



Facultad de
Posgrado

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE POSGRADO
MAESTRÍA DE MECATRÓNICA MENCIÓN EN PROCESOS
INDUSTRIALES

**“Control de Modo Deslizante para Compartición de Potencia y
Regulación de Frecuencia en Microrredes Aisladas”**

Trabajo de Titulación previo a la obtención del Título de Magister en
Mecatrónica con Mención en Procesos Industriales

Autor:

ALEX DANILO BASTIDAS JÁCOME

Tutor:

CARLOS XAVIER ROSERO CHANDI

Ibarra - Ecuador

2023



Facultad de
Posgrado

CERTIFICACIÓN DE DIRECTOR DE TESIS

Como director del trabajo de investigación con el tema: "Control de Modo Deslizante para Compartición de Potencia y Regulación de Frecuencia en Microrredes Aisladas", trabajo que fue realizado por Alex Danilo Bastidas Jácome, previo a la obtención del título de Magister en Mecatrónica mención Procesos Industriales, doy fe de que el trabajo mencionado cumple con los requisitos y méritos suficientes para ser apoyado públicamente en los tribunales para ser seleccionado oportunamente.

Ibarra, 14 de noviembre de 2023



PhD. Carlos Xavier Rosero Chandi

TUTOR



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

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

1. 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 CONTACTO | |
|-----------------------------|---|
| CÉDULA DE IDENTIDAD: | 1003507736 |
| APELLIDOS Y NOMBRES: | Alex Danilo Bastidas Jácome |
| DIRECCIÓN: | Barrio Pilanquí, Pasaje E 3-15 y Pasaje 4 |
| EMAIL: | adbastidas@utn.edu.ec |
| TELÉFONO FIJO: | 062520537 |
| TELÉFONO MÓVIL: | 0993055180 |

| DATOS DE LA OBRA | |
|--------------------------------|---|
| TÍTULO: | Control de Modo Deslizante para Compartición de Potencia y Regulación de Frecuencia en Microrredes Aisladas |
| AUTOR: | Alex Danilo Bastidas Jácome |
| FECHA: | 14 de noviembre de 2023 |
| PROGRAMA: | POSGRADO |
| TÍTULO POR EL QUE OPTA: | Magister en Mecatrónica con Mención en Procesos Industriales |
| DIRECTOR: | Carlos Xavier Rosero Chandí |

2. CONSTANCIAS.

El autor (es) manifiesta (n) 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 (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, 14 de noviembre de 2023

EL AUTOR:



Alex Danilo Bastidas Jácome



Facultad de
Posgrado

REGISTRO BIBLIOGRÁFICO

Guía: POSGRADO – UTN

Fecha: Ibarra, 14 de noviembre de 2023

Alex Danilo Bastidas Jácome: “Control de Modo Deslizante para Compartición de Potencia y Regulación de Frecuencia en Microrredes Aisladas” / **GRADO MAGISTER EN MECATRÓNICA MENCIÓN PROCESOS INDUSTRIALES**, Universidad Técnica del Norte, Ibarra.

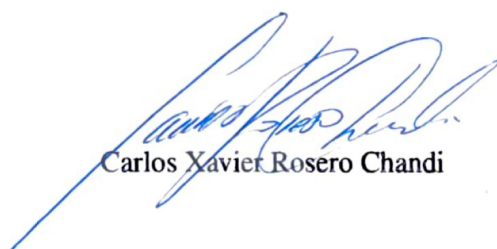
DIRECTOR: PhD. Carlos Xavier Rosero Chandi

El objetivo general de esta tesis fue: Diseñar un control de modo deslizante para compartición de potencia y regulación de frecuencia en microrredes aisladas.

Entre los objetivos específicos estaban: Recopilar la información sobre control en modo deslizante sobre microrredes aisladas que bosquejen el estado del arte.

Diseñar el controlador de modo deslizante que distribuya la potencia activa y regule frecuencia en una microrred aislada.

Probar la estabilidad de la propuesta de control tanto analíticamente como en simulación.



Carlos Xavier Rosero Chandi



Alex Danilo Bastidas Jácome

DEDICATORIA

Para Doménica, mi esfuerzo y dedicación en la obtención de este título han sido impulsados por el deseo profundo de ofrecerte un ejemplo de perseverancia y determinación. Sin embargo, no tienes obligación alguna para que sigas un camino similar o incluso superior al mío. Lo que más anhelo para ti, es que encuentres tu propio camino. Que cada paso que tomes, cada decisión que afrontes, esté guiada por la luz de tus sueños y la paz de tu corazón. Sueña en grande, nunca dejes de sonreír y por sobre todo ¡sé feliz!

Para Gabriela, mi amada, mi compañera de sueños y realidades. Este logro lleva tu nombre tanto como el mío, porque cada paso que he dado ha sido tomado de la mano contigo. Gracias por ser mi fuente de inspiración, mi motivación inquebrantable y mi refugio en las tormentas. Gracias por la paciencia y la fuerza cuando incluso yo declinaba. El camino fue arduo, pero valió la pena por cada momento que compartimos y por el futuro que construiremos.

Para Pablo, Adriana, Andrés y Pame, quienes nunca dudaron de mi capacidad y siempre esperan más de mí, les prometo que les voy a llenar de orgullo. Quizá me tomó más de lo esperado, pero nunca perdieron la fe en mí, por eso quiero dedicarles el resultado de mi esfuerzo. Gracias por siempre apoyarme y ser mi soporte, eso me permite arriesgarme y saltar a esta aventura llamada vida.

Esto es por y para ustedes,

Danilo

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, mi más sentido agradecimiento a mi esposa, quien con hombro y espalda apoyaron este sueño que hoy es nuestra realidad. Gracias por tanto mi amor.

A mi hija que me regaló sus horas de juegos y compañía para poder culminar esta tarea. Te compensaré con el doble de amor y tiempo mi niña adorada.

A mis padres y hermanos quienes me apoyan incansablemente y nunca me han dejado solo. Sin ustedes no podría ser la persona que está consiguiendo esto el día de hoy.

A mi tutor Xavier, por ser un guía y amigo de años, gracias por ayudarme a culminar este trabajo. Has sido y serás una fuente de inspiración para mí, espero poder llegar un día a tu nivel.

A Cosme, por ser un gran ser humano y un excelente coordinador de carrera.

A la Universidad Técnica del Norte, mi alma mater, espero no sea la última vez que pise tus aulas.

Un día sin aprender algo nuevo, es un día perdido.

Alex Danilo

Índice

| | |
|---|-----------|
| Índice | 7 |
| Índice de figuras | 9 |
| Índice de tablas | 10 |
| 1 Introducción | 13 |
| 1.1 Planteamiento del problema | 13 |
| 1.2 Antecedentes | 13 |
| 1.3 Objetivos de la investigación | 16 |
| 1.3.1 Objetivo general | 16 |
| 1.3.2 Objetivos específicos | 16 |
| 1.4 Justificación | 17 |
| 1.5 Alcance | 17 |
| 2 Análisis literario | 19 |
| 2.1 Conceptos básicos de microrredes | 19 |
| 2.2 Control de microrredes | 20 |
| 2.2.1 Control jerárquico | 21 |
| 2.3 Control de modo deslizante | 22 |
| 2.4 Estado del arte del control de modo deslizante en microrredes aisladas | 24 |
| 2.4.1 Revisión de la literatura sobre el control de modo deslizante en microrredes aisladas | 24 |
| 3 Metodología | 27 |
| 3.1 Modelado matemático del sistema de microrred y del controlador | 27 |
| 3.1.1 Red de comunicaciones | 27 |
| 3.1.2 Red de eléctrica | 28 |
| 3.2 Diseño de los parámetros del controlador | 28 |
| 3.2.1 Delimitación del problema de control | 29 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.2.2 | Diseño del controlador de modo deslizante | 30 |
| 3.3 | Análisis de estabilidad del sistema de microrred con el controlador | 31 |
| 3.4 | Descripción del sistema de la microrred | 32 |
| 3.5 | Simulación de la microrred y del controlador en modo deslizante | 34 |
| 4 | Resultados y discusión | 38 |
| 4.1 | Presentación de los resultados de simulación | 38 |
| 4.1.1 | Control de frecuencia: Droop vs Control de modo deslizante | 38 |
| 4.1.2 | Compartición de potencia activa y regulación de frecuencia | 38 |
| 4.1.3 | Error en potencia activa y de frecuencia | 41 |
| 4.2 | Evaluación del desempeño del controlador | 43 |
| 5 | Conclusiones y recomendaciones | 48 |
| 5.1 | Conclusiones del estudio | 48 |
| 5.2 | Recomendaciones para futuras investigaciones | 49 |
| | Referencias | 50 |

Índice de figuras

| | | |
|----|---|----|
| 1 | Aplicación de los “convertidores de poder” en una red de generación distribuida . | 14 |
| 2 | Esquema de la estructura de una microrred | 20 |
| 3 | Esquema del control jerárquico en una microrred | 21 |
| 4 | Configuración de la microrred | 33 |
| 5 | Proceso de simulación | 35 |
| 6 | TrueTime Toolbox | 35 |
| 7 | Simulación de la red de generación distribuida | 36 |
| 8 | Simulación del nodo del convertidor de potencia | 37 |
| 9 | Reparto de la potencia activa | 39 |
| 10 | Reparto de la potencia reactiva | 39 |
| 11 | Regulación de la frecuencia | 40 |
| 12 | Regulación del voltaje | 40 |
| 13 | Control de potencia activa con control de modo deslizante | 41 |
| 14 | Control de frecuencia con control de modo deslizante | 42 |
| 15 | Control de potencia activa con droop | 42 |
| 16 | Control de frecuencia con droop | 43 |
| 17 | Error de potencia activa en función de la ganancia de compensación de frecuencia | 44 |
| 18 | Error de potencia activa en función de la tasa de transmisión | 44 |
| 19 | Error de frecuencia en función de la ganancia de la compensación de frecuencia | 45 |
| 20 | Error de frecuencia en función de la tasa de transmisión | 45 |

Índice de tablas

| | | |
|---|--|----|
| 1 | Parámetros de configuración de la microrred. | 34 |
| 2 | Comparativa entre el control de modo deslizante y el control droop-free. | 47 |

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE POSGRADO
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN MECATRÓNICA, MENCIÓN EN PROCESOS
INDUSTRIALES

“Control de Modo Deslizante para Compartición de Potencia y Regulación de Frecuencia en Microrredes Aisladas”

Autor: Alex Danilo Bastidas Jácome

Director: Carlos Xavier Rosero Chandi

Año: 2022

RESUMEN

La generación distribuida de energía eléctrica se ha convertido en una alternativa viable para la reducción de costos y la mejora de la eficiencia energética. Las microrredes aisladas son sistemas de generación distribuida que permiten la integración de fuentes de energía renovable y no renovable, y que pueden operar de manera autónoma o conectadas a la red eléctrica principal. Este trabajo diseña un controlador de modo deslizante que distribuye la potencia activa y regula la frecuencia en una microrred aislada. A partir de la recopilación de información sobre el control de modo deslizante en microrredes aisladas, se diseña el controlador y se prueba la estabilidad de la propuesta de control tanto analíticamente como en simulación en MATLAB/Simulink. Los resultados muestran que el Control por Modo Deslizante es más efectivo que el método tradicional de droop en términos de estabilidad y regulación de la frecuencia del sistema. Además, se destaca la colaboración entre nodos de generación distribuida para optimizar el suministro energético. En un panorama donde la estabilidad y eficiencia son fundamentales para la integración de fuentes de energía renovable y la operación confiable de sistemas distribuidos, el Control de Modo Deslizante emerge como una contribución valiosa para el diseño y operación de microrredes aisladas.

Palabras clave: Microrredes AC, control de modo deslizante, derivación de reloj, partición, control droop, inversor, control jerárquico

TECHNICAL UNIVERSITY OF THE NORTH
GRADUATE SCHOOL
MASTER'S PROGRAM IN MECHATRONICS, SPECIALIZATION IN INDUSTRIAL
PROCESSES
**“Sliding Mode Control for Power Sharing and Frequency Regulation in Islanded
Microgrids”**

Author: Alex Danilo Bastidas Jácome
Supervisor: Carlos Xavier Rosero Chandi
Year: 2022

ABSTRACT

Distributed power generation has become a viable alternative for reducing costs and improving energy efficiency. Islanded microgrids are distributed generation systems that allow the integration of renewable and non-renewable energy sources, and can operate autonomously or connected to the main power grid. This work designs a sliding mode controller that distributes the active power and regulates the frequency in an islanded microgrid. From the collection of information on sliding mode control in islanded microgrids, the controller is designed and the stability of the control proposal is tested both analytically and in simulation in MATLAB/Simulink. The results show that the Sliding Mode Control is more effective than the traditional droop method in terms of stability and frequency regulation of the system. In addition, the collaboration between distributed generation nodes to optimize energy supply is highlighted. In a scenario where stability and efficiency are fundamental for the integration of renewable energy sources and the reliable operation of distributed systems, Sliding Mode Control emerges as a valuable contribution to the design and operation of islanded microgrids.

Keywords: Microgrids, Sliding Mode Control, chattering, droop-free, power inverter.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del problema

Las microrredes (MG) tienen la capacidad de trabajar en modo aislado, un escenario en el que su dinámica no está dominada por la red principal. El funcionamiento en este modo exige unos mecanismos de control y gestión adecuados para cumplir con el equilibrio entre la demanda y la oferta.

