

**SISTEMA DE CONTROL TOLERANTE A FALLOS PASIVO PARA  
DISPOSITIVOS DE COMPENSACIÓN DINÁMICOS INSTALADOS EN  
MICRO-RED HÍBRIDA INTELIGENTES BASADO EN  $H_\infty$  Y REDES  
NEURONALES ARTIFICIALES**



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA:  
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de  
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:  
SISTEMA DE CONTROL TOLERANTE A FALLOS PASIVO PARA  
DISPOSITIVOS DE COMPENSACIÓN DINÁMICOS INSTALADOS EN  
MICRO-RED HÍBRIDA INTELIGENTES BASADO EN  $H_{\infty}$  Y REDES  
NEURONALES ARTIFICIALES**

**AUTOR:  
JESSICA PAOLA RAMÍREZ GARCÍA**

**TUTOR:  
LEONY ORTIZ MATOS**

**Quito, enero 2022**

Jessica Paola Ramírez García

**SISTEMA DE CONTROL TOLERANTE A FALLOS PASIVO PARA DISPOSITIVOS DE COMPENSACIÓN DINÁMICOS INSTALADOS EN MICRO-RED HÍBRIDA INTELIGENTES BASADO EN  $H_{\infty}$  Y REDES NEURONALES ARTIFICIALES**

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2022  
Ingeniería Eléctrica

Breve reseña histórica e información de contacto.



**Jessica Paola Ramírez García** (Y'1997). Realizó sus estudios en la “Unidad Educativa Particular Jesús de Nazareth”, se graduó de bachiller en “Ciencias Generales” con Auxiliar en “Informática y Programación”. Egresada de la Carrera de Ingeniería Eléctrica en la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo trata de un Sistema de control tolerante a fallos pasivo para dispositivos de compensación dinámicos instalados en Micro-Red híbrida inteligentes basado en  $H_{\infty}$  y redes neuronales artificiales. [jramirezg4@est.ups.edu.ec](mailto:jramirezg4@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. [lortiz@ups.edu.ec](mailto:lortiz@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©  
2022 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 Sistema de Control Tolerante a Fallos Pasivo para Dispositivos de Compensación Dinámicos instalados en Micro-red Híbrida Inteligentes basado en  $H_{\infty}$  y Redes Neuronales Artificiales, realizado por Jessica Paola Ramírez García, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito, enero de 2022

.....  
  
Leony Ortiz Matos

Cédula de identidad: 175423038-9

## **CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR**

Yo, Jessica Paola Ramírez García, con documento de identificación N° 1721705950, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor/es del trabajo de grado/titulación intitulado: Sistema de Control Tolerante a Fallos Pasivo para Dispositivos de Compensación Dinámicos Instalados en Micro-Red Híbrida Inteligentes Basado en H<sub>∞</sub> y Redes Neuronales Artificiales, 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 autor 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 digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, enero de 2022



Jessica Paola Ramírez García

1721705950

## INDICE GENERAL

1. Introducción .....	2
2. Micro-red .....	4
3. Red neuronal .....	4
4. Compensador Estático de Reactivos (SVC).....	5
5. H Infinito ( $H_{\infty}$ ) .....	5
6. Planteamiento del problema.....	6
6.1. Tolerancia a fallos .....	6
6.2. Diseño del $H_{\infty}$ .....	7
6.3. Algoritmo de diseño.....	7
7. Caso de estudio y Análisis de Resultados .....	8
7.1. Falla incipiente.....	9
7.2. Falla abrupta.....	10
8. Conclusiones .....	11
9. Trabajos Futuros .....	11
10. Referencias.....	11
11. Matriz de Estado del Arte .....	16
12. Resumen de Indicadores .....	19

## INDICE DE TABLAS

Figura 1. Resumen. ....	3
Figura 2. Esquema de una neurona artificial.....	4
Figura 3. Diagrama H-infinito.....	6
Figura 4. Zona del controlador.....	7
Figura 5. Diseño del regulador de voltaje. ....	7
Figura 6. Falla incipiente en primario. ....	9
Figura 7. Falla abrupta en primario.....	9
Figura 8. Acción de control, falla incipiente.....	9
Figura 9. Error, falla incipiente.....	9
Figura 10. Voltaje RMS, fase A falla incipiente.....	10
Figura 11. Acción de control, falla abrupta. ....	10
Figura 12. Error, falla abrupta.....	10
Figura 13. Voltaje RMS, fase A falla abrupta.....	11

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Algoritmo diseño  $H_\infty$ .....7  
Tabla 2. Funciones Utilizadas .....8  
Tabla 3. Matriz Estado del Arte ..... 16

# SISTEMA DE CONTROL TOLERANTE A FALLOS PASIVO PARA DISPOSITIVOS DE COMPENSACIÓN DINÁMICOS INSTALADOS EN MICRO-RED HÍBRIDA INTELIGENTES BASADO EN $H_{\infty}$ Y REDES NEURONALES ARTIFICIALES

## Resumen

Para esta investigación se desarrolla un sistema de control tolerante a fallos pasivos para una Micro-red híbrida, orientado a aquellos fallos que resultan como consecuencia de daños comunes en sus sistemas de sensado. El método planteado utiliza el controlador  $H_{\infty}$  y a las redes neuronales como observador de estados mediante la implementación de fallas de sensado como casos de estudio. Esta investigación permite desarrollar los parámetros de configuración del Sistema de Control de  $H_{\infty}$ . Las simulaciones, validación, la identificación de la planta y el diseño del controlador se llevan a cabo por medio software Matlab/Simulink. Para ello, esta investigación utiliza como fuente de comprobación y validación, ensayos realizados en una Micro-red tipo benchmarking. La investigación muestra valiosos resultados como: mejoras en el comportamiento de la señal de salida del controlador del SVC expuesto a los fallos de sensado, disminución el error con respecto al controlador clásico PID; lo que valida la funcionalidad del controlador tolerante a fallos desarrollado para dispositivos SVCs.

