



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

TRABAJO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO EN MECATRÓNICA

TEMA:

“PLATAFORMA DE SIMULACIÓN DE MICRORREDES AISLADAS EN BASE
A CONVERTIDORES DE FORMACIÓN DE RED Y DE ALIMENTACIÓN DE
RED ”

AUTOR: BRYAN ISRAEL GARCÉS ULLOA

DIRECTOR: CARLOS XAVIER ROSERO

IBARRA-ECUADOR
DICIEMBRE 2022



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DEL AUTOR			
CÉDULA DE IDENTIDAD	1804856357		
APELLIDOS Y NOMBRES	Garcés Ulloa Bryan Israel		
DIRECCIÓN	Avenida Manuela Saenz y Quiz Quiz (Ambato)		
EMAIL	bigarcesu@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO	032852715	TELÉFONO MÓVIL	0982657998
DATOS DE LA OBRA			
TÍTULO	"Plataforma de simulación de microrredes aisladas en base a convertidores de formación de red y de alimentación de red"		
AUTOR	Bryan Israel Garcés Ulloa		
FECHA	01 de Diciembre 2022		
PROGRAMA	Pregrado		
TÍTULO POR EL QUE OPTA	Ingeniero en Mecatrónica		
DIRECTOR	Carlos Xavier Rosero C.		

CONSTANCIA

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es original, y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, 01 de diciembre de 2022



Bryan Israel Garcés Ulloa

C.I.: 1804856357



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CERTIFICACIÓN

En calidad de director del trabajo de grado "Plataforma de simulación de microrredes aisladas en base a convertidores de formación de red y de alimentación de red", presentado por el egresado Bryan Israel Garcés Ulloa, para optar por el título de Ingeniero en Mecatrónica, certifico que el mencionado proyecto fue realizado bajo mi dirección.

Ibarra, diciembre de 2022

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Carlos Xavier Rosero".

Carlos Xavier Rosero
DIRECTOR DE TESIS

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mis padres, a mis hermanos y a mis abuelos, quienes con su confianza y esfuerzo me han permitido llegar muy lejos para que siga caminando en la vida. De igual a mi familia que ya no esta más en este mundo para que sepan que a pesar de la tristeza que ha pasado, sé que me está mirando desde el cielo como estoy cumpliendo uno más de mis sueños y que a pesar de que no estén aquí físicamente, ellos siempre estarán en nuestros corazones.

Bryan Garcés U.

Agradecimiento

Agradezco a la Universidad Técnica del Norte, por ser la institución que me permitió acceder a sus aulas para poder conseguir una de mis metas en mi vida académica y profesional.

A los docentes y personal administrativo de la universidad por haberme dado sus conocimientos en toda mi vida universitaria, al igual elogios y regaños cuando eran necesarios, porque por ellos he llegado tan lejos.

A mi director Carlos Xavier Rosero por sus enseñanzas, su conocimiento, su tiempo y su apoyo; confió en mí a pesar de todo y me brindó su ayuda en conocimiento en el desarrollo de este trabajo.

A mis padres, hermanos y amigos por ser la fuente de apoyo y confianza en mí que necesitaba en los momentos más duros de mi vida universitaria, por ellos estoy aquí.

A las personas que conforman la Carrera de Ingeniería en Mecánica, por ser un grupo de educadores capaces y pacientes, quienes han compartido conocimiento primordial para el desarrollo de mi vida profesional y me ayudaron a llegar a la culminación de esta etapa en mi vida.

Bryan Garcés U.

Resumen

Las microrredes son sistemas usados en la distribución y generación de electricidad, estas pueden estar conectadas a una red principal o trabajar de manera aislada (modo isla). En el modo aislado, la red principal no tiene ningún efecto en la dinámica que existe en la microrred, esto se puede lograr con el uso de distintos convertidores de potencia unidos al sistema. La estructura de una microrred aislada se basa en un nivel de control primario (droop) o de caída el cual permite estabilizar la amplitud de voltaje, la frecuencia y las potencias del proceso. Este trabajo abarca el modelado de la dinámica de diferentes microrredes mediante el uso de distintos convertidores de potencia, principalmente, el convertidor formador de red y el convertidor alimentador de red; para que la conexión de estos potencien sus elementos básicos y puedan trabajar como microrredes aisladas. Por medio de software matemático Matlab, junto a las componentes de Simulink y TrueTime se simula la microrred en donde se analiza el comportamiento de los convertidores conectados a la red eléctrica y de comunicación, y su funcionamiento en el transcurso del tiempo. Resultado de estas simulaciones se obtiene diferentes configuraciones que funcionan correctamente brindando una energía aceptable a la microrred, sin errores considerables y que dependiendo la programación, pueden funcionar de manera aislada cada parte en la que está dividida la microrred, mejorando así la eficiencia de la red eléctrica para una futura construcción.

Abstract

Microgrids are systems used in the distribution and generation of electricity, they can be connected to a main network or work in isolation (island mode). In island mode, the main network has no effect on the dynamics that exist in the microgrid, this can be achieved with the use of different power converters attached to the system. The structure of an isolated microgrid is based on a primary control level "droop", which allows stabilizing the voltage amplitude, frequency and power of the process. This work covers the modeling of the dynamics of different microgrids through the use of different power converters, mainly the grid-forming converter and the grid-feeding converter; so that the connection of these enhance their basic elements and can work as isolated microgrids. By means of mathematical software Matlab, together with the Simulink and TrueTime components, the microgrid is simulated where the behavior of the converters connected to the electrical and communication network, and their operation over time, are analyzed. As a result of these simulations, different configurations are obtained that work correctly, providing acceptable energy to the microgrid, without considerable errors and, depending on the programming, each part in which the microgrid is divided can work in isolation, thus improving the efficiency of the network power grid for future construction.

Índice General

AUTORIZACIÓN	II
CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR	IV
DECLARACIÓN	V
CERTIFICACIÓN	VI
DEDICATORIA	VII
AGRADECIMIENTO	VIII
RESUMEN	IX
ABSTRACT	X
Índice General	XI
Índice de figuras	XIII
Introducción	1
1. Revisión literaria	5
1.1. Estructura básica de una microrred	7
1.2. Tipos de microrredes	8

1.2.1. Microrredes de corriente alterna (AC)	9
1.2.2. Microrredes de corriente continua (DC)	9
1.2.3. Microrredes híbridas	9
1.2.4. Microrred en cascada	10
1.2.5. Microrred en paralelo	10
1.3. Modos de operación de microrredes AC	11
1.3.1. Convertidor de formación de red	11
1.3.2. Convertidor de alimentación de red	12
1.3.3. Convertidor de soporte de red	12
1.4. Ejemplos de microrredes	13
2. Metodología	18
2.1. Modos de operación de Microrredes	18
2.1.1. Convertidor formador de red	18
2.1.2. Convertidor alimentador de red	19
2.2. Arquitectura y control del convertidor formador de red	20
2.2.1. Enfoque multi-maestro	22
2.3. Arquitectura y control del convertidor alimentador de red	25
2.4. Plataforma de simulación	29
2.4.1. Convertidores virtuales	30
2.4.2. Interruptores activos	32
2.4.3. Transformadores virtuales	33
3. Resultados	34
3.1. Funcionamiento de dos convertidores formadores de red y un alimentador de red en una MG aislada	35
3.2. Funcionamiento de una MG con dos convertidores formadores de red y dos convertidores alimentadores de red	38

3.3. Funcionamiento de una MG aislada con cuatro convertidores formadores de red.	42
3.4. Análisis de Resultados	44
4. Conclusiones y Trabajo a futuro	46
4.1. Conclusiones	46
4.2. Trabajo a futuro	47
Bibliografía	48
Anexos	51

Índice de figuras

1.1. Convertidores de potencia interactivos implementados en [13]	15
1.2. Configuración de laboratorio formada en [2]	16
1.3. Modelo estático de larga señal explicado en [24]	17
2.1. Representación simplificada de los convertidores de potencia en MGs	20
2.2. Fuente de generación distribuida en un convertidor formador de red	21
2.3. Generador de referencias con control de caída en el convertidor formador de red	23
2.4. Fuente de generación distribuida en un convertidor alimentador de red	26
2.5. Generador de referencias para el convertidor alimentador de red	26
2.6. Trabajo de la plataforma de simulación [27]	29
2.7. Convertidor formador de red virtual	31
2.8. Convertidor alimentador de red virtual	32
2.9. Interruptor normalmente abierto	33
2.10. Interruptor normalmente cerrado	33
2.11. Transformadores virtuales	33

3.1. Estructura de una MG con tres convertidores	35
3.2. Voltaje de cada convertidor	36
3.3. Frecuencia de red de cada convertidor	36
3.4. Potencia activa en la MG	37
3.5. Potencia reactiva en la MG	38
3.6. MG con dos convertidores formadores de red y dos alimentadores de red	38
3.7. Voltaje de la MG	39
3.8. Frecuencia de la MG	40
3.9. Compartición de potencia activa en la MG	41
3.10. Potencia reactiva de la MG	41
3.11. MG aislada con cuatro convertidores formadores de red	42
3.12. Voltaje de la MG aislada	43
3.13. Frecuencia de la MG aislada	43
3.14. Señales de potencia activa en la MG.	44
3.15. Potencia reactiva en la MG.	44
4.1. Librería TrueTime	72

Introducción

Planteamiento del problema

Las microrredes (MG, MicroGrids) son pequeños sistemas de energía que integran fuentes, dispositivos de almacenamiento y cargas, interconectados con la red eléctrica a través de convertidores electrónicos de potencia [1]. Los pares que constan de fuentes de energía y convertidores pueden denominarse fuentes de generación distribuida (DGS, Distributed Generation Sources).

Una MG puede funcionar conectada o desconectada de la red principal. En el modo conectado, la energía fluye desde/hacia la red principal dependiendo de si hay consumo/generación de energía dentro de la MG. De lo contrario, en modo aislado, la MG se desconecta de la red principal y, por lo tanto, no hay intercambio de energía externa y la generación de energía interna se hace bajo demanda. El modo de operación aislado es el escenario más desafiante porque la dinámica de la MG no está dominada por la red principal. Entonces, uno o más convertidores de potencia son responsables de mantener la tensión de la red independientemente del consumo de carga. Se han propuesto diversas estrategias de control que abordan este desafío, a menudo organizadas de acuerdo con una arquitectura de control estandarizada de tres niveles [2]. En este contexto, aparecen dos tipos de convertidores: de formación de red y de alimentación de red. Los convertidores de formación de red se encargan principalmente de asegurar la calidad del voltaje de la MG (amplitud y frecuencia). Los convertidores de alimentación de red entregan

temporalmente energía a la MG, ya que administran fuentes intermitentes tales como paneles solares y turbinas eólicas.

No se puede hablar de control de una MG sin hablar también de su implementación. Hay muchas variaciones para adoptar la arquitectura y el diseño de la MG, algunas configuraciones típicas se han informado en [3]. Además, no existen sistemas de prueba de referencia particularmente aceptados, sin embargo, las MG para investigación se pueden implementar en bancos de prueba o simulaciones que en ambos casos requieren escenarios y estructuras flexibles.

En la medida del conocimiento del autor, se carece de plataformas flexibles de simulación de MG, disponibles libremente para uso en la academia. Además, existe una demanda creciente de herramientas de simulación/experimentación en la Universidad ya que el campo de las MG aisladas está siendo visitado a través de varios proyectos de ingeniería. Es así que se propone crear una plataforma de simulación que contenga dispositivos eléctricos/electrónicos de potencia, además de núcleos de procesamiento en tiempo real que ejecuten tareas de control y se puedan conectar dentro de una red de comunicaciones. La flexibilidad de la plataforma propuesta se verá reflejada en la posibilidad de creación de MG virtuales que integren diferentes topologías de conexión en base a convertidores (de alimentación y de formación de red), líneas de transmisión, líneas de comunicación y cargas.

Antecedentes

En [3]-[4] se evidencian diferentes configuraciones experimentales para el control jerárquico de MG. Dos características comunes en todos ellos son tener suficientes nodos para emular una red de generación distribuida e implementar las tareas de control en potentes controladores digitales [5]. En la literatura se pueden encontrar diversos métodos para simular MG, que van desde enfoques más centrados en la parte de la electrónica de potencia, hasta enfoques que abarcan tanto la electrónica de potencia como los sistemas informáticos, por ejemplo, véanse los resultados recientes en [6] - [7] y las referencias allí.

En relación al estudio de convertidores, en [8] se identifican tres tipos de convertidores en relación a su comportamiento y estructura: de formación de red, de alimentación de red y de soporte de red. Además, se argumenta que estos convertidores no han sido todavía difundidos en la industria.

Objetivos

Objetivo General

Desarrollar una plataforma flexible de simulación de microrredes aisladas que contenga convertidores de potencia, tanto de formación de red como de alimentación de red.

Objetivos Específicos

- Establecer la estrategia de simulación adecuada en base al estudio de la dinámica de los convertidores de potencia.
- Programar los elementos básicos de simulación usando software matemático.
- Implementar diferentes configuraciones de microrredes aisladas en la plataforma de simulación que potencien la interconexión de sus elementos básicos.

Justificación

El continuo avance tecnológico ha hecho que las energías no renovables se desgasten hasta casi acabarse, por lo que cada vez se observa más la producción de energía renovable en distintos países. Esta energía, actualmente no se la puede obtener en todo momento del día por lo que se tiene la necesidad de ser controlada y almacenada. Las energías renovables son generalmente controladas a través de convertidores que están conectados a la red y que proveen la energía necesaria dependiendo las necesidades del usuario.

Reparten energía a distintos puntos y pueden ser controlados a partir de su manipulación en la red. El presente trabajo se enfoca en crear una plataforma de simulación en donde los elementos protagonistas son los convertidores de potencia. La relevancia de esta propuesta consiste en que partirá del estudio de la arquitectura y de la dinámica de los convertidores, para crear una herramienta útil en los desarrollos de ingeniería.

En referencia a la formación académica, se aplicarán los conocimientos y las habilidades obtenidos al cursar la carrera de ingeniería.

Alcance

En este trabajo se propone un enfoque de co-simulación de MG aisladas basado en dos funcionalidades específicas: electricidad/electrónica y control en tiempo real. Se crearán tres elementos básicos: convertidores de potencia de formación y de alimentación de red, líneas de transmisión y cargas.

En base a los elementos creados se podrán realizar simulaciones de MG aisladas que trabajen en diferentes escenarios tales como:

- Varios convertidores de formación de red conectados en paralelo, que manejan cargas distribuidas.
- Convertidores de formación de red conectados en paralelo con convertidores de alimentación de red, manejando cargas distribuidas.
- Convertidores que se conectan/desconectan durante las simulaciones.
- Cargas que se conectan/desconectan durante las simulaciones
- Cortes de líneas de potencia.
- Cortes de comunicaciones.

Capítulo 1

Revisión literaria

Las microrredes (MG) son sistemas de distribución eléctrica en las que se contiene cargas y micro fuentes de energía distribuidas, pueden ser operadas de manera coordinada y controlada como un solo sistema proporcionando una ventaja desde la perspectiva de la red [1] [9].

