

**MEJORAMIENTO DE LA FIABILIDAD EN MICROREDES MEDIANTE EL  
CONTROL ROBUSTO DE VOLTAJE USANDO TÉCNICAS PASIVAS DE  
TOLERANCIA A FALLOS**



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA:  
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de  
INGENIERA ELÉCTRICA**

**TEMA:  
MEJORAMIENTO DE LA FIABILIDAD EN MICROREDES MEDIANTE EL  
CONTROL ROBUSTO DE VOLTAJE USANDO TÉCNICAS PASIVAS DE  
TOLERANCIA A FALLOS**

**AUTORA:  
GRACE KATERINE CHINCHUÑA TOLEDO**

**DIRECTOR:  
MSc. LEONY ORTIZ MATOS**

**Quito, Marzo 2018**

Grace Katerine Chinchuña Toledo

**MEJORAMIENTO DE LA FIABILIDAD EN MICROREDES MEDIANTE EL CONTROL ROBUSTO DE VOLTAJE USANDO TÉCNICAS PASIVAS DE TOLERANCIA A FALLOS**

Universidad Politécnica Salesiana , Quito – Ecuador 2018

Ingeniería Eléctrica

Breve reseña de autores e información de contacto.



**Grace Katerine Chinchuña Toledo** (Y'1991-M11). Realizo sus estudios secundarios en la Unidad Educativa Salesiana Domingo Savio de la ciudad de Cayambe, Bachiller con la especialidad de Ciencias Generales. Egresada de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en mejoramiento de la fiabilidad en microredes mediante el control robusto de voltaje usando técnicas pasivas de tolerancia a fallos. [gchinchuna@est.ups.edu.ec](mailto:gchinchuna@est.ups.edu.ec)

*Dirigido por:*



**Leony Ortiz Matos** (Y'1982). Recibió el título de MSc. e Ingeniería en Automática por el Instituto Superior Politécnico Julio Antonio Mella (ISPJAM) de la Universidad de Oriente, Cuba. Actualmente se encuentra estudiando para obtener su título de Doctor en Ingeniería en la Universidad Pontificia Bolivariana-Colombia-Medellín, es miembro del Grupo de Investigación en Redes Eléctricas Inteligentes (GIREI). Forma parte del equipo académico de la carrera de Ingeniería Eléctrica de Universidad Politécnica Salesiana Quito-Ecuador. Sus principales intereses de investigación Automatización y Control, Control robusto y Control Tolerante a Fallos, Micro-redes Eléctricas Inteligentes híbrida, CA/CC. [lortizm@ups.edu.ec](mailto:lortizm@ups.edu.ec)

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

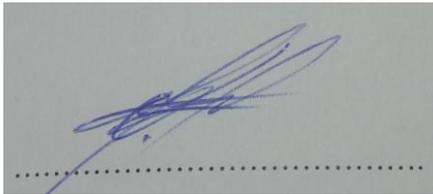
DERECHOS RESERVADOS

©2018 Universidad Politécnica Salesiana  
QUITO - ECUADOR

## DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo, Leony Ortiz Matos declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación **“MEJORAMIENTO DE LA FIABILIDAD EN MICROREDES MEDIANTE EL CONTROL ROBUSTO DE VOLTAJE USANDO TÉCNICAS PASIVAS DE TOLERANCIA A FALLOS”** realizado por **Grace Katerine Chinchuña Toledo**, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, Marzo del 2018



Leony Ortiz Matos

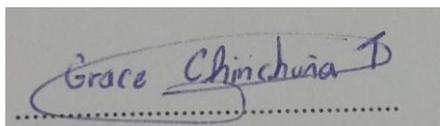
Cédula de identidad: 1754230389

## CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, **Chinchuña Toledo Grace Katerine**, con documento de identificación N° 1724433451, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autora del trabajo de grado/titulación intitulado: **“MEJORAMIENTO DE LA FIABILIDAD EN MICROREDES MEDIANTE EL CONTROL ROBUSTO DE VOLTAJE USANDO TÉCNICAS PASIVAS DE TOLERANCIA A FALLOS”**, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autora me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Firma

A rectangular box containing a handwritten signature in blue ink. The signature reads "Grace Chinchuña Toledo" with a stylized flourish at the end. Below the signature is a horizontal dotted line.

Nombre: Grace Katerine Chinchuña Toledo

Cédula: 1724433451

Fecha: Quito, Marzo del 2018

## **DEDICATORIA**

A Dios Padre y a la Virgen del Cisne porque siempre me han dado su bendición,

A mi mami por todo el apoyo, consejos, comprensión y amor brindado a lo largo de mi vida, porque sé que sin ella no estaría donde estoy ahora.

A mis hermanos quienes están a mi lado en cada etapa de mi vida como la vida estudiantil, confiando en mí, apoyándome para conseguir mis objetivos.

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primer lugar a Dios por permitirme cumplir una meta tan anhelada, guiándome a lo largo de mi vida, por ser mi apoyo, luz en mi camino, por la fortaleza para seguir adelante en aquellos momentos de dificultad.

A mi madre Yolanda por ser la persona que ha estado apoyándome en todo momento malo y bueno como no agradecerle si le debo todo lo que soy, porque esta meta no es solo mía.

A la memoria de mi padre que desde un lugar cercano a Dios regó su bendición hacia mí, porque estuvo presente durante este largo período de estudios ayudándome a cumplir mi sueño.

A mis hermanos Fernando y Daniela gracias por ser esos hermanos que siempre han estado ahí pendiente de mí, quienes siempre he encontrado un respaldo incondicional.

Agradezco en especial al Ing. Leony Ortiz MSc., Director de este trabajo, por haber impartido sus conocimientos para el desarrollo de esta investigación y así finalizar con éxito el objetivo propuesto.

Al resto de mi familia por el apoyo incondicional, paciencia y motivación para cumplir con éxito esta fase de la vida.

A mis amigos más cercanos por darme ese voto de confianza, cariño y motivación para seguir perseverando en mi propósito.

## INDICE GENERAL

Resumen.....	1
Abstract.....	1
1. Introducción.....	2
2. Generalidades .....	3
2.1 Micro-redes inteligentes .....	3
2.1.1 Potencial energético.....	5
2.1.2 Generalidades en la micro-red.....	5
2.1.3 Selección del equipo.....	5
2.1.4 Instalaciones eléctricas y complementarias .....	5
2.1.5 Comportamiento del sistema. ....	5
2.2 Estabilidad de voltaje.....	6
2.3 Diagnóstico de falla .....	7
2.4 Control de voltaje en MG .....	8
2.4.1 Control primario .....	9
2.4.2 Control secundario.....	9
2.4.3 Control terciario.....	10
2.5 Control Pasivo Tolerante a fallos .....	10
2.5.1 Control IMC .....	10
2.5.2 Estimación de estado .....	11
2.5.3 Control robusto $H_{\infty}$ .....	12
2.6 Probabilística de la fiabilidad de la Micro-red .....	12
3. Estrategia de control .....	13
3.1 Diseño del controlador con tolerante a fallas .....	13
3.2 Modelado e identificación de la planta.....	14
3.3 Estructura de control.....	14
4. Caso de estudio.....	16
4.1 Modelo y validación de la Micro-red .....	16
4.2 Análisis de resultados. ....	18
5. Conclusiones.....	19
6. Trabajos Futuros .....	20
7. Referencias .....	20
7.1 Estado del Arte .....	24

## ***INDICE DE FIGURAS***

Figura 1. Infraestructura de distribución de energía de micro-red.....	4
Figura 2. Configuración de la micro-red.....	7
Figura 3. Error porcentual.....	14
Figura 4. Caso de Estudio .....	18
Figura 5. Respuesta dinámica del FTCS ante las diferentes fallas estimadas.....	18
Figura 6. Comportamiento de la señal activa.....	19
Figura 7. Señal de control .....	19
Figura 8. Temática-Indicador de la Matriz del Estado de Arte.....	29
Figura 9. Formulación del Problema-Indicador de la Matriz del Estado de Arte .....	29
Figura 10. Solución-Indicador de la Matriz del Estado de Arte .....	29

## ***INDICE DE TABLAS***

Tabla 1. Variables .....	14
Tabla 2. Variables del diseño .....	15
Tabla 3. Condiciones terminales del sistema de estudio.....	16
Tabla 4. Características de carga del sistema de estudio.....	16
Tabla 5. Características de las líneas del sistema de estudio .....	16
Tabla 6. Comparación de potencia de líneas y error del sistema de estudio.....	17
Tabla 7. Matriz de Estado de Arte.....	24

# MEJORAMIENTO DE LA FIABILIDAD EN MICROREDES MEDIANTE EL CONTROL ROBUSTO DE VOLTAJE USANDO TÉCNICAS PASIVAS DE TOLERANCIA A FALLOS

## Resumen

En este documento se plantea mejorar la fiabilidad en Micro-redes mediante el control robusto de voltaje ante fallos del sistema con métodos pasivos. La propuesta se fundamenta en el rechazo de perturbaciones permitiendo e identificando las posibles fallas del sistema de diagnóstico para el control por modelo interno (IMC) como estrategia de control. El desarrollo del control es basado en la manipulación el voltaje de una micro-red de corriente continua (CC), le permite al sistema operar de manera estable y dentro de los márgenes permisibles de calidad ante fallos en actuadores, sensores y de la planta sin necesidad de manipular técnicas de reconfiguración. En varias veces la micro-red es afectada en las diversas cargas pertenecientes la estabilidad. Finalmente se expone los resultados en ciertas condiciones de control esta investigación se ilustra en la red de 14 barras de la IEEE y se utiliza Simulink/Matlab para su modelación donde se obtuvo los datos iniciales del sistema con la técnica propuesta obtuvo un rendimiento robusto.

**Palabras Clave:** Control de voltaje, control pasivo, control por modelo interno (IMC), estabilidad de voltaje, falla, fiabilidad, micro-red.