**Palabras Clave:** Micro-red, Dispositivo de Compensación Dinámico; Control robusto, Control  $H_{\infty}$ , Redes Neuronales Artificiales, Control Tolerante a Fallos.

## Abstract

For this investigation, a passive fault tolerant control system is developed for a hybrid microgrid, oriented to those failures that result as a consequence of common damages in its sensing systems. The proposed method uses the  $H_{\infty}$  controller and neural networks as state observer by implementing sensing faults as case studies. This investigation allows developing the configuration parameters of the  $H_{\infty}$  Control System. Simulations, validation, plant identification and controller design are carried out by means of Matlab/Simulink software. For this purpose, this research uses as a source of verification and validation, tests performed in a benchmarking type Microgrid. The research shows valuable results such as: improvements in the behavior of the SVC controller output signal exposed to the sensing faults, decrease of the error with respect to the classical PID controller, which validates the functionality of the fault tolerant controller developed for SVC devices.

**Keywords:** Microgrids, Dynamic Compensating Device, Robust control,  $H_{\infty}$  Control, Artificial Neural Networks, Fault Tolerance Control.

## 1. Introducción

Las necesidades energéticas en cada zona de la tierra continúan incrementando especialmente debido al surgimiento de industrias y a las necesidades relacionadas al transporte. En este sentido, tales requerimientos han hecho que surjan nuevas formas de generación de la energía eléctrica mediante recursos energéticos renovables y la utilización de redes de un tamaño inferior a las tradicionales denominadas Micro-Redes (MR) [1]–[3]. Las MR pueden ser entendidas como sistemas eléctricos de pequeña escala que contienen varios generadores distribuidos, cargas, así como sistemas de almacenamiento de la energía [1], [4]–[6].

Debido al surgimiento de nuevos tipos de cargas como son los vehículos eléctricos y sus sistemas de almacenamiento que funcionan con corriente directa, que se conectan en conjunto con las cargas de corriente alterna que son las más recurrentes en redes domésticas [4].

Las MR mezcladas o híbridas de tipo AC/DC han tomado especial relevancia para los investigadores, debido a la factibilidad que ofrece cada tipo de MR, con la única necesidad de inclusión de dispositivos de conversión de la energía que funcionan con elementos de electrónica de potencia [7]–[14].

Las MR por sus características deben ser capaces de funcionar tanto en modo de red conectada como en forma independiente y para cada modo debe existir una correcta operación y control, que incluso debería ser capaz de resistir ciertos problemas y fallos [1], [4], [22], [23], [14]–[21].

En este sentido las operaciones de control también deben considerar aspectos característicos de ciertas formas de generación como la eólica y la solar,

donde la variabilidad y la intermitencia son comunes; y son aspectos que se deben considerar para una operación continua, estable, segura y resiliente de la MR híbrida. Existen diferencias y cambios significativos de una red eléctrica tradicional, respecto a las características que ofrecen las MR, en especial aquellas que operan en AC y DC. En los aspectos relacionados al control y los problemas que podrían darse en la operación, tales cambios tienen directa relación con la existencia de operaciones de control distribuidas y la existencia de flujos de potencia que son bidireccionales [24], [25].

Como se ha indicado previamente, uno de los aspectos más relevantes del correcto funcionamiento de la MR es contar con un control robusto; el mismo que tendría que ser capaz de soportar la existencia de fallos en diversos componentes del sistema de control y la MR.

Durante los eventos de fallo y malfuncionamiento de los sensores y actuadores de los diversos subsistemas de la MR, los sistemas de control con retroalimentación más tradicionales podrían no ser capaces de garantizar la estabilidad del sistema ni un rendimiento adecuado de todos los componentes.

Por ello, existen nuevas estrategias para el manejo de este tipo de red entre las que podemos nombrar los controles tolerantes a fallos (FTC) por sus siglas en inglés [1], [14], [16], [17], [20], [22], [23]. Tales estrategias permiten el surgimiento de sistemas de control que son tolerantes a fallos (FTCS), mismos que pueden superar las deficiencias antes planteadas [26].