En las MG, las fuentes de suministro pueden estar impulsadas por un conjunto diverso de motores primarios y/o dispositivos de almacenamiento. La característica distintiva clave estas, es que las fuentes están interconectadas por controladores micro fuente. Este poder de los dispositivos electrónicos mantiene el equilibrio energético y la calidad de la energía a través de plug and play pasivo. También permiten la conexión y desconexión de dispositivos sin necesidad de ninguna reconfiguración de equipos, preexistentes o nuevos [9].

Para una empresa de servicios públicos, las MG pueden ser consideradas como una célula controlada del sistema de potencia, es decir, esta celda podría controlarse como una sola carga despachable, que puede responder en segundos para satisfacer las necesidades del sistema de transmisión [1]. Para el cliente, la MG puede ser diseñado para satisfacer sus necesidades especiales de la persona; como, mejorar confiabilidad,

reducir las pérdidas del alimentador, soportar voltajes locales, proporcionar una mayor eficiencia mediante el uso de calor residual, corrección de caídas o suministro de energía ininterrumpida entre otros casos [1].

Las microrredes requieren un conjunto de controladores estructurados para garantizar un correcto funcionamiento del sistema en condiciones genéricas de funcionamiento, como diferentes modos de operación o manejo de fallas en la red [11]. Los controladores de voltaje y corriente de bajo nivel son responsables de regulando localmente las variables de salida del convertidor de potencia. Estos controladores deben tener un alto ancho de banda y rendimiento en para garantizar un tiempo de respuesta rápido bajo condiciones operativas genéricas condiciones. En un nivel de control más alto, los controladores primarios toman cuidado de la estabilidad de la microrred [2].

En la actualidad, las MG trabajan como un enfoque alternativo del método tradicional, para integrar recursos de energía distribuidos a pequeña escala en redes de distribución de electricidad del sistema de energía. Los enfoques tradicionales son basados en minimizar consecuencias para la seguridad y el rendimiento de la red de un numero pequeño de micro generadores interconectados, por esta razón si existe una falla, requiere que se desconecte instantáneamente el sistema. En este punto las MG son diseñadas para operar de manera independiente, conectada a la red, pero aislado de esta, funcionando de tal manera que se pueda mantener el rendimiento [9].

En este capítulo se describe y detalla acerca de las microrredes y sus distintos convertidores, que ayudan a un funcionamiento correcto en diferentes casos propuestos. Se detalla de manera exhaustiva los convertidores en formación de red y en alimentación de red, además de sus diferentes experimentos y teorías formuladas a partir de estos. Los experimentos propuestos se tomarán en cuenta para la realización de un nuevo entorno de comunicación para ambos convertidores.

1.1. Estructura básica de una microrred

Las micro fuentes de especial interés para las MG son pequeñas (≤ 100 -kW) unidades con interfaces electrónicas de potencia. Estas fuentes son de bajo costo, bajo voltaje y tienen alta confiabilidad con pocas emisiones. Por esta razón, la electrónica de potencia proporciona el control y la flexibilidad que requiere la MG; junto con los controles deben asegurarse de que puedan satisfacer a las necesidades de los clientes o servicios públicos. Esto se consigue con una arquitectura básica compuesta por 3 componentes críticos [1] [9].

1. El controlador de micro fuente es un componente importante de la estructura de la MG, porque este se encarga de responder en milisegundos y usar la información local para controlar la micro fuente durante el transcurso de todos los eventos. Un elemento clave es que las comunicaciones entre micro fuentes son innecesarias para operación, cada uno de los inversores son capaces de responder a los cambios de carga de manera predeterminada sin necesidad de que exista comunicación de datos de otras fuentes o ubicaciones. Por esta razón trabajan mediante el “plug and play” lo que implica que la micro fuente puede ser añadida a la MG sin necesidad de que haya cambios en el control y protección de unidades, por lo que forman parte del sistema. Las entradas básicas del controlador funcionan como punto de ajuste de potencia y voltaje [1].
2. La optimización del sistema que permite el proceso avance de manera efectiva y no se detenga debido a posibles fallos, es proporcionada por el gestor energéticos. Este último utiliza información sobre necesidades locales de electricidad y calor, requerimientos de la calidad de energía. Para determinar la cantidad de energía que la MG debe extraer del sistema de distribución [1]. Las funciones claves mas importantes del gestor energético son:
 - Proporcionar el punto de ajuste de voltaje y potencia individual para cada micro fuente.
 - Asegurar que se cumplan las cargas eléctricas y de calor.

- Asegurar que la MG cumpla con las condiciones operativas del sistema.
 - Minimizar las emisiones y pérdidas del sistema
 - Maximizar la eficiencia operativa
 - Proporcionar lógica y control para el funcionamiento en isla y la reconexión durante eventos previstos.
3. Por último, la protección, que se encarga, como su nombre lo dice, de responder a las fallas que existen en el sistema como en la MG. Si la protección se encuentra definida de manera correcta, entonces a pesar de que la falla no sea del sistema sino de la red, esta aislará la MG de utilidad principal lo más rápido posible para proteger las cargas que están trabajando. La velocidad de aislamiento depende de las cargas específicas predeterminadas por el cliente. Si la falla se encuentra dentro de la MG, entonces el sistema de protección aísla la sección más pequeña posible del alimentador radial para eliminar la falla, siendo estos casos los más convencionales en las micro fuentes basados en electrónica de potencia [9].

1.2. Tipos de microrredes

Las MG, como es de conocimiento tiene que ser una red eléctrica capaz de autogestionarse de manera independiente de la red eléctrica; para realizar esto último no existe una sola manera de controlar o de formarse por lo que existen diferentes tipos de sistemas que trabajan de manera diferente, las cuales se describen a continuación.

1.2.1. Microrredes de corriente alterna (AC)

Las MG de AC representan la fuente de alimentación en una red de distribución, estas se pueden conectar fácilmente a una red de utilidad ya existente sin necesidad de requisitos especiales tales como convertidores y su control enfoques. Desde la evolución del concepto de microrred, las microrredes ac han ocupado un lugar central en la investigación, por lo que existen gran cantidad de experimento hechos a base de este tipo de MG. Esto se debe a la alimentación de AC bien establecida en las redes, de tal manera que poseen modos compatibles de dispositivos eléctricos y electrónicos [10].

1.2.2. Microrredes de corriente continua (DC)

Una MG en DC se destaca principalmente a una protección mejor contra cortocircuitos, es decir, posee mayor eficiencia. Apareció principalmente debido a la amplia aplicación de equipos electrónicos modernos y la disponibilidad de fuentes DC respetuosas con el medio ambiente, por ejemplo; células solares. Este tipo de MG exhiben mayor eficiencia y tienen una conversión con menos proceso que las MG en AC. La red de distribución de una microrred de CC puede ser uno de tres tipos: monopolar; bipolar; u homopolar [10].

1.2.3. Microrredes híbridas

Las MG híbridas consisten en redes de distribución en AC y DC con un controlador central de microrred. Este tipo de MG se construye principalmente para minimizar las etapas de conversión, reducir los dispositivos de interfaz, aumentar la confiabilidad y reducir los costos de energía, de esta manera se mejora la eficiencia global de la red. Este tipo de estructura permite que tanto la alimentación en AC como en DC se suministre a una red de distribución donde los consumidores puedan usar electricidad

dependiendo de sus necesidades [10].

Los siguientes tipos de MG están regidas a los tipos según su configuración.

1.2.4. Microrred en cascada

La configuración de tipo cascada conocida también como configuración de tipo serie ofrece una solución eficiente usando una generación distribuida de alto voltaje. También permite una fuente de alimentación de alta calidad debido a la regulación de frecuencia. Generalmente, la mayoría de los generadores están ubicados en un área donde se realiza un control centralizado [12].

Esta configuración permite aumentar fácilmente el voltaje sin el uso de transformadores enormes y costosos, además requiere una etapa para la conversión de energía para integrar el dispositivo de bajo voltaje en la MG. Es fácil y flexible de implementar, sin embargo, aumentar la cantidad de MG en cascada hace que sea más difícil instalar el generador en un área localizada. El costo de la comunicación a través de un sistema centralizado sofisticado y costoso el control depende de un gran ancho de banda [12].

1.2.5. Microrred en paralelo

La configuración de tipo paralelo utiliza principalmente el control de caída por lo que no requiere enlaces físicos de comunicación, siendo así fácil de implementar. Sin embargo, todos los controladores locales necesitan comunicarse con un controlador central, lo que debilita la confiabilidad y escalabilidad del sistema si no se adoptan estrategias de control adecuadas [12].

Cuando el MG está conectado al sistema de energía eléctrica, las unidades de generación distribuida se controlan como fuentes de corriente para que el sistema siga operando. Para el modo isla se requieren

métodos de control descentralizados que incluyen el control de caída y distintas variantes que sirve para lograr la sincronización de frecuencia y poder compartido. De esta manera, permite aumentar la capacidad de potencia y eficiencia del sistema evitando ondulaciones extremas. Sin embargo, se requiere un control de potencia preciso en AC o DC para integrar la MG. La precisión de distribución es muy sensible por lo que cada potencia es compensada por los inversores [12].

1.3. Modos de operación de microrredes AC

En la actualidad el uso de energía en AC resulta más sencillo por su estabilidad y maleabilidad, al igual que esta presente en la red pública local. De esta forma hay modos para controlar estas MG, los cuales, los más importantes, se describen a continuación.

1.3.1. Convertidor de formación de red

Los convertidores de formación de red se encargan principalmente de asegurar la calidad del voltaje de la MG (amplitud y frecuencia). Como fuentes de voltaje, presentan una impedancia de salida baja, por lo que necesitan un sistema de sincronización extremadamente preciso para operar en paralelo con otros convertidores de formación de red [11]. El poder compartido entre convertidores formadores de red conectados en paralelo es una función del valor de su producción de impedancias [11].

El Convertidor en formación de red (GFC) opera con control de bucle cerrado creando una referencia de voltaje y frecuencia en su salida. El principio de operación de este convertidor proviene de una fuente de potencia ininterrumpida (UPS) que tiene un ESS y puede suministrar una carga sin la red eléctrica. Entonces, el GFC asegura en un MG la calidad de la energía (PQ), la continuidad del servicio y la estabilidad [12], [13].

1.3.2. Convertidor de alimentación de red

Los convertidores de alimentación de red entregan temporalmente energía a la MG, ya que administran fuentes intermitentes tales como paneles solares y turbinas eólicas. Estos convertidores son controlados como fuentes de corriente e impuesta la inyección de potencia activa [11] [14]. El funcionamiento estable de este conversor tiene un papel muy importante en lo que se trata la estabilidad del sistema [14].

Los convertidores de alimentación de red son adecuados para el funcionamiento en paralelo con otros convertidores de potencia del mismo tipo en modo conectado a la red. Estos convertidores pueden participar en el control de la amplitud y frecuencia del voltaje de CA de la microrred ajustando, en una capa de control de nivel superior, las referencias de potencias activas y reactivas, P y Q , a entregar [11], [5], [15].

1.3.3. Convertidor de soporte de red

Las técnicas para controlar la distribución de energía en microrredes han sido utilizadas previamente en aplicaciones que tratan con fuentes de energía interrumpida en paralelo. Para evitar el control de caída se utilizan algoritmos para controlar el reparto de energía en microrredes sin utilizar canales de comunicación, de esta manera se eliminan los límites impuestos por la ubicación física y la mejora del rendimiento de la microrred [16].

Los convertidores de soporte a la red son implementados para desarrollar técnicas de regulación de caída, de esta manera se regula el intercambio de potencias activas y reactivas con la red y se mantienen un bajo control de la frecuencia y la amplitud de la red. La idea principal para apoyar el control de caída proviene de imitar la capacidad de autorregulación del generador síncrono en modo conexión a red, disminuyendo la potencia activa entregada cuando aumenta la frecuencia de red y disminuyendo la

potencia reactiva inyectada cuando aumenta la amplitud de la tensión de red [11].

1.4. Ejemplos de microrredes

Desde la creación de las MG, se las han utilizado de diferente manera para comprobar su funcionamiento y su veracidad de las cuales hay que destacar el convertidor formador de red, el alimentador de red y el soportador de red [11].

El modo de operación aislada representa un el planteamiento desafiante debido a que la dinámica de la MG no está dominada por la red principal, por lo que los convertidores de potencia son los que se encargan de mantener la tensión en la red independientemente del consumo de energía que represente [10]. Se encuentra diseñado para separarse de la red principal y seguir operando de manera independiente, distribuyendo energía, y reconectándose cuando se resuelva el problema de la red [12].

Algunos experimentos realizados con GFC para un control jerárquico explicados en [8], [17], señala algunos lugares del mundo en el cual el uso de microrredes aisladas ha sido implementado a través de diferentes centrales y topologías. Cabe destacar que en este funcionamiento no existe una estructura aceptada o única por lo que cada una de las microrredes tiende a funcionar de manera distinta a pesar de que exista configuraciones típicas [8].

En [18] se expone una manera de realizar el control el control de caída y exponer las verdades acerca de las limitantes existente en el momento de simularlo y ponerlo en marcha. Con el fin de lograr el reparto preciso entre inversores operados en paralelo, la resistencia de los inversores debe ser la misma, al igual que los puntos de ajuste de voltaje, dando un resultado desfavorable, porque de esta manera nos da un resultado imposible de realizar en la vida real.

Tomando en cuenta el estudio anterior, en [4] se le agrega una retroalimentación de frecuencia adicional

mediante la compensación y el método de inercia para simular un mejor el rendimiento dinámico y la estabilidad. Al añadir estos nuevos factores y componentes a las distintas ecuaciones ayudan a disminuir la velocidad del cambio de radio de frecuencia y voltaje, al igual que reducen la fluctuación existente entre estos dos factores.

Se propone un modelo que generaliza el control de caída en [19] que esta basado en el modelo tradicional anteriormente señalado y un generador síncrono de control virtual. En este se puede diseñar un bucle de control de control de caída generalizada de forma flexible para adaptarse a diferentes requisitos. El control puede suprimir la oscilación y reducir el tiempo de estabilización de potencia activa de salida cuando cambia la referencia de potencia [19]. El control de caída generalizado puede proporcionar inercia y propiedades de amortiguación.

Cambiando el controlador integral por un controlador proporcional-integral, la inercia virtual queda incluida en el control de sincronización de energía del convertidor como se detalla en [3]. También se detalla un control jerárquico para tres fases, en el que el control de la estructura se basa en el marco de referencia estacionario, y organizado en dos niveles de control. El control primario se basa sobre el control de caída y los conceptos de impedancia virtual, mientras que en el control secundario es el controlador centralizado local, siendo el responsable de compartir el poder y tiene el objetivo de restaurar las desviaciones de frecuencia y amplitud producidas por el control primario [3],[20].