## Abstract

This paper proposes an improvement in reliability in micro-grid about the robust control of voltage to failures of the system using passive methods of tolerance to failures. The proposal is based on the identification of possible failures of the diagnostic system for the internal control model (IMC) to reject the disturbance, as a control strategy. The development of the robust control is based on the voltage of a DC micro-grid, which allows the system to operate in a stable and within the permissible margins of quality against failures in actuators, sensors and the plant without the need to use reconfiguration techniques. Stability in Micro-grid is continuously affected in the related loads. Finally, the results are presented in certain control conditions. This research is illustrated the IEEE 14-nodes system and the Simulink/Matlab where the initial data of the system were obtained proposed method provides robust performance.

**Keywords:** Control of voltage, passive control, control by internal model (IMC), stability of voltage, fault, reliability, smart grid.

## 1. Introducción

Las técnicas usadas en el control tolerante a fallas pueden ser agrupadas en dos grandes grupos: el Control Tolerante a Fallos Activo (por sus siglas en inglés AFTCS) y el Control Tolerante a Fallos Pasivo (PFTCS). El control PFTCS se diseña de manera que cumpla los objetivos de control para el peor caso, garantizando la estabilidad de la planta, aumentando la robustez y disminuyendo el umbral de la falla del sistema. La investigación se realizó por el interés del mejoramiento de fiabilidad del control en las Micro-redes y se utilizó técnicas pasivas de tolerancia a fallos, que permitirían mantener la estabilidad ante perturbación y falla. Para el estudio y simulación de la ley propuesta en este trabajo, y cuyo objetivo fue el control de unidades de generación a diésel en una Micro-red, se utilizó principalmente metodologías de Control por Modelo Interno (por sus siglas en inglés IMC). El controlador opera de manera estable entre los límites permisibles de calidad ante fallos y perturbaciones en la planta. El método pasivo se maneja como técnica de control robusto, permitiendo una mejora de confiabilidad, presentando un esquema de control consolidado, prediseñado para ciertos fallos en lazo cerrado y obtener un grado de robustez aceptable.[1]–[3]

El IMC es un método de gran conformidad en el rechazo de fallos o perturbaciones en la planta, como una estrategia de control con una solución analítica para un controlador óptimo de un modelo de proceso nominal. Se plantea encontrar el controlador que incluye un modelo explícito de la planta que trabaje en la región de intersección de las posibles soluciones admisibles. [3]–[5]

La robustez del sistema de control sirve en el ajuste de varias fallas del sistema, sin esforzarse por un rendimiento óptimo para cualquier condición de falla específica. En comparación con un Sistema de Control Tolerante a Fallos (SCTF) activo, es más difícil para un SCTF pasivo lograr un rendimiento óptimo bajo cualquier condición de fallo de base de diseño. [6], [7].

El diseño de controladores IMC está fundamentado a partir del punto de vista teórico donde se proporciona parámetros de ajuste en los sistemas lineales. En generalidad de sistemas presentan algún tipo de no linealidad que funcione en un rango de operación. El controlador IMC garantiza la estabilidad interna del circuito cerrado y que pueden sintonizar en línea fácilmente sin alterar la estabilidad, los parámetros del controlador. Hay diversas plantas que tienen un comportamiento de fase nominal, como los motores de corriente continua con regulación de campo, bombas hidráulicas entre otras. [8]–[10] Las micro-redes son una solución para lugares que no tienen la accesibilidad a la electricidad, estos son sistemas de distribución de recursos energéticos que es posible en casos de la red principal. Es un sistema autónomo de energía distribuida la que permite la sostenibilidad energética, fiabilidad, disponibilidad y soporte de carga a nivel de sistemas conectados al punto principal de energía.[11], [12]

Estas unidades de micro generación han surgido para satisfacer el incremento de necesidades de energía eléctrica de los clientes. El problema fundamental en el control con un sistema complejo es el fallo de un componente de control o un error que reducirá el sistema. Los fallos son errores que pueden ocurrir en la micro-red debido a una variedad de causas posibles, incluyendo fallas en las

líneas eléctricas, caídas de rayos, en algunas regiones de la red pueden quedar sobrecargado. [11], [13]

El resto del paper se divide por secciones, las cuales están estructuradas de la consiguiente manera. En la sección 2 se exponen la revisión bibliográfica de temas principales, estructura general de la micro-red, control pasivo, estabilidad del voltaje, técnicas de control, diagnóstico de falla. En la sección 3 se describe el método para lograr la tolerancia a los fallos en la planta que se encuentra la metodología a realizar como son las distintas simulaciones realizadas con la estrategia de control. Mientras en la sección 4 se analizan los resultados conseguidos de la propuesta para el mejoramiento de la fiabilidad en la micro-red. Finalmente, la sección 5 recoge las conclusiones alcanzadas del marco del trabajo que se llevó término.

## 2. Generalidades

### 2.1 Micro-redes inteligentes

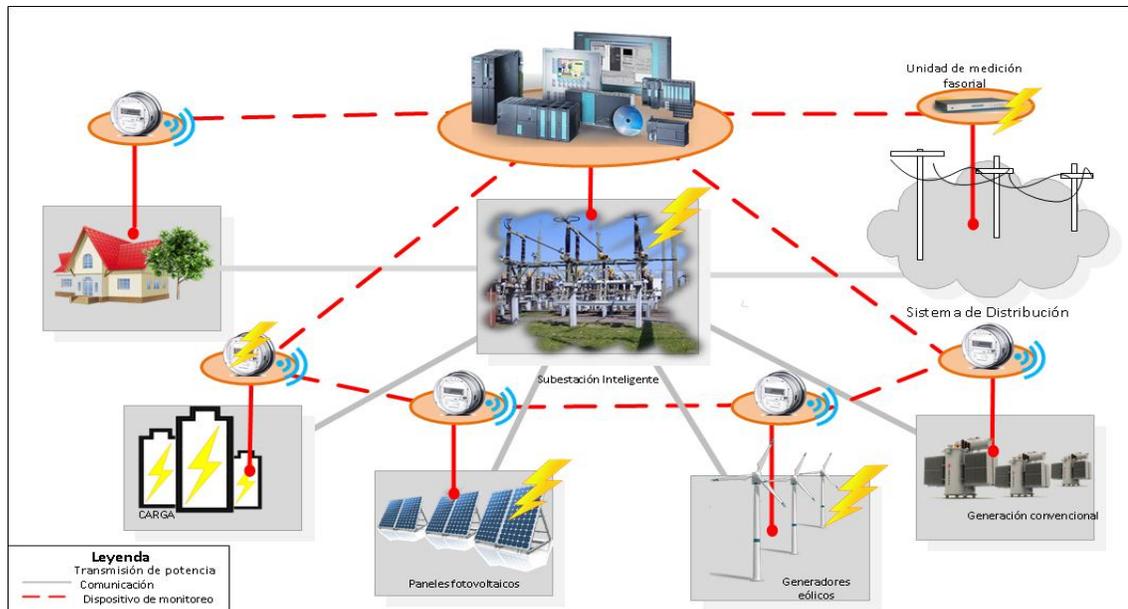
Son un sistema las micro-redes que conforma una parte de la red de distribución de energía y emplean tecnología renovable y no renovable. Las micro-redes son una alternativa bastante atractiva para superar los desafíos de las unidades de recursos de energía distribuida. Las energías limpias renovables donde se puede mostrar los fallos de diferentes maneras. Si no se lleva a cabo los diagnósticos preventivos y los mantenimientos, pueden existir inestabilidades, generación de energías ineficientes y otras pérdidas. El sistema de distribución de electricidad auto-contenidos es generalmente dentro de la red de distribución eléctrica grande, tienen la capacidad de coordinar y vender la energía proporcionada desde una o más fuentes de generación hasta el

consumidor. Existe la posibilidad cuando las micro-redes estén conectadas a los grandes sistemas se pueda vender o comprar energía dependiendo de lo que se demande para trabajar. [11], [14], [15]

La infraestructura esta principalmente interconectada a través de cables y posiblemente, líneas de transmisión, de distribución que forman un sistema unificado de energía para un soporte de carga local, incluye tanto en sistemas de generación como las convencionales. En la generación pueden ser renovables como fotovoltaica, eólica, biomasa, entre otras convencionales de energía. Las unidades de energía limpia incluye turbinas eólicas, fotovoltaicas (PV) paneles y celdas de combustible.[12], [16], [17] El fin de integrar los recursos de energía renovables, se debe garantizar los niveles de confiabilidad y las ventajas potenciales de los recursos distribuidos de la generación donde también incluyen problemas.

- En valor de los niveles apropiados de reservas se proyecten en bajo nivel de determinación de la demanda y oferta.
- Nuevos modelos de diseños en el mercado que permitan la participación competitiva de generación de energía intermitente.
- Para el aumento en la potencia de generación distribuida con el desarrollo de técnicas de control de voltaje y frecuencia.

En la figura 1 se muestra la característica de las micro-redes, como la combinación de las tecnologías de control, detección y comunicación como procedimientos de generación de energía distribuida de forma eficiente y fiable capaz de suministrar energía en caso de perturbación o falla, donde se mantiene los parámetros de este.



