir los valores de potencia P y Q medidas en el nodo de estudio, se hace uso del *estimador de estados* que se encarga de generar los estados del sistema (magnitud de voltaje y ángulo de desfasamiento del voltaje de nodo) a partir de todos o algunos valores de mediciones con incertidumbre y a dichos estados generados se toman como entradas de las ecuaciones de *flujos de potencia* estudiadas en el capítulo anterior. Los valores generados por los flujos de potencia, son los valores tomados por el *control Droop* como potencias de generación actuales (potencias estimadas).

Una vez obtenidos los valores de la señal de voltaje deseada entregada por el *control Droop*, se introducen a leyes de control secundarias que son las encargadas de generar el voltaje deseado, para entregar las potencias P y Q pedidas al nodo por el *despacho económico*. Estas leyes de control pueden ser efectuadas por gobernadores en los generadores síncronos o por convertidores de potencia en el caso de las fuentes de generación distribuida, que generen en DC. Para el caso de estudio de este trabajo de tesis la ley de control secundaria, será la ley de control efectuada por el convertidor de potencia presentada en la sección 3.1, la cual será la encargada de generar la forma de onda de la señal de voltaje de salida entregada por la fuente DG y con la que se busca satisfacer la demanda energética de las cargas.

El esquema de control antes descrito se puede representar de manera gráfica por la Figura 3.15 donde la potencia de entrada es la potencia proporcionada por las fuentes de DC ideales y que representan a las fuentes de energía verde, los valores con el subíndice  $e$  representan a valores estimados, los valores con el superíndice  $*$  representan valores deseados o valores de referencia para las leyes de control y finalmente los valores con el subíndice  $m$  representan valores medidos.

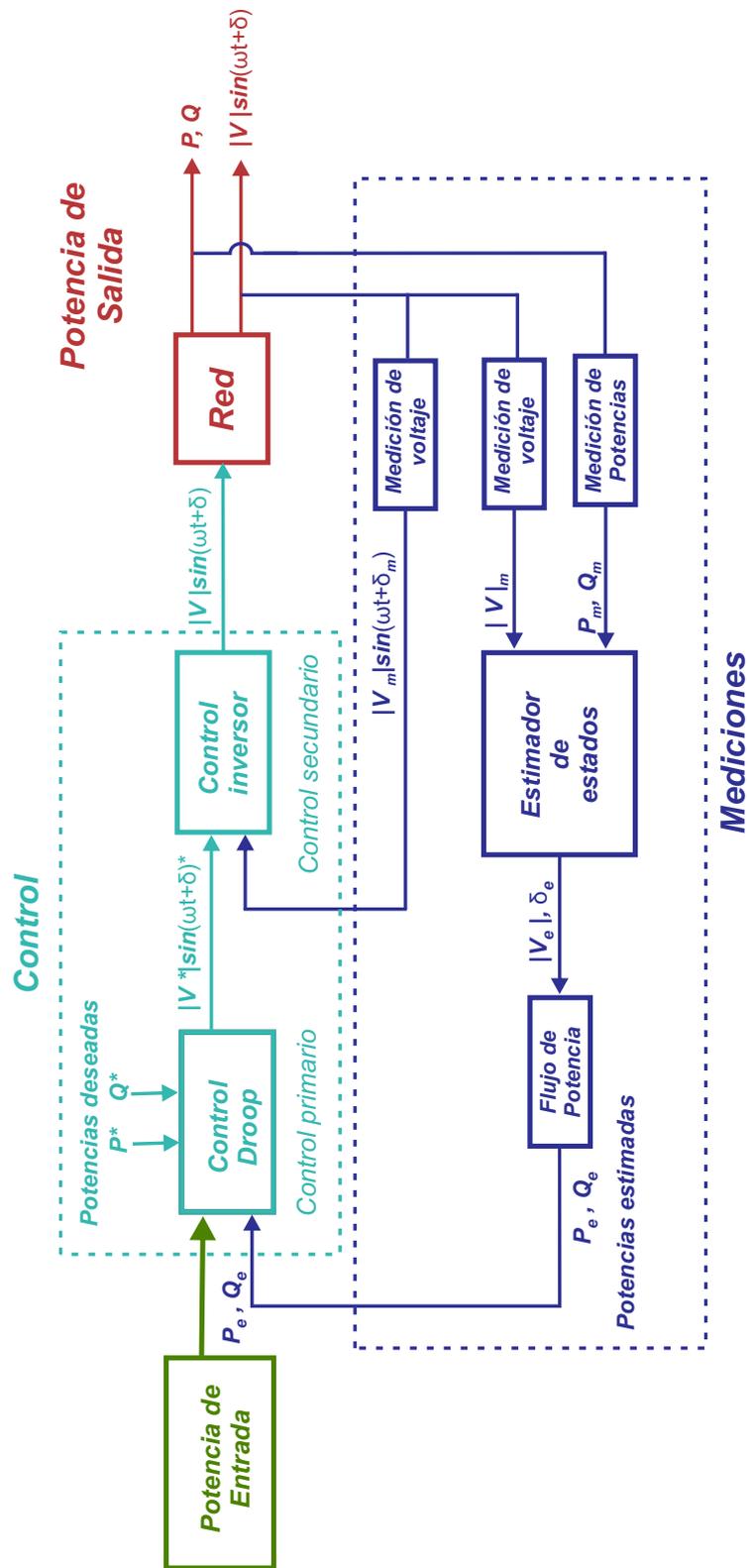


Figura 3.15: Esquema de control final para la micro-red

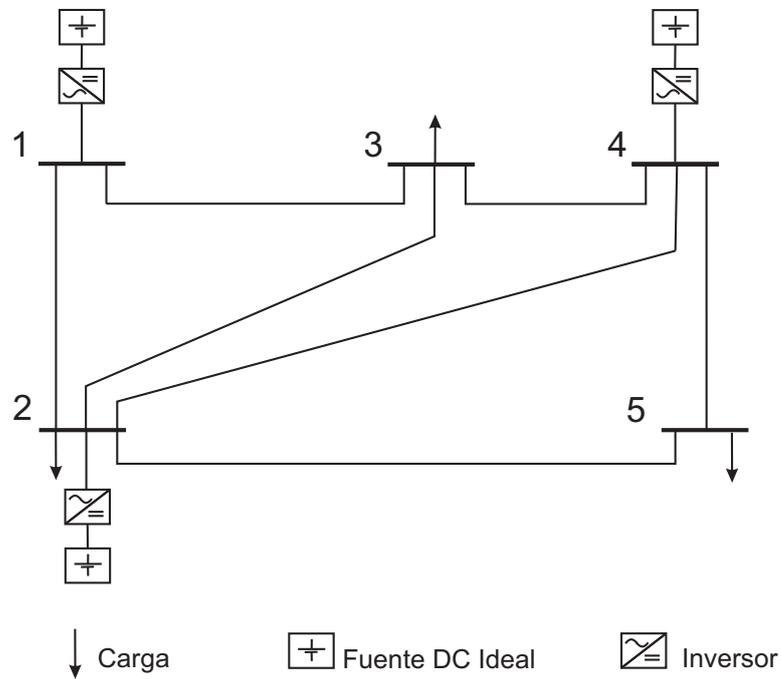
## Evaluación Numérica

---

Con el fin de mostrar numéricamente el comportamiento del esquema de control planteado y compararlo con escenarios ideales se tomó como ejemplo la red de 5 nodos mostrada en la Figura (4.1) tomada de (Stagg et al. (1968)), donde los valores base son  $S_{base} = 100 \text{ MVA}$  y  $V_{base} = 100 \text{ kV}$ , dicha red cuenta con 3 cargas y dos generadores síncronos, los cuales son sustituidos por inversores trabajando en paralelo y conectados a una fuente de DC ideal, la carga del nodo 4 también es sustituida por un inversor que tendrá el comportamiento de una carga, los valores nominales así como en por unidad (véase A.2) para las líneas de transmisión de la red están dados en la Tabla 4.1, así como los valores de generación y de carga se pueden ver en la Tabla 4.2.

Para poder hacer la evaluación del esquema de control propuesto en el presente trabajo se toman en cuenta las siguientes consideraciones:

- Las fuentes de generación pueden satisfacer la demanda energética de las cargas, por lo que se puede emplear el control dado en (3.26).
- La red se puede representar con un modelo monofásico.
- La potencia generada es la misma que la consumida por las cargas.
- Las cargas conectadas a la red son lineales
- Cada nodo de la red tiene asociado un valor de inyección de potencia (P,Q), una magnitud de voltaje  $|V|$  con un ángulo  $\delta$  como ángulo de desfase con respecto al nodo de referencia.



**Figura 4.1:** Red de cinco nodos

Nodos	R[ $\Omega$ ]	X[ $\Omega$ ]	R[ pu ]	X[ pu ]
1 - 2	2	6	0.02	0.06
1 - 3	8	24	0.08	0.24
2 - 3	6	18	0.06	0.18
2 - 4	6	18	0.06	0.18
2 - 5	4	12	0.04	0.12
3 - 4	1	3	0.01	0.03
4 - 5	8	24	0.08	0.24

**Tabla 4.1:** Valores de impedancia de las líneas de transmisión por unidad

Los casos de estudio se dividieron en cuatro, partiendo desde el caso más ideal hasta el más complejo en el que se evalúa el esquema de control propuesto, dichos escenarios son descritos a continuación.

---

Nodos	Voltaje nominal	Generación		Carga	
		Megawatts	Megavars	Megawatts	Megavars
	[ V ]				
1	1000	0	0	0	0
2	1000	40	30	0	0
3	1000	0	0	45	15
4	1000	0	0	40	5
5	1000	0	0	60	10

**Tabla 4.2:** Valores de impedancia de las líneas de transmisión por unidad

- Primer escenario:* Es el escenario ideal, se asume que el voltaje dado por el control droop puede ser suministrado sin ningún tipo de error a la salida del filtro asociado al inversor y se cuenta con todas las mediciones del sistema. Este escenario ideal se presenta para mostrar el comportamiento deseado del sistema, por lo que se compararán los escenarios posteriores con este primer escenario ideal.
- Segundo escenario:* Se incorporan a los inversores el filtro de salida sin alguna ley de control que controle el voltaje de salida y además se cuenta con todas las mediciones del sistema. Este escenario se presenta para mostrar el comportamiento natural que tendría el sistema sin ningún tipo de control para así poder tener un punto de comparación concreto del sistema y del desempeño del control presente en el para los escenarios posteriores.
- Tercer escenario:* Se incorpora a los inversores la ley de control (3.18) propuesta en la sección 3.2 y además se cuenta con todas las mediciones del sistema. Este escenario es presentado para mostrar el comportamiento del sistema con una ley de control que lleve las potencias y voltajes a sus valores deseados. Esto, contando con que se tienen todas las mediciones necesarias para implementar las leyes de control propuestas.
- Cuarto escenario:* Se toman las mismas consideraciones del caso anterior, se incorpora el estimador de estados estático dado en la sección 3.3 para tomar las mediciones y se asume que no se pueden tener todas las mediciones del sistema (mediciones en la generación). En este escenario se presenta el esquema de control propuesto en esta tesis para

poder hacer control de potencia y contar con un monitoreo constante del sistema, para evaluar el desempeño del esquema de control propuesto se comparará el comportamiento de este escenario con el comportamiento del primer escenario (escenario ideal).