Las MG en modo aislado pueden funcionar siguiendo una estructura de control jerárquica que abarca tres niveles: primario, secundario y terciario. Normalmente, cuando las MG funcionan en modo aislado, sólo se requieren las capas primaria y secundaria. La capa de control primaria incluye controladores locales que suelen aplicar el método de droop, para garantizar el reparto de la potencia activa y preservar la estabilidad de la MG. La capa de control secundaria compensa la inevitable desviación de la frecuencia en estado estacionario introducida por el control de droop mediante estrategias de control de tipo integral; su funcionamiento puede ser local o puede necesitar el intercambio de datos entre inversores. Como alternativa, otro tipo de funcionamiento de la MG en isla considera una estructura de control distribuido que evita el enfoque jerárquico. En particular, la estrategia droop-free proporciona un control de primera/segunda capa sin depender del enfoque de droop, pero utilizando una red de comunicación dispersa para el intercambio de datos entre inversores.

Por otro lado, los fallos en la red de comunicaciones pueden llevar a particiones de la red donde varios algoritmos de control trabajan en paralelo. Este escenario provoca desviaciones de estado estacionario tanto para la frecuencia como de la potencia activa, e incluso inestabilidad, dependiendo de la partición. Interdependencias entre la red eléctrica red eléctrica y la red de comunicaciones y los problemas de fiabilidad en las MG.

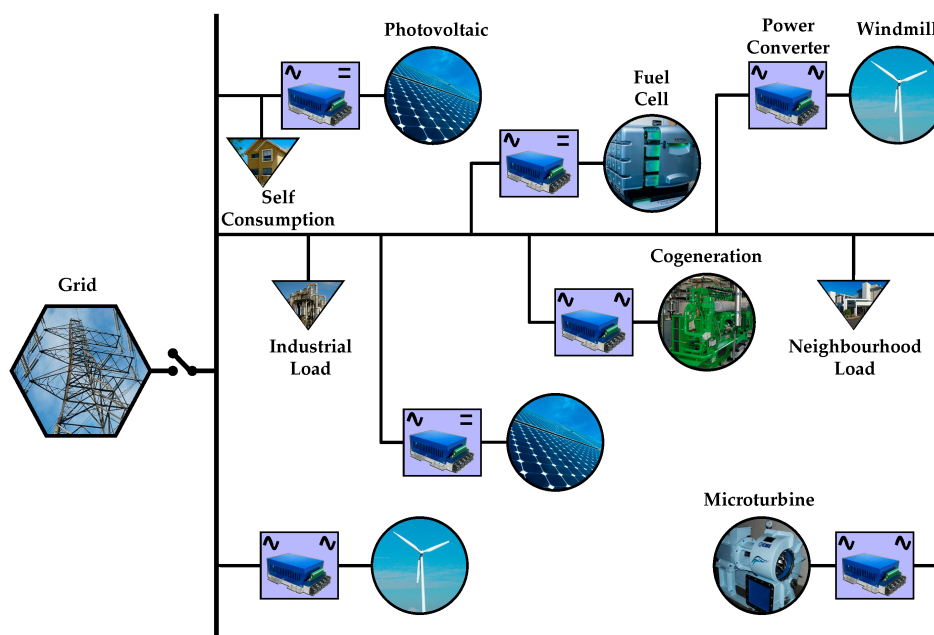
1.2. Antecedentes

La generación de energía eléctrica basada en fuentes renovables tiene dos escenarios principales: modo conectado a la red, en el que las fuentes de generación están conectadas a una red suministrada principalmente por grandes centrales eléctricas, y el modo aislado, en el que las

fuentes distribuidas, los dispositivos de almacenamiento de energía y las cargas componen una entidad autónoma que en su forma general puede denominarse microrred (Miret et al., 2017). Este es uno de los principales artículos a seguir en la presente investigación ya que definen los conceptos de microrredes aisladas, de fuentes distribuidas, las cargas y los dispositivos de almacenamiento y bosquejan de manera gráfica los componentes de distribución de la energía eléctrica con los “power converters”, como se puede observar en la figura 1.

Figura 1.

Aplicación de los “convertidores de poder” en una red de generación distribuida



Nota: Adaptado de Miret et al. (2017)

Los avances recientes en las tecnologías de energía renovable y los cambios en las infraestructuras de las empresas eléctricas han aumentado el interés de las empresas eléctricas en la utilización de los recursos de Generación Distribuida (GD) para generar electricidad (Adefarati & Bansal, 2016). En este artículo los autores trabajan con el concepto Generación Distribuida para la generación de electricidad, además presentan una tabla que recoge las diferentes definiciones de GD realizadas por varios autores. Logran definir el beneficio de la GD gracias a la alta tasa de consumo eléctrico global.

Pérez Fernández (2017) define a la microrred como un sistema eléctrico constituido por generadores distribuidos e interconectados, cargas y unidades distribuidas de almacenamiento

de energía eléctrica que cooperan entre sí comportándose colectivamente como un único sistema consumidor o productor. La coordinación del sistema incluye coordinación entre los dispositivos de control y protección, así como funcionalidades de gestión energética y control inteligente. Los componentes esenciales de una microrred aislada incluyen sistemas de generación distribuida, estrategias para la gestión de cargas, dispositivos de almacenamiento de energía, sistemas de supervisión y control del flujo de potencia, así como prácticas y procedimientos destinados al mantenimiento preventivo.

La elevada penetración de las centrales de generación distribuida, basadas en fuentes de energía renovables, está impulsando la conexión de los convertidores de potencia a la red eléctrica. Este concepto de generación permitiría formar redes locales, microrredes, cuando la red principal se caiga por cualquier tipo de contingencia en la red (Rocabert et al., 2011). En el documento citado se realiza la implementación de convertidores de potencia a la red eléctrica, para poder satisfacer las necesidades de electricidad cuando no funcione la red principal. Sin embargo, la conexión y desconexión de redes puede generar sobre corrientes transitorias que en esta investigación resuelven con un control on/off.

Las microrredes y en esta ocasión realizan una descripción general de las estructuras de las microrredes y de las técnicas de control a diferentes niveles. Este análisis se extiende también hacia el esquema de control jerárquico (CJ) de las microrredes, que, basado en la división de capas de control primario, secundario y terciario, se dedica a minimizar el coste de operación, coordinando los servicios de apoyo, mientras se maximiza la fiabilidad y la controlabilidad de las microrredes (Rocabert et al., 2012). Se selecciona el artículo ya que presentan el control jerárquico de las microrredes en tres capas: primario, secundario y terciario, definiciones importantes para el desarrollo investigativo de esta investigación que se centrará en la primera capa del CJ.

Siguiendo el modelo de la arquitectura de CJ presentado en la cita anterior de los sistemas de transmisión de energía, la estratificación del control primario, secundario y terciario se ha convertido en el paradigma de funcionamiento estándar de las microrredes aisladas (Dörfler et al., 2016). En el artículo citado se continúa trabajando en base a los niveles de control jerárquico y se enfocan en buscar diferentes tipos de control para la optimización económica del despacho de

energía CA. Llegan a la conclusión que el mejor control para llegar a satisfacer su objetivo es la adopción del control de droop, término acogido por varias investigaciones y que no presenta traducción al español hasta el momento de la realización de esta investigación.

Se demuestra mediante amplios experimentos en una microrred del rango de los megavatios que las desviaciones del reloj pueden perjudicar la sincronización de la frecuencia en sistemas de energía de baja inercia. Utilizando el modelo derivado, investigan los efectos de las desviaciones de reloj en el rendimiento de los inversores formadores de red controlados por droop con respecto a la sincronización de la frecuencia y el reparto de la potencia activa (Schiffer et al., 2017).

Álvarez Farriols (2020), expresa que los controladores a distintos niveles jerárquicos son ampliamente usados para el control de convertidores conectados en paralelo. Esta estrategia suele estar formada por tres lazos de control llamados primario tipo droop, secundario y terciario, los cuales interactúan con el resto de las capas que forman el control completo de la microrred DC.

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1. Objetivo general

Diseñar un control de modo deslizante para compartición de potencia y regulación de frecuencia en microrredes aisladas.

1.3.2. Objetivos específicos

- Recopilar la información sobre control de modo deslizante sobre microrredes aisladas que bosquejen el estado del arte.
- Diseñar el controlador de modo deslizante que distribuya la potencia activa y regule frecuencia en una microrred aislada.
- Probar la estabilidad de la propuesta de control tanto analíticamente como en simulación.

1.4. Justificación

Este trabajo propone un control de modo deslizante (SM) desarrollado en la primera capa del modelo jerárquico como una alternativa sencilla al control de droop que ofrece hacer que las microrredes sean fáciles de implementar. Así, el droop se sustituye por un controlador de conmutación que utiliza como superficie de deslizamiento el término de corrección de frecuencia introducido en el control sin droop. Esta superficie considera comunicaciones disponibles y relaciona la potencia activa del inversor local con el resto de la potencia activa de los inversores de las microrredes. Se analiza como ventaja como beneficio colateral del método propuesto la robustez contra los deslizamientos del reloj y las particiones de la red. Además, el enfoque puede constituir un punto de partida para otros estudios teóricos estudios teóricos y para un posterior análisis con políticas de nivel superior.

La aplicación de las técnicas de modo deslizante en las microrredes aisladas no es nueva sin embargo el trabajo presenta una estrategia de control para mejorar la estabilidad de las microrredes; independientemente de que se añada o se omita la generación distribuida en la microrred, la estabilidad está garantizada. Se busca mejorar la estabilidad transitoria durante el funcionamiento en isla y la estabilidad en estado estacionario. Además, el esquema introduce un control cooperativo de modo deslizante, inspirado en algoritmos de consenso de seguimiento distribuido e implementado en la segunda capa de una microrred. Esta solución proporciona un alto nivel de robustez contra las incertidumbres de los parámetros y las perturbaciones exógenas.

La Mecatrónica se caracteriza no solo en la implementación de procesos industriales, la importancia de la carrera se presenta en la automatización de procesos y la solución de problemas desde pequeños circuitos hasta grandes diseños de control. El diseño del controlador en modo deslizante para microrredes aisladas propone un avance significativo en los procesos de control no solo a las redes eléctricas sino a cualquier otro proceso de control al cual se adapten las características de estabilidad y se mejoren las respuestas en frecuencia de las señales.

1.5. Alcance

El presente proyecto pretende corroborar la estabilidad para microrredes aisladas desde el punto de vista de un análisis teórico y simulado a partir de software matemático para simulación.

Además, observando la dinámica de las ecuaciones citadas, se va a comprobar que la respuesta del sistema depende de la señal de reloj de los controladores y las comunicaciones que se utilicen las cuales provocan mayores desviaciones y errores. Por último, se logrará afirmar que los resultados simulados resultados simulados y el análisis teórico van de la mano y son, por tanto, válidos.

2. ANÁLISIS LITERARIO

2.1. Conceptos básicos de microrredes

Una microrred se define como una red local encargada de la producción y distribución de energía, con la capacidad de operar de forma independiente o conectada a la red eléctrica principal. Sus ventajas radican en la mejora de la seguridad, eficiencia, sostenibilidad y calidad del suministro eléctrico, particularmente al integrar fuentes de energía renovable y sistemas de almacenamiento. Sin embargo, la implementación de microrredes presenta desafíos, incluyendo la gestión de la tensión, la minimización de pérdidas, el control de la potencia reactiva y la coordinación entre generadores distribuidos (Martí et al., 2016).

Según estos autores, las microrredes aisladas son sistemas eléctricos eficientes y fiables que pueden suministrar energía a comunidades remotas y áreas donde la red eléctrica principal no está disponible. Además, las microrredes aisladas pueden mejorar la seguridad y la calidad del suministro eléctrico al reducir la dependencia de la red eléctrica principal y aumentar la resiliencia del sistema en caso de fallos en la red.

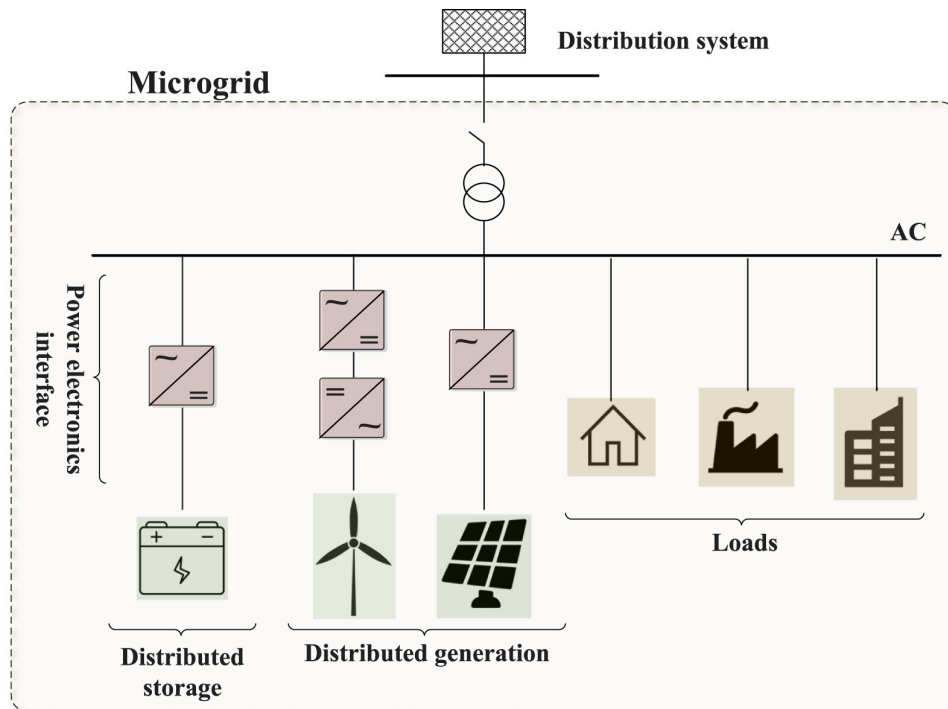
Sin embargo, la integración de sistemas de energía renovable en microrredes aisladas también presenta desafíos técnicos, como la variabilidad y la intermitencia de la producción de energía renovable y la necesidad de mantener la estabilidad y la calidad del suministro eléctrico. Por lo tanto, es importante implementar técnicas de control y gestión de energía eficaces y robustas para garantizar el rendimiento óptimo de las microrredes aisladas.