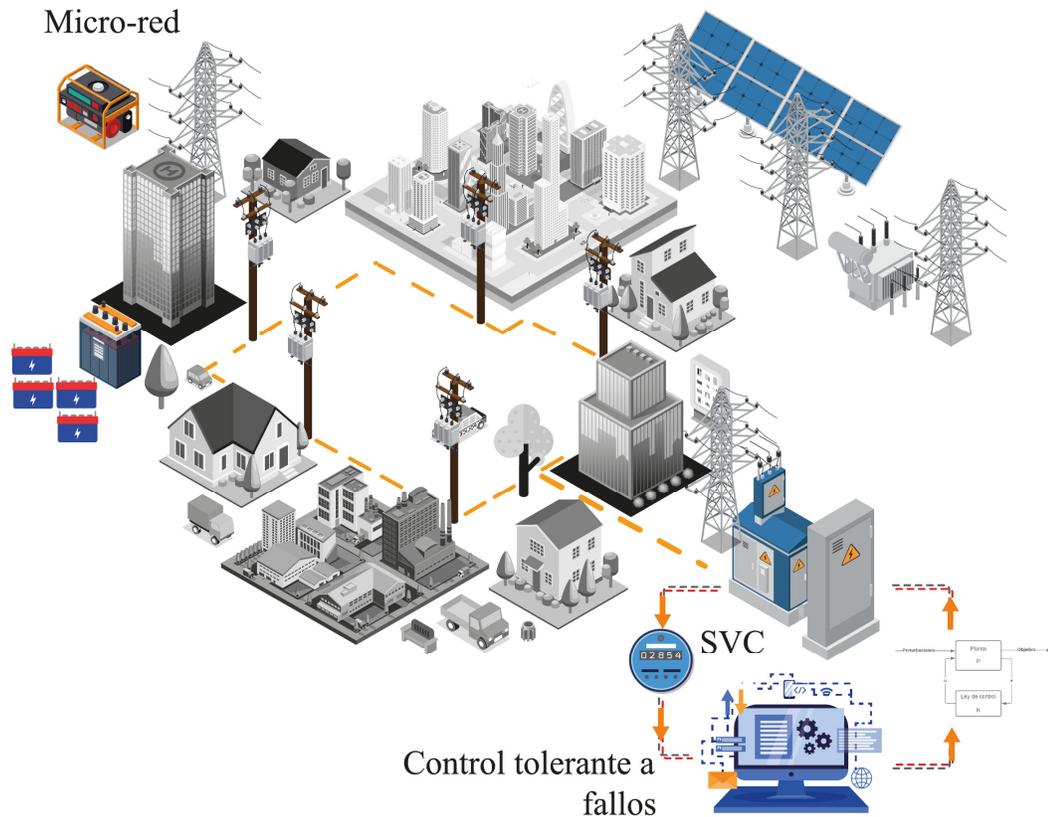


Figura 1. Micro-red Híbrida tipo Benchmark con Sistema SVC

Los controles tolerantes a fallos pueden ser divididos en dos grupos: controles activos (AFTCS), que son aquellos que contienen estrategias de diagnóstico y detección de fallos en tiempo real mediante el uso de la información. Los sistemas de control activo también contienen mecanismos de reconfiguración que permiten mantener a la MR estable y un aceptable rendimiento aun cuando existan fallos en diversos componentes del sistema [1], [26], [27].

Los controles tolerantes a fallos que son pasivos en cambio están diseñados para que tengan una única estructura robusta, es decir no tienen forma de ser reconfigurados automáticamente durante los eventos de fallos. Otra diferencia es que no consideran la información que puede tener un sistema de detección y diagnóstico de fallos (FDD) [1], [26].

Los sistemas de control que toleran fallas han sido estudiados extensamente

y existen diversas propuestas que funcionan en modo de red conectada y también cuando la MR opera independientemente.

La operación en modo conectado a la red convencional está soportada en los parámetros de la red principal y la mayoría de propuestas que han sido establecidas previamente están relacionadas con el uso de bancos de capacitores y de sistemas de transmisión flexibles de AC (FACTS); en el caso de las estrategias de control avanzadas, también se emplean regulaciones de voltaje en las zonas de generación [1], [28].

Por otra parte, en la operación aislada, los investigadores han determinado que existen otras necesidades como por ejemplo la correcta elección del sistema generador que se convierte en el líder de frecuencia[28].

Principalmente cuando existe alta penetración de fuentes de generación con energías renovables en las que las características inherentes de intermitencia y discontinuidad son normales y complican el uso de estrategias tradicionales de control de las MR [28].

En [28] se presenta un sistema FTC que permite tener una tolerancia a los fallos en función de un controlador adaptativo basado en el modelo mediante un control PID sintonizado mediante algoritmo genético y una estructura con inteligencia, se plantea que esta estructura garantiza un seguimiento de las condiciones de la MR, lo que permite la regulación de frecuencia, de la amplitud de voltaje. Para ello se propone la existencia de escenarios con fallos incluyendo averías de los actuadores, conexión de carga súbita, así como fallas de duración corta; lo que permite poner a prueba el rendimiento de la propuesta planteada.

## 2. Micro-red

Las MR son en general un conjunto revolucionario de elementos que trabajan en conjunto para generar, transportar y suministrar de potencia a un conjunto de cargas en una determinada zona geográfica que puede operar de modo aislado o con un vínculo de interconexión con una red convencional. Esto implica que una MR debe contar con elementos de generación y cargas que busquen un equilibrio constante en función de los recursos disponibles a nivel tecnológico y ambiental. En general las MR hacen uso de sistemas de generación que aprovechan recursos renovables como son el agua, viento, calor o radiación proveniente del sol [29]–[31].

Los sistemas de generación y los puntos de consumo se vinculan por

sistemas de distribución que pueden ser en AC o en DC con la correspondiente necesidad de disponer de elementos de conversión AC/DC o DC/AC [32].

Por otro lado, y debido a la necesidad de cubrir deficiencias que podrían darse por las implicaciones de un sistema completo pero con recursos limitados se pueden disponer de sistemas de compensación reactiva e incluso sistemas de almacenamiento que a la larga mejoran la calidad del servicio [32]–[34].

## 3. Red neuronal

Se puede concebir un modelo abstracto bastante simple del funcionamiento de una neurona artificial la cual se puede observar en la figura 2.

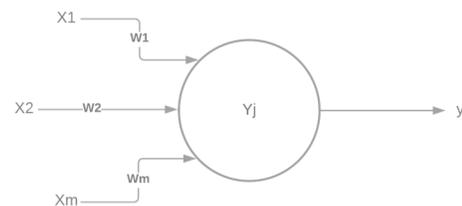


Figura 2. Esquema de una neurona artificial.

La neurona artificial está compuesta por un conjunto de pesos representados en los valores  $W_1, W_2, W_m$  y que representa las conexiones sinápticas de una neurona real, un vector  $x$  que compone las entradas y finalmente una salida de la unidad representada por  $y$  que es resultado de una función de activación representada por la expresión que continúa.

$$y = \gamma \left( \sum_{i=1}^m W_i X_i + W_0 \right) \quad (1)$$

En donde  $W_0$  representa el umbral de acción o activación mientras que la función de activación es representada por  $\gamma$ .

Una red neuronal artificial es la composición computacional de múltiples procesadores elementales compuestas por un sistema adaptativo que mediante un algoritmo es capaz de ajustar sus pesos con el fin de conseguir mejorar el desempeño con el uso de muestras[35].