#### 4.1. Primer Escenario

Este escenario se muestra el comportamiento ideal que presentaría el sistema y el cual se busca igualar con el esquema de control propuesto en esta tesis. En este escenario se asume que todas las mediciones del sistema están disponibles, los inversores son capaces de funcionar como cargas o como generadores y su comportamiento se considera ideal, lo cual implica que los valores del control droop son entregados sin error, el control droop implementado es el dado en (3.26) también mostrado a continuación

$$\omega = \omega^* - m(P - P^*)$$

$$V = V^* - n(Q - Q^*) - k_Q \int (Q - Q^*) dt$$

por lo que el esquema de control evaluado es el mostrado en la Figura 4.2.

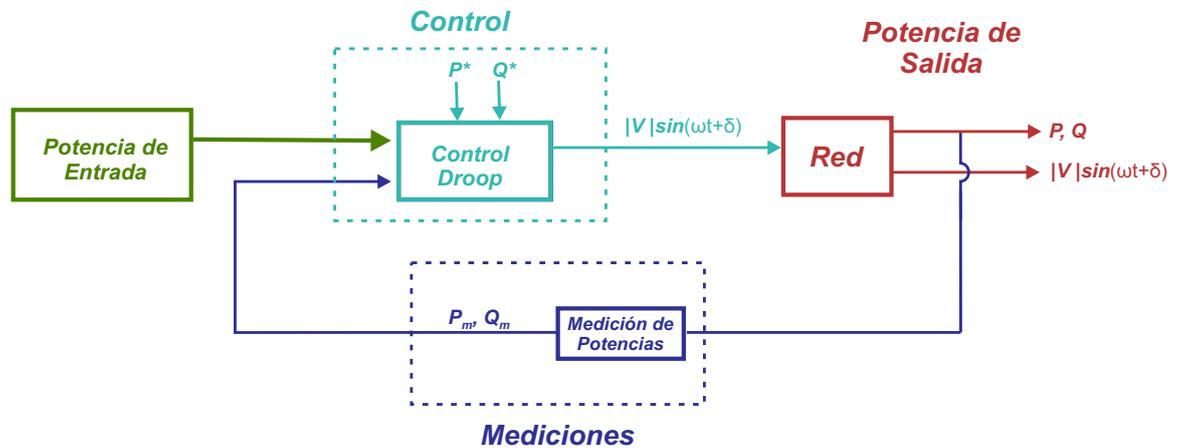


Figura 4.2: Esquema de control primer escenario

Los valores de potencia por unidad deseados para las cargas e inversores están dados en la Tabla 4.3 y los valores para las ganancias del control droop dado en (3.26) son presentadas en la Tabla 4.4. En este ejemplo así como para los ejemplos posteriores y con la finalidad de observar el desempeño del controlador ante el cambio de repartición de carga del segundo 0 al segundo 15 se asume que el inversor situado en el nodo 4 no está disponible para proporcionar potencia y para la red es considerado como una carga, por lo que del segundo 0 al segundo 7 la repartición de las cargas se

Nodos	Voltaje [ pu ]	t [ 0 - 7 ]		t ( 7 - 15 ]		t ( 15 - 20 ]	
		P [ pu ]	Q [ pu ]	P [ pu ]	Q [ pu ]	P [ pu ]	Q [ pu ]
1	1	0.1137	0.2694	0.1837	0.1694	0.3453	0.0938
2	1	1.3130	0.1196	1.2430	0.2196	0.3453	0.0938
3	1	-0.45	-0.15	-0.45	-0.15	-0.45	-0.15
4	1	-0.40	-0.05	-0.40	-0.05	0.3453	0.0938
5	1	-0.60	-0.10	-0.60	-0.10	-0.45	-0.10

Tabla 4.3: Potencias de nodo deseadas

Inversores	kp	kq	ki
1	0.01	0.015	0.035
2	0.01	0.015	0.035
3	0.01	-0.1	0.3

Tabla 4.4: Ganancias para el control droop

da entre el los inversores situados en los nodos 1 y 2 con las potencias deseadas dadas en la tabla (4.3), del segundo 7 al segundo 15 se hace una nueva repartición de carga en los inversores de los nodos 1 y 2 manteniendo la carga constante en los nodos del 3 al 5, posteriormente del segundo 15 al 20 se considera que el inversor del nodo 4 está disponible para inyectar potencia a la red por lo que las cargas en los nodos 3 y 5 son repartidas equitativamente entre los inversores asociados a los nodos 1, 2 y 4.

El comportamiento del sistema para las potencias activas y reactivas de cada nodo están dadas en las Figuras 4.3 y 4.4, para poder visualizar el desempeño del control propuesto en las Figuras 4.5 y 4.6 se presentan las gráficas de los errores de las potencias activas y reactivas en cada nodo, finalmente para verificar que se llegan a las potencias deseadas sin pasar los límites de seguridad y calidad permitidos en las Figuras 4.7, 4.8 y 4.9 se muestran los valores de amplitud de voltaje, ángulo de desfaseamiento de voltaje entre nodos y la frecuencia respectivamente.

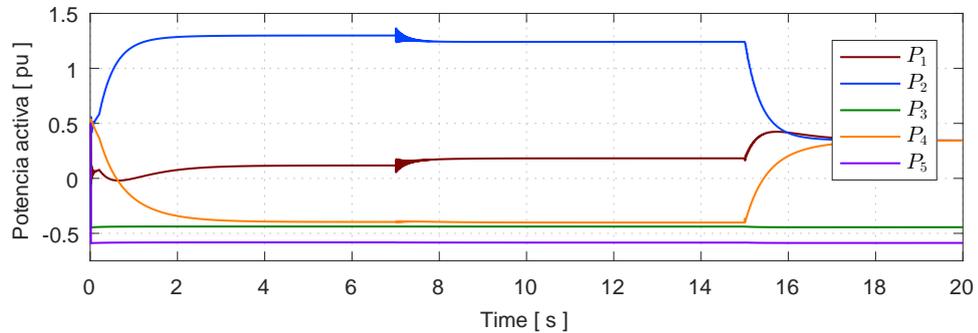


Figura 4.3: Potencias activas en el sistema

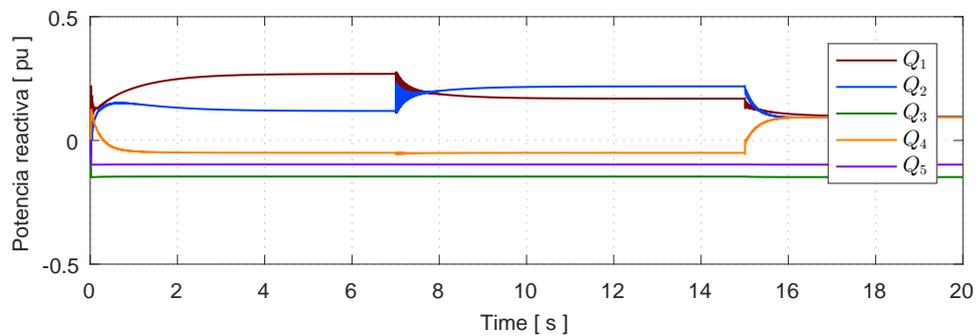


Figura 4.4: Potencias reactivas en el sistema

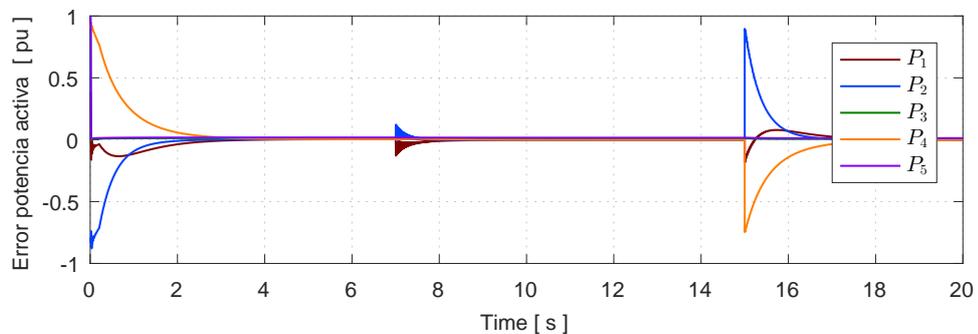
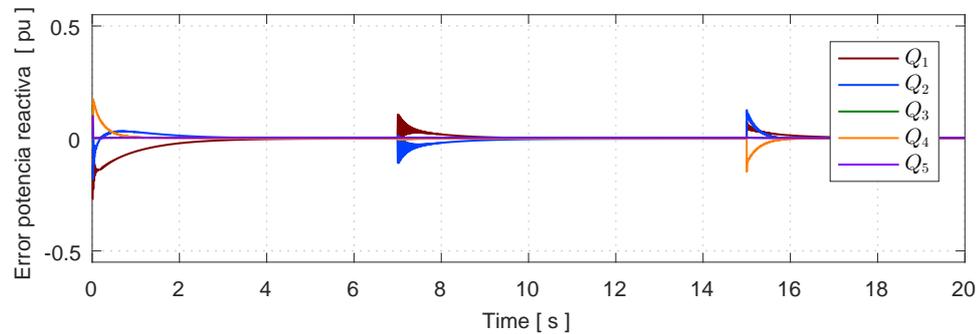


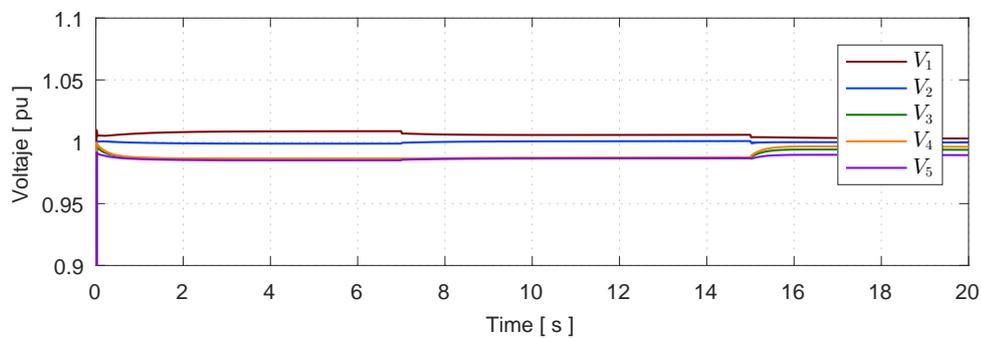
Figura 4.5: Error de potencias activas en el sistema

## 4.2. Segundo Escenario

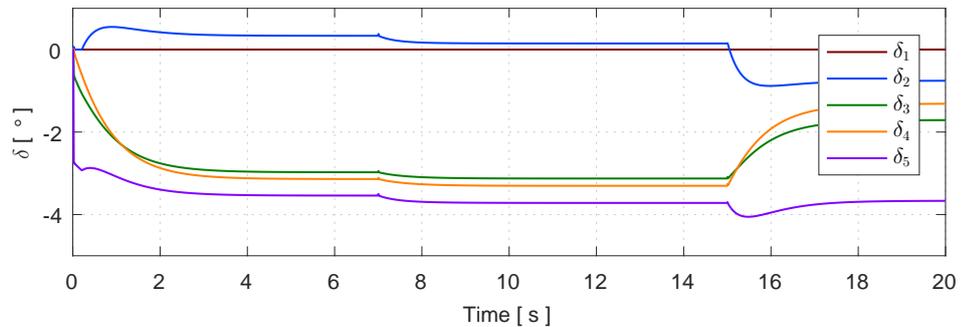
Para este escenario se incorporan los filtros de salida asociados a cada inversor presente en la micro-red, se asume que se cuentan con las mediciones necesarias para llevar a cabo el control propuesto en la *sección 3.2* por lo que el esquema de control es el mismo al del escenario pasado el cual es mostrado en la Figura 4.2, sin embargo, no



**Figura 4.6:** Error potencias reactivas en el sistema



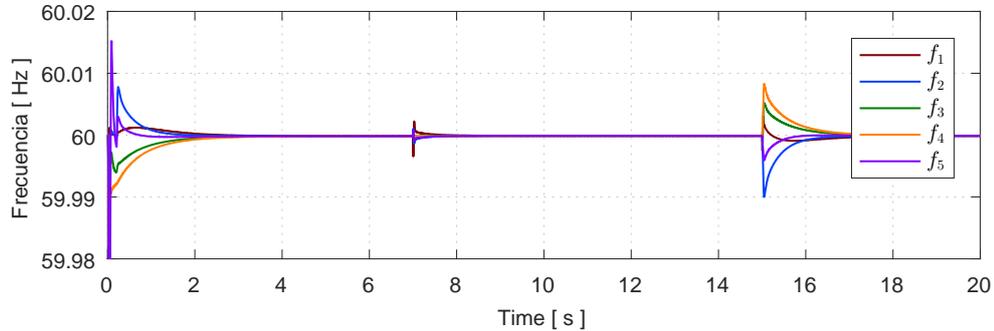
**Figura 4.7:** Voltaje en los nodos



**Figura 4.8:** Ángulo de desfase de voltaje entre nodo y nodo

se agrega una ley de control para compensar la dinámica que se gana al incorporar el filtro de salida para cada inversor, esto con la finalidad de ver el comportamiento en la micro-red así como la de cada inversor presente en ella sin una acción de control asociada a la salida de los inversores.