En [13] se diseñó un control de sincronización de energía generalizado que puede integrar características caída como de inercia. Utilizaron una estrategia de control de potencia activa síncrona para convertidores conectados a la red orientados a la emulación de inercia y control de frecuencia primaria. Con los resultados probaron que la constante de inercia, el factor de amortiguamiento y la caída de la pendiente se puede encontrar con precisión para una buena dinámica e interacción del sistema. En Fig. 1.1 se indica las componentes utilizadas en el sistema explicado.

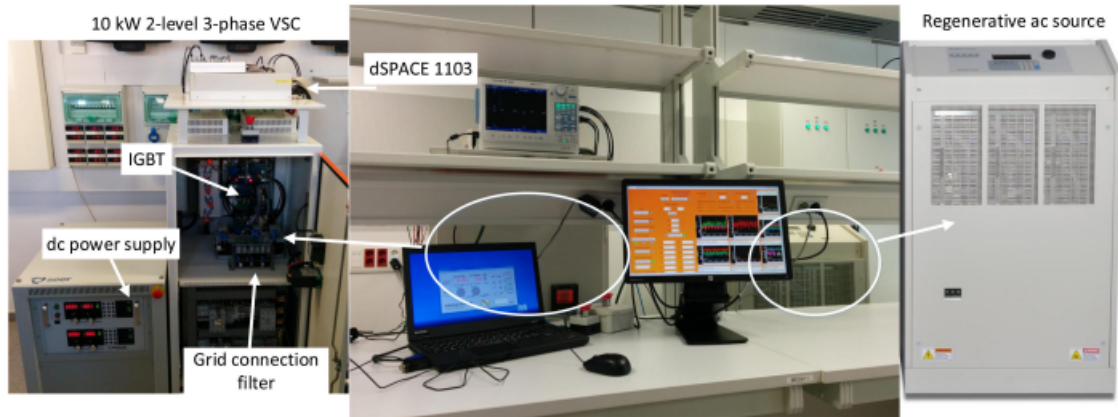


Figura 1.1: Convertidores de potencia interactivos implementados en [13]

Un control de energía síncrono novedoso que reduce el orden para el inversor controlado por voltaje se propuso en [20], el cual brinda facilidades para que el coeficiente de caída sea liberado mediante el ajuste del factor de amortiguamiento. Tomando en cuenta esto, el bucle de potencia activa de segundo orden puede pasar a funcionar como un sistema de primer orden, dando como resultado la mejora de la respuesta dinámica.

Un análisis presentado en [5], identifica los parámetros críticos para la estabilidad del sistema y presenta una muestra de cómo se pueden ajustar las dos implementaciones desarrolladas para garantizar la dinámica satisfactoria de las señales pequeñas. Para que resulte de manera adecuada se necesita un sistema con un acoplamiento significativo entre control de potencia activa y reactiva [15]. Por último, una configuración generalizada para el convertidor en formación de red que toma en cuenta cada uno de los aspectos anteriores, descrito en [2], en el que toma en cuenta una teoría de control basada en la retroalimentación de múltiples entradas y múltiples salidas. Asumiendo que todas las formulaciones populares se pueden unificar en una matriz de transferencia generalizada para el control en la configuración. En Fig. 1.2 se señala el esquema implementado en la configuración del convertidor a condiciones controladas.

Existen una cierta cantidad de estudios que explican lo complicado que es trabajar con el convertidor formador de red, como en [21], que se centra en alcanzar exclusivamente la estabilidad en la sincronización

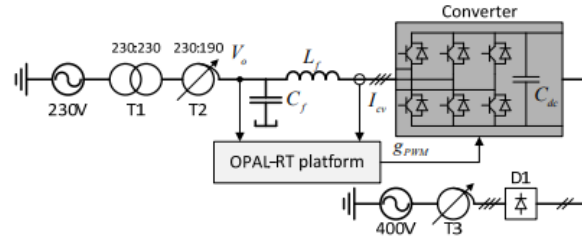


Figura 1.2: Configuración de laboratorio formada en [2]

durante eventos de falla de bajo voltaje, en donde el convertidor está esclavizado para cumplir con la inyección de corriente reactiva. Aquí también se señalan que aun se debe encontrar un método para evaluar la sincronización de los convertidores alimentados en la red porque actualmente no se ha llegado a una conclusión.

En cambio, en [22] se señala un procedimiento de análisis y modelado para el problema de la estabilidad armónica en sistemas de potencia en AC. Ejecutando un estudio exhaustivo obtuvieron que el enfoque que está basado en la impedancia, proporciona un método eficiente para el punto de vista computacional, de esta manera se logra realizar análisis más precisos, dando como resultado que la inestabilidad armónica resulta a partir de las interacciones de los lazos de control internos para los inversores.

Las simulaciones realizadas a partir de caídas de voltaje de red se indican en [23], en donde se observa a través de gráficas de dos dimensiones una bifurcación catastrófica en el funcionamiento que puede dañar el estado físico de los sistemas. El funcionamiento completo de las bifurcaciones y la inestabilidad que existen en el sistema se las simula ciclo a ciclo con medidas experimentales.

En el trabajo realizado en [24], se toma en cuenta conceptos e índices de estabilidad concomitante, al igual que el análisis en estado estacionario tomando en cuenta sistemas de alimentación única. El sistema representado en Fig. 1.3 pueden proporcionar mejor soporte de voltaje a un sistema AC de recepción débil, pero si se utiliza un control de potencia reactiva modulada, esto mejoraría significativamente [11], [24].

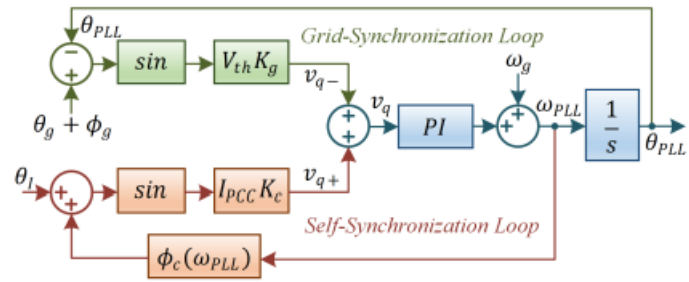


Figura 1.3: Modelo estático de larga señal explicado en [24]

Tomando en cuenta lo anterior, los sistemas de formación de red son más comunes de utilizar para el caso de sistemas aislado, debido a que los sistemas de alimentación de red suelen tener muchos problemas al perder estabilidad, por esta razón para un mejor desarrollo y control, se plantea el uso de una plataforma en la cual existe estos dos convertidores conectados entre sí para evitar pérdidas y conseguir una estabilidad a pesar de que se pudiera desconectar de una red eléctrica.

Capítulo 2

Metodología

2.1. Modos de operación de Microrredes

En esta sección se describen los principales modos de funcionamiento: modo conectado a la red cuando hay una interacción con la red pública; modo isla refiriéndose a un modo autónomo operación; y el modo de funcionamiento transitorio, como lo indica el nombre, es la transición significa cuando hay una desconexión o restauración con respecto a la red principal [25]; este último se abarcará en el desarrollo de resultados combinando convertidores.

2.1.1. Convertidor formador de red

Los convertidores formadores de red se controlan en lazo para trabajar como fuentes ideales de voltaje AC con una amplitud dada V^* y una frecuencia ω^* [11]. Es representado en la figura 2.1a como una fuente ideal AC, presentan una impedancia de salida baja, por lo que necesitan un extremadamente preciso

sistema de sincronización para operar en paralelo con otros convertidores formadores de red. El reparto de energía entre los convertidores que forman la red conectados en paralelo es una función del valor de su salida impedancias [26].

Dentro de este contexto, la referencia para el voltaje que debe ser inyectado esta impuesta por 2.1. Este último se establece a través de bucles de control adecuados dentro del generador de referencias como función para la amplitud V^* y frecuencia ω^* , y medidas que se obtienen a partir de la tensión v y la corriente i que proporciona el convertidor de potencia. Para modo de conexión o modo isla, este convertidor regula la amplitud y frecuencia de la tensión de la red sin necesidad alguna de conectar otro convertidor formador de red en la MG, de manera síncrona hace el generador una red convencional [27].

$$v^* = f(V^*, \omega^*, v, i) \quad (2.1)$$

2.1.2. Convertidor alimentador de red

Los convertidores alimentadores de red se controlan como fuentes de corriente, presentando una alta impedancia de salida en paralelo. Estos convertidores de potencia son aptos para operar en paralelo con otros convertidores de alimentación de red en modo conectado a la red [11].

Este convertidor entrega energía a una red mediante la inyección de corriente, y la referencia para esta corriente es fijado por; un generador de referencias en función de la MG, las referencias de potencia activa y reactiva a entregar, P^* y Q^* respectivamente, y las medidas tomadas del voltaje v y la corriente i proporcionados por el convertidor de potencia [27], justo como el convertidor anterior. Todo esto es representado en 2.2, de esta manera siempre tiene que estar conectado a otro convertidor o a un generador síncrono para funcionar.

$$i^* = f(P^*, Q^*, v, i) \quad (2.2)$$

Estos convertidores pueden participar en el control de la amplitud y frecuencia del voltaje en AC de la microrred ajustando, en una capa de control de nivel superior, las referencias de potencias activa y reactiva, P y Q, a entregar [11]. El funcionamiento de los convertidores de alimentación de red a menudo está regulado por un controlador de alto nivel, como un controlador de seguimiento del punto de máxima potencia o un controlador de la planta de energía, que establece valores de referencia para P y Q [28]. En Fig. 2.1 se indica la estructura simplificada de los convertidores que se analizan en este documento.

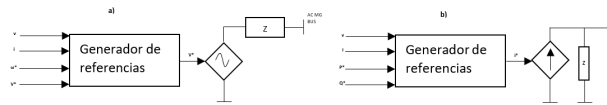


Figura 2.1: Representación simplificada de los convertidores de potencia en MGs

2.2. Arquitectura y control del convertidor formador de red

Los convertidores formadores de red son los encargados de establecer la tensión que se suministrará a las cargas, la estructura de control principal de un convertidor de potencia de formación de red consta de dos bucles en cascada.

La presencia de convertidores de apoyo a la red contribuye positivamente a mejorar la calidad del voltaje a lo largo de la línea de la microrred, tanto en los conectados a la red y modos de isla. Los convertidores de potencia que forman la red se pueden controlar en ambos los marcos de referencia dq síncrono y estacionario [11].

Un esquema simplificado de una fuente de generación distribuida en un convertidor trifásico de potencia formador de red que se conecta a un punto de acoplamiento común puede ser reconocido como una fuente de energía, un procesador de señal digital dedicado, una pila de energía y un filtro de salida, en Fig. 2.2 se la reconoce encerrada en recuadros [11].

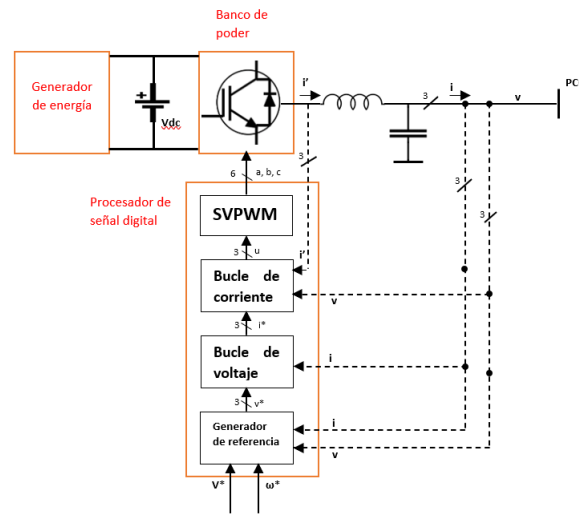


Figura 2.2: Fuente de generación distribuida en un convertidor formador de red

1. *Fuente de energía:* Este sector es el que brinda la energía que pasa por el sistema, siendo una parte muy necesaria para brindar energía DC al convertidor de manera continua.
2. *Procesador de señal digital:* Para generar un proceso en el cual se tenga como objetivo generar una señal medible y utilizable se tiene que partir de una base; para medición en tiempo real es necesario el generador de referencia, los bucles de voltaje y corriente en cascada, y la unidad de modulación de ancho de pulso [29]. El generador de referencias trabaja principalmente en establecer la referencia de voltaje v^* , posteriormente seguido por el convertidor de potencia de modo que $v=v^*$, de acuerdo a las referencias que están dentro del sistema de tensión V^* y frecuencia ω^* , que es necesario en el punto de acoplamiento común. El bucle de voltaje fija el voltaje de salida del convertidor para que coincida con el voltaje de referencia mientras que el lazo regula la corriente que suministró el convertidor [11]. La unidad de modulación de ancho de pulso genera el vector de voltaje trifásico que se aplicará a través del banco de poder [30].
3. *Banco de poder:* Conformado por un puente trifásico completo y un módulo de transistores de potencia. Estos se encargan de rectificar y amplificar la modulación de ancho de pulso de baja potencia que han sido suministradas por el procesador de señal digital.

4. *Filtro de salida:* El filtro utilizado en esta aplicación, es un filtro pasa baja LC, compuesto por una inductancia trifásica y un banco de capacitores, los cuales se encargan de suavizar las señales que se envían al sistema de potencia que alimentan los distintos sectores del mismo.

Existen dos esquemas de control para microrredes aisladas: maestro-esclavo y multi-maestro. Tomando en consideración que el enfoque maestro-esclavo no funcionaría de tal manera que si el convertidor maestro de formación de red falla, entonces toda la red falla, en esta sección solo se tomará en cuenta el enfoque multi-maestro.

2.2.1. Enfoque multi-maestro

Primeramente, para el manejo del convertidor formador de red mediante el enfoque multim-maestro, asegura cooperativamente la calidad del voltaje de la red, si alguno falla, el objetivo sigue en funcionamiento. Para este cumplimiento se ha diseñado un control jerárquico para el control de los convertidores en paralelo; pudiendo ser de manera centralizada, descentralizada o interconectada a través de canales de comunicación. Esta arquitectura consta de 3 niveles; control primario, secundario y terciario [12].

1. *Control primario:* Realiza el control de la energía local, el voltaje y la corriente. Esta implementado en controladores locales, siguiendo los puntos de ajuste dados por los controladores de nivel superior [16].
2. *Control secundario:* Se ocupa del control de la calidad de energía, como restauración de voltaje/frecuencia, la desestabilidad de voltaje y la compensación armónica. La sincronización de red en la MG en AC también esta dentro del alcance el mando secundario [10][16].
3. *Control Terciario:* Los objetivos del control terciario incluyen la regulación del flujo de potencia y la gestión de energía. La regulación del flujo de potencia garantiza la potencia precisa de control

compartido entre las unidades de energía distribuida, y el intercambio de potencia entre la MG y la red externa. La gestión de energía tiene como objetivo introducir inteligencia al sistema [12][16].