Una de las principales ventajas que presenta el uso de redes neuronales artificiales es la facilidad de uso de datos de entrenamiento mediante procesos supervisados o no supervisados[35].

El proceso supervisado se da al hacer uso de datos de entrada y salida bien conocidos esperando que lo datos de salida de la red neuronal sea lo más parecida posible a los datos de salida que se disponen[35].

El aprendizaje no supervisado hace uso de conjunto de patrones que a la larga sean válidos para encontrar estructuras o configuraciones que estén presentes en los datos [35].

#### **4. Compensador Estático de Reactivos (SVC)**

Dentro de los dispositivos de tipo FACT, el compensador estático de reactivos se sitúa en la categoría de aquellos que tienen una conexión en derivación. El dispositivo en cuestión consiste en un inductor controlado por medio de electrónica de potencia denominados tiristores y que recibe el nombre de TCR [36].

Mediante el control correcto del disparo de los TCR, se consigue una variación de la reactancia que a la larga implica un cambio en el consumo de potencia reactiva en el punto de conexión del compensador con lo cual es posible mejorar el factor de potencia en dicho punto y por tanto controlar también el voltaje de la barra [36]–[39].

El control del dispositivo se da por medio de la modificación del ángulo de

disparo de los elementos de potencia que componen el SVC.

Dicha lógica de control es emitida por lazos de control que pueden contener controladores PI, PID o incluso opciones más robustas como la que será implementada en la presente investigación [40]–[43].

Los dispositivos de compensación reactiva son utilizados en las MR con la finalidad de compensar el factor de potencia que se encuentre fuera de parámetros normales [36], [44]

Por efectos de las cargas conectadas al sistema, una alteración en el factor de potencia trae como consecuencia la afectación en el voltaje del sistema en las barras del sistema [36], [44].

Por otro lado, es usual que en las MR los sistemas de generación requieran de consumos o por principios propios de generación ocasionen modificaciones en los valores reactivos lo cual puede ocasionar una baja en el voltaje de salida de las unidades y por tanto una baja de potencia, esto se soluciona con la instalación de un SVC [36], [44].

#### **5. H Infinito ( $H_{\infty}$ )**

Se utiliza para conseguir controladores de rendimiento garantizado y que son estables, el uso de estos modelos se plantea como un problema de optimización mediante el cual se encuentra un modelo que cumpla con el objetivo.

Una de las principales ventajas del método es ampliamente aplicable en sistemas multivariable mientras que parte de las desventajas contempla un alto nivel de conocimiento matemático y un entendimiento del sistema que será controlado.

El nombre del método parte dado que la optimización se realiza sobre el llamado espacio de Hardy en la mitad

positiva del plano complejo y representa el máximo valor sobre el espacio mencionado siendo entendido como la máxima ganancia en cualquier dirección y en cualquier frecuencia para un sistema SISO, es la magnitud máxima de la respuesta en frecuencia. Entre sus usos se destaca la reducción del impacto de una perturbación en un lazo cerrado que puede ser observado a modo de estabilidad o rendimiento.

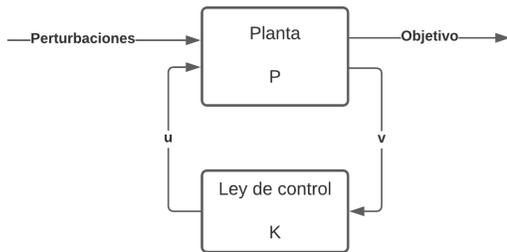


Figura 3. Diagrama H-infinito

La planta representada en la figura 3 por medio de  $P$  posee dos entradas compuestas por una entrada exógena que incluye una señal de referencia, perturbaciones y señales manipuladas.

Por otro lado, se dispone de 2 salidas entre las cuales se dispone de una señal de error que debe ser minimizada y las variables medidas que será usadas como señales de control en el sistema.

Mediante las señales medidas y el valor de  $K$  se puede calcular las variables manipuladas. La expresión 1 muestra de manera matricial para formular el problema [22], [45], [46].

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} z \\ v \end{bmatrix} &= P(s) \begin{bmatrix} w \\ u \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} P_{11}(s) & P_{12}(s) \\ P_{21}(s) & P_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ u \end{bmatrix} \\ u &= K(s) v \end{aligned} \quad (2)$$

Es posible entonces calcular la dependencia de  $z$  respecto a  $w$  por medio de la transformación fraccional lineal inferior lo cual se muestra en las expresiones que continúan.

$$z = F_\ell(P, K)w$$

$$F_\ell(P, K) = P_{11} + P_{12}K(I - P_{22}K)^{-1}P_{21} \quad (3)$$

De acuerdo con lo antes mencionado se conoce que el objetivo del método en cuestión requiere encontrar un controlador  $K$  de modo que  $F_\ell(P, K)$  sea minimizado de acuerdo con la norma  $H_\infty$  siendo lo mismo aplicable al diseño realizado por medio de  $H_2$ . Existen algunas técnicas para alcanzar el objetivo entre las que se menciona la parametrización de Youla-Kucera que lleva a controladores de orden muy alto, métodos basados en la resolución de 2 ecuaciones de Riccati requiriendo muchas simplificaciones y finalmente el método basado en optimización con una reformulación de Riccati usando matrices lineales de desigualdades, método que requiere pocas suposiciones [47].

## 6. Planteamiento del problema

### 6.1. Tolerancia a fallos

Se dice que un controlador es tolerante a fallos cuando este controlador es capaz de mantener los objetivos de control a pesar de que el mismo se encuentre sujeto a la ocurrencia de fallos, los fallos en mención pueden ser fallos aditivos o no aditivos en función de la alteración que le causan siendo estos principalmente alteraciones a las mediciones que a la larga crean modificaciones en las ecuaciones del espacio de estados. Mientras que las fallas no aditivas o multiplicativas ocasionan cambios en los términos del espacio de estados.