Para este escenario como para los escenarios siguientes, debido a la incorporación de los inversores es necesario calcular los valores de inductancia y capacitancia del filtro LC que filtrará el voltaje entregado por los inversores a la red.



**Figura 4.9:** Frecuencia en los nodos del sistema

Siguiendo el procedimiento mostrado en el Apéndice A.3 para el diseño del filtro LC, si se considera la frecuencia de switcheo del inversor en 4000 [Hz], la frecuencia de corte para el filtro recomendada se encuentra entre

$$\frac{4000}{3} \leq f_c \leq \frac{4000}{2}$$

tomando la frecuencia de corte en 1500 [Hz] se fija el valor de la capacitancia en  $9 \mu[F]$  y de la ecuación (A.3) se despeja el valor para el inductor del filtro quedando como

$$L = \frac{1}{C(2\pi f_c)^2}$$

$$L = \frac{1}{9 \times 10^{-6} (3500\pi)^2} = 0.0013 [H]$$

El comportamiento del sistema para las potencias activas y reactivas de cada nodo están dadas en las Figuras 4.18 y 4.19, para poder visualizar el desempeño del control propuesto en las Figuras 4.20 y 4.21 se presentan las gráficas de los errores de las potencias activas y reactivas en cada nodo, para verificar que se llegan a las potencias deseadas sin pasar los límites de seguridad y calidad permitidos en las Figuras 4.22, 4.23 y 4.24 se muestran los valores de amplitud de voltaje, ángulo de desfase de voltaje entre nodos y la frecuencia respectivamente. Finalmente se presentan las señales de control en los inversores en la Figura 4.25

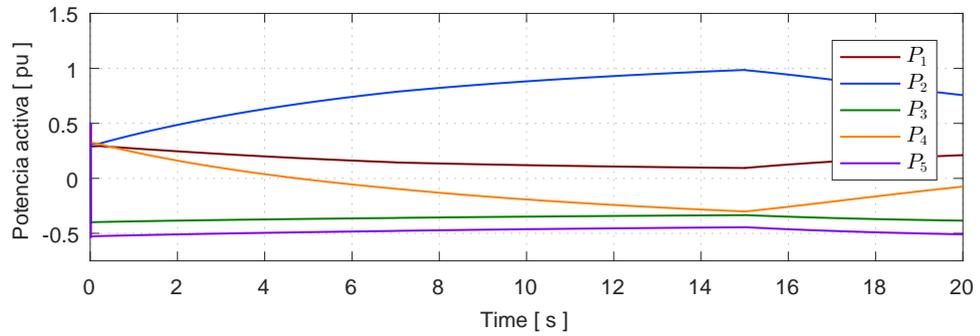


Figura 4.10: Potencias activas en el sistema

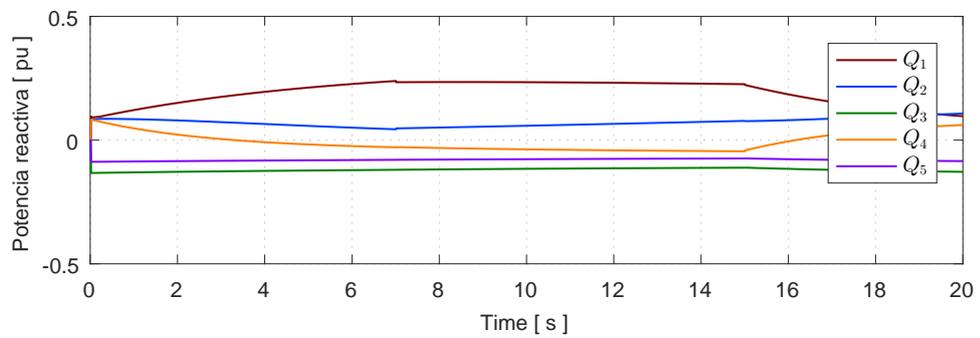


Figura 4.11: Potencias reactivas en el sistema

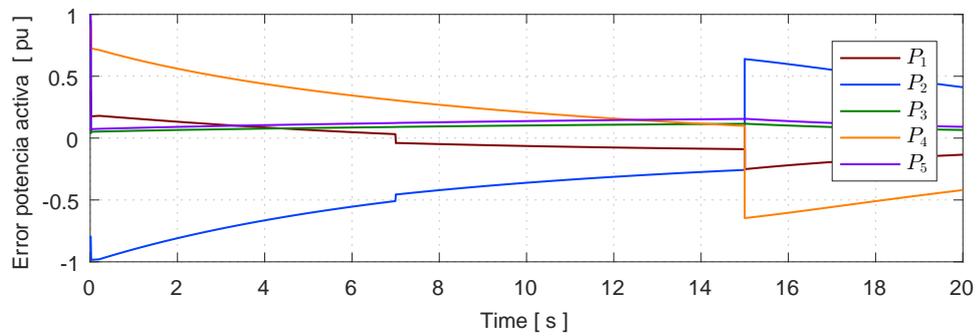


Figura 4.12: Error de potencias activas en el sistema

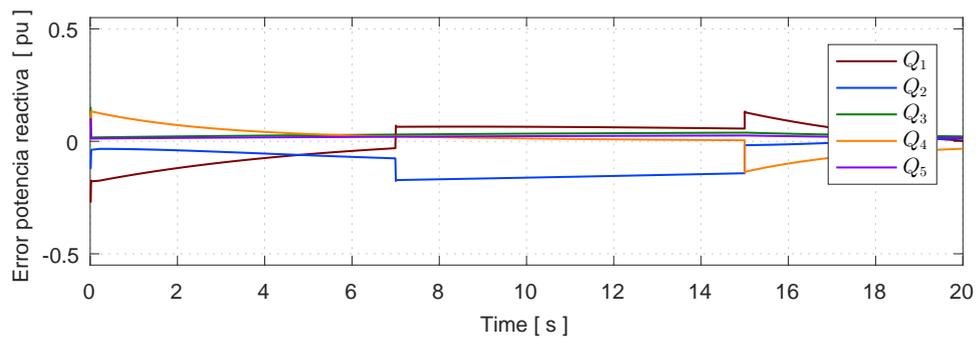


Figura 4.13: Error potencias reactivas en el sistemas

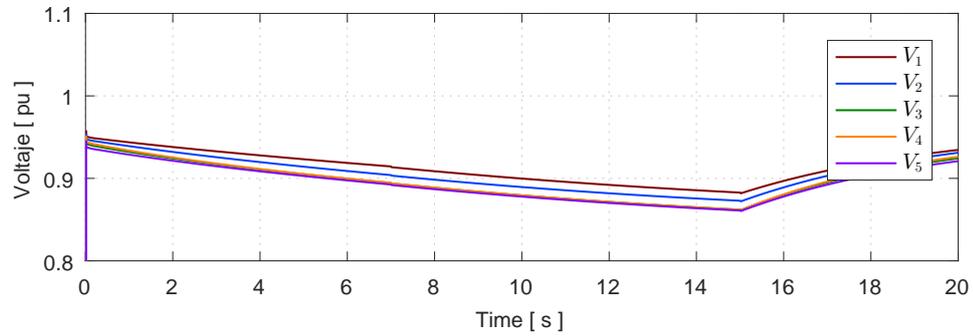


Figura 4.14: Voltaje en los nodos

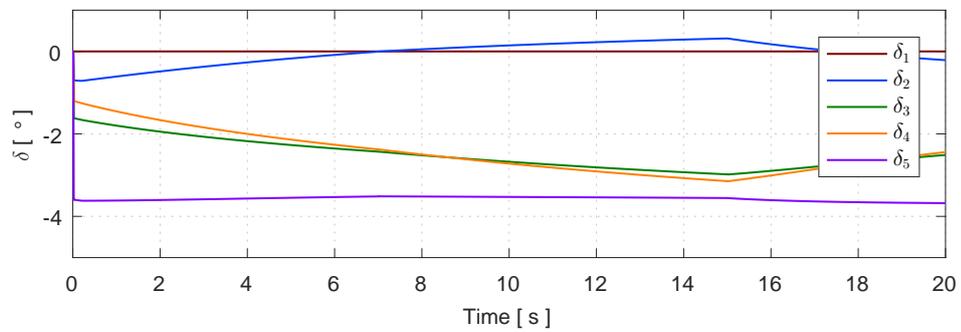


Figura 4.15: Ángulo de desfase de voltaje entre nodo y nodo

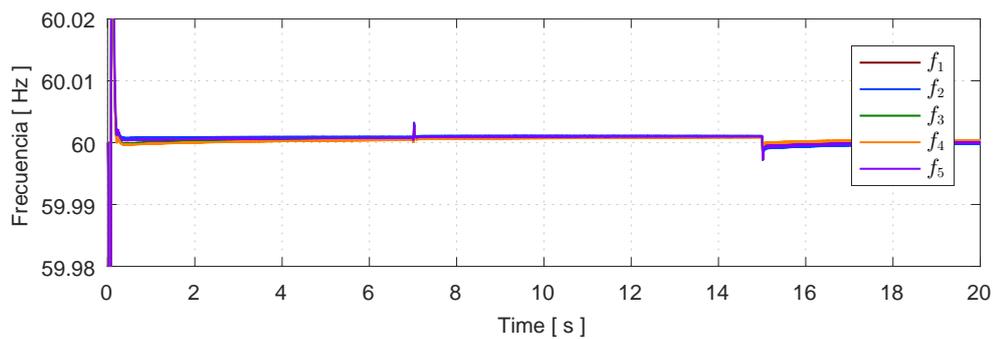


Figura 4.16: Frecuencia en los nodos del sistema

### 4.3. Tercer Escenario

En este tercer escenario a los inversores se les incorpora la ley de control (3.18) dada en la sección 3.1, también mostrada a continuación

$$u = V_{in}^{-1} [\dot{x}_1^* + C^{-1}x_2^* - k_1 L^{-1} \tilde{x}_1]$$

$$\dot{x}_2^* - Lx_1^* + I_L - k_2 C^{-1} \tilde{x}_2 = 0,$$

esto para compensar la dinámica agregada por el filtros de salida presentes en los inversores, las ganancias para las leyes de control asociadas a cada inversor están dadas en la Tabla 4.5 y serán las mismas para cada inversor presente en el sistema. También se da por hecho que se cuenta con todas las mediciones necesarias y estas no tienen ningún tipo de incertidumbres, por lo que el esquema de control para el sistema es mostrado en la Figura 4.17.