Resumidamente, las microrredes aisladas son sistemas eléctricos independientes que utilizan fuentes de energía renovable y sistemas de almacenamiento de energía para suministrar energía a comunidades remotas y mejorar la seguridad y la calidad del suministro eléctrico. Aunque la integración de sistemas de energía renovable en microrredes aisladas presenta desafíos técnicos, las técnicas de control y gestión de energía eficaces y robustas pueden garantizar el rendimiento óptimo del sistema.

En su estudio, Sandelic et al. (2022) proporcionan una representación detallada de una microrred en la Figura 2. Esta microrred no es una simple red eléctrica, sino que incorpora la generación de energía renovable a través de un enfoque de generación distribuida y alma-

Figura 2.

Esquema de la estructura de una microrred



Nota: Adaptado de Sandelic et al. (2022). Reliability aspects in microgrid design and planning. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Figura 1.

cenamiento. Este enfoque permite una mayor eficiencia y sostenibilidad en comparación con los métodos tradicionales de generación de energía. La microrred está conectada a una carga específica, que puede variar dependiendo de las necesidades del sistema. Además, también está conectada a la red eléctrica principal, lo que permite un flujo constante de energía y la capacidad de compensar cualquier déficit de energía que pueda surgir.

Lo más destacado de este sistema es su sofisticado sistema de control. Este sistema no solo maneja la producción de energía, sino que también se encarga del almacenamiento y distribución de la misma. Esto asegura que la energía producida se utilice de la manera más eficiente posible, minimizando el desperdicio y maximizando el uso de fuentes renovables.

2.2. Control de microrredes

El control en microrredes se encarga de supervisar y regular el funcionamiento de sistemas de energía distribuida a pequeña escala, que comprenden fuentes de energía renovable, almacenamiento de energía y cargas locales. Para lograrlo, se dividen en tres categorías de

control.

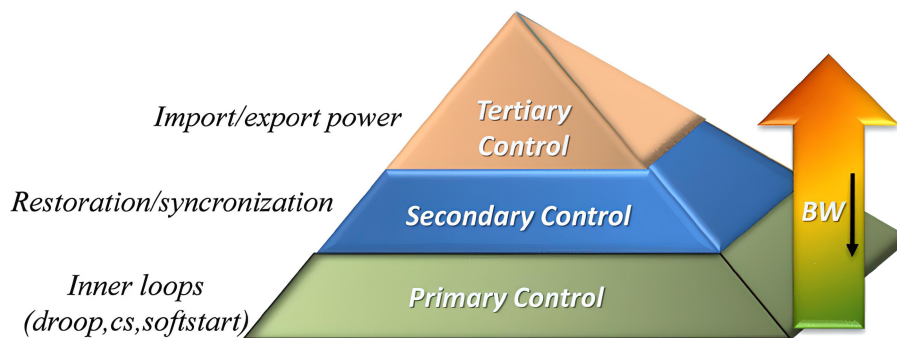
2.2.1. Control jerárquico

Bidram y Davoudi (2012), definen a la jerarquía de control como una estructura de tres niveles utilizada en los sistemas de microrredes. Esta estructura consta de tres niveles de control: primario, secundario y terciario. El control primario mantiene la estabilidad de voltaje y frecuencia de la microrred después del proceso de aislamiento. El control secundario compensa las desviaciones de voltaje y frecuencia causadas por la operación de los controles primarios. Finalmente, el control terciario administra el flujo de energía entre la microrred y la red principal y facilita una operación económicamente óptima.

El nivel superior es responsable de la toma de decisiones de alto nivel, como la planificación de la operación a largo plazo y la asignación de recursos. El nivel medio se ocupa de la coordinación y la supervisión de los dispositivos de control en tiempo real, como el control de tensión y el control de potencia activa y reactiva. Por último, el nivel inferior se encarga del control local de los dispositivos individuales, como los generadores y las cargas.

Figura 3.

Esquema del control jerárquico en una microrred



Nota: Adaptado de Guerrero et al. (2011). BW= Bandwidth (Banda ancha)

Para entender mejor la estrategia de control jerárquico propuesto por Guerrero et al. (2011), se puede observar la Figura 3, el enfoque jerárquico de cuatro niveles para gestionar la producción de energía. En el nivel 3, o control terciario, se regula el flujo de energía entre la microrred y la red principal. El nivel 2, o control secundario, se encarga de mantener los niveles eléctricos dentro de los valores requeridos, y puede incluir un bucle de control de sincronización para conectar o

desconectar la microrred del sistema de distribución de manera fluida. En el nivel 1, o control primario, se emplea comúnmente el método de control de caída para emular comportamientos físicos que aseguran la estabilidad y amortiguación del sistema, e incluso puede integrar un bucle de control de impedancia virtual para simular la impedancia de salida física. Por último, en el nivel 0, se abordan las cuestiones de regulación de cada módulo, incorporando bucles de control de corriente y voltaje, tanto de retroalimentación como de avance, y utilizando controles lineales y no lineales para regular la tensión de salida y controlar la corriente, manteniendo así la estabilidad del sistema.

2.3. Control de modo deslizante

V. Utkin et al. (2009), define al control deslizante como una estrategia de control no lineal empleada en sistemas caracterizados por incertidumbres y perturbaciones. Su finalidad radica en dirigir al sistema hacia una trayectoria predeterminada, aun en circunstancias de perturbaciones y posibles desviaciones respecto a la representación del modelo. Este método se diseñó para mejorar la robustez del sistema, permitiéndole mantenerse en curso incluso cuando enfrenta factores externos impredecibles y posibles errores en la descripción del modelo.

La técnica de control de modo deslizante se basa en la creación de una superficie de deslizamiento que sigue la dinámica del sistema y garantiza que el sistema permanezca dentro de ciertos límites. Según V. I. Utkin (1992), la superficie de deslizamiento en el control de modo deslizante actúa como un 'colchón' matemático que guía al sistema hacia un comportamiento deseado. Es elegida estratégicamente para garantizar la estabilidad y la convergencia del sistema en presencia de perturbaciones.

Delavari y Naderian (2017), realizan un trabajo con CMD y obtienen mejoras significativas en el rendimiento dinámico de la microrred, su capacidad para resistir perturbaciones y la calidad del voltaje de salida, en términos de reducción de distorsiones armónicas. El CMD desempeña un papel crucial en la mejora de la seguridad y eficiencia de las microrredes, haciendo frente a los desafíos inherentes a la operación de sistemas eléctricos descentralizados y dinámicos.

No existe una fórmula que describa el comportamiento del CMD, sin embargo, se plantea una idea general de cómo se podría representar matemáticamente. Se supone que se controla un

sistema representado por una ecuación diferencial

$$\dot{x} = f(x, u), \quad (1)$$

donde:

- \dot{x} es la derivada temporal del estado x .
- $f(x, u)$ es la función que describe la dinámica del sistema en términos del estado x y la señal de control u .

El objetivo es diseñar una superficie deslizante $S(x)$ de tal manera que cuando el sistema esté en la superficie deslizante, se cumpla

$$S(x) = 0, \quad (2)$$

además, la derivada temporal de la superficie deslizante $\dot{S}(x)$ se elige de manera que, cuando el sistema se encuentre en la superficie deslizante, se cumpla:

$$\dot{S}(x) = 0, \quad (3)$$

la señal de control u se calcula utilizando la superficie deslizante y sus derivadas

$$u = g(x, \dot{S}(x)), \quad (4)$$

la función $g(x, \dot{S}(x))$ se selecciona de acuerdo con las características específicas del sistema y la forma de la superficie deslizante.

La elección exacta de $S(x)$ y $g(x, \dot{S}(x))$ depende de la dinámica del sistema y los objetivos de control, por lo que no existe una única fórmula matemática universal para representar el control de modo deslizante, sino que se diseña de manera específica para cada aplicación y sistema.

En resumen, el control de modo deslizante es una técnica de control no lineal robusta y eficiente que se utiliza en sistemas eléctricos de potencia para mejorar la estabilidad y la respuesta transitoria del sistema. Se basa en la creación de una superficie de deslizamiento que

sigue la dinámica del sistema y se utiliza con éxito en microrredes aisladas para compartir la potencia y regular la frecuencia del sistema.

2.4. Estado del arte del control de modo deslizante en microrredes aisladas

En el contexto de la creciente adopción de sistemas de energía distribuida y la búsqueda de soluciones sostenibles en el sector eléctrico, las microrredes aisladas han emergido como una alternativa prometedora para la generación y distribución de energía en regiones remotas o aisladas de la red eléctrica convencional. Estas microrredes, que a menudo incorporan múltiples fuentes de energía renovable y sistemas de almacenamiento, plantean desafíos únicos en términos de control y gestión de la energía. En este contexto, el control de modo deslizante se ha destacado como una estrategia de control dinámico efectiva que puede mejorar la estabilidad, la respuesta transitoria y la eficiencia operativa de las microrredes aisladas. Este estado del arte tiene como objetivo explorar las investigaciones y avances más recientes en el campo del control de modo deslizante aplicado a microrredes aisladas, proporcionando una visión detallada de las técnicas, los enfoques y los resultados más relevantes que han contribuido a su desarrollo y aplicación práctica.

2.4.1. Revisión de la literatura sobre el control de modo deslizante en microrredes aisladas

He et al. (2021) en su trabajo “Design of Decentralized Adaptive Sliding Mode Controller for the Islanded AC Microgrid With Ring Topology” expresan que en el contexto de las microrredes aisladas, el control de voltaje representa un desafío crítico debido a la variabilidad de la generación de energía renovable y la aleatoriedad de las cargas locales durante el funcionamiento en modo aislado. Para abordar estos desafíos, se ha investigado el uso de estrategias de control deslizante de modo adaptativo descentralizado. Estas estrategias tienen como objetivo mitigar los problemas de vibración o “chattering” inherentes al control deslizante convencional al considerar la estructura en anillo de la microrred. En este enfoque, se crea un sistema de seguimiento de errores que modela las interacciones entre los diversos subsistemas, teniendo en cuenta la transmisión de potencia entre ellos y los valores nominales de los estados del sistema. La optimización de los parámetros del controlador se logra mediante algoritmos adaptativos.

Los resultados de las simulaciones respaldan la efectividad de estas estrategias de control deslizante adaptativo descentralizado al abordar los problemas de restricción de vibración en el control de voltaje de las microrredes aisladas. Además, se demuestra la estabilidad asintótica del sistema, lo que indica un control preciso y robusto. Sin embargo, se plantea la necesidad de futuras investigaciones para abordar sistemas no lineales y aquellos con retardos en el tiempo, lo que podría ampliar aún más la aplicabilidad de estas estrategias en el contexto de las microrredes aisladas (He et al., 2021).

Este estudio representa un avance significativo en el campo del control de microrredes aisladas y destaca la utilidad del control deslizante de modo adaptativo descentralizado para abordar desafíos específicos relacionados con la variabilidad y la estabilidad en estos sistemas.

El trabajo presentado por Rosero et al. (2023) en el artículo "Droop-Free Sliding-Mode Control for Active-Power Sharing and Frequency Regulation in Inverter-Based Islanded Microgrids", aborda un tema relevante en el control de microrredes aisladas, específicamente la regulación de la energía activa y la frecuencia. Este estudio se enfoca en la propuesta de un enfoque de control deslizante descentralizado para abordar estos desafíos específicos. A continuación, se presenta un estado del arte basado en la información proporcionada:

La investigación en el control de microrredes aisladas ha sido un área de interés en la búsqueda de soluciones eficientes y confiables para la gestión de sistemas energéticos distribuidos. Dentro de este contexto, el artículo de Rosero et al. (2023) se destaca por su enfoque en el control deslizante descentralizado para la regulación de la energía activa y la frecuencia en microrredes. El control deslizante ha sido objeto de investigación en el ámbito del control de sistemas no lineales debido a su capacidad para abordar problemas de oscilación o "chattering". Sin embargo, su aplicación en microrredes aisladas, especialmente en la gestión de energía activa y la regulación de la frecuencia, es un tema en evolución.

En términos de metodología, Rosero y sus colegas emplearon un análisis de Lyapunov, una técnica bien establecida para demostrar la estabilidad y el rendimiento de sistemas dinámicos. Además, realizaron simulaciones realistas en una plataforma que involucra cuatro inversores, lo que refleja un enfoque práctico y aplicado para evaluar su propuesta de control. La inclusión de simulaciones realistas es crucial para validar la viabilidad y eficacia de un enfoque de control en

situaciones del mundo real.