La tolerancia a fallos entonces puede buscar estrategias pasivas o activas pudiendo en casos mantener el controlador con cambios en sus parámetros mientras que en otros casos

se puede reconfigurar las leyes de control [1], [14].

### 6.2. Diseño del $H_\infty$

La señal de control es manipulada directamente por el controlador, el cual reemplaza a uno tradicional de tipo PI que formaba parte del sistema de control y cuyo rendimiento será comparado con el controlador  $H_\infty$ .

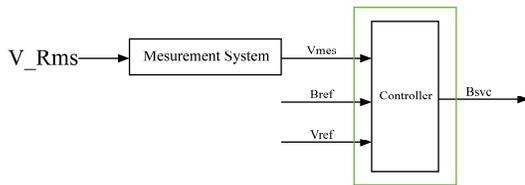


Figura 4. Zona del controlador.

La figura 4 ilustra la zona del controlador en la cual se introduce el controlador robusto. Se puede observar que las variables que son medidas son aquellas que corresponden a señales de voltaje además de contar con valores que corresponden a referencias necesarias para generar señales de control adecuadas.

Por otro lado, en la figura 5 se puede observar el modo en el cual se coloca el controlador diseñado dentro del regulador de voltaje considerando la necesidad de reducir el error a 0. El error corresponde a aquellos valores que resultan de la diferencia entre el voltaje medido y el voltaje de referencia además de sustraer el valor correspondiente a la señal de control en este caso representada por el Bsvc con lo cual se entiende que el controlador actúa directamente sobre la señal de control.

### 6.3. Algoritmo de diseño

La tabla 1 muestra el algoritmo utilizado en el diseño de un controlador basado en el uso de  $H_\infty$ .

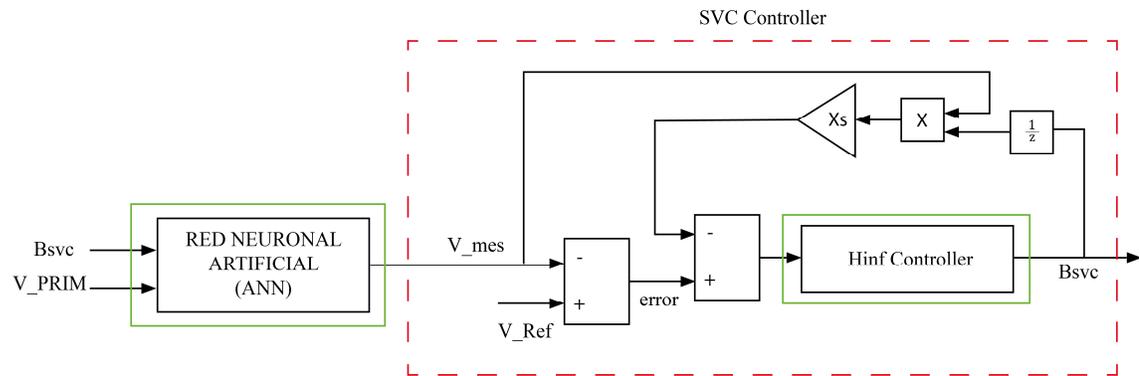


Figura 5. Diseño del regulador de voltaje.

Tabla 1. Algoritmo diseño  $H_\infty$ .

Algoritmo 1: Diseño controlador $H_\infty$	
<b>Paso 1</b>	<b>Entradas</b> $P = ss(A,B,C,D)$

<b>Paso 2</b>	<b>Polos y ganancia de DC</b> $M=M/(dcgain(M)*dcgain(P(1,:)))$ $R_{ideal}=P*M$
<b>Paso 3</b>	<b>Ancho de banda</b> $Om_c=bandwidth(P(1,:)*M)$
<b>Paso 4</b>	<b>Uso de NCFSYN</b> $[Cinf,gam]=ncfsyn(Pw)$

	Cinf=-Cinf Perfmargin=1/gam C1=Wi*Cinf*Wo L=P*C1
<b>Paso 5</b>	<b>Pre filtro</b> Qhat=(T(1,:)*Q0) Qhat=minreal(Qhat,[ ],false) Q=Q0*Qhat
<b>Paso 7</b>	<b>Control general</b> Controller=minreal(Controller,[ ],false)
<b>Paso 8</b>	<b>Salida</b> Controller
<b>Paso 8</b>	<b>Final</b>

Por otro lado, la tabla 2 muestra las funciones utilizadas para el desarrollo del algoritmo de la tabla 1 cabe especificar que las funciones indicadas corresponden a funciones utilizadas y disponibles en Matlab.

Tabla 2. Funciones Utilizadas

Función	Descripción
dcgain	Calcula la ganancia de baja frecuencia (DC) de sistemas LTI.
bandwidth	Calcula el ancho de banda de un sistema SISO
ncfsyn	Diseña un controlador, basado en el diseño H $\infty$ de Glover McFarlane.
minreal	Calcula el valor mínimo más probable

## 7. Caso de estudio y Análisis de Resultados

Para el presente estudio se propone la utilización de un sistema de prueba tipo benchmark el cual representa una MR de 13 barras compuesta por 2 sistemas de almacenamiento de energía, 2 plantas de generación fotovoltaica, 1 generador diésel, un punto de interconexión con una red convencional además de cargas lineales y no lineales y finalmente un SVC.

Dicho controlador es sujeto a simulaciones para obtener un modelo detallado de la planta por medio de la utilización de espacios de estados, el

proceso de simulación arroja una planta del controlador del SVC [11].