**Figura 1.** Infraestructura de distribución de energía de micro-red

La estructura general está formada de diferentes fuentes de generación de energía (convencionales y no convencionales), sistema de acumulación de energía y unidades de gestión de potencia (como: convertidor, inversor conectado a red, inversor puro regulador) para el sistema y la posible conexión a la red. Las micro-redes están configuradas como redes DC o AC conectadas a baja o media tensión de las redes de distribución requieren potencia electrónica convertidores para conectarse a cargas de edificios o la red eléctrica. Están generalmente monitoreadas usando medidores inteligentes y dispositivos de detección para el diagnóstico de fallas en mantener la estabilidad y el rendimiento. [11], [12], [17]

Las micro-redes mejoradas tienen una estrategia de gestión de potencia (PMS por sus siglas en inglés) y una estrategia de gestión de la energía (EMS por sus siglas en inglés), que describen, las funciones de gestión requieren de una infraestructura de comunicación, que consta de equipos de medición inteligente para determinar en el tiempo

la carga, se prioriza la generación renovable, el flujo de potencia, conexiones a la red, opera generaciones convencionales, además de almacenar energía y manejar según razones de funcionamiento. En el bloque de administración del tiempo real recibe los valores pronosticados de carga, generación e información de mercado para mantener controles apropiados en el flujo de potencia. Las micro-redes se diseñan de acuerdo a criterios como la conexión con la red, soporte, relaciones con los tipos y número de fuentes de energía y la carga. [8], [18].

En el esquema de la micro-red es complejo debido a factores relacionados con la generación, la configuración del sistema, la selección de componentes, el dimensionamiento y la operación. Existe una metodología que consta de 5 fases para la implementación de la micro-red.

- Potencial energético
- Generalidades en la micro-red
- Selección del equipo
- Instalaciones eléctricas y complementarias
- Comportamiento del sistema

### **2.1.1 Potencial energético**

La micro-red puede estar asociado de energías renovables (fotovoltaica, eólica, biomasa) o combustible, diesel, gasolina adicional soporte de redes eléctricas o de gas. La irradiación solar debe ser analizada, las condiciones del funcionamiento de los paneles como su construcción consiste de materiales como vidrio, metales, semiconductores. En la eólica consiste de la orientación del viento, su frecuencia y la velocidad. Mientras otras unidades de energía de generación como la de diesel, biomasa, gas natural, entre otras que permite los procesos térmicos, en consecuencia la generación de gases. [8], [18]–[20]

### **2.1.2 Generalidades en la micro-red**

Se establece lo que se necesite de energía, su configuración y las restricciones que permita una gestión correcta en la operación. Como la monitorización de la carga y sus características técnicas para la configuración principal en las necesidades energéticas, adicional sus restricciones en el contenido de la red de generación. Se puede mostrar en diagrama de mecanismos los específicos de la potencia, corriente y tensión del sistema en sus valores de funcionamiento e información. [8], [18], [20].

### **2.1.3 Selección del equipo**

Las razones técnicas de la selección son el análisis de los elementos de generación, unidades de acondicionamiento, almacenador de energía y los medidores de energía. En la generación los elementos están constituidos por los paneles, seguidores solares y aerogeneradores. Las unidades del acondicionamiento como es el ajuste de nivel de tensión, gestión de la

configuración la micro-red y su sistema de almacenamiento de banco de baterías es por la capacidad amperimétrica requerida. En los componentes de monitorización y comunicación que facilitan el control del funcionamiento del sistema que permite tener datos de los análisis en las unidades integradas son los medidores de energía. [8], [19], [20]

### **2.1.4 Instalaciones eléctricas y complementarias**

Para esta fase es importante el dimensionamiento de los conductores, protecciones eléctricas y puestas a tierras. En la micro-red se debe tener diferentes medios para salvaguardar la protección de la vida de las personas, la integridad de los componentes de sobrevoltaje y sobrecorriente se realicen según las medidas. Es recomendada para aterrizar el conductor negativo y el aumento de protección de los equipos que se utiliza el sistema a tierra como de las personas. La representación gráfica que se fundamenta en diagramas de bloques de la micro-red donde se describe los componentes del sistema con las características técnicas. [8], [18].

### **2.1.5 Comportamiento del sistema.**

La descripción y análisis de la energía se trata de saber cómo, y cuanto consume para el modelado de la micro-red como un sistema descrito en bloques. El modelado en la formulación consiste en el funcionamiento detallado en cada elemento donde se considera las relaciones de eficiencia entre la salida y la variable de entrada. También se puede describir el comportamiento del sistema desde el análisis financiero con respecto a la viabilidad para analizar como un proyecto de inversión, para lo cual la proyección del flujo de efectivo

durante su vida útil y se requiere la determinación de indicadores.[20]

## 2.2 Estabilidad de voltaje

Desde la posición inicial de operación se muestra la habilidad de reivindicar un estado de operación en equilibrio después de haber sido sometido a un disturbio. La estabilidad del voltaje consiste en la capacidad de energía para mantener constante los voltajes en los nodos. La perturbación es inestabilidad que se causa en forma de caída progresiva o el aumento de voltajes de algunas barras. [8], [21]–[24]

La estabilidad de voltaje está relacionada con el balance de energía en el sistema de potencia, cuando existe déficit de reactivos se produce una reducción en el voltaje, en operación normal para reanudar el control. Los inconvenientes de estabilidad de voltaje se presentan en sistemas que no cuentan con reserva. [25], [26]

En la inestabilidad pueden existir aspectos como la inestabilidad del ángulo del rotor, pérdida del sincronismo los cuales provocan el colapso del voltaje. El sistema de potencia está sujeto a un disturbio en la fase de funcionamiento y los voltajes de equilibrio estarán en condiciones de los límites aceptables. Este colapso puede ocasionar apagón total o parcial. La inestabilidad puede variar desde una fracción de segundo a decenas de minutos.

La estabilidad del circuito cerrado para sistemas de fase son resultados de las simulaciones en tiempo real donde se debe mostrar la eficacia del método propuesto para la duración de la falla puede explicar el fenómeno:

- La disminución de tensión debido a la falla de red reducirá significativamente el voltaje del final del circuito.

- Durante el fallo el suministro de la potencia reactiva, mantendrá el voltaje del terminal superior al punto de fallo durante el evento ocurrido.

El periodo de estudio de interés es en el orden de segundos y requieren soluciones de ecuaciones diferenciales del sistema. La estabilidad de voltaje a largo plazo trata de estudiar el comportamiento de la red durante varios minutos, a fin que sea evaluado. Donde se involucra los equipos de respuesta lenta: transformadores con cambio de TAP, limitadores de corriente en generadores, el análisis estático es manipulado en muchos casos. [27], [28] La principal causa para el desequilibrio de voltaje es la respuesta que tienen las cargas frente a una perturbación en la red. La potencia demandada por las cargas, tiende a ser restituida por acción de reguladores de voltaje. Cuando las cargas son restauradas se produce un aumento del nivel de voltaje que genera un incremento de consumo de la potencia reactiva.

Las Micro-redes están formadas por sistemas de generación, sistemas de almacenamiento, sistemas de distribución, gestión y control del sistema de energía. El sistema de la figura 2 de generación son las fuentes fotovoltaicas con diferentes tipos de celdas solares de forma que permitan la realización de la comparación del rendimiento con la tecnología. En sistemas de almacenamiento las baterías que son idóneos de acumular cantidades de energía grandes, aportando sostenibilidad al sistema durante periodos de tiempo prolongados (horas). [17], [29] Los supercondensadores cuya función es la de suministrar corrientes de carga considerables, sin la obligación de mantenimiento, presentando la rapidez de carga y características óptimas para operar en regímenes

cíclicos. En la distribución son los transformadores y protecciones de media y baja tensión.

Los transformadores, inteligentes que se adaptan a las necesidades requeridas por la micro-red de energía, disminuyendo perdidas, mejorando la refrigeración reduciendo su tamaño e incremento en su nivel de monitorización. En la infraestructura e interoperabilidad de comunicaciones como centro de control, la unidad con su capacidad de razonamiento y decisión autónoma así como la capacidad de acción predictiva. En la siguiente figura se muestra en el gráfico la configuración de la micro-red.

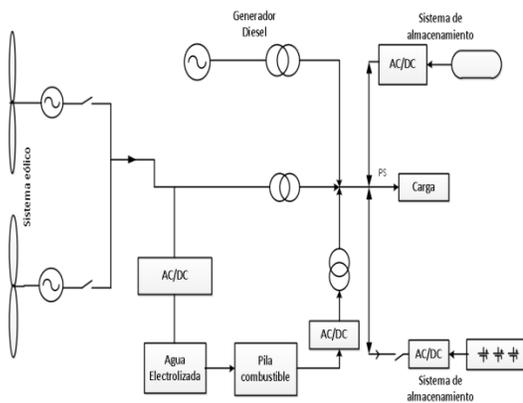


Figura 2. Configuración de la micro-red.

### 2.3 Diagnóstico de falla

En el sistema, los efectos de fallo podrían ser cambios en la señal y los parámetros de operación. Es indispensable estudiar más a fondo las fallas y los métodos de diagnóstico que abarcan un amplio espectro de sistemas distribuidos de generación de energía, también de unidades de acumulación de energía. Las fallas consisten en caídas de tensión igual o desequilibrada, respectivamente, a cada fase, facilitando el lugar a un interruptor disparado que obliga la micro-red a entrar en modo isla. [30], [31]

Para detectar fallos en la red principal, para el voltaje y la corriente se usan

fasores en el acoplamiento. Los modelos para el determinación de fallas requieren una comprensión detallada de cómo funciona el componente. Los métodos construyen y diseñan pruebas que pueden detectar y diagnosticar fallas basadas en los modelos del sistema en lugar de datos experimentales en tiempo real.[11]

En las fallas se realiza estudio sobre los valores experimentales medidos a partir del sistema físico real. Existen varias causas y efectos de las fallas para subsistemas y componentes micro-red como es el desgaste habitual, rotura, cortocircuitos, sobrecarga, fallos mecánicos entre otros.

1.-Falla monofásica a tierra: ocurre cuando se conecta físicamente con el suelo una fase de las tres, causando cortocircuito.

2.- Falla bifásica a tierra: en este caso dos de las tres fases entran en contacto con el suelo, causando cortocircuito.

3.- Falla bifásica: se produce cuando las combinaciones de dos fases están conectadas entre sí.