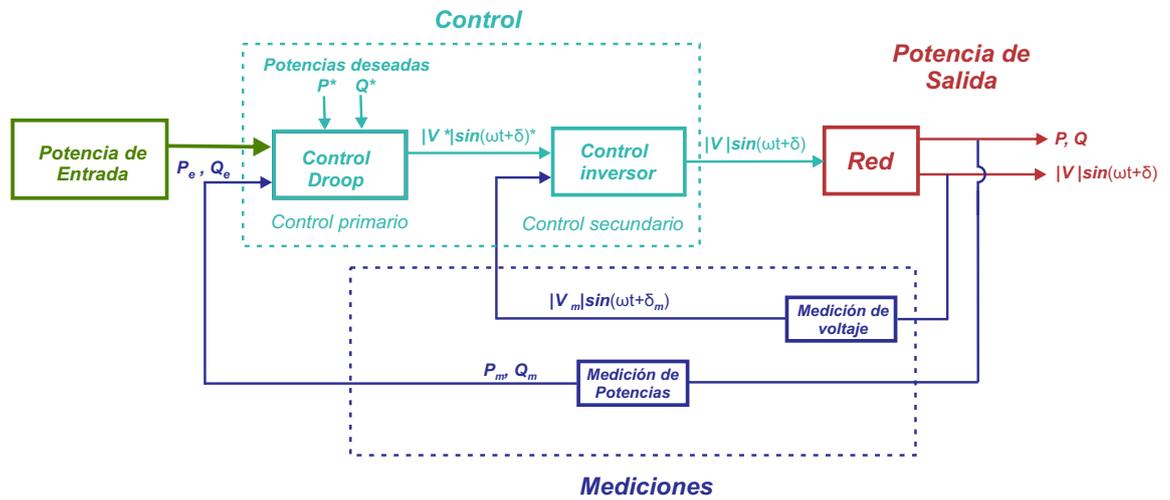


Figura 4.17: Esquema de control tercer escenario

Ganancia	Valor
$K_1$	10
$K_2$	100

Tabla 4.5: Ganancias para la ley de control asociada a la salida de voltaje en los inversores

El comportamiento del sistema para las potencias activas y reactivas de cada nodo están dadas en las Figuras 4.18 y 4.19, para poder visualizar el desempeño del control propuesto en las Figuras 4.20 y 4.21 se presentan las gráficas de los errores de las potencias activas y reactivas en cada nodo, para verificar que se llegaran a las potencias deseadas sin pasar los límites de seguridad y calidad permitidos en las Figuras 4.22, 4.23 y 4.24 se muestran los valores de amplitud de voltaje, ángulo de desfase de voltaje entre nodos y la frecuencia respectivamente. Finalmente se presentan las señales de control en los inversores en la Figura 4.25

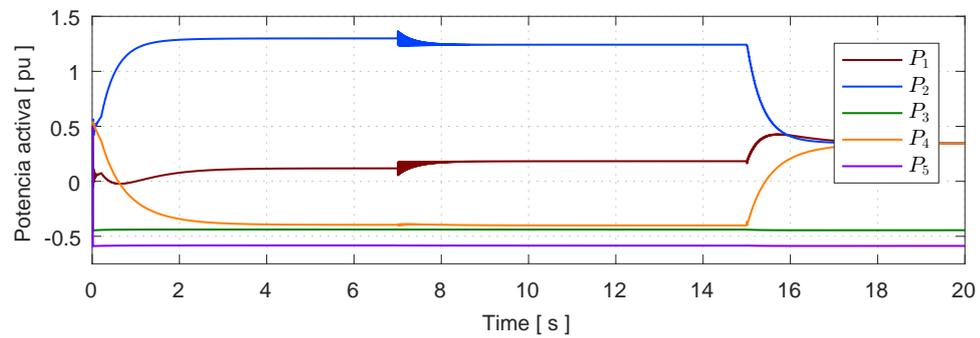


Figura 4.18: Potencias activas en el sistema

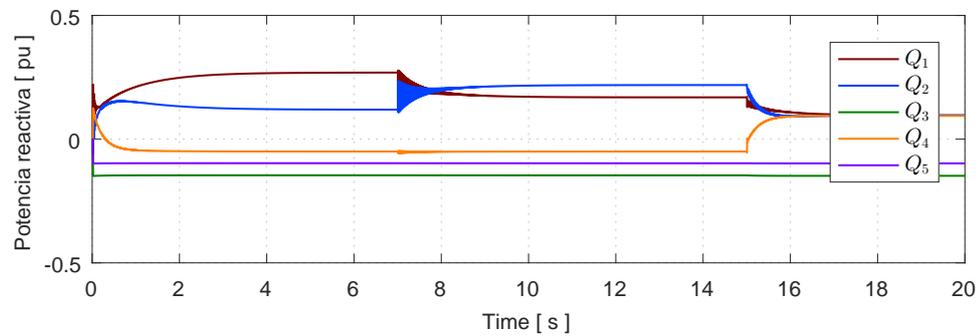
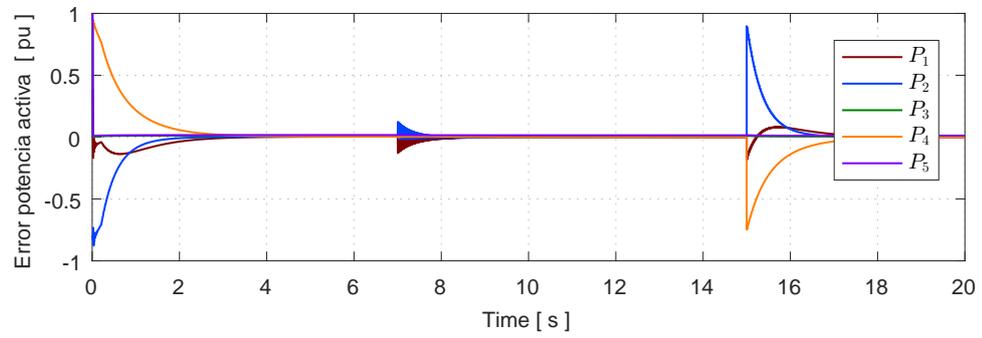
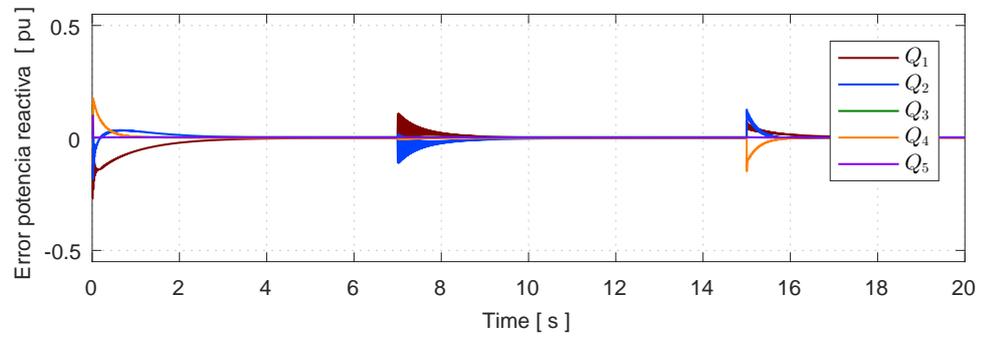


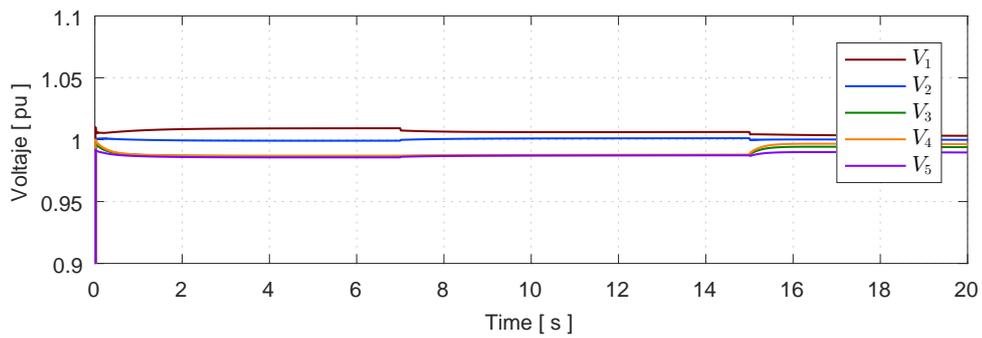
Figura 4.19: Potencias reactivas en el sistema