El método planteado es probado con la ocurrencia de fallas de sensado no maliciosa de tipo incipiente y abrupta en el primario del sistema de control, el controlador diseñado por medio de la metodología H $\infty$  es implementado dentro del SVC

El controlador que se obtiene por medio del proceso de diseño propuesto en el presente documento arroja los parámetros para el controlador de acuerdo con lo mostrado por la expresión (4).

$$A = \begin{bmatrix} -2.8589e+3 & -437.5202 & -200.3750 \\ -189.3177 & -108.0308 & -119.0287 \\ -31.9593 & 10.5618 & -21.6496 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$B = \begin{bmatrix} -2.2530e+3 \\ 9.5451e+3 \\ -2.5641e+3 \end{bmatrix}$$

$$C = [-2.6847e-17 \quad -6.3176e-17 \quad 3.6174e-19]$$

$$D = 0$$

Por otro lado, la red neuronal que se implementa está diseñada para trabajar con 2 entradas, cada capa tiene un total de 10 neuronal en su capa oculta mientras que cada una tiene 3 neuronas de salida. Se dispone de 2 sistemas de tipo NARX y cada una es utilizada de manera independiente para trabajar con las señales del primario y el secundario.

En base a lo expuesto en los capítulos anteriores se procede a desarrollar las simulaciones correspondientes a las fallas, la ocurrencia de la falla se planifica con un tiempo de ocurrencia de 0.4 segundos de la simulación con lo cual se consigue que la ocurrencia de la falla suceda una vez que la MR ya ha encontrado estabilidad en su punto de operación. Las fallas suceden de acuerdo con lo explicado por diferentes factores que desencadenan alteraciones en las señales adquiridas desde el primario, las fallas ensayadas son incipiente de acuerdo con lo mostrado en la figura 6 y

otra de tipo abrupto que se visualiza en la figura 7.

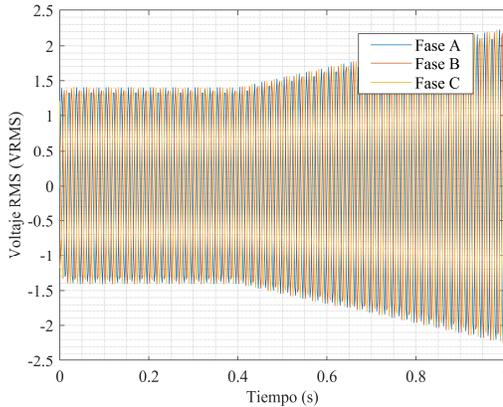


Figura 6. Falla incipiente en primario.

Se puede observar que el fallo abrupto que sucede a los 0.4 segundos de simulación ocasionan una salida con valor de 0 lo cual sugiere una desconexión del sensor de voltaje involucrado.

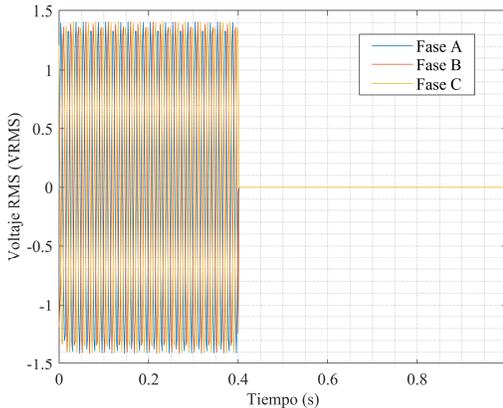


Figura 7. Falla abrupta en primario.

Las señales antes mostradas fueron ensayadas con la finalidad de comprobar cómo un fallo de sensado puede ocasionar modificaciones no deseadas en las señales de control de dispositivos ligados a dichas señales, en este caso en específico la señal de control que desencadena los disparos de los dispositivos de potencia involucrados en el funcionamiento de los SVC. Las señales fueron introducidas en el controlador con un método PI y también con el controlador robusto

## 7.1. Falla incipiente

La figura 8 muestra una comparativa del desempeño de ambos métodos de control y cómo se desarrollan ante la ocurrencia del fallo incipiente.

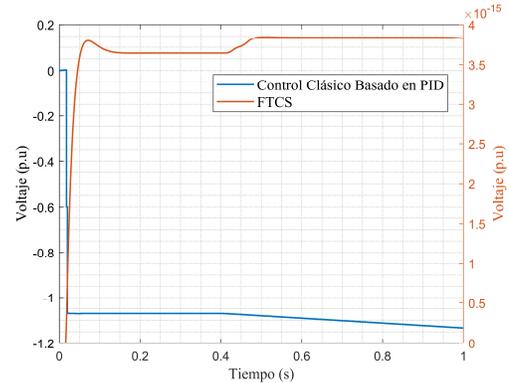


Figura 8. Acción de control, falla incipiente.

Se puede observar que la acción de control que resulta de ambos métodos es completamente diferente en forma y magnitud, la acción de control resultante del controlador PI tiene una magnitud que varía entre 0 y -1.2 aproximadamente mientras que la acción de control resultante del controlador diseñado con  $H_{\infty}$  varía entre 0 y  $4 \times 10^{-15}$ , dichas magnitudes sufren alteraciones por los puntos de referencia a los cuales está sujeto el sistema previo a los 0.4 segundos de ocurrencia de la falla y una vez que la falla se presenta inmediatamente la acción de control sufre modificaciones.

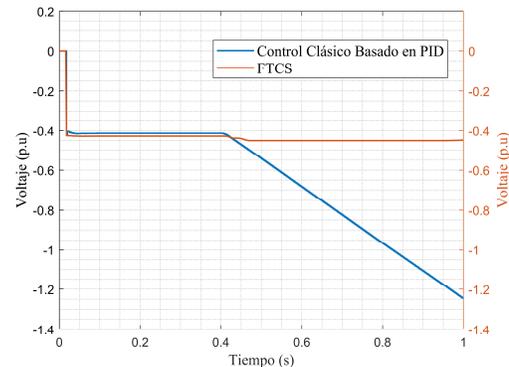


Figura 9. Error, falla incipiente.

Para mejor entendimiento del comportamiento se presenta la figura 9 la cual ilustra el valor de error que se produce con cada acción de control, la cual debería procurarse minimizar, se observa que ante la ocurrencia de la falla el comportamiento de la acción de control del controlador PI tiende a una divergencia que crece constantemente, mientras que en el caso del controlador construido en la presente investigación el error tiende a modificarse pero el cambio es mínimo comparado con la acción de control más tradicional.