Los resultados de este trabajo subrayan la eficacia del enfoque de control deslizante propuesto. Se destaca su capacidad para lograr un intercambio de energía activa confiable, minimizando al mismo tiempo el uso del ancho de banda de la red de comunicación, un aspecto crucial en la operación de microrredes. Además, la robustez del enfoque contra los deslizamientos de reloj mejora la confiabilidad y la estabilidad del sistema, aspectos críticos en la operación de microrredes aisladas.

En resumen, el estudio de Rosero et al. (2023) contribuye significativamente al estado del arte en el control de microrredes aisladas, especialmente en lo que respecta a la regulación de la energía activa y la frecuencia. Este trabajo presenta un enfoque prometedor y robusto que puede ser relevante en la mejora del rendimiento general de las microrredes aisladas, y establece una base sólida para investigaciones futuras en áreas como la regulación de voltaje y el intercambio de energía reactiva en estos sistemas.

3. METODOLOGÍA

3.1. Modelado matemático del sistema de microrred y del controlador

La descripción y modelado de una microrred se articulan en torno a dos componentes fundamentales: la red de comunicaciones y la red eléctrica. La red de comunicaciones constituye el entramado digital que facilita la interconexión y la transmisión eficiente de datos entre los diversos elementos de la microrred. Por otro lado, la red eléctrica abarca la configuración física de generadores, dispositivos de almacenamiento, cargas y otros componentes eléctricos que integran la infraestructura energética de la microrred. Este enfoque dual asegura una comprensión holística de la interacción entre las dimensiones informáticas y eléctricas, permitiendo así un modelado exhaustivo que refleje la complejidad y la dinámica inherentes a las microrredes.

3.1.1. Red de comunicaciones

Se mira a la red como un grafo simple $G_c = (N, E_c)$ para modelar la topología de la red de comunicaciones de la microrred. N representa el conjunto de n nodos, donde cada nodo es un terminal de comunicación perteneciente a un inversor de la microrred, y $E_c \subseteq N \times N$ representa el conjunto de aristas, es decir, las conexiones de comunicación entre los nodos.

El Laplaciano de la red de comunicaciones G_c es una matriz simétrica y semidefinida positiva que representa las conexiones físicas entre los nodos. El Laplaciano se modela mediante una suma de términos que representan las conexiones entre los nodos

$$L = \begin{bmatrix} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq 1}}^n a_{1j} & -a_{1,2} & \cdots & -a_{1,n} \\ -a_{2,1} & -a_{2,2} & \cdots & -a_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -a_{n,1} & -a_{n,2} & \cdots & \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq n}}^n a_{nj} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

donde la matriz Laplaciana L se define como una suma de términos a_{ij} que representan las conexiones entre los nodos de la red eléctrica. Cada término b_{ij} se define como la inversa de la impedancia entre los nodos i y j . La diagonal de la matriz Laplaciana se define como la suma de las impedancias conectadas a cada nodo. La obtención Laplaciana y justificación matemática se

puede revisar en (Rosero et al., 2017).

El modelado preciso de la red de comunicaciones es importante para el diseño y la implementación de enfoques de control en microrredes, ya que la comunicación entre los inversores es esencial para el intercambio de información y la coordinación del control. El enfoque de control deslizante propuesto en este trabajo utiliza información de la red de comunicaciones para lograr un intercambio de energía activa preciso y una regulación de frecuencia mejorada.

3.1.2. Red de eléctrica

El modelado de la red eléctrica de la microrred se realiza a partir de un modelo de circuito equivalente que incluye los generadores de energía renovable, los sistemas de almacenamiento de energía y las cargas. Se representa mediante una matriz Laplaciana $B \in R^{n \times n}$, que se define como una suma de términos que representan las conexiones entre los nodos de la red eléctrica

$$B = \begin{bmatrix} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq 1}}^n b_{1j} & -b_{1,2} & \cdots & -b_{1,n} \\ -b_{2,1} & -b_{2,2} & \cdots & -b_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -b_{n,1} & -b_{n,2} & \cdots & \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq n}}^n b_{nj} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

La ecuación dinámica de la red eléctrica se deriva de la potencia activa inyectada a cada nodo y la evolución en el tiempo de $P(t) = v^2 G 1_{nx1} + v^2 B \Theta(t)$ y se obtiene

$$\dot{P}(t) = v^2 B \Omega(t), \quad (7)$$

donde $\dot{P}(t)$ es la tasa de cambio de la potencia activa en la red eléctrica, v es el voltaje de la red eléctrica, $\Omega(t)$ es el vector de frecuencias locales de los inversores y B es la matriz Laplaciana de la red eléctrica (6).

3.2. Diseño de los parámetros del controlador

El objetivo del control es lograr una compartición de potencia activa precisa y una regulación de frecuencia mejorada en la microrred.

3.2.1. Delimitación del problema de control

El método droop-free, que incluye un control de voltaje presentado por Nasirian et al. (2016) en su estudio "Droop-Free Distributed Control for AC Microgrids", queda fuera del alcance de este análisis, ya que se aparta del enfoque centrado en frecuencia y potencia activa que se presenta en este trabajo. En cambio, la regulación de voltaje se efectúa de manera constante mediante la aplicación del método convencional de caída de tensión presentado por Chandorkar et al. (1993), el cual se implementa de forma local en cada nodo del sistema. Esta estrategia de regulación se expresa mediante

$$v_i(t) = v_0 - cq_i(t), \quad (8)$$

donde:

- $v_i(t)$ representa la amplitud del inversor de voltaje,
- v_0 es la amplitud del voltaje nominal,
- $q_i(t)$ es la potencia reactiva de salida del inversor, y
- c es la ganancia del control proporcional.

La potencia activa suministrada por los inversores en estado estacionario, denotada como $P_i(\infty)$, debe ser equitativa para asegurar un suministro adecuado a la carga. Esto puede ser expresado

$$P_i(\infty) = \frac{P_T}{n}, \quad (9)$$

donde P_T es la potencia total suministrada por todos los inversores.

La frecuencia local de cada inversor en estado estacionario $\omega_i(\infty)$ se puede formular como

$$\omega_i(\infty) = \omega_0. \quad (10)$$

3.2.2. Diseño del controlador de modo deslizante

En el estudio de Nasirian et al. (2016), donde plantean la forma compacta del método Droop-Free $\Omega(t) = \Omega_0 - eLP(t)$, expandiéndola

$$\omega_i(t) = \omega_0 + \delta_i(t), \quad (11)$$

$$\delta_i(t) = m \left(\left(\sum_{j=1}^{n_i} a_{ij} p_{ij}(t) \right) - n_i p_i(t) \right), \quad (12)$$

donde a_{ij} determina la disponibilidad de comunicación entre los nodos i y j , y n_i denota el número de nodos que intercambian datos de control. Se debe tener en cuenta que en cada nodo i , se conocen las potencias de los nodos vecinos $p_j(t)$ además de la potencia local $p_i(t)$.

El término correctivo $\delta_i(t)$ en (11) se reemplaza por un término de conmutación de frecuencia extraído del método droop-free, $\delta_i^S(t)$, para formular la ley de control del modo deslizante

$$\omega_i(t) = \omega_0 + \delta_i^S(t). \quad (13)$$

Luego, el término de conmutación $\delta_i^S(t)$ se calcula en cada i -ésimo VSI y opera siguiendo la ley de control de signos

$$\delta_i^S(t) = k_i \text{sgn}(s_i(p)), \quad (14)$$

donde la ganancia k_i permite fijar el peso de la compensación. La presencia de la función de signo da como resultado el cambio, de tal manera

$$\delta_i^S(t) = \begin{cases} k_i & \text{si } s_i(p) > 0 \\ 0 & \text{si } s_i(p) = 0 \\ -k_i & \text{si } s_i(p) < 0 \end{cases} . \quad (15)$$

El término de conmutación de frecuencia en (14) incluye una superficie deslizante $s_i(p)$ basada en el término de corrección en (12). Por lo tanto, es una función que calcula el desajuste

de la potencia activa del vecindario para el cual se requieren comunicaciones disponibles

$$s_i(p) = \left(\sum_{j=1}^{n_i} a_{ij} p_{ij}(t) \right) - n_i p_i(t). \quad (16)$$

La ganancia positiva m fue eliminada porque no influía el signo en la expresión, además el peso de la ecuación está definido por k_i .

Denotando el conjunto de términos por corrección de $\Delta^S(t) = [\delta_1^S(t) \cdots \delta_n^S(t)]^T$ y el conjunto de las superficies deslizantes del VSI por $S(p) = [s_1(p) \cdots s_n(p)]^T$, el control droop-free del modo deslizante mostrado en (13) y (16) se puede desarrollar para todos los n nodos

$$\Omega(t) = \Omega_0 + \Delta^S(t), \quad (17)$$

$$\Delta^S(t) = k \operatorname{sgn}(S(p)), \quad (18)$$

$$S(p) = -LP(t). \quad (19)$$

3.3. Análisis de estabilidad del sistema de microrred con el controlador

La función cuadrática de Lyapunov $V(S)$ que considera la superficie de deslizamiento $S(p)$ de (19)

$$\begin{aligned} V(S) &= \frac{1}{2} S(p)^T S(p) \\ &= \frac{1}{2} (LP(t))^T LP(t). \end{aligned} \quad (20)$$

Además, la función candidata en (20) debe satisfacer los criterios de estabilidad de Lyapunov

$$\begin{aligned} \dot{V}(S) &= S(p)^T \dot{S}(p) < 0 \\ &= (LP(t))^T L\dot{P}(t) < 0. \end{aligned} \quad (21)$$

Remplazando (7) y (17) - (19) en (21), el criterio de estabilidad de Lyapunov se convierte en

$$\dot{V}(S) = v^2 k (LP(t))^T LB \operatorname{sgn}(-LP(t)) < 0. \quad (22)$$

En la ecuación (22), se establece que los escalares v y k deben satisfacer la condición $v^2 k > 0$.

Asimismo, se subraya que las matrices Laplacianas L y B son simétricas y definidas positivas (PSD), y, crucialmente, su producto, LB , también resulta ser simétrico, lo que conduce a la importante implicación $LB \geq 0$. Además, es esencial destacar que el término con el factor de signo $(-LP(t))$ hereda el signo negativo a lo largo de la función.

En resumen, dado que se satisface la desigualdad y se cumplen las condiciones establecidas en (22), el controlador propuesto en (17)-(19) garantiza la estabilidad asintótica del sistema. La cuidadosa elección de los escalares v y k y la propiedad positiva de LB desempeñan un papel fundamental en la efectividad y estabilidad del controlador propuesto.

3.4. Descripción del sistema de la microrred

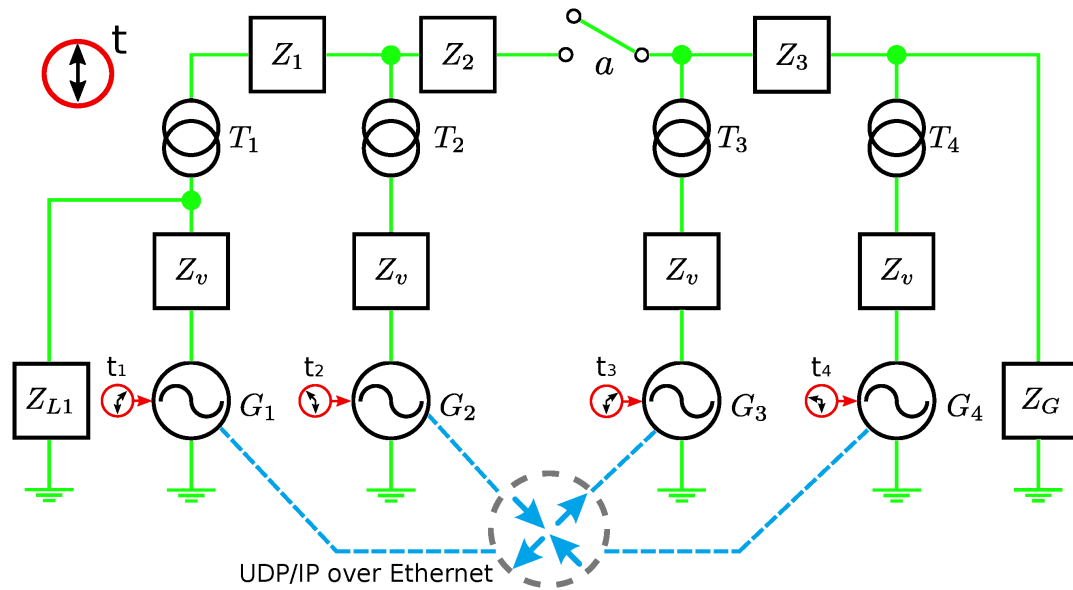
Se propone la configuración de una red trifásica de generación distribuida que consta de cuatro nodos de generación, así como una fuente de corriente alterna (CA) que simula la red general. Cada nodo tiene la capacidad de suministrar energía a su carga local R_{Local_i} y, de manera colaborativa, a una carga común R_{Common} ubicada en las proximidades de la fuente de CA. Este diseño permite un enfoque colaborativo entre los nodos de generación para alimentar eficientemente tanto las cargas locales como la carga común, mejorando así la distribución y utilización de la energía generada en la red trifásica.

La Figura (4) presenta el esquema de la Microrred (MG), donde cuatro unidades de Generadores Distribuidos (DG) — G_1, G_2, G_3 y G_4 — funcionan como Inversores de Fuente de Voltaje (VSI, por sus siglas en inglés). Cada generador regula de manera independiente la amplitud y frecuencia del suministro eléctrico, al tiempo que proporciona potencia activa y reactiva para alimentar la carga compartida Z_G . Por otro lado, G_1 suministra energía a la carga local Z_{L1} .