**Figura 4.20:** Error de potencias activas en el sistema



**Figura 4.21:** Error potencias reactivas en el sistemas



**Figura 4.22:** Voltaje en los nodos

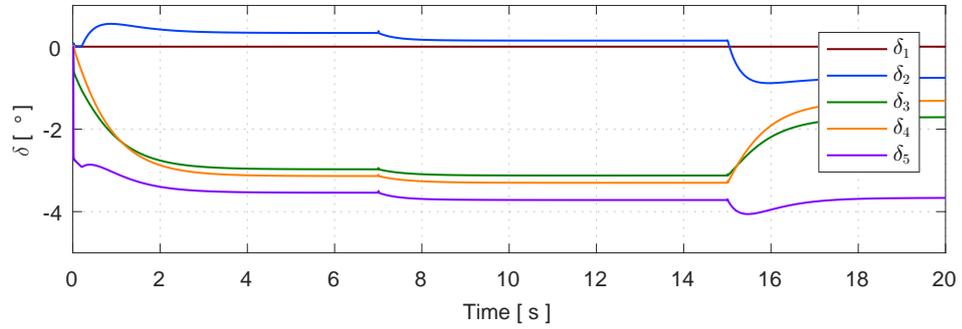


Figura 4.23: Ángulo de desfase de voltaje entre nodo y nodo

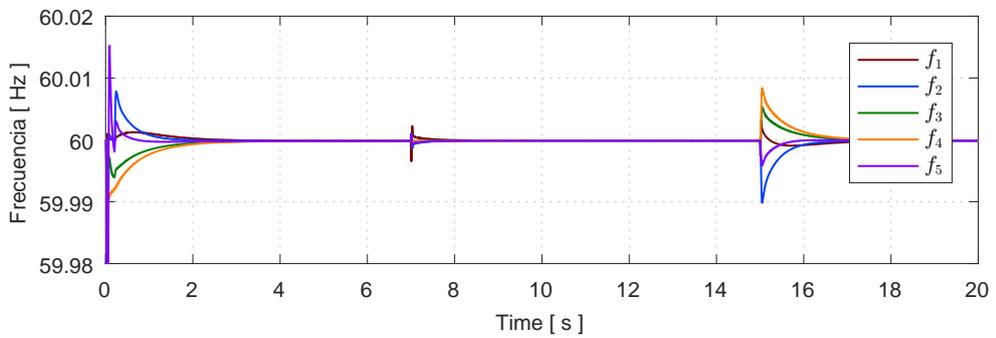


Figura 4.24: Frecuencia en los nodos del sistema

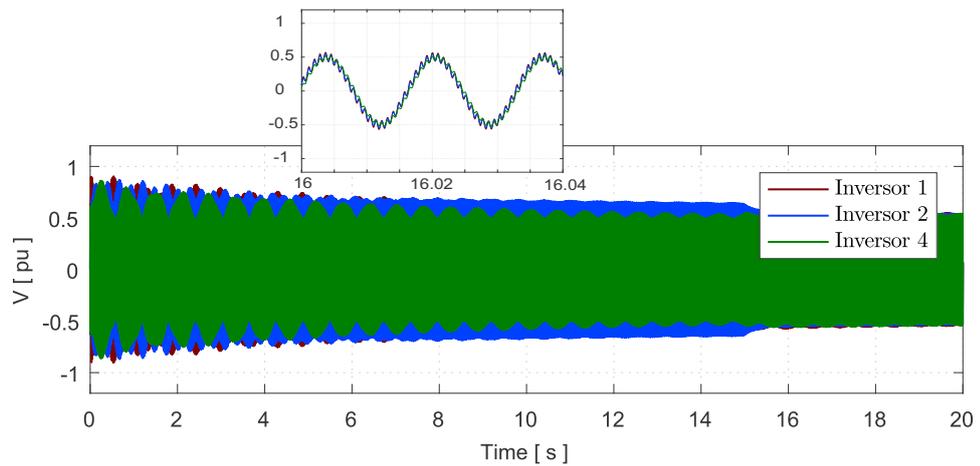


Figura 4.25: Señales de control en los inversores

#### 4.4. Cuarto Escenario

Con la finalidad de ganar robustez ante incertidumbres en las mediciones y tener un conocimiento completo del sistema sin la necesidad de tener todas las mediciones del mismo, al esquema de control dado en el escenario anterior se incorpora un estimador de estados estático dado en la Sección 3.3. En este escenario se asume que no es posible tomar todas las mediciones necesarias para llevar a cabo las leyes de control propuestas (potencias en los nodos de generación) y las mediciones con las que se cuentan tienen asociadas incertidumbres, por lo que a partir de las mediciones disponibles se reconstruyen los estados del sistema, posteriormente con los estados estimados es posible reconstruir todas las potencias presentes en la red permitiendo cerrar el lazo de control propuesto, dando lugar a un nuevo esquema de control el cual es mostrado en la Figura 4.26.

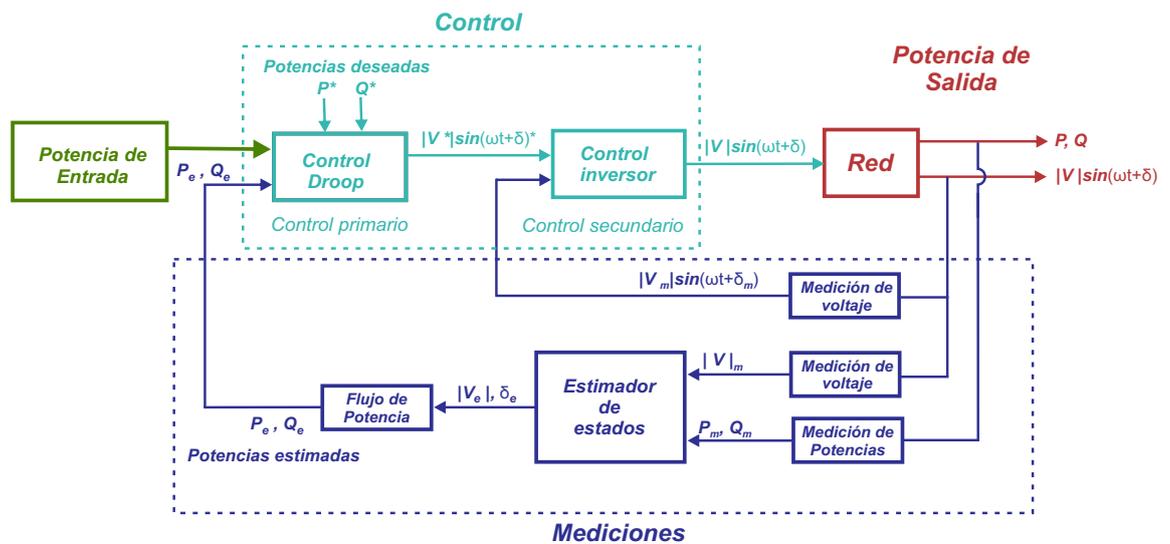


Figura 4.26: Esquema de control cuarto escenario

Con el estimador de estados se estimarán los valores de magnitud de voltaje y ángulo de desfase entre nodos, por lo que para la construcción del estimador de estados se tomaron como mediciones las potencias  $P$  y  $Q$  en los nodos de carga, dos

voltajes y dos potencias de línea quedando el siguiente vector de mediciones:

$$z = \begin{bmatrix} P_{12} \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \\ Q_{12} \\ Q_3 \\ Q_4 \\ Q_5 \\ |V_1| \\ |V_2| \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

donde  $P_{1,2}$  y  $Q_{1,2}$  son las potencias activas y reactivas que van del nodo 1 al nodo 2,  $P_k$  es la potencia activa en el nodo k,  $Q_k$  es la potencia reactiva en el nodo k, finalmente  $|V_1|$  y  $|V_2|$  son las magnitudes de voltaje en el nodo 1 y 2. De las mediciones tomadas para estimar los estados del sistema se asume que tienen asociada una incertidumbre como puede ser una mala calibración del instrumento, dicha incertidumbre es independiente en cada una de las mediciones. Para caracterizar la incertidumbre de cada medición se toma en cuenta la varianza asociada a cada medición la cual servirá para formar la matriz de pesos en el estimador de estados, las varianzas para cada tipo de medición se tomaron de (Gómez-Expósito et al. (2016)) y están dadas en la Tabla 4.6. El comportamiento del sistema para las potencias activas y reactivas de cada nodo

Tipo de medición	$\sigma^2$	$\frac{1}{\sigma^2}$
Potencia activa de línea $P_{ij}$	0.000064	15625
Potencia activa de nodo $P_k$	0.0001	10000
Potencia reactiva de línea $Q_{ij}$	0.000064	15625
Potencia reactiva de nodo $Q_k$	0.0001	10000
Magnitud de voltaje $ V $	0.0001	625000

Tabla 4.6: Ganancias para el control droop

están dadas en las Figuras 4.27 y 4.28, para poder visualizar el desempeño del control propuesto en las Figuras 4.29 y 4.30 se presentan las gráficas de los errores de las potencias activas y reactivas en cada nodo, para verificar que se llegan a las potencias deseadas sin pasar los límites de seguridad y calidad permitidos en las Figuras 4.31, 4.32 y 4.33 se muestran los valores de amplitud de voltaje estimada, ángulo de desfasamiento de voltaje estimado entre nodos y la frecuencia respectivamente, además se presenta el error de estimación tanto de voltaje y ángulo de desfasamiento en las Figura 4.34 y Figura 4.35, finalmente las señales de control en los inversores en la Figura 4.36.