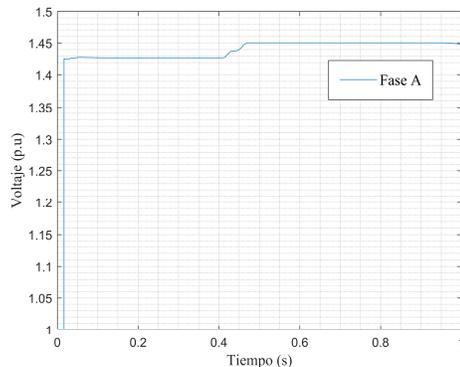


Figura 10. Voltaje (p.u), fase A falla incipiente.

La figura 10 muestra el comportamiento del voltaje de salida (p.u) en la fase A después que la señal es procesada por el controlador  $H_\infty$  y una etapa compuesta por una red neuronal artificial. Una vez ocurrida la falla el voltaje tiende a tener una fluctuación como efecto esperado sin que esta modificación sea significativa ya que la misma tiene una variación de 0.02 unidades respecto a la condición de prefalla.

## 7.2. Falla abrupta

De manera similar a lo revisado con la falla incipiente se presentan los resultados obtenidos para el caso en el cual la falla es de tipo abrupta, la figura 11 muestra el comportamiento de la acción de control sujeto a la falla abrupta, se puede visualizar nuevamente que la

acción de control con un controlador tradicional tiene una variación entre -1.2 y 3.5 unidades, teniendo un cambio brusco a los 0.4 segundos en la ocurrencia de una falla. Por otro lado, la acción de control con el uso del sistema  $H_\infty$  se mantiene en el intervalo entre 0 y  $4 \times 10^{-15}$  con un comportamiento similar al obtenido en la anterior falla estudiada, el controlador incluso muestra una menor fluctuación después de los 0.4 segundos respecto a la falla incipiente.

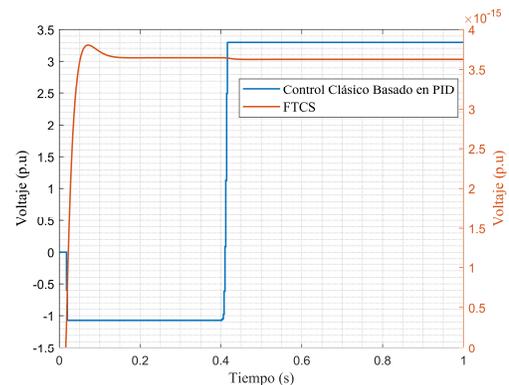


Figura 11. Acción de control, falla abrupta.

Se presenta también la figura 12 correspondiente al error producido como efecto de la acción de control con ambos controladores. Una vez más se evidencia que el error provocado por el controlador  $H_\infty$  es mucho menor al producido por el controlador PI después de la ocurrencia de la falla, el controlador PI ocasiona nuevamente una divergencia en el error, aunque en este caso el error se estabiliza en un periodo de tiempo corto.

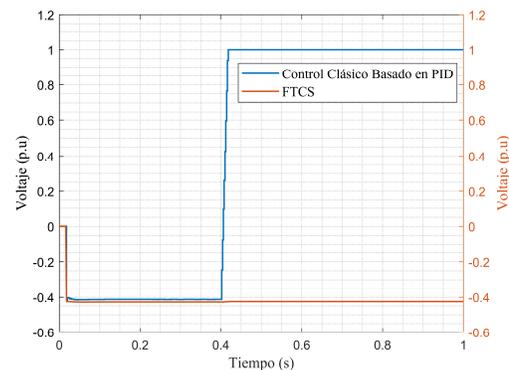


Figura 12. Error, falla abrupta.

Al igual que lo revisado con anterioridad, se grafica el valor de voltaje RMS en la fase A como efecto de la implementación del controlador robusto, el resultado se muestra en la figura 13.

Dado que el error que se produce por la acción de control es pequeño la variación que se presenta en el voltaje es también pequeña lo cual valida la robustez del controlador ante la ocurrencia de fallos de sensado.

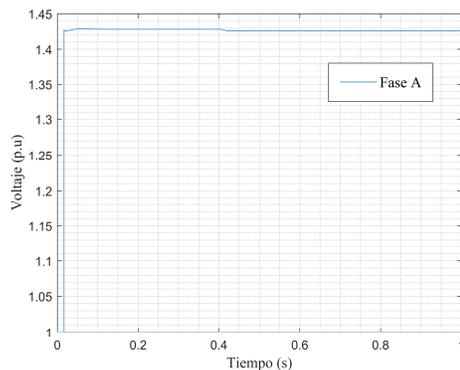


Figura 13. Voltaje RMS, fase A falla abrupta.

## 8. Conclusiones

Se comprueba que implementar un controlador diseñado por medio de  $H_\infty$  mejora la capacidad de los controladores de soportar alteraciones producidas por eventos de fallo en la entrada del controlador, el desempeño es mucho mejor que un controlador convencional de tipo PI con lo cual se consigue efectivamente mantener la acción de estabilidad sin cambios significantes.

Se prueba exitosamente el funcionamiento del controlador diseñado por medio de simulación en software especializado en simulación de sistemas dinámicos Simulink/Matlab. El software permitió llevar a cabo simulaciones con el fin de realizar la identificación del sistema además del diseño del controlador y la validación de este en una Micro Red implementada por medio de un sistema Benchmark.

El sistema de control tolerante a fallos de sensado pasivo diseñado muestra un mejor rendimiento ante la ocurrencia de una falla abrupta respecto a una falla incipiente, los parámetros diseñados del controlador fueron calculados de manera exitosa, aunque en ambos casos es significativamente mejor que un controlador tradicional dado que este último muestra divergencias considerables ante la ocurrencia de fallas incipientes y abruptas.