Adicional existen fallas en los medios de energía renovables, en la fotovoltaica se tienen fallas en el punto caliente, que se producen cuando el panel está parcialmente sombreado o dañado, la consecuencia es una disminución de la corriente de la celda. Las fallas de degradación son consecuencias cuando la resistencia de la serie de células aumenta debido a la sobreexposición, o también cuando existe una disminución de la resistencia a la derivación celular debido a daños e impurezas de cristales en la unión, o la acumulación de desechos en la superficie, o células desacopladas. [8], [11]

El diagnóstico de falla está basado en modelos del sistema en los datos experimentales medidos a partir del sistema físico. Como la identificación de

características en señales defectuosas como la fuerza de umbrales que desencadena un fallo. Los métodos que intentan estimar el estado del sistema son los datos generados por comparaciones de medidas con las teóricas. [25], [32]

Abundan varios métodos de diagnóstico de fallos debido a los enfoques. Los métodos basados en la estimación de estados intentan estimar el estado del sistema construyendo observadores de mediciones reales o datos generados comparando las medidas en la estimación de estado. Los enfoques son basados en modelos de orden reducido del sistema para reducir la complejidad. [6], [11]

El algoritmo SVM por sus iniciales en inglés (Máquina Vectorial de Soporte), es eficaz para solucionar los problemas de categorización y regresión. Se proyecta los datos a un espacio de alta dimensión, este clasificador se aplica en cables, líneas de transmisión para diagnóstico de falla de línea y localización basado en modelo. Este tiene ventajas que es efectivo en casos que el valor de dimensiones es mayor que el número de muestras, utiliza un subconjunto de puntos de vectores de soporte que es eficiente en la memoria. En la clasificación se puede predecir con solo resultados binarios, mientras en la regresión como predicciones con números flotantes de puntos reales como salida. [10], [33]

#### **2.4 Control de voltaje en MG**

La estabilidad de voltaje está directamente relacionada con el balance de energía reactiva en el sistema de potencia; cuando existe déficit de reactivos se produce una disminución en la magnitud del voltaje la cual acciona los sistemas de control para restaurarla a un valor normal de operación. Si el

déficit de reactivos persiste, el decremento en la magnitud del voltaje continúa hasta violar los límites de operación del sistema lo cual acciona los sistemas de protección provocando la salida en cascada de componentes del sistema, lo cual, agrava aún más el déficit y puede llevar al colapso del sistema. Se dice que un sistema experimenta inestabilidad de voltaje cuando presenta una caída continua e incontrolable en la magnitud del voltaje. Uno de los problemas de inestabilidad de voltaje y se caracteriza por una disminución inicial lenta en la magnitud de voltaje y una caída brusca final. Este proceso se extiende en períodos de segundos hasta unas pocas horas. En el caso de los sistemas que operan cerca a sus límites de capacidad o aquellos en los cuales existe importación de energía a grandes distancias o desde otros sistemas son algunas medidas para mitigar los problemas de estabilidad de voltaje se encuentran en las siguientes categorías:

- Soluciones operativas,
- Modificaciones al sistema
- Deslastre de carga por voltaje.

La modificación al sistema se basa en la expansión del sistema y la compensación reactiva controlada. La propuesta se basa en medidas operativas, expansión del sistema, compensación reactiva, bloqueo de cambiadores de taps, sistemas de protección de área amplia y partición del sistema en subsistemas. En deslastre de carga consiste cuando exista nivel de voltaje bajo en la parte del sistema, se desconecte la carga para que ese recupere el voltaje y no se pierda. [21].

Para moderar los problemas en la estabilidad de voltaje son como la adición de fuentes reactivas que son controlados por dispositivos como los

Flexible AC Transmisión System (FACTS).

1.- Los Compensadores estáticos de voltaje (SVC), se convierten en un condensador cuando alcanza el límite de control y toda la capacitancia está completamente conmutada y la potencia reactiva donde se disminuye la tensión en la posición de control. [21], [34]

2.- Los Static Compensation (STATCOM) es un convertidor de fuente de voltaje conectado a través de una inductancia a la red. Se los utiliza en las compensaciones capacitivas donde pierde la capacidad en la obtención de reactivos en la depreciación de voltaje en el intercambio de la potencia. En el control en la micro-red se da en forma ordenada primaria, secundaria y tercera. [21], [22], [35].

#### **2.4.1 Control primario**

Esta es la etapa inicial en el control de la micro-red es también llamado control local o control interno. En esta etapa, el controlador local del generador distribuido, carga, dispositivos de almacenamiento de energía, son claves por tener una respuesta rápida. En la parte de convertidores aproximados, se requiere un control diseñado donde se simula las características de inercia de generadores y se regula la frecuencia apropiada. [12], [36].

En el generador distribuido es donde se estabiliza la frecuencia del generador y la velocidad angular después de un desequilibrio entra la generación y la carga. Al realizar la simulación se obtiene la regulación de velocidad en el flujo de potencia basado en acoplamiento de potencia activa/frecuencia y potencia reactiva/voltaje. El control de salida del inversor normalmente consiste en un lazo para el control de voltaje y un lazo interno para

regulación de corriente. [12], [21], [36] Las potencias de salidas del generador distribuido se ajustan simultáneamente en el control primario. Las ecuaciones resultan del flujo de la potencia realizada en la barra del modelado de control primario con el método de Newton-Raphson. Este método se utiliza en el procedimiento de una ecuación, producir una numeración de aproximaciones que se acercan a una solución (iteraciones). El funcionamiento de control primario en micro-redes se genera incumplimientos en los límites de tensión o frecuencia donde se juega una regla clave porque el control debe tener una respuesta rápida. [37], [38].

#### **2.4.2 Control secundario**

Es indispensable que se realice un control adicional al del control primario para recuperar el voltaje y la frecuencia en sus límites correspondientes. Este control es similar al control primario en el flujo de la potencia, al tener incumplimientos en los límites de tensión o generación realiza un flujo de potencia óptimo de minimización de los costos de redistribución en la generación y los recortes de carga. El flujo de potencia óptimo en el control secundario no introduce cualquier complejidad adicional en la operación de la micro-red. La importancia del control secundario está basado en la reducción de los costos de estudios de planificación y operación de la micro-red. Este control funciona en corregir los niveles de tensión y el desequilibrio de carga, por el generador de distribución en la micro-red en función de la generación de energía reactiva. [36], [38].

### **2.4.3 Control terciario**

Es el control que se constituye según los requerimientos de los puntos de referencia del sistema. Donde se coordina la actividad de múltiples micro-redes interactuando unos con otros en el sistema con los requerimientos de la red como la regulación de frecuencia, soporte de voltaje, etc. Proporciona las señales de controles a nivel secundario en micro-redes u otra clase de subclases, además coordina los controles primarios. En este nivel el control es típicamente que opera en orden de varios minutos, independientemente y reaccionar de manera predefinida en forma instantáneamente en los eventos locales. La cuestión afecta el control secundario y terciario en micro-redes aisladas. [12], [36]

## **2.5 Control Pasivo Tolerante a fallos**

El método pasivo utiliza técnicas de control para diseñar el sistema ante ciertas perturbaciones. Tiene un esquema de control fijo prediseñado para ciertas fallas. En FTCS (Fault Tolerant Control) el sistema mantiene un rendimiento aceptable en el mal funcionamiento de los equipos del sistema. El objetivo principal de FTCS es preservar y promover un sistema de auto reparación al proceso en el mal funcionamiento del sistema ante las fallas, son aisladas donde se utiliza el sistema de estudio de fallas. Después de su detección éstas son reparadas mediante un sistema que rediseña el controlador para evitar fallas críticas y procurar que el proceso siga operando con normalidad. Los fallos del componente se dividen en:

- Fase de diseño
- Fuera de los conjuntos de fallos predefinidos

La otra es hacer que el fallo bien definido del sistema para un fallo bien definido se ponga en la parte de diseño usando redundancias de sistema incorporadas. Está directamente relacionado con la robustez del sistema, sin intentar obtener un desempeño óptimo en alguna condición de falla específica. Para lograrlo se asumen todos los modos de operación del sistema, tanto en condiciones normales como de falla. [2], [39], [40] Los fallos en los componentes se dividen en dos características: que se anticipan en la etapa de diseño y los que están fuera de los conjuntos de fallos predefinidos que suceden mientras el sistema está en funcionamiento. La desventaja es cuando no se aplica a procedimientos no lineales al ser necesaria una descripción precisa del espacio de estados.

### **2.5.1 Control IMC**

El modelo interno es aquel idóneo de rechazar disturbios o perturbaciones para presentar robustez en su sistema, con el diseño de los controladores. Está conformada la estructura por un controlador (C), de planta (P), u variable manipulada, entre otras. El controlador IMC para un modelo de proceso nominal se combina con un filtro de orden bajo que garantiza la estabilidad interna del circuito cerrado y los parámetros se pueden sintonizar con la solidez sin alterar la estabilidad del sistema. Hay muchas plantas que tienen un comportamiento de fase no-mínimo, tales como motores de corriente continúan con regulación de campo, hornos, bombas hidráulicas y así sucesivamente. En esta situación se hace muy importante obtener una inversa estable del modelo de planta para usar en el esquema IMC para lograr el objetivo de seguimiento. [37], [41], [42]

La planta está representada por un modelo de tiempo discreto, el efecto del numerador polinómico puede ser compensado por sistemas inversos aproximados. Los sistemas inversos aproximados se implementan como filtros de respuesta de impulso finito. La planta no se sabe exactamente, los parámetros de la planta están cambiando, entonces los controladores IMC pueden ser diseñados en línea utilizando estrategias de control adaptativo. [5], [10], [43]

Los controladores estables están diseñados con la función de transferencia de tiempo discreto identificada que suele tener ceros fuera del círculo unitario y, la inversa del sistema se vuelve inestable. El uso de tales sistemas inversos da lugar a modos inestables en el bucle cerrado a medida que los polos inestables del controlador cancelan con los ceros no cancelables de la planta. En los sistemas inversos aproximados se implementan como filtros adaptativos de respuesta de impulso finito. [5], [43]

El modelo interno es una técnica de diseño de control con varias características, la robustez es analizada o manipulada. Se puede implementar con la condición que pruebe la permanencia nominal interna del sistema. La teoría IMC se utiliza para diseñar controladores adicionales para mejorar la robustez de todo el sistema basado en las características del sistema pseudo-lineal. [33], [37] En el esquema de control se pueden resumir algunas preguntas fundamentales como:

- 1) Estructura de control donde se limita del rendimiento.
- 2) Diseño de controlador: en donde se hace el circuito cerrado medidas de rendimiento reflejan los objetivos de control.