Las impedancias Z_1, Z_2 y Z_3 modelan elementos parásitos en las líneas de transmisión, mientras que T_1, T_2, T_3 y T_4 representan transformadores de aislamiento en la salida de cada convertidor de energía. Z_v simboliza la impedancia virtual implementada digitalmente en cada convertidor de energía. Además, la microrred implementa el Protocolo de Datagrama de Usuario (UDP) sobre Ethernet conmutado para posibilitar la comunicación efectiva entre los cuatro inversores.

Es importante destacar que el tiempo global está representado por t , mientras que los tiempos

Figura 4.
Configuración de la microrred



Nota: Adaptado de Rosero et al. (2023)

locales t_1 , t_2 , t_3 y t_4 ilustran el efecto de los deslizamientos de reloj en cada convertidor de fuente de voltaje (VSI). Este diseño detallado y preciso de la microrred proporciona una representación completa de su estructura y operación.

El estudio de Miret et al. (2017), enfocado en la implementación de un laboratorio experimental flexible para redes de generación distribuida basadas en inversores de potencia, proporciona valores nominales que han sido demostrados y comprobados en condiciones de laboratorio. La Tabla 1 presenta los valores respaldados por evidencia experimental, los cuales pueden ser aplicados de manera confiable en la simulación y diseño de la Microrred que se está por implementar. El uso de los resultados y parámetros verificados en este estudio no solo añadirá confiabilidad a la simulación, sino que también permitirá una mayor coherencia y comparabilidad con los hallazgos de Miret et al. (2017). Este enfoque de aprovechar datos ya validados en un entorno experimental contribuirá significativamente a la robustez y precisión de la investigación en el ámbito de la Microrred.

Tabla 1.

Parámetros de configuración de la microrred.

| Descripción | Símbolo | Valor |
|--|-------------------|--|
| Ganancias para la caída de voltaje | $c_{1,2,3,4}$ | $1 \mu\text{V}/(\text{VAr})$ |
| Velocidad de deriva del reloj en G_1 | d_1 | 1,0000 ppm |
| Velocidad de deriva del reloj en G_2 | d_2 | 1,00001 ppm |
| Velocidad de deriva del reloj en G_3 | d_3 | 0,9999 ppm |
| Velocidad de deriva del reloj en G_4 | d_4 | 1,00002 ppm |
| Ganancias para el droop-free | $e_{1,2,3,4}$ | 10 mrad/(Ws) |
| Ganancias para la compensación de frecuencia en MD | $k_{1,2,3,4}$ | $2\pi \times 5 \text{ mrad}/(\text{Ws})$ |
| Ganancias para la caída de frecuencia | $m_{1,2,3,4}$ | 1 mrad/(Ws) |
| Impedancias de los transformadores 1 y 2 | $T_{1,2}$ | $0,62 \text{ m}\Omega @ 37,01^\circ$ |
| Impedancias de los transformadores 3 y 4 | $T_{3,4}$ | $1,31 \text{ m}\Omega @ 9,87^\circ$ |
| Periodo de muestreo | t_s | 0,1 ms |
| Periodo de transmisión de datos | t_r | 0,1 ms |
| Voltaje de la red (rms línea a línea) | v_0 | $\sqrt{3} 110 \text{ V}$ |
| Frecuencia de la red (sin carga) | ω_0 | $2\pi \times 60 \text{ rad/s}$ |
| Impedancia máxima de carga global | $Z_G \text{ max}$ | $88 \Omega @ 0^\circ$ |
| Impedancia mínima de carga global | $Z_G \text{ min}$ | $44 \Omega @ 0^\circ$ |
| Impedancia de carga local 1 | Z_{L1} | $88 \Omega @ 0^\circ$ |
| Impedancia virtual | Z_v | $3,76 \text{ m}\Omega @ 90^\circ$ |
| Impedancia de línea de transmisión | Z_1 | $1,3 \text{ m}\Omega @ 36,9^\circ$ |
| Impedancias de las líneas de transmisión 2 y 3 | $Z_{2,3}$ | $1 \text{ m}\Omega @ 16,7^\circ$ |

Nota: Adaptado de Miret et al. (2017)

3.5. Simulación de la microrred y del controlador en modo deslizante

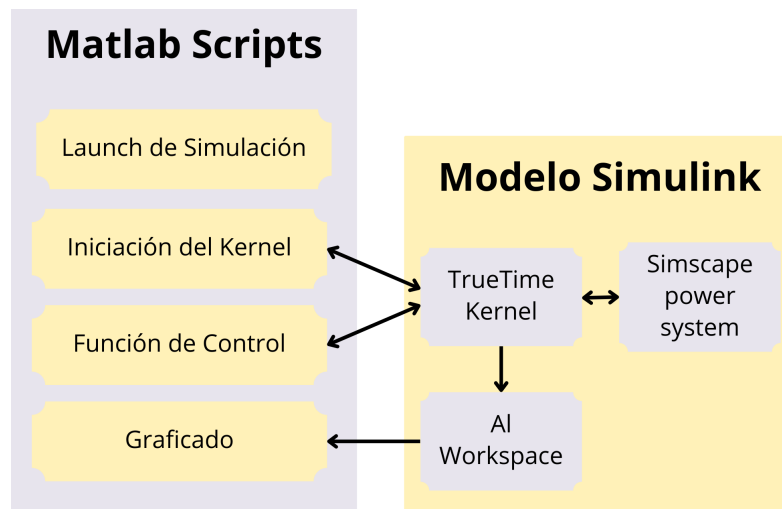
El entorno de simulación seleccionado para este estudio es el software Matlab-Simulink, utilizando la licencia estudiantil proporcionada por la Universidad Técnica del Norte. Este entorno computacional de alto rendimiento ofrece una plataforma robusta para modelar y simular sistemas dinámicos, proporcionando herramientas avanzadas para el análisis y diseño de sistemas de control.

La simulación abarcará tanto la microrred como el controlador propuesto, permitiendo una evaluación exhaustiva de su desempeño bajo diversas condiciones y los parámetros establecidos en la Tabla 1. La obtención de gráficas detalladas durante la simulación facilitará un análisis visual y cuantitativo de los resultados obtenidos.

En la Figura 5, se presenta de manera visual el proceso integral de simulación empleado en este trabajo. Esta representación gráfica no solo brinda una visión esquemática del procedimiento,

sino que también destaca la interacción entre la microrred y el controlador implementado y la comunicación entre los entornos de MATLAB-Simulink.

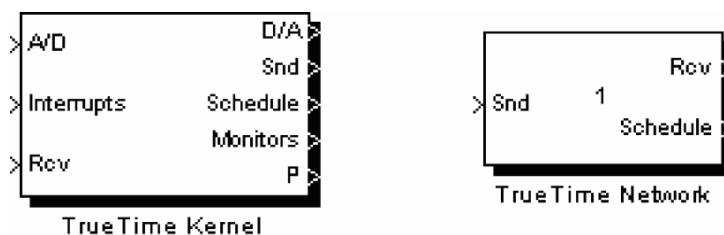
Figura 5.
Proceso de simulación



Nota: Adaptado de Rosero et al. (2021)

Un bloque importante a considerar de la Figura (5) es el TrueTime Kernel que Cervin et al. (2003) en su estudio del tiempo de ejecución de tareas informáticas, determina que las ventajas de usar TrueTime en MATLAB es que permite la simulación de modelos de control en tiempo real de manera más detallada y precisa. TrueTime es una herramienta basada en Simulink que ofrece dos bloques: un bloque de kernel en tiempo real y un bloque de red en tiempo real (Figura 6). Los retrasos en el bucle de control se capturan mediante la simulación de la ejecución de tareas en el kernel y la transmisión de mensajes a través de la red. Además, TrueTime permite la evaluación de cualquier comportamiento en el dominio del tiempo del bucle de control, no solo de un criterio de rendimiento cuadrático. En resumen, TrueTime en MATLAB es una herramienta poderosa para el diseño y la simulación de sistemas de control en tiempo real.

Figura 6.
TrueTime Toolbox

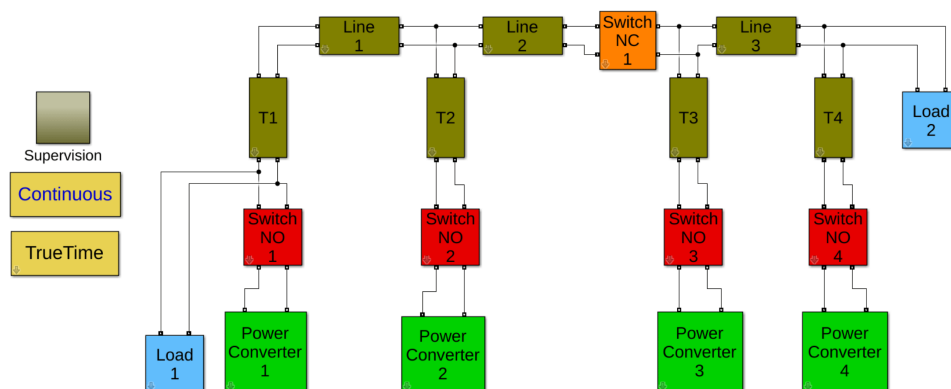


Se procedió a realizar la simulación de la microrred, incorporando todos los elementos eléctricos y electrónicos conforme a la propuesta de Rosero et al. (2017), permitiendo un estudio detallado de su comportamiento bajo diversas condiciones y escenarios. La herramienta SimScap Power Systems se destaca por su capacidad para modelar sistemas de energía complejos, brindando una representación precisa de los componentes eléctricos y permitiendo análisis detallados de la dinámica del sistema.

En la Figura (7) se presenta de manera esquemática el diseño de la microrred simulada. Esta representación gráfica proporciona una visión clara de la interconexión de los distintos elementos eléctricos y electrónicos en el sistema, permitiendo visualizar la topología de la microrred y la disposición de sus componentes. Los parámetros de todos los componentes se encuentran en la Tabla 1.

Los generadores, identificados como G_1 a G_4 , se modelan mediante convertidores de energía virtuales de formación de red 1 a 4 (representados en verde) en la Figura 7. La conexión y desconexión de estos convertidores a la red se realiza a través de interruptores NO 1 a 4 (señalados en rojo). Las cargas 1 y 2 (en azul claro) simbolizan Z_{L1} y Z_G , respectivamente. Las líneas 1 a 3 (en tono oliva) representan las impedancias Z_1 a Z_3 , mientras que T_1 a T_4 (también en oliva) comparten la misma nomenclatura que en el esquema de la microrred. Cabe mencionar que el interruptor NC 1 (de color naranja) induce una partición eléctrica, la cual no se considera en este estudio.

Figura 7.
Simulación de la red de generación distribuida

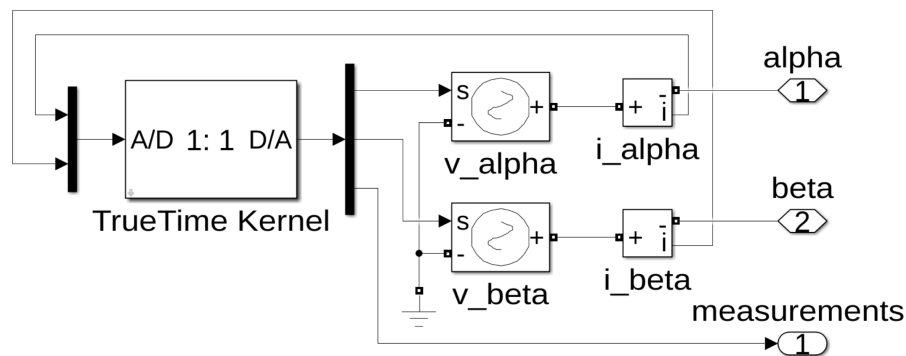


Nota: Adaptado de Rosero et al. (2023)

El bloque de supervisión (en tono oliva) transmite los valores instantáneos de potencias activa y reactiva, frecuencia, amplitud y tiempo local al espacio de trabajo de Matlab. Por otro lado, el bloque continuo (en amarillo) alberga las configuraciones de los elementos Simulink Simscape, mientras que el bloque TrueTime (en tono oliva) contiene las configuraciones específicas de la red. En este enfoque estructurado y detallado se proporciona una representación clara y completa de la simulación, permitiendo un análisis preciso de la microrred.

Figura 8.

Simulación del nodo del convertor de potencia



Nota: Adaptado de Rosero et al. (2023)

Cada nodo o convertidor de potencia en la Figura (7), identificado en verde claro como "Power Converter", se representa en Simulink mediante los bloques ilustrados en la Figura (8). El control de modo deslizante se implementa en el bloque "TrueTime Kernel" el cual interactúa con v_{α} y v_{β} que a su vez simulan los consumidores en corriente y voltaje. Si se desea estudiar a fondo los bucles de control interno el estudio (Rosero et al., 2021) ofrece mayores detalles de esta implementación.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Presentación de los resultados de simulación

La presentación de los resultados de la investigación se organiza en torno a distintos subtemas, que ofrecen una visión integral de la evaluación del sistema de microrred implementado. En primer lugar, se analiza el desempeño del sistema bajo dos enfoques de control de frecuencia: el método tradicional de droop y la metodología de control de modo deslizante. Este análisis permite examinar cómo cada método influye en la estabilidad y regulación de la frecuencia del sistema. Posteriormente, se aborda la Compartición de potencia activa y la regulación de frecuencia, destacando la colaboración entre nodos de generación distribuida para optimizar el suministro energético. Finalmente, se estudia el error en potencia activa y en frecuencia, evaluando la precisión y robustez de los métodos de control implementados. Cada uno de estos subtemas contribuye a una comprensión más completa y detallada del rendimiento de la microrred en términos de estabilidad, eficiencia y respuesta a perturbaciones.