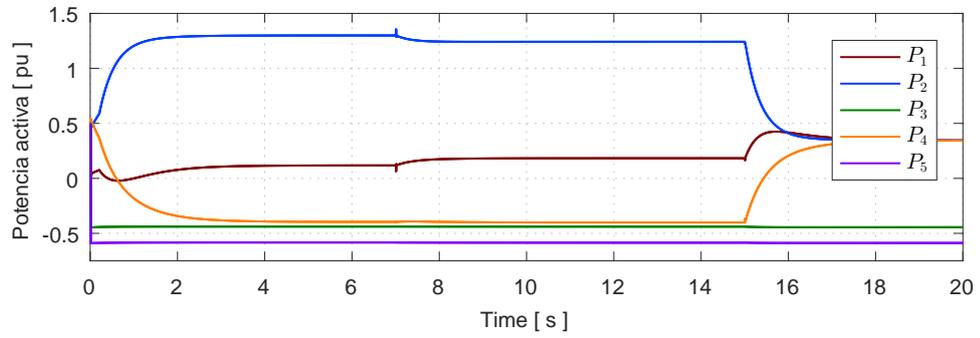


Figura 4.27: Potencias activas en el sistema

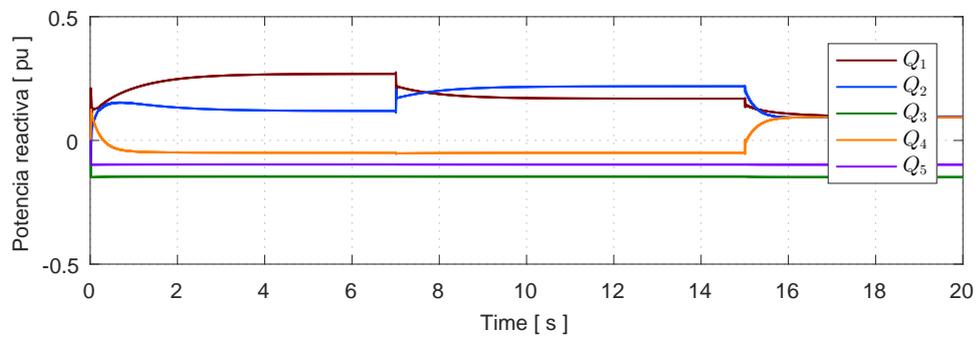


Figura 4.28: Potencias reactivas en el sistema

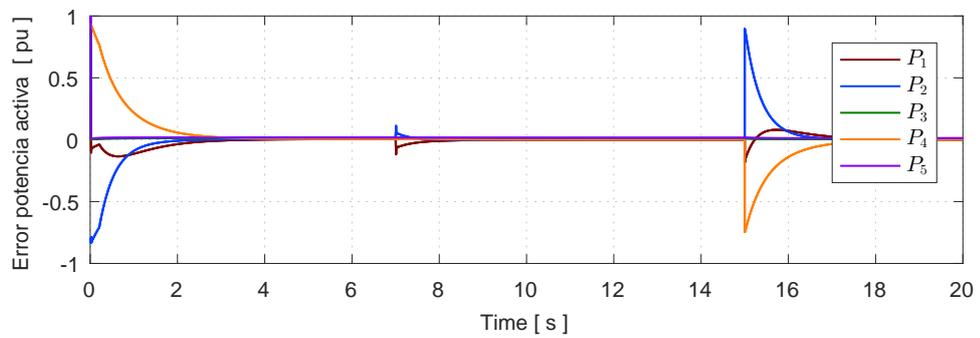


Figura 4.29: Error de potencias activas en el sistema

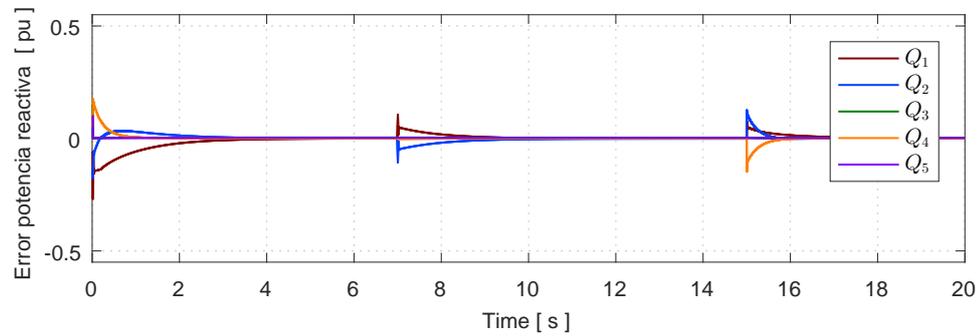


Figura 4.30: Error potencias reactivas en el sistemas

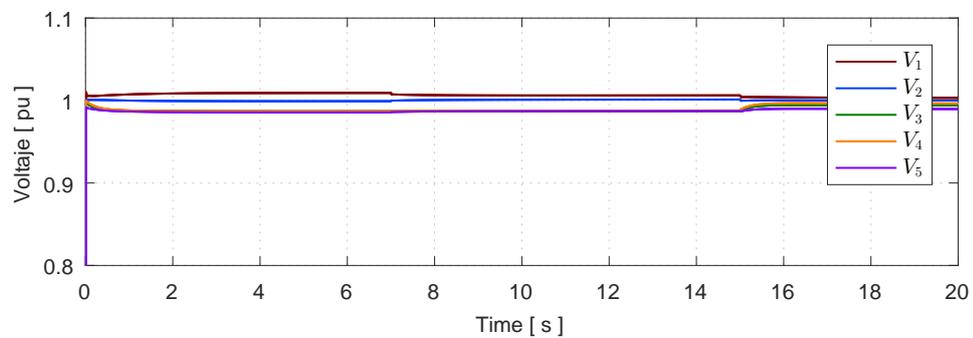


Figura 4.31: Voltaje en los nodos

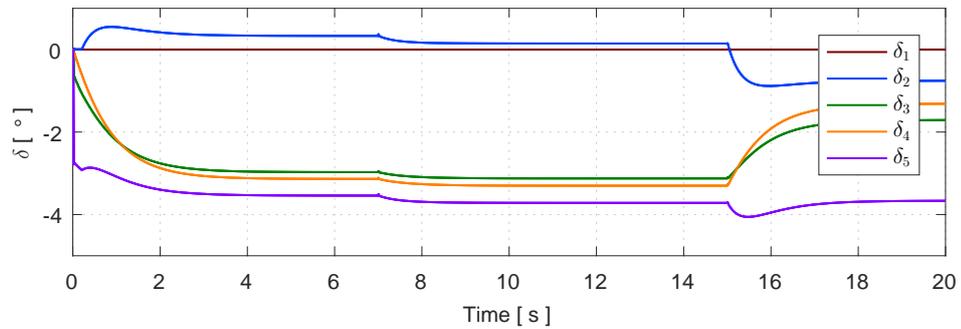


Figura 4.32: Ángulo de desfase de voltaje entre nodo y nodo

## 4.5. Resultados

En los escenarios mostrados se parte desde un escenario ideal a uno más complejo y con la finalidad de comparar el desempeño de cada uno de ellos se obtuvo el error cuadrático medio del error de seguimiento de las potencias activas y reactivas en cada uno de los nodos, en las Figuras 4.40 y 4.37 se muestran los errores cuadráticos me-

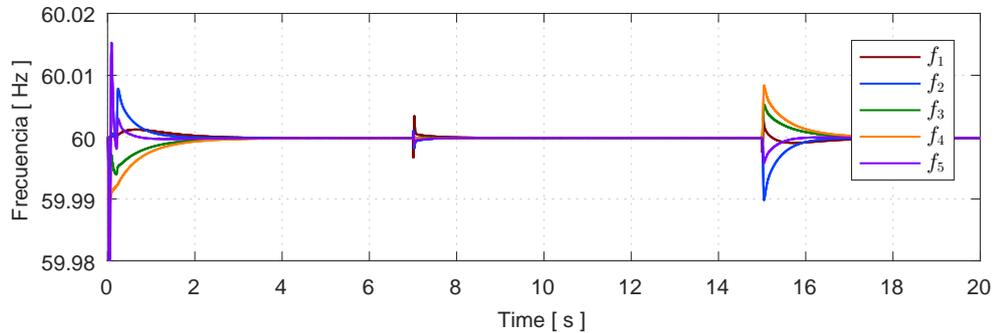


Figura 4.33: Frecuencia en los nodos del sistema

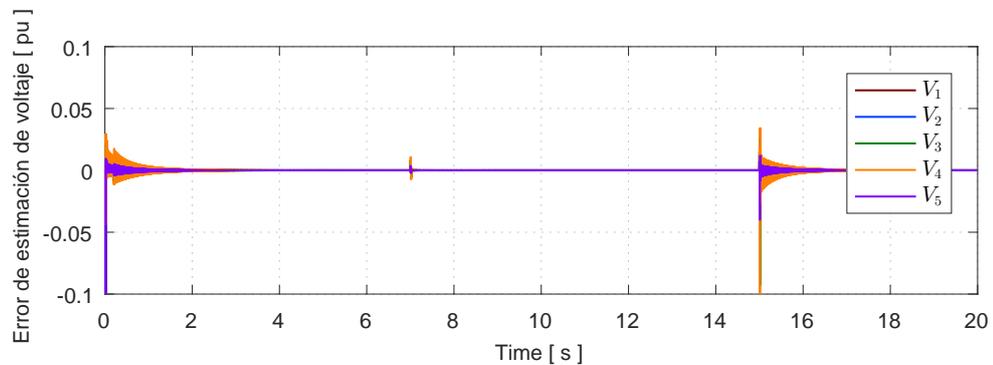


Figura 4.34: Error de estimación de magnitud de voltaje

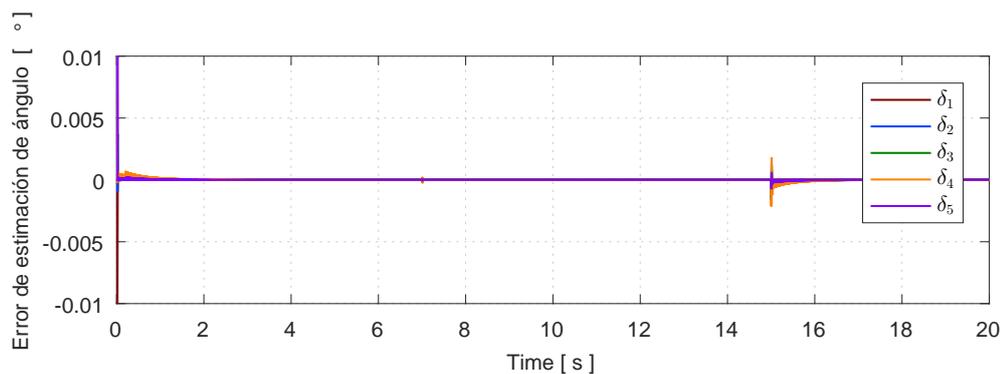


Figura 4.35: Error de estimación de magnitud de voltaje

dios obtenidos para cada nodo en cada uno de los casos evaluados, en la cual se puede apreciar que el control droop propuesto en este presente trabajo de tesis para un escenario ideal es capaz de hacer la repartición de cargas deseada con un error mínimo de seguimiento, imponiendo a cada inversor una potencia de generación o carga específica ya sea de potencia activa como reactiva, siendo esta última una diferencia

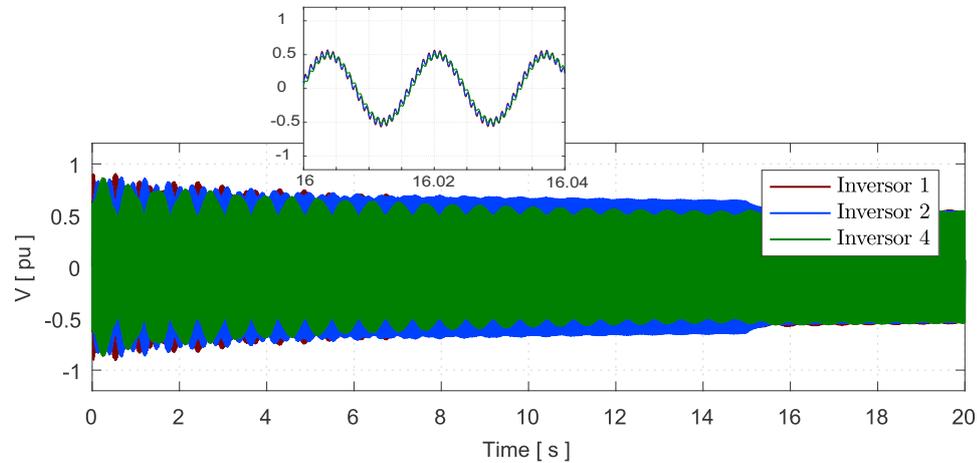


Figura 4.36: Señales de control en los inversores

importante con respecto al control droop convencional encontrado en la literatura y mostrado en la Sección 3.2, debido a que este no es capaz de llevar la potencia reactiva al valor deseado. En los escenarios presentados se somete a los inversores a cambios bruscos de carga con la finalidad de poner a prueba su desempeño, encontrando un comportamiento deseado, ya que se logra llevar a los inversores a los valores de potencia deseados respetando los valores de voltaje para obtener una seguridad y calidad energética deseada.

En el segundo escenario es claramente observable que los inversores, al no tener una ley de control que compense la dinámica asociada por los filtros de salida de cada inversor, no son capaces de entregar la potencia deseada para cada uno de ellos, aún cuando se tenga el voltaje deseado en la entrada del filtro asociado al inversor debido a la caída de voltaje que se tiene en cada uno de los filtros de salida asociados a cada inversor.

Debido al error tan grande obtenido en el escenario dos comparado con los demás escenarios se generaron dos nuevas gráficas, en las cuales se excluyen los errores correspondiente al escenario dos permitiendo tener una mejor comparación de los escenarios con leyes de control presentes y el escenario ideal (escenario 1), mostradas en las Figuras 4.39 y 4.40.

En el escenario tres se puede observar que el control asociado a cada uno de los inversores es capaz de generar el voltaje deseado en la salida del filtro del inversor, dando como resultado tener las potencias deseadas en cada uno de los nodos. Para el cuarto escenario se muestra que el esquema de control propuesto en la Figura 4.26 es capaz de hacer la repartición de carga deseada, esto es, llevar las potencias en los nodos de control a sus potencias deseadas y además es capaz de reconstruir correctamente los estados de la micro-red a partir de las mediciones disponibles. El error cuadrático medio asociado al error del seguimiento de potencias presenta valores muy

cercanos a los obtenidos para los casos ideales (primer y segundo escenario).

El buen desempeño logrado por el estimador de estados utilizado en el cuarto escenario es debido a que las variaciones de voltaje y frecuencia, que a su vez implican ángulos de desfase muy pequeños manteniendo así los valores de los estados a estimar muy cerca de las condiciones iniciales asociadas al algoritmo de estimación. Este comportamiento de mantenerse en valores cercanos a las condiciones iniciales se refuerza al tener la micro-red en modo conectado ya que mantiene el comportamiento de la micro-red en un estado cuasi estático.