El método de caída es uno de los enfoques de control más robusto para conectar convertidores de potencia formadores de red en paralelo para compartir carga y mantener la calidad del voltaje [6]. Para el control de caída es necesario utilizar ecuaciones para las pendientes de control de caída m y n para a su vez optimizar la frecuencia y perfil de tensión en referencia a la señal activa y reactiva, respectivamente [30]. Se utiliza 2.3 y 2.4 para el diseño de las ganancias en el compensador.

$$m = \Delta f / P_{max} \quad (2.3)$$

$$n = \Delta V / 2Q_{max} \quad (2.4)$$

Como se muestra en Fig. 2.3 representa la función del control de caída. Antes de comenzar con el sistema, se debe considerar que las variables AC son traducidas de un marco de referencia ortogonal de tres fases a un marco de referencia estacionario de dos ejes ($\alpha \beta$) [7], para simplificar cálculos y reducir la dificultad de la simulación.

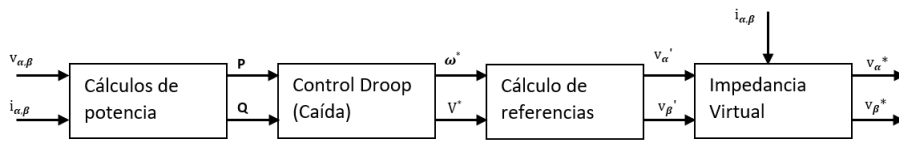


Figura 2.3: Generador de referencias con control de caída en el convertidor formador de red

1. *Calculos de potencia:* Para empezar se tiene que calcular los componentes de la potencia activa y reactiva instantánea, tal y como se muestra en 2.5 y 2.6 respectivamente.

$$p = 3/2(v_\alpha i_a + v_\beta i_\beta) \quad (2.5)$$

$$q = 3/2(-v_{\alpha} i_{\beta} + v_{\beta} i_{\alpha}) \quad (2.6)$$

En estas ecuaciones, $v_{\alpha,\beta}$ representan a los voltajes medidos localmente, mientras que i_{α}, β son las corrientes medidas a la salida del filtro LC. Para proveer atenuación al sonido se aplica a 2.5 y 2.6 un filtro pasa baja. De esta manera las ecuaciones de potencia activa y reactiva filtradas en el dominio de la frecuencia representadas en 2.7 y 2.8 respectivamente.

$$P(s) = p(s)\omega_c/s + \omega_c \quad (2.7)$$

$$Q(s) = q(s)\omega_c/s + \omega_c \quad (2.8)$$

2. *Control de caída:* El punto principal del control de caída es calcular el punto de ajuste de frecuencia ω^* y la amplitud V^* para cada inversor de corriente y lazos de control interno de tensión. Consiste en reducir la frecuencia y la amplitud de la tensión de salida para controlar los flujos de potencia activa y reactiva. Esto provoca una cierta divergencia entre de la frecuencia y amplitud en comparación con sus valores nominales y se puede calcular en las operaciones básicas 2.9 y 2.10.

$$\omega^* = \omega_0 - m_p P \quad (2.9)$$

$$V^* = V_0 - n_q Q \quad (2.10)$$

En donde ω_0 y V_0 son la tensión nominal del convertidor de potencia en frecuencia y amplitud, P y Q son las salidas de potencia activa y reactiva, y m_p y n_q son las ganancias de control proporcional.

3. *Cálculo de referencias:* Las referencias de voltajes son expresadas en función de los puntos de ajuste locales para la frecuencia ω^* y voltaje V^* en las ecuaciones 2.11 y 2.12.

$$v'_{\alpha} = V^* \sin(\omega^* t) \quad (2.11)$$

$$v'_\beta = -V^* \cos(\omega^* t) \quad (2.12)$$

Tomando en consideración 2.11 y 2.12, los voltajes suprimen un término de fase porque se considera que el convertidor está sincronizado con la red de voltaje y encendido para participar en el reparto de energía [12].

4. *Impedancia virtual*: La frecuencia en caída y el voltaje en caída expresado en 2.9 y 2.10 respectivamente, son soluciones factibles cuando predomina un comportamiento inductivo. En la red, la impedancia virtual tiene que ser predominantemente inductiva, así que para asegurar que esto suceda, es necesario añadir una inductancia virtual a la línea de impedancia para garantizar un correcto trabajo del sistema (ver 2.13, 2.14); en este caso Z_v es el valor de inductancia pura.

$$v'_\beta = V^* \cos(\omega^* t) + Z_v i_\beta \quad (2.13)$$

$$v'_\beta = -V^* \cos(\omega^* t) - Z_v i_\alpha \quad (2.14)$$

2.3. Arquitectura y control del convertidor alimentador de red

El controlador interno de los convertidores de potencia que alimentan a la red establece en bucles de control de corriente rápida que regulan la corriente inyectada en la red [28]. Otro controlador externo establece la referencia corriente para regular la potencia entregada a la red [20]. Esta corriente de referencia generalmente se proporciona como señal de retroalimentación calculada en función de las potencias de referencia, P y Q [27], [28].

Como se ha visto en la arquitectura del convertidor formador de red, este convertidor tiene características similares del esquema simplificado de una fuente de generación distribuida. Los cambios mas sustanciales del control en este caso esta dado por el control externo de la potencia activa y reactiva. Por

esta razón el esquema queda representado en Fig. 2.4.

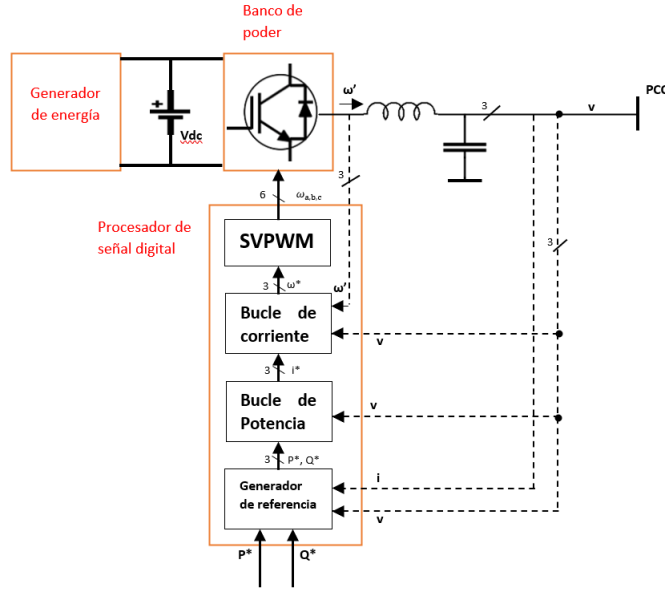


Figura 2.4: Fuente de generación distribuida en un convertidor alimentador de red

En este contexto, el *procesador de señal digital*, trabaja de una manera un poco distinta. El generador de referencias genera principalmente una referencia de potencia activa p y de potencia reactiva q , datos necesarios para el punto de acoplamiento común.

Al igual que en Fig. 2.3, en Fig. 2.5 se utiliza el control de caída. En este caso se utiliza el control maestro-esclavo para su control. De esta manera se obtiene un control principal que puede ser un convertidor formador de red o una red generadora y distribuidora de energía.

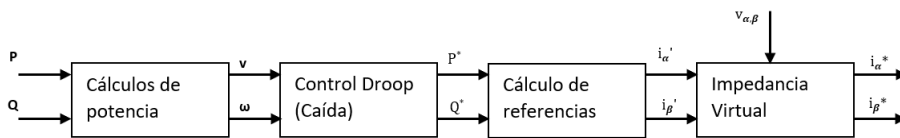


Figura 2.5: Generador de referencias para el convertidor alimentador de red

El voltaje nominal AC_{RMS} , la resistencia de carga y la frecuencia nominal de componentes son determinados para limitar la carga inductiva, así como para lograr un rango de potencia de salida deseado.

Las ecuaciones para definir estos parámetros se describen en 2.15.

$$P = 3 * V_{AC}^2 / R_L \quad (2.15)$$

En 2.15 se despeja el valor de la resistencia, dando como resultado 2.16 para obtener el valor de la corriente.

$$I = P / 3 * V_{AC} \quad (2.16)$$

Con el objetivo de simplificar el análisis y control de estos convertidores, se optará por representar con α y β a los componentes expresados como en el convertidor formador de red. De esta manera se puede transformar de un convertidor trifásico mediante una transformada simplificada definida por la *Transformada de Clarke* en 2.17.

$$\begin{bmatrix} V_{\alpha}(t) \\ V_{\beta}(t) \end{bmatrix} = 2/3 \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a(t) \\ V_b(t) \\ V_c(t) \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Se representa en 2.18 la amplitud y las funciones sinusoidales del marco de referencia $\alpha\beta$.

$$V(t) = \sqrt{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} \quad (2.18)$$

En 2.18 se aplica el teorema de triángulos rectángulos, para de esta manera obtener 2.19 y 2.20 obteniendo la amplitud para cada componente.

$$V_{\alpha}(t) = V(t) * \cos[\theta(t)] \quad (2.19)$$

$$V_{\beta}(t) = V(t) * \sin[\theta(t)] \quad (2.20)$$

Para la integración de la transformada de Clarke al programa es necesario utilizar operaciones básicas

para definir α y β utilizando 2.21 y 2.22.

$$\alpha = ab * 2 + bc/3 \quad (2.21)$$

$$\beta = \sqrt{3}/3 * bc \quad (2.22)$$

Esta transformación genera una salida de voltaje v_α y v_β , que son variables necesarias para determinar la amplitud de voltaje de salida, tal como muestra la ecuación 2.23.

$$v_0 = \sqrt{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \quad (2.23)$$

Los componentes de la potencia activa y reactiva se pueden calcular mediante 2.5 y 2.6 respectivamente. Ambos componentes se pueden calcular de la misma manera.

Para los componentes de salida para ruido y la mitigación armónica calculamos 2.7 y 2.8, y 2.25 para la salida de voltaje en dominio de la frecuencia.

$$V_0(s) = v_0\omega_c/s + \omega_c \quad (2.24)$$

Para el control de corriente en función del voltaje, la potencia activa y reactiva es necesario realizar los cálculos expuestos en 2.25 y 2.26, para esto se toma en consideración el trabajo a realizar por cada componente hasta obtener un resultado ideal.

$$i_\alpha = 2/3 * (v_\alpha * p_{ref} + v_\beta * q_{ref}) * (1/v_\alpha^2 + v_\beta^2) \quad (2.25)$$

$$i_\beta = 2/3 * (v_\beta * p_{ref} - v_\alpha * q_{ref}) * (1/v_\alpha^2 + v_\beta^2) \quad (2.26)$$

2.4. Plataforma de simulación

La plataforma de simulación imita los componentes eléctricos tales como convertidores de potencia, líneas de transmisión y cargas, de igual manera los componentes digitales e informáticos como los procesadores y temporizadores, junto con sus interacciones para ambos casos. Con este fin, se desarrollo un enfoque de co-simulación basado en Simscape Power Systems [31] y Truetime [29].

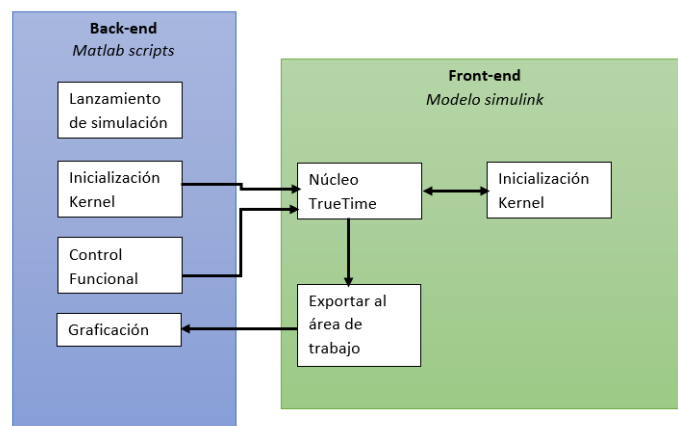


Figura 2.6: Trabajo de la plataforma de simulación [27]

El funcionamiento de la plataforma de simulación sigue los principios básicos principio de funcionamiento del modelo de simulación TrueTime en [29], que se muestra en Fig. 2.6. El entorno consta de dos capas: un back-end de datos compuesto por varios scripts de Matlab y un front-end gráfico que comprende un modelo de Simulink.

En la interfaz gráfica, el bloque del núcleo TrueTime representa un procesador digital que ejecuta un algoritmo para controlar el Sistema de alimentación Simscape. Por lo tanto, este núcleo es responsable para adquirir datos de este sistema eléctrico, procesarlos, y generarle una salida de control [27]. Además, el núcleo tiene otras funciones asociadas como la aplicación de reloj desviaciones, compensaciones de reloj y gestión de comunicación de red [27].

El back-end de datos entra en escena a través de dos Matlab scripts, que son la inicialización del núcleo

y la función de control, los script de inicialización esencialmente declaran tanto los datos locales estructura y la tarea de control a ejecutar en el dispositivo, estos también declaran algunos problemas relacionados con los problemas de activación, la prioridad y el algoritmo de programación. De lo contrario, el script de control contiene la tarea de control que se va a ejecutar en el núcleo. En referencia a la interacción con la plataforma y de nuevo atendiendo al diagrama de la figura 2.6, en etapa de programación, el usuario es libre de modificar el modelo de Simulink dependiendo de la configuración necesaria para la microrred. De esta manera, tanto la inicialización y los scripts de control deben cambiarse según la ley de control que debe implementarse. Posteriormente, para ejecutar la simulación, se debe ejecutar el script de lanzamiento de la simulación.

El archivo de inicio de simulación contiene ajustes generales sobre variables globales, valores eléctricos en los elementos del sistema de potencia, tiempo de simulación, nombre del script de Simulink a ejecutar, entre otros. Después de que la simulación se detiene, toda la información generada se envía a Matlab a través de la función exportar al espacio de trabajo para finalmente mostrarse al usuario a través del script de trazado. Estos datos son también disponible si se desea algún análisis adicional.

2.4.1. Convertidores virtuales

Una implementación virtual del convertidor de formación de cuadrícula presentado en la Figura 2.7, se muestra en Fig. 2.2. El núcleo TrueTime ejecuta el esquema de control multi maestro presentado en la figura 2.3 y expresado a través de los modelos 2.1 a 2.12.

Dos fuentes generan tensiones en el marco de referencia estacionario tomando como referencias v_{α}^* y v_{β}^* eso ha sido calculado dentro del núcleo TrueTime a través de 2.11, 2.12 y luego generada por el convertidor de digital a analógico, las intensidades proporcionadas por cada fuente, i_{α} e i_{β} , se miden a través de sensores actuales y enviados al kernel para su digitalización a través del convertidor de analógico

a digital. Estos valores se introducen en el modelo 2.1 para cálculo de potencia. Haciendo una analogía entre Fig. 2.3 y Fig. 2.2 se puede observar la eliminación de los bucles de voltaje y corriente, así como el módulo SVPWM en la implementación virtual. Todos estos elementos han sido reemplazados por las fuentes de tensión en la simulación. Además, la fuente de energía ha sido suprimida, debido a que en la simulación se considera una energía indefinida suplementaria, lo mismo sucede con el power stack y con el filtro de salida porque los voltajes no están modulados y por lo tanto, la eliminación de transitorios no es necesaria.