3) La aplicación de controlador: en donde es factible realizar todos los objetivos de control dados los grados de libertad disponibles

Una consecuencia de este resultado es que la estructura de control IMC no limita el rendimiento de circuito cerrado posible, independientemente de la medida de rendimiento de bucle cerrado donde se utiliza para codificar los propósitos de control. Estas características están generalmente en las estructuras de control que se han propuesto para sistemas de control con múltiples grados de libertad. En la planta cuando se produce un fallo es la señal de control ( $u$ ), la cual cumple objetivos de control. La manera de adecuar el fallo se basa en la agregación a la señal de control calculada por el controlador ( $u_n$ ), la señal compensadora ( $u_c$ ), la suma de las dos permite alcanzar el objetivo de control. La señal se introduce en la planta por la siguiente ecuación (1).

$$u(k) = u_n(k) + u_c(k). \quad (1)$$

Al resolver la señal de control compensadora se obtiene varios aspectos, que implica un fallo en distintos puntos de operación donde se producirá efectos diferentes en cada uno como corresponda.

### 2.5.2 *Estimación de estado*

Es método que trabaja en conversión de las medidas repetidas y otra información disponible, se desarrolla basado en respuesta escalonada. En el transcurso de estimación de estado, es la acumulación de las medidas observables que se adquiere para la configuración de las medidas a utilizar como es un estimador de valores mínimos absolutos que no varíe la configuración del sistema. [9], [36]

Los fallos del componente se pueden dividir en dos tipos, en los que se pueden anticipar en la fase de esquema y en los que están fuera de los conjuntos de fallos predefinidos que solo se producen durante las operaciones del sistema.

### 2.5.3 Control robusto $H_\infty$

El control es considerado debido a las dificultades de control que fueron explicados como eventuales en los sistemas invariantes en el tiempo. Para este sistema son las dificultades de realimentación de estado y salida. El objetivo de este método es lograr una estabilidad absoluta en lazo cerrado, resultante de incertidumbres admisibles y perturbaciones del actuador o sensado. La declaración del problema se realiza por fases. En la fase 1 se realiza la derivación de métodos sistemáticos basados en la adquisición de los procedimientos robustos, fiables para el controlador de esquemas de retroalimentación de estado y salida. La fase 2 consiste en el diseño de los procedimientos útiles para determinar los parámetros de estado y la realimentación de salida para alcanzar los objetivos de control como en la fase anterior. [44]–[46]

Los métodos se emplean en el procedimiento de inconvenientes de control que contenga restricciones no lineales. De adquirir las respuestas a los conflictos de control robusto  $H_\infty$  en la fase 1. Mientras en la fase 3 los problemas de control se reformularan como problemas de optimización restringidas. En la fase 4, se desarrolla la programación numérica mediante simulaciones en lazo cerrado.

## 2.6 Probabilística de la fiabilidad de la Micro-red

En la valoración de la fiabilidad de la micro-red es donde se evalúa los índices que expresan la capacidad para suministrar la carga en el instante que opera en modo de isla. Cuando existe una perturbación o falla en la red de distribución la micro-red se desconecta del punto de unión común por dispositivos de protección como el conmutador de transferencia estática. La estimación de la fiabilidad está representado por el modelo Markoviano de dos estados y dos parámetros, tasa de fallos y tiempo de reparación. Se obtiene desde la evaluación de fallo. [36] Tiene algunas ventajas:

- La fiabilidad en la micro-red consigue desacoplarse desde la red acogida.
- El tamaño del sistema de la valoración de fiabilidad es reducido en la micro-red
- En el software comercial para la distribución de energía puede modificarse en los parámetros equivalentes.

La tasa de fallos y el tiempo de reparación del componente son evaluados como:

$$\lambda^{eq} = \sum_{i \in \bar{u}_{iso}} \lambda_i \quad (2)$$

$$U^{eq} = \sum_{i \in \bar{u}_{iso}} \lambda_i x t_{iso,i}^{rest} \quad (3)$$

$$t_{rep}^{eq} = U^{eq} / \lambda^{eq} \quad (4)$$

Dónde:

$\lambda^{eq}$  = tasa de fallos,

$t_{rep}^{eq}$  = tiempo de reparación,

$U^{eq}$  = componente equivalente anual,

$i$ = componente de la tasa de fallo,  
 $\bar{u}_{iso}$ = conjunto de componentes fuera de la micro-red causan la interrupción,  
 $t_{iso,i}^{rest}$ = tiempo de restauración para la micro-red

El estudio del ajuste de la fiabilidad en la micro-red por el método Markoviano está sujeto a interrupciones que son modeladas, donde se puede simular utilizando la duración del estado. También depende de la incertidumbre relacionada a fluctuaciones de carga estacional, previsión de carga, error y viabilidad de la velocidad del viento. Según una serie sintética se puede simular mediante la generación de un número aleatorio. Normalmente distribuidos por cada hora en el periodo anual.

$$L_t^{samp} = L_t^{for} x (\sigma^{err} 100) x X^{norm} \quad (5)$$

Dónde:

$L_t^{samp} (L_t^{for})$ = es el nivel de carga muestreado por hora,

$\sigma^{err}$ = es el error pronosticado en la carga,

$L_t^{for}$ = como porcentaje de la carga prevista

$X^{norm}$ = número aleatorio estándar para la distribución normal.

La variabilidad de la velocidad del viento se modela utilizando la distribución de Weibull con los parámetros definidos en  $\beta$ ,  $\eta$ ,  $\gamma$  son valores estimados de la forma, la escala y los parámetros.

$$f(x) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{x-\hat{\gamma}}{\hat{\eta}} \right)^{(\beta-1)} e^{-\left(\frac{x-\hat{\gamma}}{\hat{\eta}}\right)}, x \geq \hat{\gamma} \quad (6)$$

### 3. Estrategia de control

Con el objeto de efectuar el mejoramiento de la fiabilidad en micro-redes se propuso en esta investigación basarse en el sistema de 14 barras de la IEEE para realizar el control robusto de voltaje ante fallos del sistema usando técnicas pasivas de tolerancia a fallos. El control en la identificación de fallas del sistema es el control por modelo interno (IMC). En la unidad de generación se encuentra la máquina diesel donde está compuesto por: el actuador, la constante de tiempo, la ganancia, el torque en el eje de la aparato. La idea es combinar un controlador óptimo obtenido por un modelo de proceso nominal como es un filtro de paso bajo que permita compensar el rendimiento en el ciclo cerrado.

#### 3.1 Diseño del controlador con tolerante a fallas

En la formulación del problema del diseño del control en un solo sistema el controlador IMC es  $Q$  usando técnicas robustas para las fallas. El sistema se ve afectado por diferentes perturbaciones medidas y no medidas. En las mediciones de salida está el ruido donde el proceso se formula control independiente donde se realiza el seguimiento de referencia que se rechazan las perturbaciones, rechazo de medidas y desordenes de carga. En el vector de  $Q_i$  se encuentran los controladores óptimos  $Q_r$ ,  $Q_{lm}$ ,  $Q_{dm}$  y  $Q_y$  donde se aumentó con un filtro de paso bajo de primer orden donde se eligió de acuerdo con el orden de la  $P(s)$  con la fórmula:

$$F = \frac{1}{(\lambda s + 1)^n} \quad (7)$$

### 3.2 Modelado e identificación de la planta

Para el diseño de nuestro controlador FTC por IMC es imprescindible tener el modelo de generador con la menor incertidumbre posible. Es por ello que una etapa sumamente importante para el análisis, es obtener la función de transferencia del sistema, en sí, para el diseño de nuestro controlador, donde la gran mayoría de los métodos de diseño están basados en el conocimiento.

Para estimar el modelo la investigación se basó en el enfoque por la vía experimental, e información proveniente de modelos ya validados. Entonces, tomamos el Sistema como una “caja negra”, teniendo en cuenta como entradas “*ue*” y salidas “*ys*” y “*t*”. En conjunto de experimentos y campañas de mediciones obtenemos las medidas de las variables “*ys*”, “*ue*” y “*t*” durante la evolución de nuestra planta hacia el estado estacionario. Por último, de las variables anteriores se determina el modelo a trabajar mediante el **algoritmo 1** que se muestra a continuación, y que está basado de manera explícita en el modelo ARX según:

$$\begin{aligned}
 y(t) + a_1y(t-1) + a_{na}y(t-na) \\
 = b_1u(t-nk) \\
 + b_2u(t-nk-1) \\
 + \dots + b_{nb}u(t \\
 -nk-nb+1).
 \end{aligned}
 \quad (8)$$

**Tabla 1.** Variables

Nomenclatura	Variables
Ys	Datos de la variable de salida de la planta
Ue	Datos de la variable de entrada de la planta
T	Tiempo
p(s)	Modelo matemático de la planta