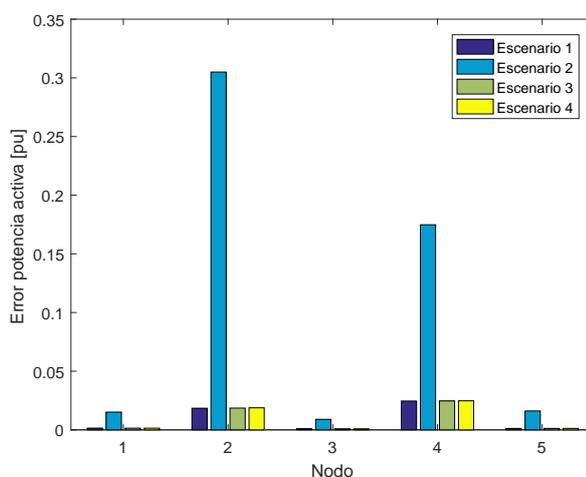


Figura 4.37: Error cuadrático medio de la potencia activa para cada nodo del sistema

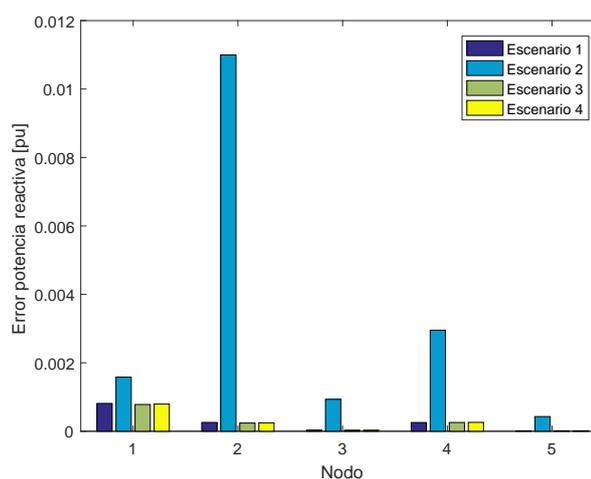


Figura 4.38: Error cuadrático medio de la potencia reactiva para cada nodo del sistema

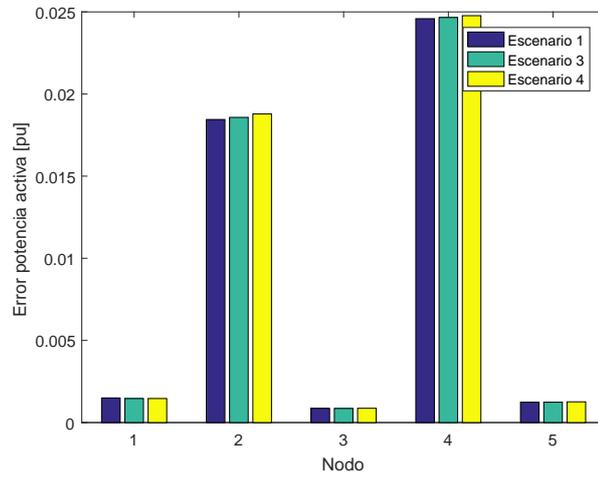


Figura 4.39: Error cuadrático medio de la potencia activa para cada nodo del sistema

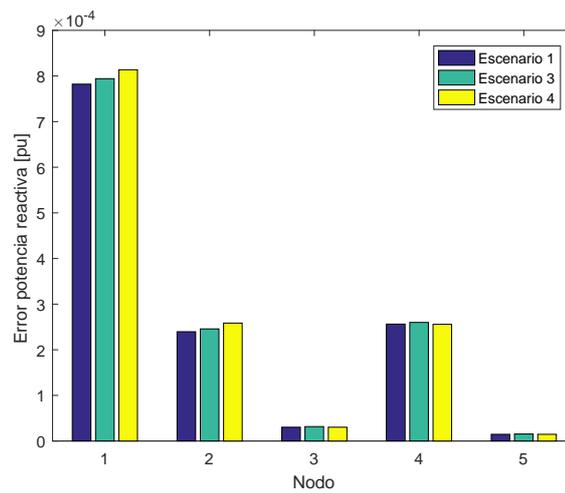


Figura 4.40: Error cuadrático medio de la potencia reactiva para cada nodo del sistema

## Conclusiones

---

En este trabajo de tesis se presentó una investigación de algunos tipos de control droop existentes, en la literatura con lo que se mostraron algunas deficiencias inherentes a la ley de control droop para inversores con impedancias de salida predominantemente inductivas por lo que se propuso y probó una nueva ley de control droop para inversores con impedancias de salida predominantemente inductivas.

El control droop propuesto mejora la eficiencia para entregar o absorber potencia reactiva en comparación con la ley de control droop presente en la literatura, lo que puede ser usado para compensar las potencias tanto activas como reactivas que se lleguen a presentar en la micro-red por los diferentes elementos conectados a ella, esto sin sobrepasar los niveles de calidad y seguridad permitidos.

En las simulaciones presentadas se muestra que el control droop propuesto es capaz de hacer que el error entre la potencia deseada y medida tienda a cero de forma asintótica, esto a pesar de los cambios que se hicieron en los valores de potencia deseada. Con lo que se muestra numéricamente la robustez del control droop ante el cambio en la repartición de carga.

Se hizo un trabajo de integración del control droop (control primario) como generador de voltajes deseados y el control para los inversores (control secundario) propuesto en (Avila-Becerril and Espinosa-Pérez (2016)) para llevar los voltajes a los valores deseados. Se evaluó mediante simulaciones la robustez del control primario y secundario trabajando en conjunto, logrando que el error en la repartición de carga tendiera a cero de manera asintótica, mostrando así sus propiedades de estabilidad.

Se sometió al esquema de control propuesto (control primario trabajando con el control secundario) a una evaluación de robustez con la presencia del estimador de estados funcionando como un observador y prescindiendo de algunas mediciones del sistema, mostrando un buen desempeño y logrando que el error en la repartición de carga tendiera a cero en tiempo infinito para todos los inversores evaluados y mediante las simulaciones presentadas se mostraron numéricamente las propiedades de estabilidad del esquema de control.

Se mostró que a pesar de que el estimador de estados utilizado no toma en cuenta la parte dinámica del sistema, este es capaz de entregar los estados correctos del

---

sistema en todo momento y a pesar de no contar con todas las mediciones debido al buen funcionamiento del control primario y secundario, ya que lleva los valores de magnitud de voltaje y ángulo de desfasamiento a estar muy cercanos a uno y cero respectivamente, generando que los valores a estimar se encuentren muy cerca de las condiciones iniciales en el estimador asegurando su convergencia. Aunado a eso se tiene que la dimensión del sistema a evaluar es pequeña por lo que el tiempo en el que se estiman los estados también es lo suficientemente pequeño como para poder hacer control con las mediciones estimadas.

Por lo anterior, cuando la micro-red este en modo aislado o este en modo conectado a la red, el esquema de control propuesto trabajando con el estimador de estados permite hacer la repartición de cargas deseada en todos los nodos de generación, así como tener disponibles todas las mediciones de la micro-red (siempre que la micro-red sea observable desde el punto de vista de la estimación).

# Apéndices

---

## A.1. Estructura de la Matriz de Mediciones Z

Basado en Grainger et al. (1996) y en Gómez-Expósito et al. (2016), el conjunto de mediciones tomadas para ser ingresadas en el algoritmo de estimación de estados, son agrupadas en la matriz  $z$  dependiendo al tipo de medición al que pertenece, quedando la estructura de la matriz  $z$  de la siguiente manera:

$$z = \begin{bmatrix} P_{ij_m} \\ P_m \\ Q_{ij_m} \\ Q_m \\ |V_m| \end{bmatrix} \quad (\text{A.1})$$

donde  $|V_m|$  es el conjunto de amplitudes de voltaje medidos,,  $P_m$  es el conjunto de inyecciones de potencia activa medidas,  $Q_m$  es el conjunto de inyecciones de potencia reactiva medidas,  $P_{ij_m}$  es el conjunto de los flujos de potencia activa (potencia que circula a través de las líneas de transmisión) medidos,  $Q_{ij_m}$  es el conjunto de los flujos de potencia reactiva (potencia que circula a través de las líneas de transmisión) medidos. En el mismo orden en el que se estructura la matriz  $z$ , es necesario ordenar la matriz de  $h(x)$  que relaciona matemáticamente el valor de los estados del sistema con las mediciones tomadas, la relación de los estados del sistema con las mediciones son presentadas en las ecuaciones (2.19), (2.20), (2.21), (2.22) del *Capítulo 2*, quedando la estructura de la matriz  $h(x)$  de la siguiente forma:

$$h(x) = \begin{bmatrix} h(x)_{|V_j|} \\ h(x)_{P_k} \\ h(x)_{P_{jk}} \\ h(x)_{Q_k} \\ h(x)_{Q_{jk}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |V_j| \\ V_j \sum_{k=1}^n (GV_k \cos(\theta_{jk}) + BV_k \sin(\theta_{jk})) \\ V_j^2 G + V_j V_k (G \cos \theta_{jk} + B \sin \theta_{jk}) \\ V_j \sum_{k=1}^n (GV_k \sin(\theta_{jk}) - BV_k \cos(\theta_{jk})) \\ -V_j^2 B + V_j V_k (G \sin \theta_{jk} - B \cos \theta_{jk}) \end{bmatrix} \quad (A.2)$$

Ya que se tiene la matriz  $h(x)$  para el calculo del valor de mediciones estimadas, es necesario calcular la matriz  $H(x)$  usada por el algoritmo de estimación de estados, para poder obtener el valor de  $H(x)$  se calcula el Jacobiano de la matriz  $h(x)$  quedando un matriz con la siguiente estructura:

$$H(x) = \begin{bmatrix} \partial h(x)_{|V_j|} & \dots & \partial \theta_n & \partial V_1 & \dots & \partial V_n \\ \partial h(x)_{P_k} & & & & & \\ \partial h(x)_{P_{jk}} & & & & & \\ \partial h(x)_{Q_k} & & & & & \\ \partial h(x)_{Q_{jk}} & & & & & \end{bmatrix}$$

n-1 columnas
n columnas

donde  $n$  es el numero de nodos del sistema, cabe mencionar que no se hace uso del ángulo de desfaseamiento 1 debido a que se toma como angulo de referencia (slack), el cual es conocido.

## A.2. Sistema por Unidad

De acuerdo con lo presentado enof Electrical and Engineers (1990), Grainger et al. (1996) los sistemas eléctricos de potencia cuentan con unidades de medición muy grandes (en los rangos de Kilos o Megas) en sus variables, por lo que para su estudio se acostumbra a usar cantidades por unidad o cantidades en por ciento, el cambio de magnitudes por unidad consiste en normalizar todas las magnitudes de las variables,

tomando como referencia un valor base para cada variable o medición del sistema. Una de las ventajas de utilizar el método de calculo por unidad sobre el calculo en por ciento es que el producto de dos magnitudes se puede expresar directamente en por unidad, a diferencia de el producto de dos magnitudes expresadas en por ciento, las cuales tienen que ser divididas entre 100 para poder obtener el resultado en por ciento.

Las variables del sistema eléctrico de potencia (corriente, voltajes, potencias aparente y reactancias) están relacionadas entre si, por lo que la elección de dos variables cualesquiera, determinan los valores base de las otras, por ejemplo, la impedancia base es aquella en la que al circular la corriente base se produce la caída de tensión base. La potencia aparente base expresada en kVA, en un sistema monofásico, es el producto de la tensión base por la caída de tensión base. En los sistemas trifásicos, el valor de kVA elegido como base, es tres veces el valor kVA base por fase

Es habitual tener como magnitudes bases los kVA y la tensión en kV nominales del sistema. Las expresiones matemáticas que relacionan las diferentes magnitudes bases son las siguientes:

■ *Sistema trifásico*

$$I_{base} = \frac{kVA_{base}}{\sqrt{3}kV_{base}}$$

$$Z_{base} = \frac{kV_{base}^2}{kVA_{base}} * 1000$$

$$kVA_{base} = \sqrt{3}kV_{base}I_{base}$$

■ *Sistema monofásico*

$$I_{base} = \frac{kVA_{base}}{kV_{base}}$$

$$Z_{base} = \frac{kV_{base}^2}{kVA_{base}} * 1000$$

$$kVA_{base} = kV_{base}I_{base}$$

una vez determinado el valor base se pueden convertir los valores de las variables del sistema original a valores por unidad del sistema mediante la siguiente expresión:

$$Valor\ por\ unidad\ deseado = \frac{valor\ real}{valor\ base}$$

Ya que un inversor es operado con una señal PWM, la cual contiene armónicos al rededor de los multiplos de la frecuencia de conmutación, es necesario conectar filtros paso-bajas a la salida del inversor para que los armónicos de la señal sean filtrados y la señal deseada sea recuperada

### A.3. Filtros LC

Ya que un inversor es operado con una señal PWM, la cual contiene armónicos al rededor de los multiplos de la frecuencia de conmutación, es necesario conectar filtros paso-bajas a la salida del inversor para que los armónicos de la señal sean filtrados y la señal deseada sea recuperada.