4.1.1. Control de frecuencia: Droop vs Control de modo deslizante

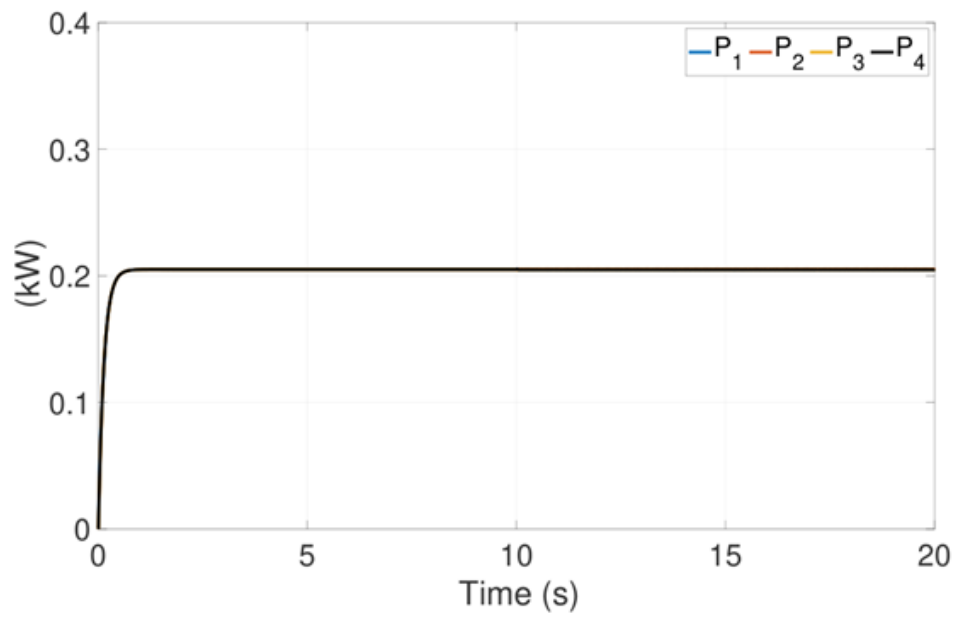
Se evalúa el rendimiento del generador de la microrred (MG) antes y después de la implementación del controlador propuesto, con el objetivo de facilitar la interpretación de los resultados presentados. A partir del tiempo $t = 0$ s, las potencias evolucionan bajo el control del droop en condiciones ideales. Posteriormente, a partir del tiempo $t = 10$ s, comienza a prevalecer el control de modo deslizante droop-free. Únicamente el método de droop de voltaje regula la evolución de la potencia reactiva (Figura 10) al ajustar la amplitud del voltaje durante toda la duración del experimento (Figura 12). Cuando el control de MD droop-free asume el control del sistema a partir del tiempo $t = 10$ s, la potencia activa (Figura 9) se mantiene regulada, aunque ahora con un ligero parpadeo, situación común en un CMD.

4.1.2. Compartición de potencia activa y regulación de frecuencia

Se presentan dos experimentos que evalúan el control de la microrred (MG) bajo condiciones idénticas, pero empleando distintos métodos para el modo de deslizante (Figura 13 y 14), y para

Figura 9.

Reparto de la potencia activa

Nota: Control droop $t > 0$, CMD $t > 10s$ **Figura 10.**

Reparto de la potencia reactiva

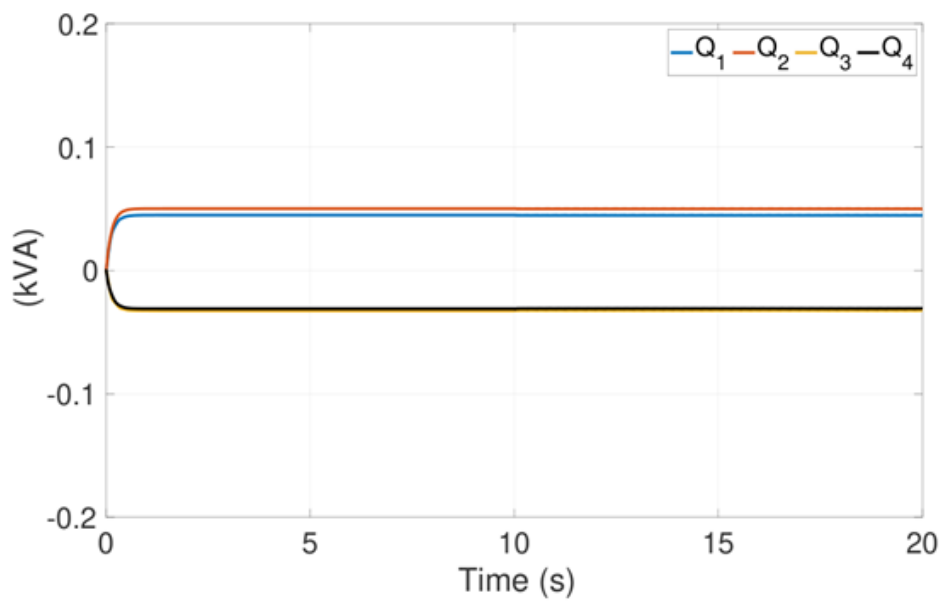
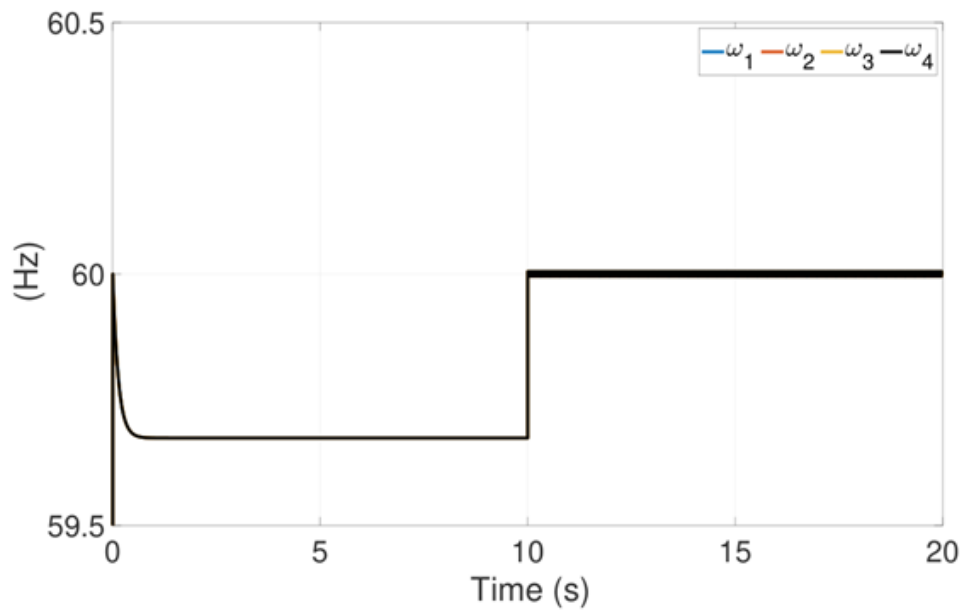
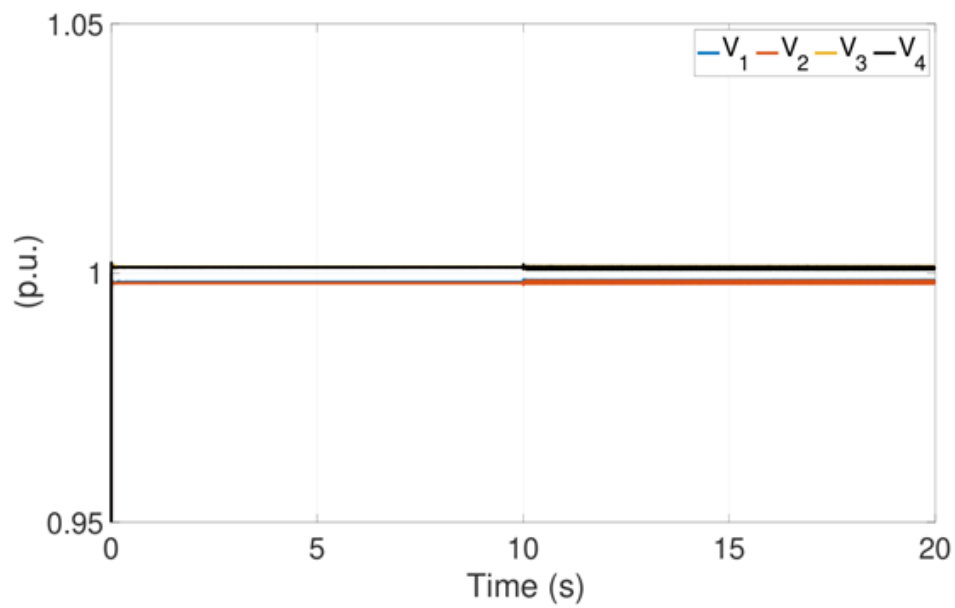
Nota: Control droop $t > 0$, CMD $t > 10s$

Figura 11.

Regulación de la frecuencia

Nota: Control droop $t > 0$, CMD $t > 10s$ **Figura 12.**

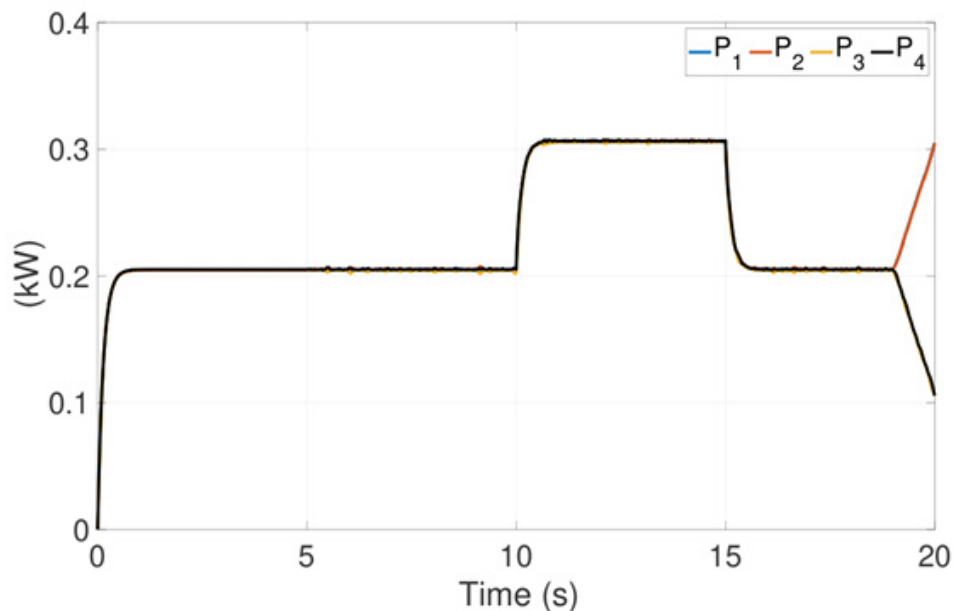
Regulación del voltaje

Nota: Control droop $t > 0$, CMD $t > 10s$

el modo droop-free (Figura 15 y 16). La simulación abarca un periodo de 20 segundos y sigue un patrón específico. A partir de $t = 0$ s, las potencias evolucionan bajo condiciones ideales; desde $t = 5$ s, los desplazamientos del reloj empiezan a tener impacto. Entre $t = 10$ s y $t = 15$ s, se introduce una variación de carga debido a una disminución temporal de ZG, seguida por su restablecimiento a su valor original, generando un incremento en la potencia suministrada por cada Inversor de Fuente de Voltaje (VSI). En $t = 18$ s, se experimenta una falla de comunicación, cambiando la topología de la red de una disposición en estrella unificada a dos conexiones punto a punto, G1–G2 y G3–G4. Estos escenarios permiten una evaluación exhaustiva del rendimiento y la robustez del sistema de microrred frente a condiciones diversas y desafiantes.

Figura 13.