---

#### Algoritmo 1: Obtención del modelo de la planta (método ARX)

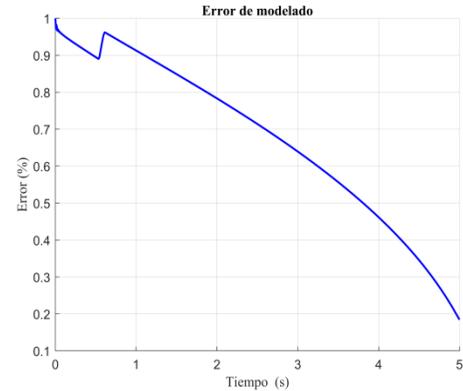
---

Paso 1 **Entrada:** ( $\{ys, ue, t\} \in R$ )  
Paso 2 **Salida:** ( $\{P(s)\} \in s$ )  
Paso 3 **Inicialización:**  $ys=y.signals.values;$   
 $ue=u.signals.values; t=y.time;$   
 $T=t(2)-t(1); n=longitud(y); z=[y u]$   
Paso 4  $th \leftarrow Art(z; [2 \ 2 \ 0]); thn = th;$   
 $th \leftarrow Sett(th, im);$   
 $tc \leftarrow thd2thc(th);$  % “se convierte el modelo tiempo continuo”  
Paso 5  $[num, den] \leftarrow th2tf(tc);$   
 $P(s) \leftarrow lsim(ft, u, t);$  % “Simule la respuesta de tiempo de los sistemas dinámicos a entradas arbitrarias”  
Paso 6: Retorna: P(s);

---

Resultado del modelo:

$$\begin{aligned}
 P(s) \\
 = \frac{3,734e^{-8}s^2 - 8,134e^{-13}s + 4,09e^{-20}}{s^3 + 5,159e^{-7}s^2 + 3,932e^{-14}s + 3,266e^{-24}}
 \end{aligned}$$



**Figura 3.** Error porcentual.

### 3.3 Estructura de control

En este capítulo se propone un algoritmo para el diseño y obtención de los controladores tolerante a fallos basados en el método por control IMC. [47] El objetivo principal fue la obtención de controladores o el controlador multiobjetivo mediante la separación de las medidas de rendimiento definidas por los diferentes

objetivos de control. La estructura de control robusta ayuda a compensar en la mayoría de las compensaciones inherentes al controlador PI, PID clásicos.

La estructura de control en retroalimentación a lazo cerrado en su estructura depende de la planta ya que se tiene en paralelo el modelo de la planta con la misma entrada este modelo va producir una salida de la cual va ser sustraída de la salida de la planta. Esa señal va ser retroalimentada comparada con la referencia para ser alimentada al controlador. El controlador IMC es robusto que es capaz de soportar los errores de modelado y también que permite monitorear las perturbaciones que no son medibles. Es necesario conocer el modelo matemático de la planta, si el modelo es igual a la planta porque la salida de estos será igual al restarlos será cero la retroalimentación ingresaría al controlador. El controlador tendrá información de las perturbaciones, sin la necesidad de estarle midiendo porque si se tiene el error de modelado ese estará yendo a  $r(s)$ .

$$y(s) = p(s) * Q(s) * r(s) + d(s) \quad (9)$$

$$p(s) * Q(s) = 1 \quad (10)$$

$$Q(s) = \frac{1}{p(s)} \quad (11)$$

Las funciones de transferencia deben ser estrictamente propias ya que los polos deben ser mayor grado que los zeros.

Definición:

Estabilidad robusta [46], [47] un sistema de control a lazo cerrado es robusto estable si garantiza la estabilidad interna el controlador C del sistema a lazo

cerrado para todos los  $P \in p$ , donde  $p$  es el incorporado de métodos inciertos.

**Tabla 2.** Variables del diseño

Nomenclatura	Variables
E	Error
dm(t)	Perturbación de salida medida
du(t)	Perturbación de salida no medida
lm(t)	Perturbación de carga medida
lu(t)	Perturbación de carga no medida
N	Ruido de medición
P(s)	Planta
Qi(s)	Controlador
r(t)	Referencia
S	Variable de Laplace
u(t)	Variable control
y(t)	Salida medida

**Algoritmo 2:** Estructura de control

Paso 1 **Entrada:**  $(P\{s\}, y(t), dm(t), du(t), lm(t), lu(t), n) | P(s) \in s, dm(t), du(t), lu(t), n \in I_p [0, \infty)$

Paso 2 **Salida:**  $(Qi(s) u(t)) | Qi(s) \in s, u(t) \in R$

Paso 3 **Inicialización:**  $\tilde{N}=P, M=I, \tilde{U}=0, \tilde{V}=I$

Paso 4

$$[y, u] \leftarrow H(P, Ci) * [r, lm, lu, dm, du, n]$$

$$H(P, Ci) \leftarrow [PC_r(I + PC_y)^{-1}, PC_{lm}(I + PC_y)^{-1} + (I + PC_y)^{-1}P, PC_{dm}(I + PC_y)^{-1} + (I + PC_y)^{-1}P, (I + PC_y)^{-1}P, PC_{dm}(I + PC_y)^{-1} + (I + PC_y)^{-1}P, C_r(I + PC_y)^{-1}, C_{lm}(I + PC_y)^{-1} - C_y(I + PC_y)^{-1}P, C_{dm}(I + PC_y)^{-1} - C_y(I + PC_y)^{-1}P, C_y(I + PC_y)^{-1} - C_y(I + PC_y)^{-1}P, C_y(I + PC_y)^{-1}]$$

$$C_y \leftarrow (\tilde{V} - Q_y \tilde{N})^{-1} (\tilde{U} - Q_y M)$$

Paso 5

$$Q_r \leftarrow C_r(I + PC_y)^{-1}$$

$$Q_{lm} \leftarrow C_{lm}(I + PC_y)^{-1} - C_y(I + PC_y)^{-1}P$$

$$Q_{dm} \leftarrow C_{dm}(I + PC_y)^{-1} - C_y(I + PC_y)^{-1}$$

Paso 6:

$$Q_i^0 \leftarrow \underset{Q_i}{\operatorname{argmin}} \sum_{k=1}^4 w_k F_k(Q_i)_2$$

Paso 7 **Retorna**  $Q_i^0$

## 4. Caso de estudio

En esta parte se presenta las simulaciones usando los datos del sistema a prueba desarrollando para estudios de evaluación de la fiabilidad del sistema.

### 4.1 Modelo y validación de la Micro-red

Está basado en el sistema de 14 barras de la IEEE, fue utilizado para poner en práctica nuevas ideas y conceptos. Con la finalidad de validar el sistema de estudio, se realizó una comparación de los valores de los flujos de potencia del caso de estudio presentado. Por lo anterior, se presenta unas tablas que se encuentra a continuación donde se podrá visualizar los datos de las líneas, de carga conectadas a cada uno de los nodos que se apreciará, los niveles de voltaje. La comparación de cargas de ambos sistemas, las potencias en las líneas, se muestra el error de la simulación en la mayoría del sistema de estudio es menor al 0,9% lo cual fue el primer paso en el caso de estudio considerando que no se aplicó ninguna restricción del modelo a utilizar. El sistema consta de red principal que se encuentra en la parte primario del transformador 1, batería conectada en el nodo 1, cargas, líneas en diferentes nodos, motores diesel, transformadores, planta fotovoltaica en el nodo 12 y los generadores como se muestra en la siguiente figura.

El modelo matemático está diseñado para el mejoramiento de la fiabilidad en micro-red es, en el cual en el generador

de diesel se considera un esquema de control fijo prediseñado para ciertos fallos en el controlador para obtener buenos resultados gracias a la robustez de las perturbaciones y la inexactitud que presenta el modelo introducido.

**Tabla 3.** Condiciones terminales del sistema de estudio

Nodo	V[kv]	$\delta$ [deg]	P[pu]	Q[pu]
1	0,38	0,3	0,6	0,2
3	0,38	0	0,006	0
8	21,40	-1,2	0,97	0,127
12	20,50	-4,6	0,448	1,370
Vs	735	0	1	0

**Tabla 4.** Características de carga del sistema de estudio

Nodo	P[pu]	Q[pu]
2	0,59	0,2
3	0,7	0,075
6	0,112	0,075
8	0,295	0,166
10	0,09	0,058
11	0,035	0,018

**Tabla 5.** Características de las líneas del sistema de estudio

Nodo Inicial	Nodo final	R [pu/m]	X [pu/m]	B [pu/m]
1	2	6,11E-05	1,69E-03	1,44E-08
1	5	4,07E-05	1,13E-03	9,61E-09
2	3	4,07E-05	1,13E-03	9,61E-09
2	4	6,11E-05	1,69E-03	1,44E-08

2	5	4,07E-05	1,13E-03	9,61E-09	7	9	2,04E-05	5,63E-04	4,80E-09
3	4	4,88E-05	1,35E-03	1,15E-08	9	14	2,04E-05	5,63E-04	4,80E-09
4	5	6,11E-05	1,69E-03	1,44E-08	10	11	4,07E-05	1,13E-03	9,61E-09
6	11	4,07E-05	1,13E-03	9,61E-09	11	12	4,07E-05	1,13E-03	9,61E-09
6	13	3,06E-05	8,45E-04	7,20E-09	13	14	2,04E-05	5,63E-04	4,80E-09
7	8	2,04E-05	5,63E-04	4,80E-09					

**Tabla 6.** Comparación de potencia de líneas y error del sistema de estudio

Nodo Inicial	Nodo final	Simulink Matlab		PSCAD		Error de simulación	
		P [pu]	Q [pu]	P [pu]	Q [pu]	P	Q
1	2	0,8162	-0,0335	0,8158	-0,0330	0,04%	0,05%
1	5	0,2800	0,0561	0,2740	0,0544	0,60%	0,17%
2	3	0,1430	-0,0258	0,1420	-0,0245	0,10%	0,13%
2	4	0,3316	-0,0189	0,3250	-0,0178	0,66%	0,11%
2	5	0,1901	0,0250	0,1890	0,0200	0,11%	0,50%
3	4	0,7070	-0,0120	0,7020	-0,0060	0,50%	0,60%
4	5	0,2154	-0,0316	0,2100	-0,0230	0,54%	0,86%
6	11	0,1237	-0,2380	0,1200	-0,2359	0,37%	0,21%
6	13	0,1103	0,0138	0,1030	0,0126	0,73%	0,12%
7	8	0,0281	0,2713	0,0245	0,2623	0,36%	0,90%
7	9	0,2565	0,2400	0,2515	0,2330	0,50%	0,70%
9	14	0,2530	0,3100	0,2490	0,3040	0,40%	0,60%
10	11	0,4708	0,0398	0,4624	0,0316	0,84%	0,82%
11	12	0,7641	1,1410	0,7608	1,1370	0,33%	0,40%
13	14	0,1316	0,1596	0,1233	0,1574	0,83%	0,22%