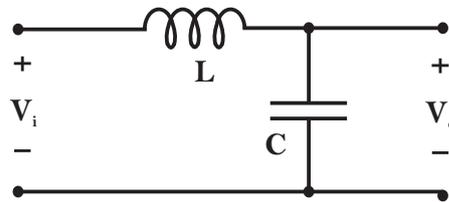


Figura A.1: Filtro LC

De acuerdo con (Zhong and Hornik (2012)) el modelo del circuito para un filtro pasivo LC es mostrado en la figura(A.1), donde la resistencia en serie del inductor y del capacitor (ESR) no son tomadas en cuenta para el proceso de diseño debido a su pequeño valor asociado. En la practica las ESR son capaces de amortiguar las oscilaciones de alta frecuencia beneficiando al comportamiento del sistema. Idealmente, para valores pequeños de inductancia y capacitancia el costo y desempeño del sistema sera mejor, sin dejar de lado que la capacitancia e inductancia deben ser lo suficientemente grandes para filtrar los efectos de conmutación. La frecuencia de corte para un filtro LC pasivo esta dada por

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (\text{A.3})$$

la cual es el factor mas importante a considerar para filtrar los armónicos propios de la conmutación, teniendo en cuenta que la frecuencia  $f_c$  debe ser mucho menor que la frecuencia de conmutación pero con el ancho de banda suficiente para el buen funcionamiento del controlador. Por lo cual se recomienda que la frecuencia de corte se encuentre entre  $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{2}$  de la frecuencia  $f_{sw}$

$$\frac{f_{sw}}{3} \leq f_c \leq \frac{f_{sw}}{2} \quad (\text{A.4})$$

cabe mencionar que este filtro tiene asociada una resonancia cercana a la frecuencia de corte; por lo tanto la frecuencia de corte no debe de elegirse dentro de los valores que

toman los armónicos principales de corriente de la carga ya que esto puede provocar alta distorsión armónica (THD). La función de costo para el filtro puede estar dada por

$$COST = \frac{2Q_L + Q_c}{\sum_{h=1,odd}^n |V_{oh} I_h|} \quad (A.5)$$

con

$$Q_L = \sum_{h=1,odd}^n |i_h|^2 X_{Lh}, Q_c = \sum_{h=1,odd}^n \frac{|V_{Ch}|^2}{X_{Ch}} \quad (A.6)$$

El peso de la potencia reactiva para el inductor se toma como el doble que el del condensador. Intuitivamente, el tamaño de la capacitancia  $C$  tiene que ser pequeña para aplicaciones en alto-voltaje y la inductancia  $L$  debería ser pequeña para aplicaciones de alta corriente (siempre y cuando se mantenga la relación para la frecuencia de corte). Además la inductancia  $L$  debería ser pequeña para aplicaciones con una cantidad significativa de armónicos de corriente y la capacitancia  $C$  debería ser pequeña para aplicaciones con una gran cantidad de armónicos de tensión, por ejemplo cuando la frecuencia de conmutación es baja.

Cuando las resistencias ESRs  $R_L$  y  $R_C$  son significativas la resonancia del filtro LC al rededor de la frecuencia de corte es amortiguada. Por lo tanto el incremento de  $R_C$  y/o  $R_L$  resulta en pérdidas excesivas de potencia, lo cual dificulta el diseño de del filtro, en general para aplicaciones de alta potencia. Una opción para contrarrestar las pérdidas asociadas a  $R_L$  y  $R_C$  es adoptar estrategias de control para agregar una resistencia virtual al circuito.

# Bibliografía

---

- Abur, A. and Expósito, A. G. (1997). Detecting multiple solutions in state estimation in the presence of current magnitude measurements. *IEEE transactions on power systems*, 12(1):370–375. 5
- Abur, A. and Expósito, A. G. (2004). *Power system state estimation: theory and implementation*. CRC press. 4
- Alsac, O., Vempati, N., Stott, B., and Monticelli, A. (1997). Generalized state estimation [power systems]. In *Power Industry Computer Applications., 1997. 20th International Conference on*, pages 90–96. IEEE. 5
- Avila-Becerril and Espinosa-Pérez (2016). A hamiltonian approach for stabilization of microgrids including power converters dynamic. *Latin American Conference in Automatic Control, Medellín, Colombia*. 25, 67
- Avila-Becerril, Silva-Martínez, and Espinosa-Pérez (2017). On the robustness of a passivity-based controller for microgrids. *20th World Congress of the International Federation of Automatic Control, Toulouse, France*. 2, 6, 7
- Becerril, S. M. A. (2016). *Caracterización y control de microrredes de potencia vía propiedades estructurales*. PhD thesis, Universidad Nacional Autónoma de México. 25
- Celik, M. K. and Abur, A. (1992). A robust wlav state estimator using transformations. *IEEE Transactions on Power Systems*, 7(1):106–113. 5
- Clements, K. A. (1990). Observability methods and optimal meter placement. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 12(2):88–93. 4
- Clements, K. A., Davis, P. W., and Frey, K. D. (1995). Treatment of inequality constraints in power system state estimation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 10(2):567–574. 5
- De La Villa Jaen, A. and Gomez-Expósito, A. (2002). Implicitly constrained substation model for state estimation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 17(3):850–856. 5

- Expósito, A. G. and Abur, A. (1998). Generalized observability analysis and measurement classification. *IEEE transactions on power systems*, 13(3):1090–1095. 5
- Fang, Xi y Misra, S. et al. (2012). Smart grid—the new and improved power grid: A survey. *IEEE communications surveys & tutorials*, 14(4):944–980. 2, 8
- Gómez-Expósito, A., Conejo, A. J., and Cañizares, C. (2016). *Electric energy systems: analysis and operation*. CRC Press. 41, 60, 69
- Gomez-Expósito, A., Abur, A., de la Villa Jaen, A., and Gomez-Quiles, C. (2011). A multilevel state estimation paradigm for smart grids. *Proceedings of the IEEE*, 99(6):952–976. 3, 5
- Grainger, J. J. S., Lea, S. M. B., ROBERT, J., Halliday, D., Halliday, R., Resnick, R., Terman, F. E., Mayo, J., Kip, A. F., Jose, L., et al. (1996). *Análisis de sistemas de potencia*. Pirelli. 2, 13, 14, 16, 69, 70
- Krumpholz, G., Clements, K., and Davis, P. (1980). Power system observability: a practical algorithm using network topology. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, (4):1534–1542. 4
- Magnago, F. H. and Abur, A. (1999). A unified approach to robust meter placement against loss of measurements and branch outages. In *Power Industry Computer Applications, 1999. PICA'99. Proceedings of the 21st 1999 IEEE International Conference*, pages 3–8. IEEE. 4
- Mariam, Lubna, B. et al. (2013). A review of existing microgrid architectures. *Journal of Engineering*, 2013. 9
- Mili, L., Cheniae, M., Vichare, N., and Rousseeuw, P. J. (1996). Robust state estimation based on projection statistics [of power systems]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 11(2):1118–1127. 5
- Monticelli, A. (1993). Modeling circuit breakers in weighted least squares state estimation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 8(3):1143–1149. 5
- Monticelli, A. (1999a). Fast decoupled state estimator. In *State Estimation in Electric Power Systems*, pages 313–342. Springer. 4
- Monticelli, A. (1999b). *State estimation in electric power systems: a generalized approach*, volume 507. Springer Science & Business Media. 4, 5
- Monticelli, A. and Garcia, A. (1983). Reliable bad data processing for real-time state estimation. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, (5):1126–1139. 4
- Muñoz, J. R. and Expósito, A. G. (1992). A line-current measurement based state estimator. *IEEE Transactions on Power Systems*, 7(2):513–519. 5

- 
- of Electrical, I. and Engineers, E. (1990). *IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis*. IEEE. 70
- Periñán, P. J. Z. and Expósito, A. G. (1999). *Estimación de estado y de parámetros en redes eléctricas*. Number 11. Universidad de Sevilla. 3, 21, 23
- Schiffer, J., Ortega, R., Astolfi, A., Raisch, J., and Sezi, T. (2014). Conditions for stability of droop-controlled inverter-based microgrids. *Automatica*, 50(10):2457–2469. 33, 35
- Schweppe, F. C. and Handschin, E. J. (1974). Static state estimation in electric power systems. *Proceedings of the IEEE*, 62(7):972–982. 4
- Schweppe, F. C. and Rom, D. B. (1970). Power system static-state estimation, part ii: Approximate model. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, (1):125–130. 3
- Schweppe, F. C. and Wildes, J. (1970). Power system static-state estimation, part i: Exact model. *IEEE Transactions on Power Apparatus and systems*, (1):120–125. 3
- Silva-Martínez, Avila-Becerril, and Espinosa-Pérez (2016). Evaluación de controladores para microredes de potencia. *Congreso Nacional de la Asociación de México de Control Automático, AMCA 2016*. 2, 7
- Singh, H., Alvarado, F. L., and Liu, W.-H. (1997). Constrained luv state estimation using penalty functions. *IEEE Transactions on Power Systems*, 12(1):383–388. 5
- Slutsker, I. W., Mokhtari, S., and Clements, K. A. (1996). Real time recursive parameter estimation in energy management systems. *IEEE Transactions on power systems*, 11(3):1393–1399. 5
- Stagg, E.-A. et al. (1968). *Computer Methods in Power System Analysis*. McGraw-Hill. 45
- Stott, B. and Alsac, O. (1974). Fast decoupled load flow. *IEEE transactions on power apparatus and systems*, (3):859–869. 4
- Tinney, W. F. and Walker, J. W. (1967). Direct solutions of sparse network equations by optimally ordered triangular factorization. *Proceedings of the IEEE*, 55(11):1801–1809. 4
- Van Cutsem, T., Horward, J.-L., and Ribbens-Pavella, M. (1981). A two-level static state estimator for electric power systems. *IEEE transactions on power apparatus and systems*, (8):3722–3732. 5
- Van Cutsem, T., Ribbens-Pavella, M., and Mili, L. (1984). Hypothesis testing identification: A new method for bad data analysis in power system state estimation. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, (11):3239–3252. 4

- Vempati, N., Slutsker, I. W., Tinney, W. F., GJELSVIK, A., and AAM, S. (1991). Enhancements to givens rotations for power system state estimation. discussion. authors' reply. *IEEE transactions on power systems*, 6(2):842–849. 4
- Wu, F. F. (1990). Power system state estimation: a survey. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 12(2):80–87. 4
- Wu, F. F. and Monticelli, A. (1985). Network observability: theory. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, (5):1042–1048. 4
- Zhong, Q.-C. and Hornik, T. (2012). *Control of power inverters in renewable energy and smart grid integration*, volume 97. John Wiley & Sons. 8, 33, 72