Control de potencia activa con control de modo deslizante



Nota: Desviaciones del reloj $t > 5s$, cambio de carga $t > 10s$ a $t > 15s$, Fallo de comunicación desde $t > 18s$

4.1.3. Error en potencia activa y de frecuencia

Se presentan el error de potencia activa y el error de frecuencia en relación con la ganancia de compensación de frecuencia k_f la tasa de transmisión t_{en} simulaciones de 5 segundos de duración. En la parte Figura (17), se ilustra el error de potencia activa respecto a la ganancia de compensación de frecuencia k_f , mientras que en la Figura (19) se representa el error de frecuencia en función de k_f . La Figura (18) exhibe el error de potencia activa en relación con la

Figura 14.
Control de frecuencia con control de modo deslizante

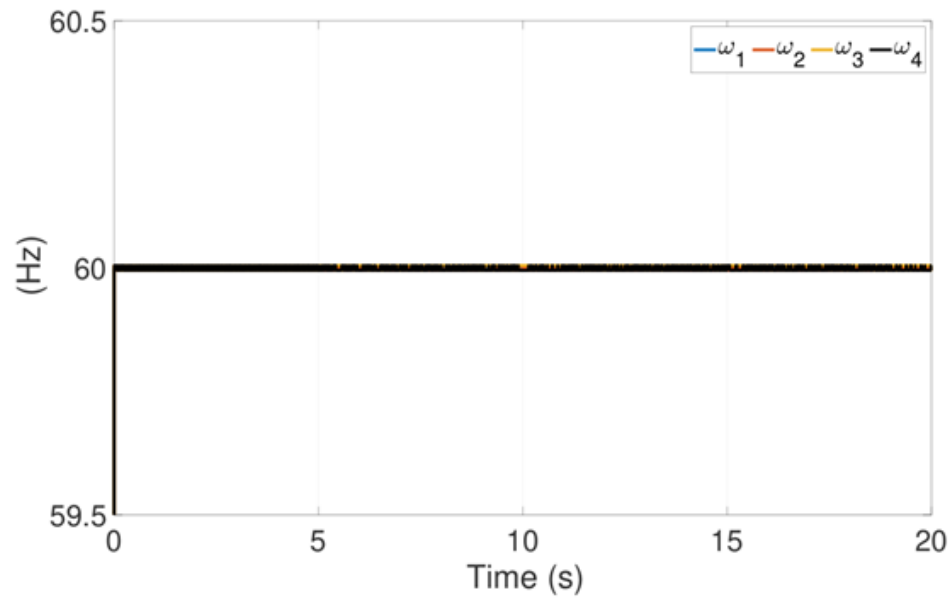
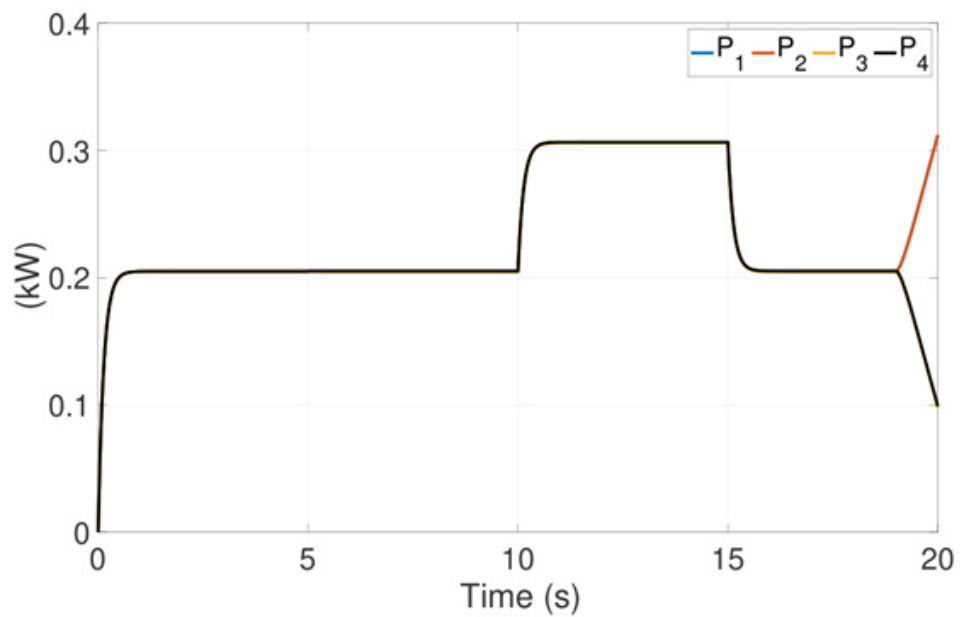


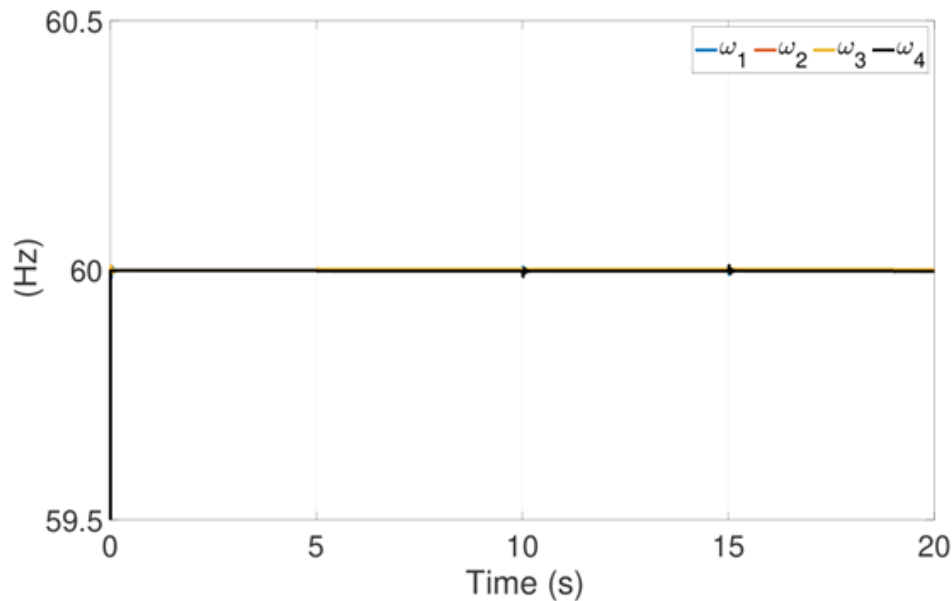
Figura 15.
Control de potencia activa con droop



Nota: Desviaciones del reloj $t > 5s$, cambio de carga $t > 10s$ a $t > 15s$, Fallo de comunicación desde $t > 18s$

Figura 16.

Control de frecuencia con droop



tasa de transmisión t_r , y la Figura (20) presenta el error de frecuencia en función de t_r .

Estos gráficos proporcionan una visión integral de cómo la variación en la ganancia de compensación de frecuencia y la tasa de transmisión impacta en los errores de potencia activa y frecuencia, particularmente cuando el control deslizante droop-free está a cargo de la gestión de la microrred aislada.

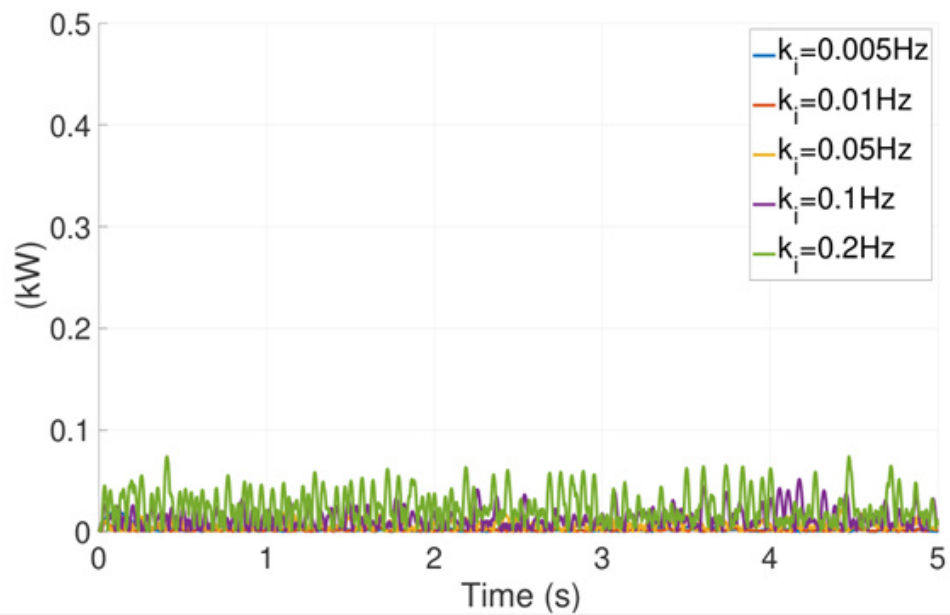
4.2. Evaluación del desempeño del controlador

La contribución más destacada del controlador en modo deslizante (CMD) droop-free, tal como se observa en la sección 4.1.1; radica en su capacidad para restablecer la frecuencia desde su caída inicial y mantener una ligera variación en torno a la referencia. En línea con las expectativas, la amplitud del voltaje continúa disminuyendo como consecuencia del control droop. Esta capacidad del CMD droop-free para recuperar y estabilizar la frecuencia, al tiempo que modula la amplitud del voltaje, destaca su eficacia en el mantenimiento de la estabilidad y regulación en el sistema de microrred, proporcionando así un elemento valioso para la gestión del sistema en condiciones dinámicas y cambiantes.

Después de la aparición de las desviaciones notables en los desplazamientos del reloj, como se evidencia en la sección 4.1.2, la potencia activa exhibe pequeñas fluctuaciones, mientras

Figura 17.

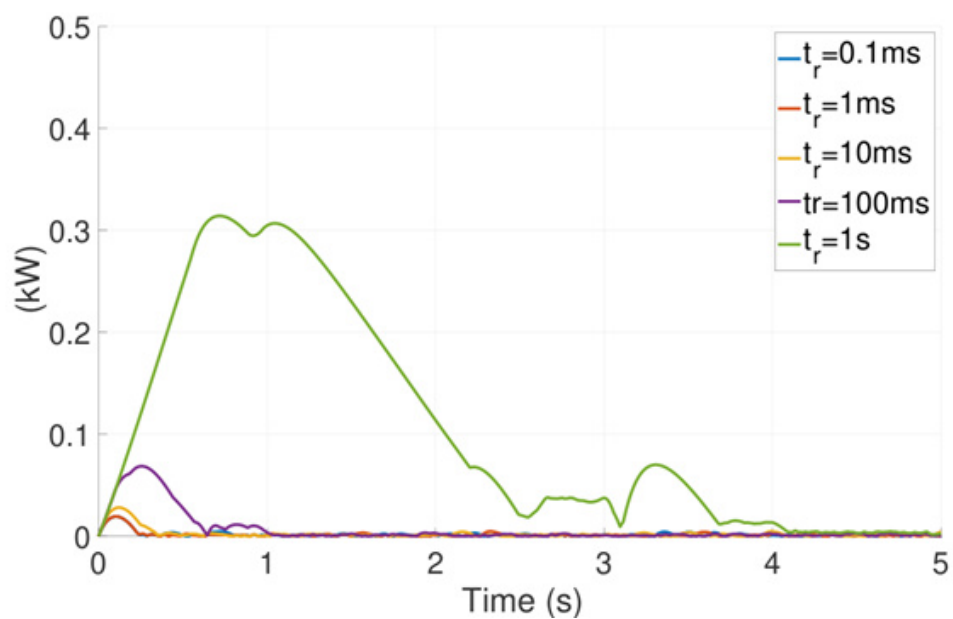
Error de potencia activa en función de la ganancia de compensación de frecuencia



Nota: El CMD droop-free gobierna la microrred aislada

Figura 18.

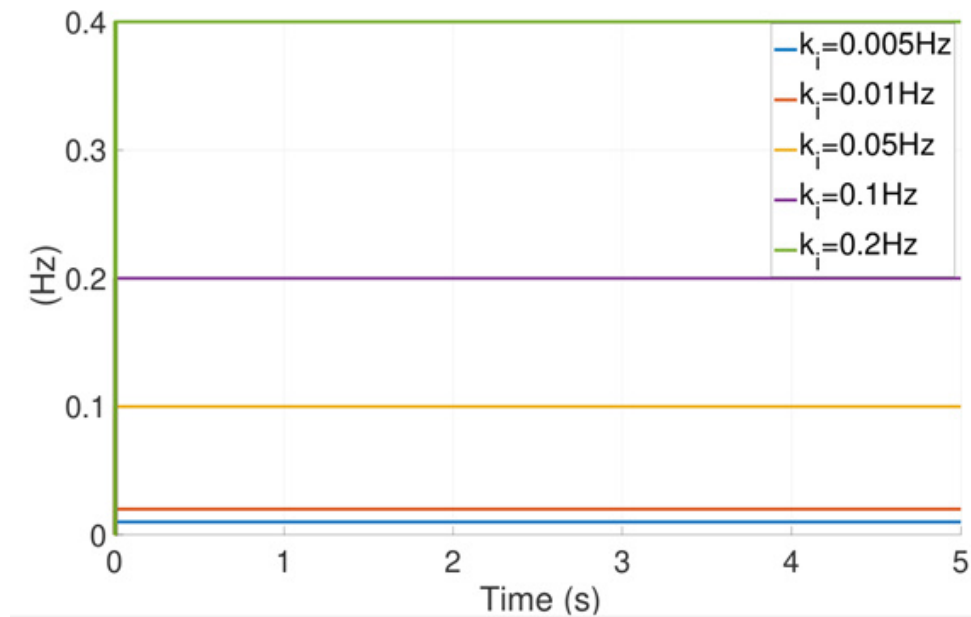
Error de potencia activa en función de la tasa de transmisión



Nota: El CMD droop-free gobierna la microrred aislada

Figura 19.