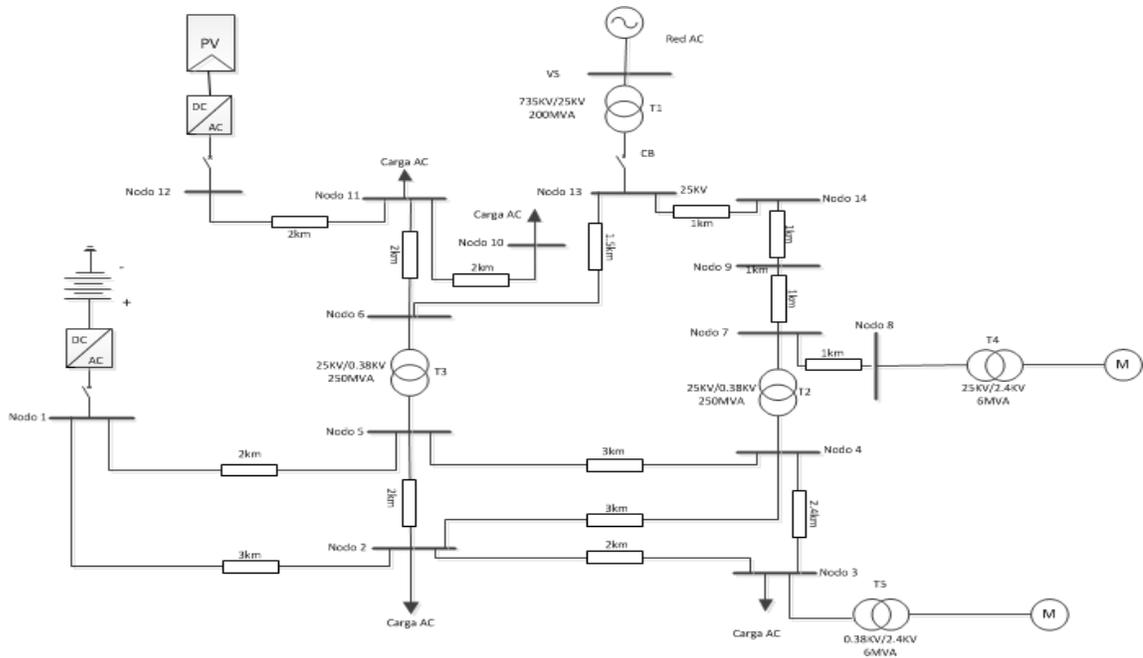


Figura 4. Caso de Estudio

## 4.2 Análisis de resultados.

Nuestro problema de control está diseñado para mantener un valor de referencia  $r=1(\text{pu})$  en los perfiles de voltaje del generador a diesel (generación distribuida) en Micro-red anterior. En este por una sucesión de perturbaciones y fallos internos de los propios sistemas asociados a la estructura de control, como  $l_m$ ,  $d_m$  y  $du$ . Según como se expone en la sección 3.3 se emplea la metodología para resolver el problema de diseño del controlador de múltiples objetivos. Para el caso del control tolerante a fallos del generador, de igual manera se formularon cuatro objetivos independientes con la funcionalidad de mantener el seguimiento a la referencia  $r$ , y al mismo tiempo se compensan los efectos de las perturbaciones y fallas medidas y no medidas.

Los controladores obtenidos por IMC,  $Q_r$ ,  $Q_{l_m}$ ,  $Q_{d_m}$  y  $Q_y$  se obtuvieron de la forma adecuada para que físicamente sean implementables. En la forma experimental se utilizó el modelo de

control interno donde los cambios en los parámetros de la planta de igual forma en el controlador diseñado de medios convencionales, puede presentar mejoramiento en la estabilidad y el método IMC muestra una respuesta como se puede observar en estas siguientes figuras, se muestran los resultados de simulaciones del comportamiento dinámico del controlador y la mejora de la capacidad del mismo en la tolerancia de los fallos internos.

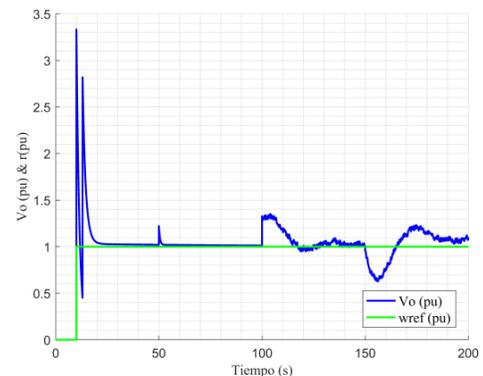


Figura 5. Respuesta dinámica del FTCS ante las diferentes fallas estimadas

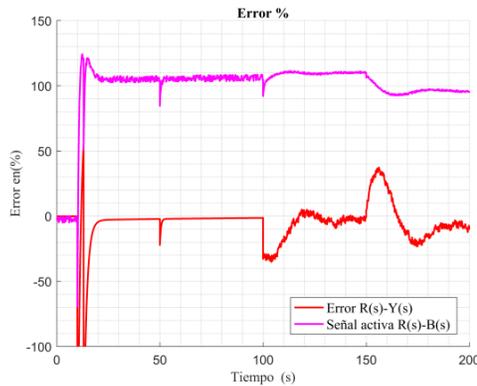


Figura 6. Comportamiento de la señal activa

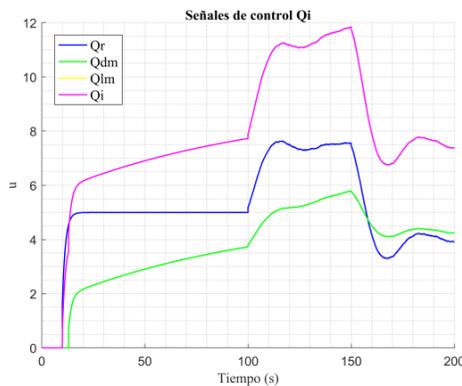


Figura 7. Señal de control

## 5. Conclusiones

Debido a la creciente demanda de energía se han realizado investigaciones sobre las fuentes de energías renovables como la energía fotovoltaica. La reducción de costos de transmisión y distribución eléctrica con mejoramiento en la calidad de potencia para los sistemas. Presentando las etapas de diseño para controlar energía de la central fotovoltaica en el caso de error estacionario y fase con tensión.

El control por modelo interno es de gran aceptación en los procesos debido a su robustez y el rendimiento de control, deben ser probados para su aplicación utilizando los observadores. Con este se ha verificado los puntos de referencias, el rechazo a las fallas en el tiempo, garantiza la estabilidad interna del

circuito cerrado y la robustez que ha logrado.

En el control es esencial de mantener los niveles de voltaje y frecuencia en terminales del generador. Las técnicas han corregido los escenarios de fallas si se realizara el control con PID se aumentaría la robustez del sistema garantizando la estabilidad.

En el control tolerante a fallos (SCTF) el controlador permanece igual y el esfuerzo de control se distribuye a los demás actuadores que estén sin reconfiguración. En la efectividad de los actuadores en el funcionamiento frente a una falla permite mantener el deslizamiento y las condiciones que aseguren al sistema de lazo cerrado permanezcan estables.

La comparación de técnicas pasivas tolerantes a fallas que indican el caso de fallas en las etapas de diseño del controlador que cada método da lugar a sus propiedades únicas y estrategias de adaptación. La técnica sirve para acomodar los fallos multiplicativos como los abruptos en la planta no lineal. Las micro-red es son consideradas soluciones de sistema incluidos en los sistemas de recursos energéticos que la configuración flexible y funcionamiento ayuda a evitar los fallos, los apagones, las pérdidas de estabilidad. La perturbación en la red se despeja, la Micro-red se puede conectar y aumentar la fiabilidad.

Las micro-redes se deben generar decisiones adecuadas para todos los componentes de fuente y almacenamiento que abastezcan a la demanda. Se presentó un modelo fiable para el abastecimiento y distribución de la energía de la cuenta de optimización a la programación lineal, debido a las variaciones del entorno, fallas y subsiguientes reparaciones de

generadores, como simulaciones validas al enfoque propuesto.

Las micro-red es surgen de la integridad de fuentes de energías renovables como una adecuada gestión de este recurso incluyen baja inercia de las unidades de energía interconectadas de la relación donde se introduce importantes retos al sistema de control para la adecuación de gestión del recurso.

En la metodología FTCS en sistemas no lineales son modelados con diferentes métodos que se basan en la modificación de fallos como parámetros de programación.

La aplicación del modelo de control IMC en la micro-red demuestra los resultados que se deben obtener en la implementación del controlador por la simulación el cual se podría implementar en aplicaciones reales

El modelo de control IMC mostrado está orientado en el sistema estable que permite una respuesta robusta ante variaciones de las condiciones del controlador. Son de gran interés los resultados porque se mantiene en un periodo un comportamiento oscilatorio, sin embargo, con el controlador IMC diseñado tiende a estabilizar la señal.

El diseño del controlador IMC fue ajustado para la robustez de ante los disturbios en el modelo porque es capaz de soportar los errores de modelado que, en la forma clásica, su estructura depende de la planta.

## 6. Trabajos Futuros

Esta revisión ayudara a desarrollar futuros trabajos en micro-redes para incluir metodologías de control tolerante a fallas a través de diagnóstico. Las direcciones recomendadas son:

- Estudio de los efectos de fallos eléctricos sobre el comportamiento

dinamico de la MG y la ley de control. .