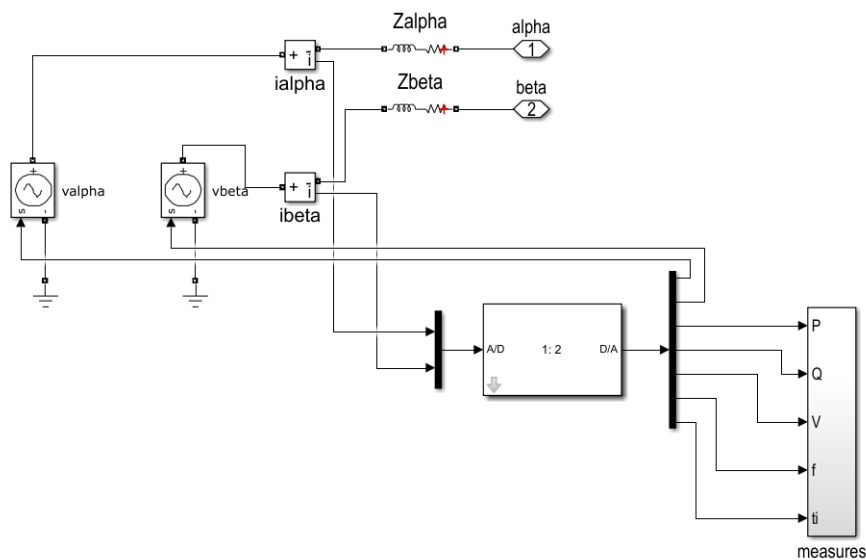


Figura 2.7: Convertidor formador de red virtual

La implementación de un convertidor alimentador de red en Fig. 2.8, que representa Fig. 2.5, como en el convertidor anterior muestra un núcleo TrueTime, ejecutando el sistema maestro-esclavo dentro del sistema. En este caso, se pudo observar que funciona como una fuente de corriente, y necesita dos entradas extras para el voltaje de referencia que es enviado de un convertidor externo o generador. De esta manera, mediante el uso de TrueTime, obtenemos salidas algo parecidas al convertidor anterior para de tal manera realizar los cálculos ya mencionados con anterioridad.

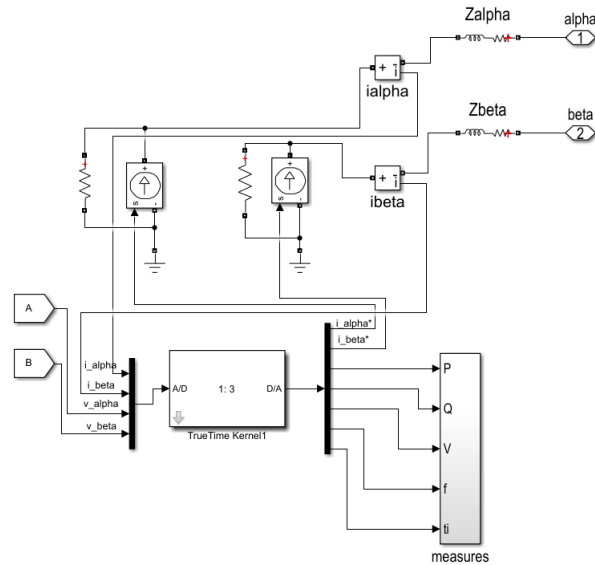


Figura 2.8: Convertidor alimentador de red virtual

2.4.2. Interruptores activos

Para recrear la conexión/desconexión física de elementos en la MG son necesarios los convertidores de potencia, cargas e incluso interruptores normalmente abiertos (Fig. 2.9) e interruptores normalmente cerrados (Fig. 2.10). Los interruptores activos para simular activación/desactivación de componentes eléctricos en líneas de transmisión, se muestran de dos tipos de interruptores activos en Fig. 2.9. Ambos elementos son idénticos excepto por su mecanismo de gatillo. Cada uno está compuesto por dos interruptores ideales, uno para cada línea en el marco de referencia. En estado activado, los interruptores tienen una pequeña resistencia interna, mientras que en estado apagado esta resistencia es infinito.

El interruptor normalmente abierto (NO) en Fig. 2.9 permanece deshabilitado (resistencia infinita) hasta que el paso ascendente activa la puerta del interruptor y lo habilita (pequeña resistencia). El interruptor normalmente cerrado (NC) en Fig. 2.10 permanece conectado hasta que se activa un escalón descendente en la puerta del interruptor y la desconecta. Los tiempos de activación para cualquiera de los bloques de paso se establecen en el script de inicio de simulación.

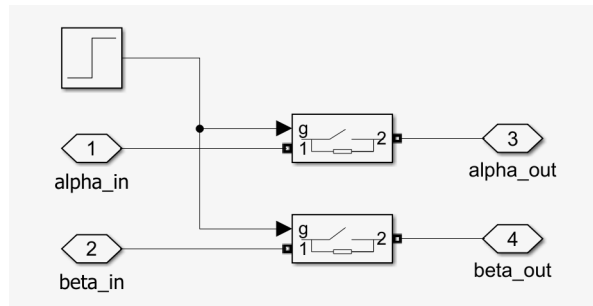


Figura 2.9: Interruptor normalmente abierto

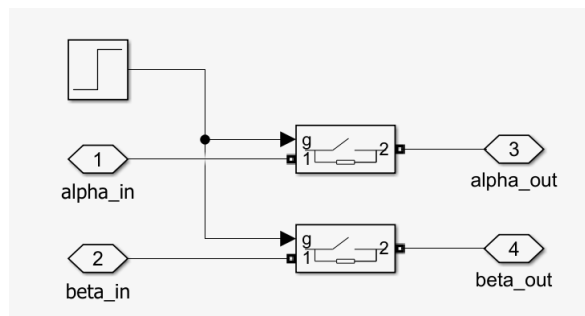


Figura 2.10: Interruptor normalmente cerrado

2.4.3. Transformadores virtuales

Todos estos elementos comparten la estructura de simulación indicada en Fig. 2.11, que comprende una rama RLC de la serie Simscape. El valor de la impedancia (inductancia y resistencia) se establece en el script de lanzamiento de simulación descrito con anterioridad.

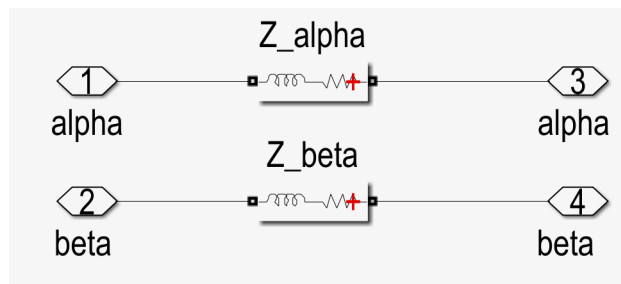


Figura 2.11: Transformadores virtuales

Capítulo 3

Resultados

Para la simulación de los diferentes componentes se ha tomado en consideración los datos del cuadro 3.1 para un correcto desarrollo del proyecto, tomando en cuenta los valores de laboratorio explicados en [32].

Cuadro 3.1: Valores nominales de la MG

Símbolo	Descripción	Valor nominal
v_0	Voltaje de red	$\sqrt{3} 110 \text{ V}$
ω_0	Frecuencia de red sin carga	$2 \pi 60 \text{ rad/s}$
Z_1	Impedancia de línea 1	$0.75 \text{ m}\Omega @90^\circ$
$Z_{2,3}$	Impedancia de línea 2 y 3	$0.30 \text{ m}\Omega @90^\circ$
$T_{1,2}$	Impedancia del transformador 1 y 2	$0.62 \text{ m}\Omega @37.01^\circ$
$T_{3,4}$	Impedancia del transformador 3 y 4	$0.1,31 \text{ m}\Omega @9.87^\circ$
Z_v	Impedancia Virtual	$3.76 \text{ m}\Omega @90^\circ$
Z_{L1}	Impedancia local de carga	$20 \Omega @0^\circ$
Z_G	Impedancia de carga global	$87 \Omega @0^\circ$
m	Ganancia en la frecuencia en caída	$1 \text{ mrad}/(\text{Ws})$
n	Ganancia en el voltaje en caída	$1 \text{ mV}/(\text{VAr})$
d_1	Tasa de deriva del reloj en el núcleo del convertidor 1	1.000
d_2	Tasa de deriva del reloj en el núcleo del convertidor 2	1.0001
d_3	Tasa de deriva del reloj en el núcleo del convertidor 3	0.999
d_4	Tasa de deriva del reloj en el núcleo del convertidor 4	1.0002

3.1. Funcionamiento de dos convertidores formadores de red y un alimentador de red en una MG aislada

En este caso la MG posee: dos convertidores formadores de red (Power Converter 1 y 2), un convertidor alimentador de red (Power Converter 3), tres cargas (Load 1, 2 y 3), tres transformadores virtuales (T1, T2 y T3), dos líneas de transmisión (Line 1 y 2) y un interruptor normalmente cerrado (Switch NC 1). Todos los componentes se pueden ver con mayor detalle en Fig. 3.1.

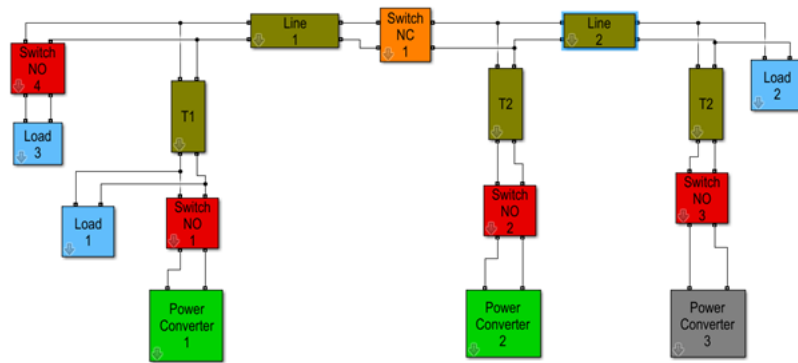


Figura 3.1: Estructura de una MG con tres convertidores

Inicialmente la red posee una carga total de 3200 [W] repartidas equitativamente entre la carga 1 y 2. El sistema inicia conectado el primer convertidor y este se encarga de suministrar toda la potencia de la red. El segundo convertidor se activa a los 2 [s] y el tercero a los 5 [s]. Una carga adicional se añade a los 8 [s] y por último a los 10 [s] la MG se separa en dos MGs independientes.

En Fig. 3.2, se observa el comportamiento del voltaje en cada convertidor, los convertidores formadores de red poseen el mismo comportamiento, debido a que, la función de estos es regular el voltaje y la frecuencia de la red, por su parte el voltaje del tercer convertidor tiene una desviación mayor ya que necesita de una referencia de voltaje proporcionado por un formador de red y por lo tanto, cualquier perturbación que sufra la referencia tiene repercusión en el alimentador de red. Finalmente, cuando no

hay ninguna conexión o desconexión de elementos el voltaje de todos los convertidores está en un rango de 108 y 110V.

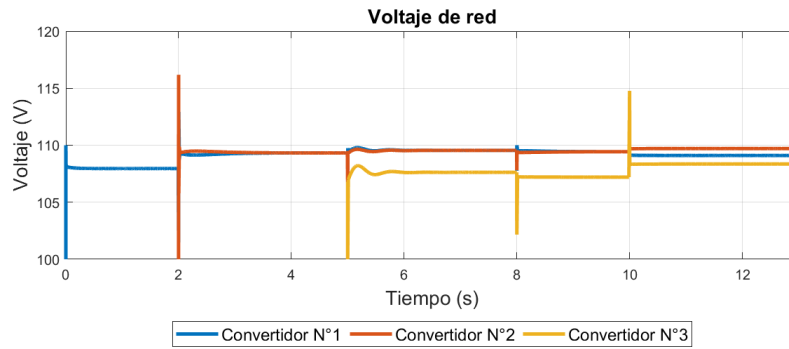


Figura 3.2: Voltaje de cada convertidor

En cuanto a la frecuencia de la red de todos los convertidores se mantiene en 60 Hz con variaciones máximas de 0.04 Hz (ver Fig. 3.3), el punto de inflexión se produce al conectar la carga extra a los 8 [s], en ese momento la frecuencia de los dos convertidores formadores de red sufre una desviación y la frecuencia alcanza los 57 [Hz], no obstante, en menos de un 1[s] vuelve al valor de frecuencia nominal.

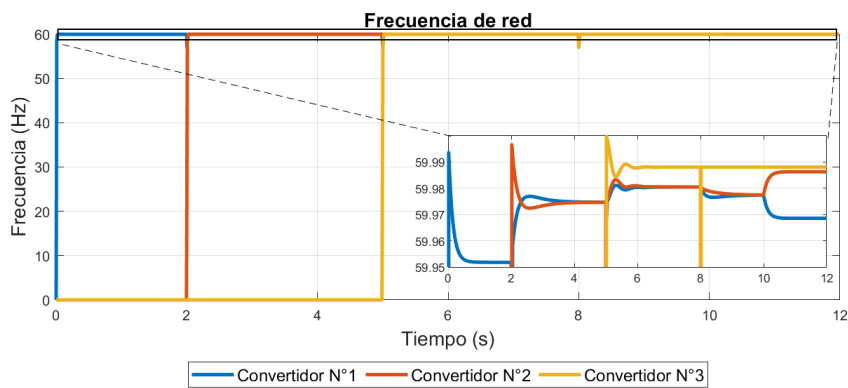


Figura 3.3: Frecuencia de red de cada convertidor

El desempeño de los controladores se evidencia con mayor detalle en el comportamiento de la potencia activa y reactiva. En el caso de la potencia activa como se observa en la Fig. 3.4, hasta el segundo 2, los 3200 [W] es producido por el primer convertidor, al conectarse el segundo convertidor el control droop

actúa y reparte la producción de potencia equitativamente entre los dos formadores de red, cada uno proporciona 1600 [W]. A los 5 [s] se conecta al convertidor alimentador de red, este convertidor tiene una referencia de potencia activa de 750 [W], y entregará esta cantidad de potencia mientras permanezca conectado a un formador de red o se cambie su referencia. Durante ese tiempo los dos convertidores bajan su producción de potencia a 1225 [W] cada uno, hasta el segundo 10 cuando se produce la separación de la MG.

La primera MG se forma por los elementos que se encuentran a la izquierda del interruptor general, con dos cargas: la primera de 1600 [W] y la segunda de 400[W], además, en esta MG la demanda es cubierta por el primer convertidor. Por otro lado, la segunda MG esta formada por un convertidor formador de red y un alimentador de red, y entre los dos suministran 1600 [W]. El alimentador de red sigue proporcionando la referencia de 750 [W] y el formador de red entrega el restante de potencia.