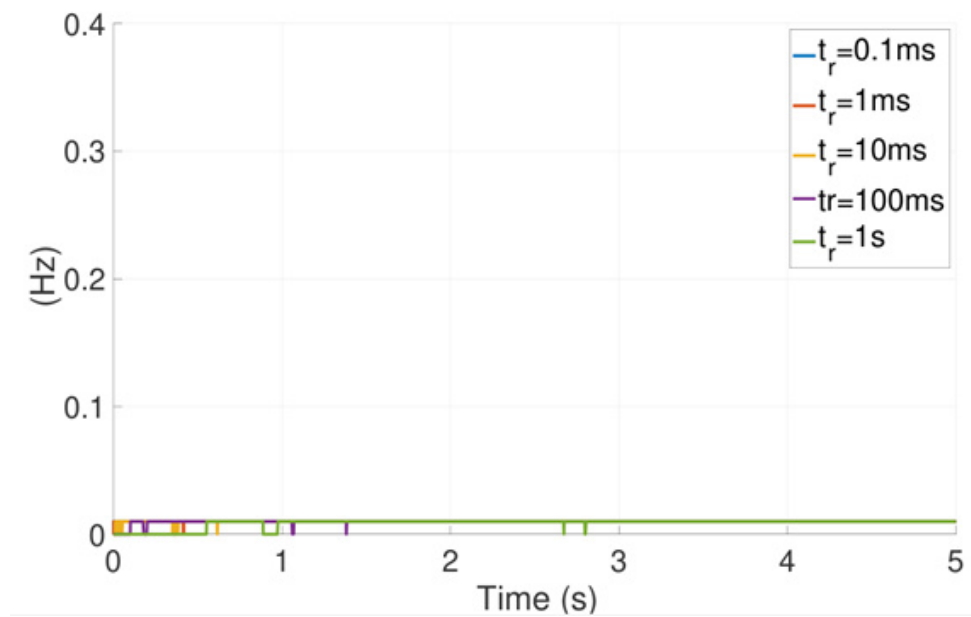
Error de frecuencia en función de la ganancia de la compensación de frecuencia



Nota: El CMD droop-free gobierna la microrred aislada

Figura 20.

Error de frecuencia en función de la tasa de transmisión



Nota: El CMD droop-free gobierna la microrred aislada

que la frecuencia se mantiene alrededor del valor nominal. En respuesta a una variación súbita en la carga global trifásica balanceada, la potencia total de la Microrred (MG) experimenta un cambio de 0,8 kW a 1,2 kW y luego retorna a 0,8 kW. En la fase final, la ocurrencia de una falla de comunicación induce inestabilidad en la MG, provocando divergencias en las potencias entre pares de nodos que aún mantienen comunicación. A lo largo de la simulación, se observa una dinámica similar tanto para el Modo Deslizante sin desplome como para la SM con desplome, con la única diferencia del "traqueteo" presente en el primero, característica distintiva de este tipo de control. Estos resultados resaltan la capacidad de ambos métodos para gestionar eventos inesperados y las diferencias notables en su comportamiento dinámico, especialmente en términos de estabilidad y respuesta ante cambios bruscos en la carga.

En la Sección 4.1.3, se destaca que la estabilidad se mantiene de manera consistente a pesar de las variaciones en los amplios rangos de la ganancia para la compensación de frecuencia k_i y de la velocidad de transmisión para el intercambio de datos t_r . Este hallazgo indica la robustez del sistema ante cambios significativos en estos parámetros clave de control. La capacidad del sistema para preservar la estabilidad en condiciones de variación extensa de los parámetros resalta la eficacia y adaptabilidad de los métodos implementados. Este resultado es crucial, ya que sugiere que el sistema de control puede mantener un rendimiento consistente y fiable en diferentes configuraciones, lo que es esencial para la operación segura y eficiente de la Microrred en diversas circunstancias y entornos.

El impacto de la ganancia k_i en la potencia activa y los errores de frecuencia se exhibe en las Figuras 17 y 19. Se observa que el error de potencia activa converge a cero, mientras que la amplitud de sus oscilaciones, atribuibles a los deslizamientos, aumenta proporcionalmente con la ganancia k_i . Por otro lado, el error de frecuencia se mantiene limitado, aunque su magnitud se incrementa con k_i .

En contraste, la influencia de la tasa de transmisión t_r en la potencia activa y los errores de frecuencia se presenta en las Figuras 18 y 20. Para valores más altos de t_r , se evidencia un aumento en el exceso de la respuesta transitoria de la potencia activa, mientras que el error de frecuencia permanece limitado, dado que depende de un k_i fijo. Estos resultados proporcionan una comprensión detallada de cómo la variación de k_i y t_r impacta en la dinámica de la potencia

activa y en los errores de frecuencia, ofreciendo valiosa información para la optimización de estos parámetros en la operación de la Microrred.

Tabla 2.

Comparativa entre el control de modo deslizante y el control droop-free.

| Metodo de Control | Ventajas | Desventajas |
|--------------------------|--|--|
| CMD | Error mínimo en el estado estacionario de potencia activa. Resistente a las desviaciones del reloj y cambios de carga. Fácil de implementar Oportunidad de mejora a través de técnicas de filtrado para el chattering y superficie deslizante adicional para el intercambio de potencia reactiva. | Chattering en la frecuencia Inestable en particiones de comunicación. |
| Droop-free | Resistente a las desviaciones de reloj y los cambios de carga. Errores mínimos en estado estable para la potencia activa y la frecuencia. | Inestable en particiones de comunicación. |

Nota: Adaptado de Rosero et al. (2023)

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones del estudio

En el transcurso de esta investigación, se han logrado avances significativos en el diseño y análisis de un controlador de modo deslizante droop-free para el intercambio de potencia activa y la regulación de frecuencia en microrredes aisladas. A través de una exhaustiva recopilación de información, se delineó el estado del arte en cuanto a los enfoques de control de modo deslizante en el contexto de microrredes aisladas.

La propuesta de control, basada en una superficie de modo deslizante que considera las comunicaciones entre nodos, ha sido diseñada con el objetivo de distribuir eficientemente la potencia activa y regular la frecuencia en una microrred aislada. La validación de la estabilidad del controlador, llevada a cabo mediante un análisis analítico respaldado por simulaciones en una microrred de cuatro nodos, ha demostrado la robustez y eficacia del enfoque propuesto.

Los resultados obtenidos confirman que la restauración de la frecuencia se logra de manera consistente, incluso frente a perturbaciones. No obstante, la presencia de “chattering” de frecuencia destaca un área de mejora potencial en futuras investigaciones, donde se puede abordar este fenómeno para optimizar el rendimiento de la electrónica asociada.

En relación con la potencia activa, se observa una estabilidad en el intercambio de potencia, con desviaciones menores causadas principalmente por desfases en los relojes de los nodos. Es importante señalar que las fallas en la comunicación de red han demostrado afectar la estabilidad de la microrred, subrayando la necesidad de desarrollar mecanismos adicionales para mejorar el rendimiento del sistema frente a este tipo de problemas.

Esta investigación ha contribuido de manera significativa al campo del control en microrredes aisladas, proporcionando una metodología efectiva y estable para la distribución de potencia activa y la regulación de frecuencia. Los resultados obtenidos sientan las bases para futuras investigaciones centradas en mitigar el “chattering” de frecuencia y mejorar la resistencia del sistema ante fallas de comunicación, consolidando así los avances logrados en este estudio.

5.2. Recomendaciones para futuras investigaciones

- **Mitigación del “Chattering” de Frecuencia.-** Investigar y aplicar técnicas de filtrado avanzadas para reducir el fenómeno de “chattering” en el sistema. Evaluar el impacto de estas técnicas en el rendimiento general del controlador y determinar la configuración óptima de los filtros.
- **Mejora de la Resiliencia ante Fallos de Comunicación.-** Investigar y desarrollar estrategias adicionales para mejorar la resiliencia del sistema frente a fallas de comunicación, considerando redundancias, protocolos de retransmisión y mecanismos de recuperación de datos.
- **Implementación Práctica y Validación Experimental.-** Llevar a cabo experimentos prácticos en un entorno de laboratorio para validar la efectividad del controlador propuesto en condiciones del mundo real. Esto proporcionará información valiosa sobre la viabilidad y aplicabilidad práctica de la solución.
- **Consideración de Sistemas Multi-Microrred.-** Extender la investigación para abordar sistemas que constan de múltiples microrredes interconectadas. Esto permitirá evaluar el rendimiento del controlador en escenarios más complejos y con una mayor diversidad de condiciones.
- **Análisis de Impacto en Sistemas Híbridos.-** Ampliar la investigación para evaluar el impacto del controlador propuesto en sistemas híbridos que integran múltiples fuentes de energía, como renovables y almacenamiento, para comprender mejor su adaptabilidad a entornos más complejos.

REFERENCIAS

- Adefarati, T., & Bansal, R. (2016). Integration of renewable distributed generators into the distribution system: a review. *IET Renewable Power Generation*, 10(7), 873-884. <https://doi.org/https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2015.0378>
- Álvarez Farriols, A. F. (2020). *Diseño del control jerárquico en tiempo discreto de una microrred DC* (Bachelor's thesis). Universidad Politécnica de Cataluña. <http://hdl.handle.net/2117/331683>
- Bidram, A., & Davoudi, A. (2012). Hierarchical Structure of Microgrids Control System. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(4), 1963-1976. <https://doi.org/10.1109/TSG.2012.2197425>
- Cervin, A., Henriksson, D., Lincoln, B., Eker, J., & Arzen, K.-E. (2003). How does control timing affect performance? Analysis and simulation of timing using Jitterbug and TrueTime. *IEEE Control Systems Magazine*, 23(3), 16-30. <https://doi.org/10.1109/MCS.2003.1200240>
- Chandorkar, M. C., Divan, D. M., & Adapa, R. (1993). Control of parallel connected inverters in standalone AC supply systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 29(1), 136-143. <https://doi.org/10.1109/28.195899>
- Delavari, H., & Naderian, S. (2017). Backstepping fractional terminal sliding mode voltage control of an islanded microgrid. *2017 5th International Conference on Control, Instrumentation, and Automation (ICCIA)*, 167-172. <https://doi.org/10.1109/ICCIAutom.2017.8258672>
- Dörfler, F., Simpson-Porco, J. W., & Bullo, F. (2016). Breaking the Hierarchy: Distributed Control and Economic Optimality in Microgrids. *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, 3(3), 241-253. <https://doi.org/10.1109/TCNS.2015.2459391>
- Guerrero, J. M., Vasquez, J. C., Matas, J., de Vicuna, L. G., & Castilla, M. (2011). Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids—A General Approach Toward Standardization. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(1), 158-172. <https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2066534>

- He, J., Mofan, W., Yan, Z., & Ji, H. (2021). Design of Decentralized Adaptive Sliding Mode Controller for the Islanded AC Microgrid With Ring Topology. *Frontiers in Energy Research*, 9. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.732997>
- Martí, P., Velasco, M., Torres-Martínez, J., Miret, J., & Castilla, M. (2016). Reactive power control for loss minimization in low-voltage distributed generation systems. *2016 12th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA)*, 371-376. <https://doi.org/10.1109/ICCA.2016.7505305>
- Miret, J., García de Vicuña, J. L., Guzmán, R., Camacho, A., & Moradi Ghahderijani, M. (2017). A Flexible Experimental Laboratory for Distributed Generation Networks Based on Power Inverters. *Energies*, 10(10), 1589. <https://doi.org/10.3390/en10101589>
- Nasirian, V., Shafiee, Q., Guerrero, J. M., Lewis, F. L., & Davoudi, A. (2016). Droop-Free Distributed Control for AC Microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(2), 1600-1617. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2414457>
- Pérez Fernández, P. (2017). *Descripción e infraestructura de una microrred para un entorno residencial* (Tesis de maestría). Universidad de Valladolid. Valladolid, España. <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/24085>
- Rocabert, J., Azevedo, G. M. S., Luna, A., Guerrero, J. M., Candela, J. I., & Rodríguez, P. (2011). Intelligent Connection Agent for Three-Phase Grid-Connected Microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 26(10), 2993-3005. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2011.2116126>
- Rocabert, J., Luna, A., Blaabjerg, F., & Rodríguez, P. (2012). Control of Power Converters in AC Microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27(11), 4734-4749. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2199334>
- Rosero, C. X., Vaca, C., Gavilanez, M., Iglesias, I., & Rosero, R. (2021). Towards a Simulation Platform for Islanded Microgrids based on Grid-Forming Power Converters. *2021 IEEE 5th Colombian Conference on Automatic Control (CCAC)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/CCAC51819.2021.9633277>
- Rosero, C. X., Velasco, M., & Martí, P. (2017). Analysis of consensus-based active power sharing with respect to network topology in islanded microgrids. *IECON 2017 - 43rd*

Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 115-120. <https://doi.org/10.1109/IECON.2017.8216024>

- Rosero, C. X., Gavilánez, M., & Mejía-Echeverría, C. (2023). Droop-Free Sliding-Mode Control for Active-Power Sharing and Frequency Regulation in Inverter-Based Islanded Microgrids. *Energies*, *16*(18). <https://doi.org/10.3390/en16186442>
- Sandelic, M., Peyghami, S., Sangwongwanich, A., & Blaabjerg, F. (2022). Reliability aspects in microgrid design and planning: Status and power electronics-induced challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *159*, 112127. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112127>
- Schiffer, J., Hans, C. A., Kral, T., Ortega, R., & Raisch, J. (2017). Modeling, Analysis, and Experimental Validation of Clock Drift Effects in Low-Inertia Power Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *64*(7), 5942-5951. <https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2638805>
- Utkin, V. I. (1992). *Variable Structure Systems with Sliding Modes*. Springer-Verlag.
- Utkin, V., Guldner, J., & Shi, J. (2009). *Sliding Mode Control in Electro-Mechanical Systems* (2nd). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420065619>