- Análisis de fiabilidad atendiendo a múltiples fallos (internos y externos) del sistema de control mediante el uso diferentes algoritmos de la detección de fallos en la micro-red: Modelo de Control Predictivo (MPC),  $H_{\infty}$  Control Óptimo, Lógica difusa, Redes Neuronales, entre otros.

## 7. Referencias

- [1] M. Blanke, M. Staroswiecki, and N. E. Wu, "Concepts and methods in fault-tolerant control," *Proc. 2001 Am. Control Conf. (Cat. No.01CH37148)*, vol. 5, pp. 2606–2620, 2001.
- [2] A. Vargas-mart, L. E. Garzaca, and R. Morales-menendez, "Sistemas de Control Tolerante a Fallas en Redes de Distribución de Energía," *Clca 2014*, 2014.
- [3] S. Saludes Rodil and M. J. Fuente, "Control IMC no lineal tolerante a fallos," *Rev. Iberoam. Automática e Informática Ind. RIAI*, vol. 4, no. 2, pp. 52–63, 2007.
- [4] J. Chen, "Active Fault-Tolerant Flight Control Systems Design using the Linear Matrix Inequality Method," vol. 21, no. 2, pp. 1–17, 1999.
- [5] M. Shafiq, "Internal model control structure using adaptive inverse control strategy.," *ISA Trans.*, vol. 44, no. 3, pp. 353–362, 2005.
- [6] J. Jiang and X. Yu, "Fault-tolerant control systems: A comparative study between active and passive approaches," *Annu. Rev. Control*, vol. 36, no. 1, pp.

- 60–72, 2012.
- [7] Q. Shen, B. Jiang, and P. Shi, “Active Fault-tolerant Control Against Actuator Fault and Performance Analysis of the Effect of Time Delay Due to Fault Diagnosis,” vol. 15, no. X, pp. 1–10, 2017.
- [8] J. M. Rey-López, P. P. Vergara-Barrios, G. A. Osma-Pinto, and G. Ordóñez-Plata, “Generalities about Design and Operation of Microgrids,” *Dyna*, vol. 82, no. 192, pp. 109–119, 2015.
- [9] J. H. Lee, M. Morari, and C. E. Garcia, “State-space interpretation of model predictive control,” *Automatica*, vol. 30, no. 4, pp. 707–717, 1994.
- [10] N. Chawankul, H. Budman, and P. L. Douglas, “The integration of design and control: IMC control and robustness,” *Comput. Chem. Eng.*, vol. 29, no. 2, pp. 261–271, 2005.
- [11] J. Hare, X. Shi, S. Gupta, and A. Bazzi, “Fault diagnostics in smart micro-grids: A survey,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 60, pp. 1114–1124, 2016.
- [12] D. E. Olivares *et al.*, “Trends in microgrid control,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 4, pp. 1905–1919, 2014.
- [13] I. Prodan, E. Zio, and F. Stoican, “Fault tolerant predictive control design for reliable microgrid energy management under uncertainties,” *Energy*, vol. 91, pp. 20–34, 2015.
- [14] R. D. Medina, “Micro-redes basadas en Electrónica de Potencia: Características, Operación y Estabilidad,” pp. 1–10, 2014.
- [15] F. Katiraei, R. Iravani, N. Hatziargyriou, and A. Dimeas, “Microgrids Management,” in *Controls and Operation Aspects of Microgrids*, vol. 6, no. June, IEEE Power and Energy Magazine, 2008, pp. 54–65.
- [16] M. S. Mahmoud, N. M. Alyazidi, and M. I. Abouheaf, “Adaptive intelligent techniques for microgrid control systems: A survey,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 90, pp. 292–305, 2017.
- [17] N. Bottrell and T. C. Green, “Modeling microgrids with active loads,” *2012 IEEE 13th Work. Control Model. Power Electron. COMPEL 2012*, 2012.
- [18] J. Rey, P. Vergara, G. Osma, and G. Ordóñez, “Consideration for the Design and Implementation of Microgrids,” *VII Simp. Int. sobre Calid. la Energía Eléctrica 2013 SICEL*.
- [19] P. Pablo and V. Barrios, “Diseño de una microred de baja tensión para el Laboratorio de Integración Energética del Parque Tecnológico de Guatiguará, Universidad Industrial de Santander, UIS, 2012.” Universidad Industrial de Santander, 2012.
- [20] G. A. Osma Pinto, “Uso racional de la energía a partir del diseño de aplicaciones sostenibles en el Complejo E3T de la Universidad Industrial de Santander,” *Grupoenergiadebogota.Com*, p. 322, 2011.
- [21] F. A. Viawan, *Voltage Control and Voltage Stability of Power Distribution Systems in the Presence of Distributed Generation*. 2008.
- [22] E. Karatepe and T. Hiyama, “Controlling of artificial neural network for fault diagnosis of

- photovoltaic array,” *Intell. Syst. Appl. to*, pp. 1–6, 2011.
- [23] D. Arias Cazco, R. A. Robayo Vasco, and L. Ortiz Matos, “Novel inteligente Step Voltaje Regulator (SVR) for residential electrical connections,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 14, no. 4, pp. 1656–1661, 2016.
- [24] A. Aguila, D. Carrión, and L. Ortiz, “Analysis of power losses in the asymmetric construction of electric distribution systems,” *IEE Lat. Am. Trans.*, vol. 13, no. 7, pp. 2190–2194, 2015.
- [25] H. Gorgiin, M. Arcak, S. A. Bortoff, and S. Varigonda, “Nonlinear Observer Design for Fuel Processing Reactors in Fuel Cell Power Systems,” 2004.
- [26] S. De Lira, V. Puig, J. Quevedo, and A. Husar, “LPV observer design for PEM fuel cell system : Application to fault detection &,” *J. Power Sources*, vol. 196, no. 9, pp. 4298–4305, 2011.
- [27] J. G. Calderón-Guizar, “Estudios de estabilidad transitoria en sistemas eléctricos industriales con generación propia interconectados con el sistema de transmisión,” *Ing. Investig. y Tecnol. Núm.*, vol. 4, pp. 445–451, 2010.
- [28] M. RIOS, C. Zapata, and O. Gómez, “Medidas para mitigar Problemas de Estabilidad de Voltaje,” 2008.
- [29] M. Blanke, M. Kinnaert, J. Lunze, and M. Staroswiecki, *Diagnosis and Fault-Tolerant Control*, 2nd ed. 2006.
- [30] R. Aghatehrani and R. Kavasseri, “Sensitivity-Analysis-Based Sliding Mode Control for Voltage Regulation in Microgrids,” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 4, no. 1, pp. 50–57, 2013.
- [31] X. LIU, X. WANG, Z. Kai, and L. Jinyuan, “Design of Variable Pitch-control System Based On Two-degree-of-freedom Internal Model Control,” *II -Internal Model Control*, no. 60574018.
- [32] P. Leo H. Chiang, MS -Richard D. Braatz, *Fault detection and diagnosis in industrial systems*. 2005.
- [33] M. Kishida and R. D. Braatz, “Internal model control of infinite dimensional systems,” *2008 47th IEEE Conf. Decis. Control*, pp. 1434–1441, 2008.
- [34] C. A. Cañizares and Z. T. Faur, “Analysis of SVC and TCSC Controller in Voltage Collapse,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 14, no. 1, pp. 158–165, 1999.
- [35] T. a. Papadopoulos, P. N. Papadopoulos, A. J. Roscoe, G. M. Burt, G. K. Papagiannis, and P. Crolla, “Black-box dynamic equivalent model for microgrids using measurement data,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 8, no. 5, pp. 851–861, 2014.
- [36] J. R. Araújo, E. N. M. Silva, A. B. Rodrigues, and M. G. da Silva, “Assessment of the Impact of Microgrid Control Strategies in the Power Distribution Reliability Indices,” *J. Control. Autom. Electr. Syst.*, 2017.
- [37] M. Morari and E. Zafiriou, “Robust process control.,” *Chemical Engineering Science*, vol. 45, no. 4. p. 1149, 1990.
- [38] K. Zhou, J. C. Doyle, and K. Glover, *Robust and Optimal Control*, vol. 40. 1996.
- [39] M. G. Zarch, J. Poshtan, and V. Puig, “Fault Tolerance Evaluation of Nonlinear Systems using

- Viability Theory,” vol. 2, pp. 4–6, 2016.
- [40] L. O. Matos, J. Wilson, and G. Sanchez, “Reconfiguration Strategy for Fault Tolerance of Power Distribution Systems Using Petri Net,” in *Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM), IEEE*, 2016, p. Smart grid, fault tolerance systems, GEMMA, petri.
- [41] R. Isermann, *Fault-Diagnosis Systems: An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance*. 2006.
- [42] A. Zheng, M. V. Kothare, and M. Morari, “Anti-windup design for internal model control,” *Int. J. Control*, vol. 60, no. 5, pp. 1015–1024, 1994.
- [43] H. Alwi and C. Edwards, “Fault tolerant control using sliding modes with on-line control allocation,” *Automatica*, vol. 44, no. 7, pp. 1859–1866, 2008.
- [44] A. Sim and H. Heng, “A Constrained Optimisation Approach for Designing Reliable Robust  $H_\infty$  Control Systems,” no. September, 2016.
- [45] G.-H. Yang and D. Ye, “Reliable  $H$  control of linear systems with adaptive mechanism,” *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 55, no. 1, pp. 242–247, 2010.
- [46] J. Hossain and H. R. Pota, *Robust Control for Grid Voltage Stability: High Penetration of Renewable Energy*, vol. 1987. 2014.
- [47] A. Mesbah and R. D. Braatz, “Design of Multi-objective Control Systems with Optimal Failure Tolerance,” *Control Conf. (ECC), 2013 Eur.*, pp. 2963–2968, 2013.