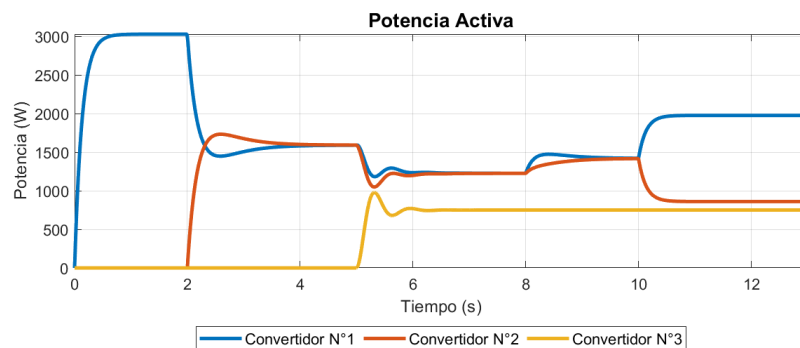


Figura 3.4: Potencia activa en la MG

La Fig. 3.5, representa las señales de potencia reactiva el comportamiento es similar al de la potencia activa, en este caso los convertidores se encargan de compartir potencia reactiva debido a que no se ha colocado un valor de referencia en el tercer convertidor.

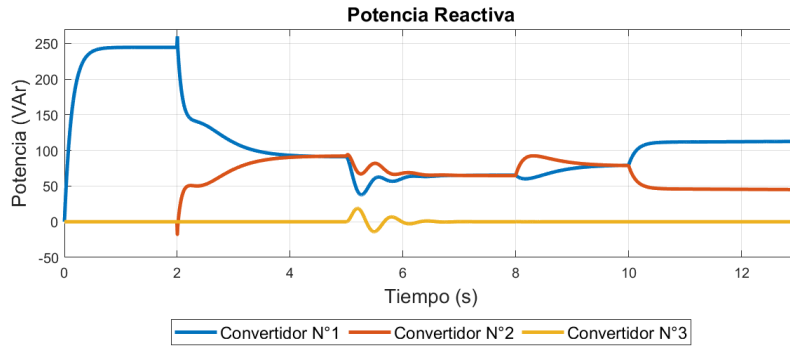


Figura 3.5: Potencia reactiva en la MG

3.2. Funcionamiento de una MG con dos convertidores formadores de red y dos convertidores alimentadores de red

Como se observa en Fig. 3.6, la MG está compuesta por: dos convertidores formadores de red (Power Converter 1 y 2), dos convertidores alimentadores de red (Power Converter 3 y 4), dos cargas (Load 1 y 2), cuatro transformadores virtuales (T1, T2, T3 y T4), tres líneas de transmisión (Line 1, 2 y 3) y un interruptor normalmente cerrado (Switch NC 1). La primera de 1600 [W] es una carga local conectada

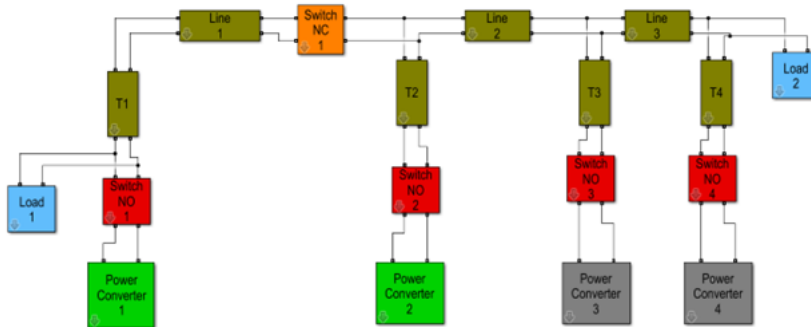


Figura 3.6: MG con dos convertidores formadores de red y dos alimentadores de red

al primer convertidor y la segunda carga también de 1600 [W] se encuentra conectada a una línea de transmisión. El primer convertidor empieza su funcionamiento desde el inicio de la operación, el Switch NO 2 activa el segundo convertidor de red a los 2 [s], El primer convertidor alimentador de red se activa

a los 5 [s] con una referencia de potencia de 500 [W] y a los 8 [s] el segundo alimentador de red comienza a entregar 700[W] establecidos en su referencia. A los 11 [s] se realiza un cambio de referencia en la potencia activa, en el primer convertidor alimentador de red, pasa de 500 a 700 [W]. Por último, se realiza la separación de la MG a los 14 [s].

El voltaje de los dos convertidores formadores de red es producido por las fuentes de voltaje de cada convertidor y la comunicación entre los convertidores permite alcanzar el voltaje deseado por la MG. Los picos de voltaje se producen al conectar y desconectar un formador de red debido a que en ese momento existe una nueva referencia de voltaje y el sistema tarda un instante de tiempo en volver alcanzar el valor de voltaje deseado. El voltaje de los alimentadores de red entrega un voltaje menor, debido a, que su referencia se toma desde la línea de transmisión y por los componentes que existen a lo largo de toda la red existen elementos que consumen cierto voltaje, sin embargo, el voltaje de los cuatro convertidores permanece por encima de los rangos permitidos (ver Fig. 3.7). En Fig. 3.8 se observa que el

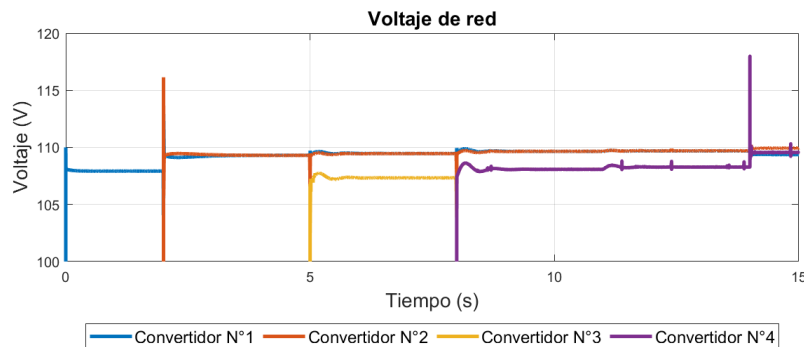


Figura 3.7: Voltaje de la MG

comportamiento de las señales de frecuencia en los dos convertidores alimentadores de red es similar, las variaciones mínimas ocurren cuando se ejerce algún tipo de conexión o desconexión de los convertidores, pero, las variaciones producidas son menores a 0,5 Hz. Una variación considerable se produce en el tercer convertidor y es a los 11 [s] cuando se realiza el cambio de referencia en su potencia activa, la frecuencia baja a 57 (Hz) igual que en el caso anterior. La Fig. 3.9 muestra la compartición de potencia activa entre los cuatro convertidores gracias al control droop, en este caso se puede ver que durante los primeros 2 [s] el

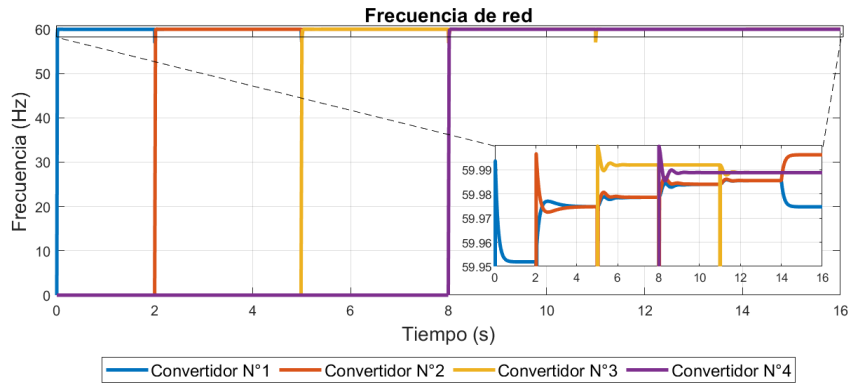


Figura 3.8: Frecuencia de la MG

primer convertidor formador de red suministra toda la demanda de carga, posteriormente, al conectarse el segundo convertidor formador de red dividen su producción de potencia de manera equitativa y entregan 1600 [W] cada uno.

A los 5 [s] se activa el primer formador de red con una referencia de 500 [W], el control propuesto en este convertidor sigue la referencia establecida e inyecta la potencia deseada, bajando a su vez la entrega de potencia de los dos convertidores formadores de red.

Luego, a los 8 [s] se conecta el segundo alimentador de red con una referencia de 700 [W], provocando una vez más que los formadores de red reduzcan su potencia, de manera que entre los cuatro sumen los 3200 [W].

A los 11 [s] se realiza un cambio de referencia en el primer convertidor formador de red, se puede apreciar que el convertidor cambia su referencia de manera satisfactoria a 700 [W], de esta manera, los dos alimentadores de red entregan un total de 1400 [W] y entre los dos formadores de red entregan 1800 [W].

Por último, al producirse la desconexión de la MG en dos independientes el primer convertidor entrega los 1600 [W] pertenecientes a su carga y entre los tres convertidores restantes entregan los otros 1600

[W], 700 [W] cada alimentador de red y 200[W] el formador de red. Las señales de potencia reactiva al

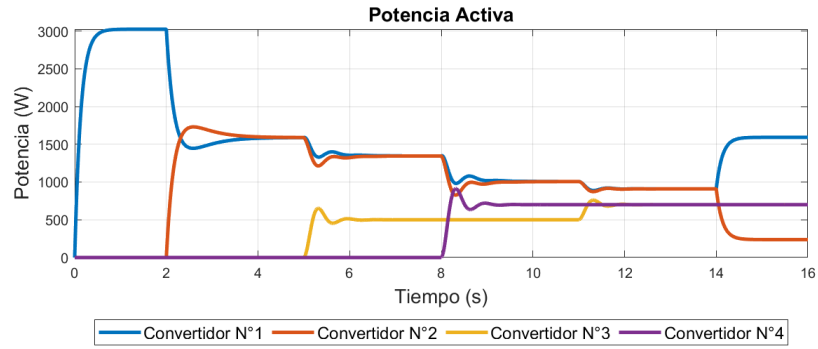


Figura 3.9: Compartición de potencia activa en la MG

igual que el caso anterior es cubierta por los convertidores formadores de red, el control droop actúa de manera eficiente para este caso compartiendo el suministro de potencia de manera equitativa en ambos convertidores (ver Fig. 3.10).

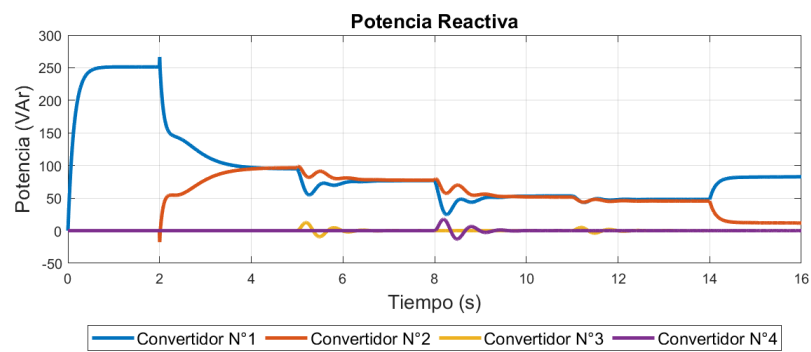


Figura 3.10: Potencia reactiva de la MG

3.3. Funcionamiento de una MG aislada con cuatro convertidores formadores de red.

La estructura de MG con cuatro convertidores formadores de red se presenta en Fig. 3.11, En este caso se encuentran conectadas dos cargas (Load 1 y 2), cada convertidor se conecta a un transformador (T1, T2, T3 y T4), hay tres líneas de transmisión (Line 1, 2 y 3) y un interruptor que divide a la MG en dos sub MGs. La carga es de 420 [W] y la segunda carga es de aproximadamente 1800 [W] entre la dos suman

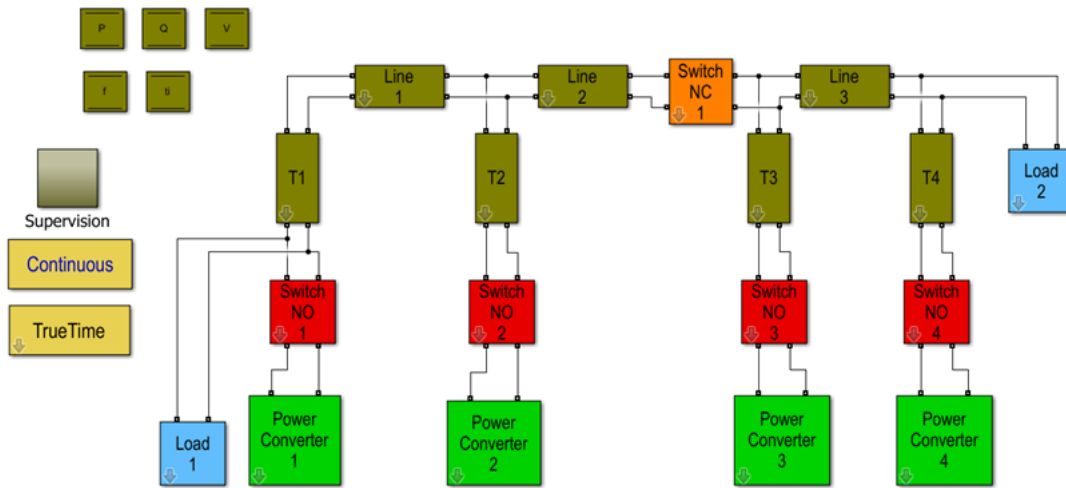


Figura 3.11: MG aislada con cuatro convertidores formadores de red

una carga total de 2020 [W], los convertidores se activan progresivamente cada 3[s]. Finalmente, a los 12 [s] se forman dos sub MGs, la primera se compone por los elementos del lado izquierdo del interruptor normalmente cerrado y la segunda MG por los elementos del lado derecho.

En Fig. 3.12 se observa la producción de voltaje de los cuatro convertidores formadores de red, con la activación de cada convertidor se produce un pico en la señal de cada convertidor, al conectarse a la red los convertidores se ajustan automáticamente al voltaje de red establecido y cuando la red se particiona todos los convertidores proveen aproximadamente 110 [V]. En este caso la frecuencia va aumentando en

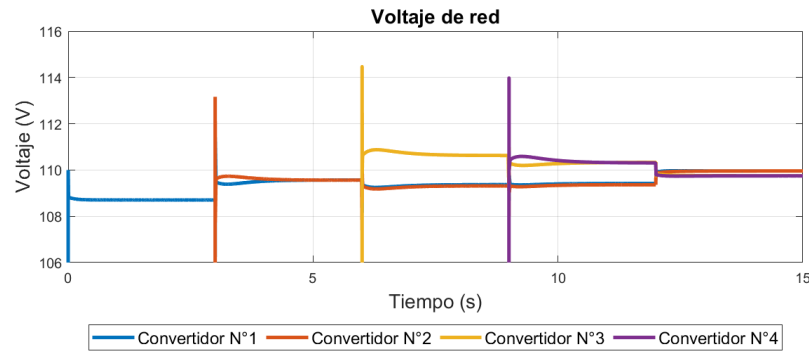


Figura 3.12: Voltaje de la MG aislada

pequeñas cantidades (ver Fig. 3.13). Al conectarse cada convertidor se eleva la frecuencia, sin pasar de los 60 [Hz], cuando un convertidor se conecta el anterior sigue esa referencia de frecuencia, a partir de los 10 [s] se puede ver como los cuatro convertidores entregan la misma frecuencia con un error de 0,01 [Hz]. Finalmente, al particionarse la red las frecuencias tienden a separarse, pero en valores muy pequeños. La compartición de potencia activa se puede ver en Fig. 3.14, durante el primer instante de tiempo el

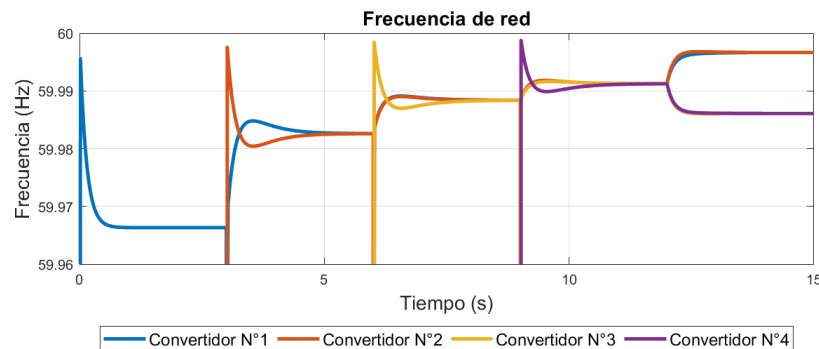


Figura 3.13: Frecuencia de la MG aislada

primer convertidor satisface los 2020 [W] requeridos por la MG, a partir del segundo 3 [s], se puede ver como la producción de potencia se va dividiendo para la cantidad de convertidores que se encuentren operando. Finalmente, cuando la MG se divide en dos sub MGs, los dos primeros convertidores producen los 1800 [W] requeridos por la primera carga y los dos convertidores restantes suministran los 420 [W] de la segunda carga. Todas las señales de potencia se establecen en un tiempo menor a 3 [s]. Al trabajar con cargas resistivas, el desempeño de la potencia reactiva va en función de los elementos inductivos que

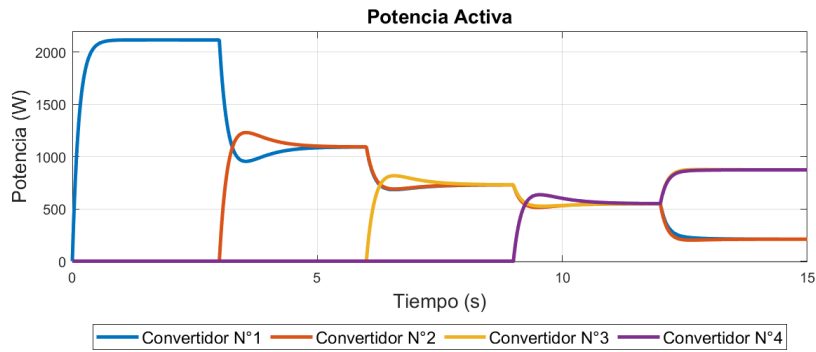


Figura 3.14: Señales de potencia activa en la MG.

posee la MG, sin embargo, se puede ver que también el control droop cumple con su objetivo de manera sobresaliente (ver Fig. 3.15).

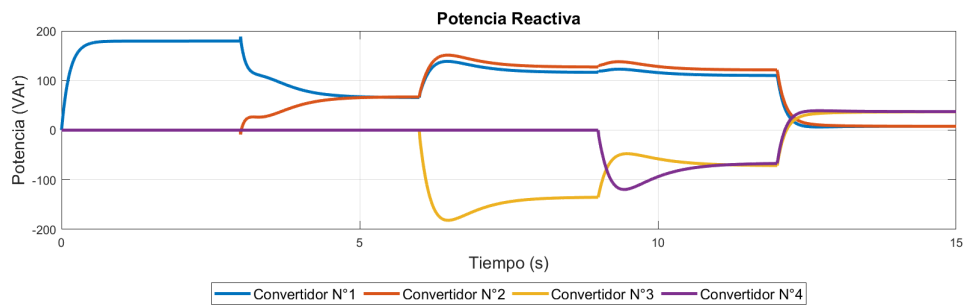


Figura 3.15: Potencia reactiva en la MG.

3.4. Análisis de Resultados

La plataforma de simulación desarrollada ha sido evaluada considerando cargas, transformadores, líneas de transmisión e interruptores de conexión y desconexión. El desempeño de los convertidores de potencia en la MG se realizó con diferentes configuraciones y ante diferentes condiciones de trabajo como: conexión y desconexión de elementos, aumentos de carga durante la operación y cortes en las líneas de transmisión.

Se pudo ver el funcionamiento de la MG con un solo tipo de convertidores como es el caso de los formadores de red y también con la combinación de convertidores formadores de red y alimentadores de red. Cada tipo de convertidor internamente posee ecuaciones y algoritmos de control que permiten el funcionamiento de la MG aislada.

En el caso de los convertidores formadores de red, se pudo observar que el control droop permite compartir potencia entre los convertidores activos en la MG, como se pudo ver la aplicación de este método introduce desviaciones de voltaje y frecuencia en todo el sistema. La compartición de potencia activa se realiza de manera perfecta debido a que la frecuencia durante el tiempo de operación permanece prácticamente constante, sin sufrir variaciones considerables. Por otro lado, no se consigue repartir adecuadamente la potencia reactiva, ya que su desempeño depende de la amplitud de voltaje generada por los convertidores formadores de red, como se pudo observar en todos los casos existen variaciones de voltaje, impidiendo tener una compartición perfecta de potencia reactiva, no obstante, el controlador implementado realiza una ecualización simple de esta potencia.

Por otro lado, el control PI de potencia implementado en los convertidores alimentadores dieron excelentes resultados, se puede ver como la referencia de potencia establecida alcanza su objetivo con cero errores en estado estable. Obtener a la salida una señal corregida de potencia permite a este tipo de convertidores inyectar la cantidad de corriente requerida por el usuario hacia la MG.

Finalmente, la interacción de los dos tipos de convertidores con sus respectivos elementos dio como resultado un desempeño excelente en la MG aislada. Se logró demostrar que la plataforma realizada es robusta y permite agregar tantos convertidores como sea necesario, esto es posible realizando ciertas modificaciones en el archivo de configuración de Matlab.

Capítulo 4

Conclusiones y Trabajo a futuro

4.1. Conclusiones

Varios modelos de microrredes en modo aislado se obtuvieron a partir de una plataforma de simulación que permite al usuario editarla y comprenderla, poniéndolo a prueba con diferentes valores numéricos. En estas plataformas se pueden modificar tanto convertidores de alimentación de red como formadores de red y se puede observar a través de gráficos expuestos en el capítulo anterior.

Cada caso de conexión entre convertidores resulta tener una gran cantidad de posibilidades. Por esta razón se estudió tres maneras generales para explorar las alternativas básicas, de las cuales se pueden tomar en consideración para otros estudios más exhaustivos.

La caracterización de los elementos básicos de la simulación a través de valores nominales de laboratorio y ecuaciones numéricas, han permitido identificar el comportamiento de cada parte del entorno simulado y permiten predecir el gráfico de potencia activa y reactiva para cada caso estudiado.

El estudio de cada forma de interconexión de convertidores de potencia han permitido demostrar la facilidad y precisión de trabajo de cada uno de estos. De esta manera se considera que el caso más versátil es el de interconexión de varios convertidores formadores de red, debido a que la interconexión entre ambos convertidores, siempre resulta en que es necesario un convertidor formador de red para un funcionamiento estable.

4.2. Trabajo a futuro

El trabajo a futuro se orientará al estudio de distintas formas de conexión entre convertidores y diferentes estrategias para alcanzar resultados más precisos e implementarlos de una manera tangible en un ambiente controlado.

De igual manera se implementarán estudios a diferentes escalas para averiguar el comportamiento de los elementos del sistema como el voltaje, la corriente y las potencias activa y reactiva, conociendo alguna manera de mejorar la simulación.

Bibliografía

- [1] R. H. Lasseter, “Microgrids,” *2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, vol. 1, pp. 305–308, enero 2002. doi: 10.1109/PESW.2002.985003.
- [2] O. Mo, S. Darco, and J. A. Suul, “Evaluation of Virtual Synchronous Machines with Dynamic or Quasi-Stationary Machine Models,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 7, pp. 5952–5962, 2017.
- [3] X. Wang, F. Blaabjerg, and W. Wu, “Modeling and analysis of harmonic stability in an AC power-electronics- based power system,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 12, pp. 6421–6432, 2014.
- [4] X. Meng, J. Liu, and Z. Liu, “A Generalized Droop Control for Grid-Supporting Inverter Based on Comparison between Traditional Droop Control and Virtual Synchronous Generator Control,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, no. 6, pp. 5416–5438, 2019.
- [5] M. Rasheduzzaman, B. H. Chowdhury, and S. Bhaskara, “Converting an old machines lab into a functioning power network with a microgrid for education,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, no. 4, pp. 1952–1962, 2014.
- [6] A. S. Vijay, S. Doolla, and M. C. Chandorkar, “Real-Time Testing Approaches for Microgrids,” *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 5, pp. 1356–1376, sep 2017.

- [7] X. Zhou, X. Gou, T. Huang, and S. Yang, “Review on Testing of Cyber Physical Systems: Methods and Testbeds,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 52179–52194, sep 2018.
- [8] H. M. Antunes, S. M. Silva, D. I. Brandao, R. V. Ferreira, and B. D. J. C. Filho, “Analysis of a grid-forming converter based on repetitive control in centralized AC microgrid,” *2017 IEEE 8th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems, PEDG 2017*, 2017.
- [9] R. Lasseter, A. Akhil, C. Marnay, J. Stephens, J. Dagle, R. Guttromson, A. S. Meliopoulos, R. Yinger, J. Eto, R. Lasseter, A. Akhil, C. Marnay, J. Stephens, J. Dagle, R. Guttromson, A. S. Meliopoulos, R. Yinger, and J. Eto, “The certs microgrid concept,” Abril 2002.
- [10] J. Miret, J. L. G. D. Vicuña, R. Guzmán, A. Camacho, and M. M. Ghahderijani, “A flexible experimental laboratory for distributed generation networks based on power inverters,” *Energies 2017, Vol. 10, Page 1589*, vol. 10, p. 1589, Octubre 2017.
- [11] J. Rocabert, A. Luna, F. Blaabjerg, and P. Rodríguez, “Control of power converters in AC microgrids,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 11, pp. 4734–4749, 2012.
- [12] D. P. Estévez, “Control of grid-tied converters in microgrids,” *Universidad de Vigo*, pp. 19–159, Febrero 2019.
- [13] W. Zhang, D. Remon, and P. Rodriguez, “Frequency support characteristics of gridinteractive power converters based on the synchronous power controller,” *IET Renewable Power Generation*, vol. 11, no. 4, pp. 470–479, 2017.
- [14] J. Chen, F. Milano, and T. O’Donnell, “Assessment of Grid-Feeding Converter Voltage Stability,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 34, no. 5, pp. 3980–3982, 2019.
- [15] X. Quan, A. Q. Huang, and H. Yu, “A Novel Order Reduced Synchronous Power Control for Grid-Forming Inverters,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 12, pp. 10989–10995, 2020.

- [16] L. Meng, A. Luna, E. R. Díaz, B. Sun, T. Dragicevic, M. Savaghebi, J. C. Vasquez, J. M. Guerrero, M. Graells, and F. Andrade, “Flexible System Integration and Advanced Hierarchical Control Architectures in the Microgrid Research Laboratory of Aalborg University,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 52, no. 2, pp. 1736–1749, 2016.
- [17] N. W. Lidula and A. D. Rajapakse, “Microgrids research: A review of experimental microgrids and test systems,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 1, pp. 186–202, 2011.
- [18] Q. C. Zhong, “Robust droop controller for accurate proportional load sharing among inverters operated in parallel,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 4, pp. 1281–1290, 2013.
- [19] C. Buccella, C. Cecati, and H. Latafat, “Digital control of power converters - A survey,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 8, no. 3, pp. 437–447, 2012.
- [20] J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, and J. Matas, “Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids—A General Approach Toward Standardization,” *New Zealand Journal of Educational Studies*, vol. 58, no. 1, pp. 35–51, 2011.
- [21] M. Chen, D. Zhou, A. Tayyebi, E. Prieto-Araujo, F. Dörfler, and F. Blaabjerg, “Generalized Multi-variable Grid-Forming Control Design for Power Converters,” vol. 14, no. 8, pp. 1–10, 2021.
- [22] H. H. Zeineldin, “A Q-f droop curve for facilitating islanding detection of inverter-based distributed generation,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, no. 3, pp. 665–673, 2009.
- [23] H. H. Zeineldin, E. F. El-Saadany, and M. M. Salama, “Distributed generation micro-grid operation: Control and protection,” *Power Systems Conference 2006: Advanced Metering, Protection, Control, Communication and Distributed Resources, PSC*, pp. 105–111, 2006.
- [24] M. G. Taul, X. Wang, P. Davari, and F. Blaabjerg, “An Overview of Assessment Methods for Synchronization Stability of Grid-Connected Converters under Severe Symmetrical Grid Faults,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, no. 10, pp. 9655–9670, 2019.

- [25] X. Wang, F. Blaabjerg, and W. Wu, "Modeling and analysis of harmonic stability in an AC power-electronics- based power system," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 12, pp. 6421–6432, 2014.
- [26] M. Huang, Y. Peng, C. K. Tse, Y. Liu, J. Sun, and X. Zha, "Bifurcation and Large-Signal Stability Analysis of Three-Phase Voltage Source Converter under Grid Voltage Dips," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 11, pp. 8868–8879, 2017.
- [27] C. X. Rosero, C. Vaca, M. Gavilanez, I. Iglesias, and R. Rosero, "Towards a Simulation Platform for Islanded Microgrids based on Grid-Forming Power Converters," pp. 1–6, 2021.
- [28] Y. Han, H. Li, P. Shen, E. A. A. Coelho, and J. M. Guerrero, "Review of Active and Reactive Power Sharing Strategies in Hierarchical Controlled Microgrids," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, pp. 2427–2451, mar 2017.
- [29] A. Cervin, D. Henriksson, B. Lincoln, J. Eker, and K. E. Arzen, "How Does Control Timing Affect Performance?," *IEEE Control Systems*, vol. 23, no. 3, pp. 16–30, 2003.
- [30] F. de Andrade, M. Castilla, and B. D. Bonatto, *Basic Tutorial on Simulation of Microgrids Control Using MATLAB® & Simulink® Software*. SpringerBriefs in Energy.
- [31] S. P. Systems, "https://www.mathworks.com/products/simscape_electrical.html," 2021.
- [32] C. X. Rosero, C. Vaca, M. Gavilanez, I. Iglesias, and R. Rosero, "Towards a simulation platform for islanded microgrids based on grid-forming power converters," pp. 1–6, 2021.

Anexos

Anexo 1: Declaración de variables para convertidores formadores de red

```
clear all; close all;  
global ts  
global wo  
global m n  
global numPQ denPQ Vn Lv  
global num_generators  
global kernel_drift kernel_offset  
global kernel_start  
global tr  
global vtx  
global frameSize  
global tControl tBreak tStepLoad
```

```
global driftSoft timeWhenDrift

%% Fundamental data
tstop = 50; %simulation time
tControl = [0 3 6 9]; % time at which controllers enable
tBreak = [12 0]; %time when partitions occur [(2 subgrids) (local load
%at DGI is disabled)]
tStepLoad = [200 70]; %[Disabled Enabled]
timeWhenDrift = 25;

ts = 100e-6; %sampling time on each processor

vtx = 100e6; %data rate
frameSize = 80;
tr = 0.1e-3; %transmission rate (%time at which the messages are sent)
data_rate = tr;
loss = 0;

nodes = 4
num_generators=nodes;
kernel_offset=zeros(1,num_generators);
kernel_drift=[-4.7000e-06 -3.1000e-06 0 2.7000e-06]*0;% drifts
driftSoft = [1 1.00001 0.9999 1.00002];

kernel_start = zeros(1,num_generators);
```

```
model = [ 'nodes' num2str(nodes) ];

%% control parameters %%
m = [1e-4 1e-4 1e-4 1e-4];
n = [1e-3 1e-3 1e-3 1e-3];

%virtual impedance
Lv = [3.76e-3 3.76e-3 3.76e-3 3.76e-3];

%% electrical parameters %%
Vn=110*sqrt(2);
wo=2*pi*60;

R_conv=[0.5 0.5 1.3 1.3];
L_conv=[1 1 0.6 0.6]*1e-3;

R_line = [0.001 0.001 0.001];
L_line = [0.75e-3 0.3e-3 0.3e-3];

R_load = [86 20];
L_load = [0 0];

R_trans = [(0.62e-3)*cosd(37.01) (0.62e-3)*cosd(37.01)
(1.31e-3)*cosd(9.87) (1.31e-3)*cosd(9.87)];
```

```
L_trans = [(0.62e-3)*sind(37.01) (0.62e-3)*sind(37.01)
(1.31e-3)*sind(9.87) (1.31e-3)*sind(9.87)];
```

```
%% Power filter
num=[0.02*wo]; den=[1 0.02*wo];
sysd=c2d(tf(num,den),ts,'tustin');
[numPQ,denPQ]=tfdata(sysd,'v');

load_system(model);

tic
sim(model);
toc

%diffPot = max(P(end,:)) - min(P(end,:));

%%
plot_P_F_V_Q; %plot

%name = sprintf('Case%dNODrift_Droop.mat', i)

%save(name) %save
```

Anexo 2: Procesador para convertidores formadores de red

```
function [exectime, data] = processor(seg, data)
```

```
switch seg
  case 1

    %% intensity readings
    data.ia = ttAnalogIn(1);
    data.ib = ttAnalogIn(2);

    if data.time < data.timeWhenDrift
      ts = data.ts;
    else
      ts = data.ts*data.driftSoft(data.a);
    end

    data.time = data.time + ts;

    if data.time>=data.tControl(data.a)
      if
        (data.time>=data.tControl(2)&&(data.controlOut(2)==0))
          data.t=0;
          data.wc = (19/20)*data.wo;
          data.rampW = 0;
          data.controlOut(2) = 1;
        end
      end

      if
```

```
(data.time>=data.tControl(3)&&(data.controlOut(3)==0))

    data.t=0;

    data.wc = (19/20)*data.wo;

    data.rampW = 0;

    data.controlOut(3) = 1;

end

if

(data.time>=data.tControl(4)&&(data.controlOut(4)==0))

    data.t=0;

    data.wc = (19/20)*data.wo;

    data.rampW = 0;

    data.controlOut(4) = 1;

end

%% Droop algorithm

data.t = data.t + ts;

if data.rampW == 0

    data.wc = data.wc + 0.1;

    if data.wc >= data.wo

        data.wc = data.wo;

        data.rampW = 1;

    end

end
```

```
end

wi = data.wc - data.m(data.a)*data.P; %only
droop

ph = wi*data.t;% - mp*data.P;

data.va = (data.Vn -
data.n(data.a)*data.Q)*sin(ph);
data.vb = -(data.Vn -
data.n(data.a)*data.Q)*cos(ph);

data.va = data.va + data.Lv*data.wc*data.ib;
data.vb = data.vb - data.Lv*data.wc*data.ia;

data.p = (3/2)*( data.va*data.ia +
data.vb*data.ib);
data.q = (3/2)*(-data.va*data.ib +
data.vb*data.ia);

data.V = sqrt(data.va^2 + data.vb^2)/sqrt(2);

data.f = wi/(2*pi);

%% Filter for active and reactive power
```

```
signals

data.P = (data.num(1)*data.p +
data.num(2)*data.p - data.den(2)*data.P)/
data.den(1);
data.Q = (data.num(1)*data.q +
data.num(2)*data.q - data.den(2)*data.Q)/
data.den(1);

if ph > (2*pi)
    %t = ((ph - 2*pi) + mp*data.P)/(wi);
    data.t = (ph - 2*pi)/wi;
end

else
    data.P=0;
    data.Q=0;
    data.V=0;
    data.f=0;
    data.va=0;
    data.vb=0;
    data.p=0;
    data.q=0;
end

exectime = data.ts/2;
```



```
case 2
    ttAnalogOut(1, data.va);
    ttAnalogOut(2, data.vb);
    ttAnalogOut(3, data.P);
    ttAnalogOut(4, data.Q);
    ttAnalogOut(5, data.V);
    ttAnalogOut(6, data.f);
    ttAnalogOut(7, data.time);

    exectime = -1;
end
```

Anexo 3: Declaración de variables para convertidores alimentadores de red

```
clear all; close all;
global ts
global wo
global m n
global numPQ denPQ Vn Lv
global num_generators
global kernel_drift kernel_offset
```

```
global kernel_start
global trp
global vtx
global frameSize
global tControl tBreak tStepLoad
global driftSoft timeWhenDrift
global P_ref
global Q_ref
global kpp
global kip
global numPQ_1 denPQ_1
global tGFOff

%% Fundamental data
tstop = 100; %simulation time
tControl = [0 2 5 8]; % time at which controllers enable
tBreak = [10 0]; %time when partitions occur
[(2 subgrids) (local load %at DG1 is disabled)]
tStepLoad = [200 70]; %[Disabled Enabled]
timeWhenDrift = 25;
tGFOff = [0 0 0];

ts = 100e-6; %sampling time on each processor
vtx = 100e6; %data rate
frameSize = 80;
```

```
tr = 0.1e-3; %transmission rate (%time at which the
messages are sent)
data_rate = tr;
loss = 0;

nodes = 3;
num_generators=nodes;
kernel_offset=zeros(1,num_generators);
kernel_drift=[-4.7000e-06 -3.1000e-06 0 2.7000e-06]*0;%
drifts
driftSoft = [1 1.00001 0.9999 1.00002];

kernel_start = zeros(1,num_generators);

model = ['nodes' num2str(nodes)];

%% control parameters %%
m = [1e-4 1e-4 1e-4 1e-4];
n = [1e-3 1e-3 1e-3 1e-3];

%virtual impedance
Lv = [3.76e-3 3.76e-3 0 0];

%% electrical parameters %%
Vn=110*sqrt(2);
```

```
wo=2*pi*60;

%% parametros grid-feeding
P_ref=600; %—>I=2A
Q_ref=0;

kpp = 0;
kip = 15;

R_conv=[0.5 0.5 0.5 0.5];
L_conv=[1 1 1 1]*1e-3;

R_line = [0.001 0.001 0.001];
L_line = [0.75e-3 0.3e-3 0.3e-3];

R_load = [22 22 86];
L_load = [0 0 0];

R_trans = [(0.62e-3)*cosd(37.01) (0.62e-3)*cosd(37.01)
(1.31e-3)*cosd(9.87) (1.31e-3)*cosd(9.87)];
L_trans = [(0.62e-3)*sind(37.01) (0.62e-3)*sind(37.01)
(1.31e-3)*sind(9.87) (1.31e-3)*sind(9.87)];

%% Power filter
```

```

num=[0.02*wo]; den=[1 0.02*wo];
sysd=c2d(tf(num,den),ts,'tustin');
[numPQ,denPQ]=tfdata(sysd,'v');

%% Power Controller
num_1=[kpp kip]; den_1=[1 0];
sysd=c2d(tf(num_1,den_1),ts,'tustin');
[numPQ_1,denPQ_1]=tfdata(sysd,'v');

load_system(model);

tic
sim(model);
toc

%diffPot = max(P(end,:)) - min(P(end,:));

%%
plot_P_F_V_Q; %plot

%name = sprintf('Case%dNODrift_Droop.mat', i)

%save(name) %save

```

Anexo 4: Procesador para convertidores alimentadores de red

```

function [exectime, data] = processor_1(seg, data)

switch seg

```

case 1

```
%% intensity readings
data.iia = ttAnalogIn(1);
data.iib = ttAnalogIn(2);
data.va = ttAnalogIn(3);
data.vb = ttAnalogIn(4);

if data.time < data.timeWhenDrift
    ts = data.ts;
else
    ts = data.ts*data.driftSoft(data.a);
end

data.time = data.time + ts;

if data.time >= data.tControl(data.a)
    if
        (data.time >= data.tControl(2) && (data.controlOut(2) == 0))
            data.t = 0;
            data.wc = (19/20)*data.wo;
            data.rampW = 0;
            data.controlOut(2) = 1;
        end
    end
end
```

```
if
    (data.time>=data.tControl(3)&&(data.controlOut(3)==0))
    data.t=0;
    data.wc = (19/20)*data.wo;
    data.rampW = 0;
    data.controlOut(3) = 1;
end

if
    (data.time>=data.tControl(4)&&(data.controlOut(4)==0))
    data.t=0;
    data.wc = (19/20)*data.wo;
    data.rampW = 0;
    data.controlOut(4) = 1;
end

if data.time>=data.tGOff(data.a)
    if
        (data.time>=data.tGOff(2)&&(data.controlOutB(2)==0))
        data.t=0;
        data.wc = (19/20)*data.wo;
        data.rampW = 0;
        data.controlOutB(2) = 1;
        data.P_ref=750;
    end
end
```

```

        end
    end

    %%
    data.t = data.t + ts;

    if data.rampW == 0
        data.wc = data.wc + 0.1;

        if data.wc >= data.wo
            data.wc = data.wo;
            data.rampW = 1;
        end
    end

end

%% Power equations
data.V = sqrt(data.va^2 + data.vb^2)/sqrt(2);
data.p = (3/2)*( data.va*data.iia +
data.vb*data.iib);
data.q = (3/2)*(-data.va*data.iib +
data.vb*data.iia);
wi = data.wc - data.m(data.a)*data.P; %only
droop
ph = wi*data.t;% - mp*data.P;
data.f = data.wo/(2*pi);

```



```

data.f = wi/(2*pi);

%% Filter for active and reactive power
signals %%
data.P = (data.num(1)*data.p +
data.num(2)*data.p - data.den(2)*data.P)/
data.den(1);
data.Q = (data.num(1)*data.q +
data.num(2)*data.q - data.den(2)*data.Q)/
data.den(1);

%% Control de potencia %%
data.pref=data.P_ref-data.P;
data.qref=data.Q_ref-data.Q;
data.Pref = (data.num_1(1)*data.pref +
data.num_1(2)*data.pref -
data.den_1(2)*data.Pref)/data.den_1(1);
data.Qref = (data.num_1(1)*data.qref +
data.num_1(2)*data.qref -
data.den_1(2)*data.Qref)/data.den_1(1);

data.iia = (2/3)*(data.va*data.Pref +
data.vb*data.Qref)/(data.va^2 + data.vb^2);
data.iib = (2/3)*(data.vb*data.Pref -

```

```
        data.va*data.Qref)/(data.va^2 + data.vb^2);
else
    data.P=0;
    data.Q=0;
    data.V=0;
    data.f=0;
    data.va=0;
    data.vb=0;
    data.p=0;
    data.q=0;
    data.ii a=0;
    data.ii b=0;
end

exectime = data.ts/2;

case 2
    ttAnalogOut(1, data.ii a);
    ttAnalogOut(2, data.ii b);
    ttAnalogOut(3, data.P);
    ttAnalogOut(4, data.Q);
    ttAnalogOut(5, data.V);
    ttAnalogOut(6, data.f);
    ttAnalogOut(7, data.time);
```

```
    exectime = -1;
end
```

Anexo 5: Kernel

```
function kernel_init(arg)
global ts wo numPQ denPQ Vn Lv num_generators m n
global kernel_drift kernel_offset kernel_start tr
global tControl
global driftSoft timeWhenDrift

a=arg(1);

%Persistent variables
data.tControl = tControl;

data.num=numPQ;
data.den=denPQ;

data.a=a;
data.ts=ts;
data.m = m;
data.n = n;
```

```
data.wo=wo;
data.P=0;
data.Q=0;
data.dw=0;
data.Vn=Vn;
data.V=0;
data.Lv=Lv(a);
data.ts=ts;
data.t=0;
data.va=0;
data.vb=0;
data.va_old = 0;
data.vb_old = 0;
data.p=0;
data.q=0;
data.f=0;
data.estimated_e=Vn;
data.driftSoft = driftSoft;
data.timeWhenDrift = timeWhenDrift;

data.time=0;

data.rampW = 0;
data.wc = 19/20*wo;
data.controlOut = [0 0 0 0];
```

```

%%%

data.mdrift=kernel_drift(a);

data.moffset=kernel_offset(a);

data.start=kernel_start(a);

data.num_generators=num_generators;

data.tr=tr;

%create the task

ttInitKernel('prioEDF');

ttCreatePeriodicTask('dintegral_w_task', 0, ts,
'processor', data);

end

```

Anexo 6: Librería TrueTime

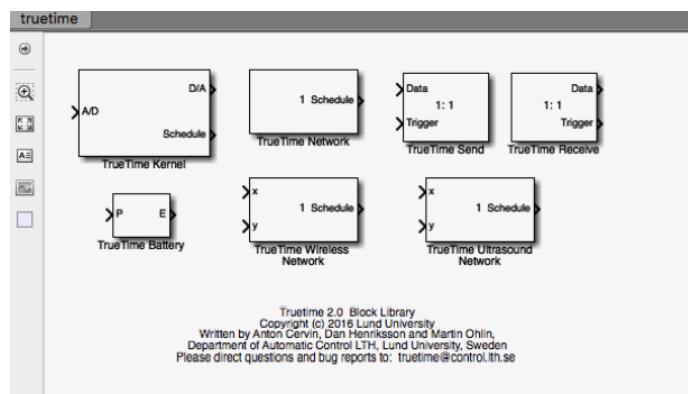


Figura 4.1: Librería TrueTime