Se consigue el correcto desempeño de una red neuronal artificial como paso previo a la introducción de una señal medida en el controlador involucrado, la señal que se produce por un error de sensado es procesada por una red neuronal artificial para posteriormente introducir la señal en el controlador que en consecuencia procesará la señal con el controlador  $H_\infty$ .

## 9. Trabajos Futuros

Se propone introducir la metodología del presente artículo académico para el desarrollo de controladores robustos que puedan soportar fallos de tipo maliciosos y ante la ocurrencia de otro tipo de fallos al igual que en diferentes tipos de dispositivos que requieran de una acción de control robusta. Por otro lado, se propone llevar a cabo investigaciones comparativas o con algoritmos de selección que permitan seleccionar la mejor acción de control que sea resultado de diferentes metodologías para mejorar el rendimiento de los sistemas involucrados.

## 10. Referencias

- [1] L. Ortiz, J. W. González, L. B. Gutierrez, and O. Llanes-Santiago, "A review on control

- and fault-tolerant control systems of AC/DC microgrids,” *Heliyon*, vol. 6, no. 8, 2020, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e04799.
- [2] Á. J. Pérez Pazmiño and L. Ortiz Matos, “Despliegue óptimo de redes de distribución y generación distribuida para microrredes eléctricas híbridas CA aisladas usando método heurístico,” *Ser. Científica la Univ. Ilas Ciencias Informáticas*, vol. 15, no. 1, pp. 80–96, 2022.
- [3] L. Ortiz, R. Orizondo, A. Águila, J. W. González, G. J. López, and I. Isaac, “Hybrid AC/DC microgrid test system simulation: grid-connected mode,” *Heliyon*, vol. 5, no. 12, 2019, doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e02862.
- [4] F. Chishti and B. Singh, “Hybrid Control of Renewable Based Microgrid Synchronized to 3P4W AC Distribution Network,” *2021 Int. Conf. Nascent Technol. Eng. ICNET 2021 - Proc.*, no. Icnete, pp. 3–8, 2021, doi: 10.1109/ICNET51185.2021.9487755.
- [5] M. Zolfaghari, G. B. Gharehpetian, M. Shafie-khah, and J. P. S. Catalão, “Comprehensive review on the strategies for controlling the interconnection of AC and DC microgrids,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 136, no. October 2021, p. 107742, 2022, doi: 10.1016/j.ijepes.2021.107742.
- [6] M. Ortiz and E. M. Garcia Torres, “Pronóstico de la demanda eléctrica residencial basado en el modelo de regresión adaptativa multivariante spline (MARS),” Universidad Politecnica Salesiana, 2015.
- [7] H. Yu, S. Niu, Z. Shao, and L. Jian, “A scalable and reconfigurable hybrid AC/DC microgrid clustering architecture with decentralized control for coordinated operation,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 135, no. August 2021, p. 107476, 2022, doi: 10.1016/j.ijepes.2021.107476.
- [8] K. Beleño, J. Berrio, A. Pardo, and G. Oscar, “Diseño de una smart grid para un sistema híbrido de energía Design of a smart grid for a hybrid power system,” *Prospect*, vol. 11, no. 2, pp. 94–101, 2013.
- [9] E. Baneshi, S. M. H. Kalali, and A. B. Dehkordi, “Microgrid Optimal Planning in Two Functional Modes Grid Connected and the Intentional Islanding,” *2019 IEEE 5th Conf. Knowl. Based Eng. Innov. KBEI 2019*, pp. 857–863, 2019, doi: 10.1109/KBEI.2019.8735048.
- [10] D. Carrión and L. Ortiz, “Generación distribuida a partir de bicicletas estáticas y sistemas híbridos,” *Ingenius*, vol. 10, pp. 44–48, 2013.
- [11] L. Ortiz Matos, L. B. Gutierrez Zea, J. W. González Sanchez, and A. Aguila Tellez, “An ARX-Petri Nets algorithm for Active Identification of an AC / DC Microgrid Simulation,” in *2019 IEEE 4th Colombian Conference on Automatic Control (CCAC)*, 2019, p. 6, doi: 10.1109/CCAC.2019.8921191.
- [12] J. R. Collaguazo Solís and L. Ortiz Matos, “Control de voltaje óptimo para sistemas de almacenamiento de energía de batería (BESS) acoplados a microrredes de AC utilizando algoritmos LQG,” Universidad Politécnica

- Salesiana, 2020.
- [13] S. I. Freire Piedra and L. Ortiz Matos, “Modelado y simulación de un sistema automático de adquisición de datos en centrales hidroeléctricas pequeñas,” Universidad Politécnica Salesiana, 2015.
- [14] S. X. Garrido Jácome and L. Ortiz Matos, “Estrategia activa de tolerancia a fallas para el control Buck-Boost de micro-redes eléctricas en DC,” 2019, [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/17621>.
- [15] L. Ortiz, L. B. Gutiérrez, J. W. González, and A. Águila, “A novel strategy for dynamic identification in AC/DC microgrids based on ARX and Petri Nets,” *Heliyon*, vol. 6, no. March, p. 18, 2020, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e03559.
- [16] S. P. Quishpe Guamantica and L. Ortiz Matos, “Detección de fallas de sensado en convertidores CA/CC para micro-redes híbridas usando análisis de componentes principales (PCA),” Universidad Politécnica Salesiana, 2021.
- [17] J. G. B. Sánchez and L. O. Matos, “Estrategia de tolerancia a fallas por condiciones ambientales para IEDS en subestaciones de distribución,” Universidad Politécnica Salesiana, 2016.
- [18] F. A. Urgiles Navarrete and L. Ortiz Matos, “Estrategia de identificación dinámica no lineal basada en NARX para fuentes de generación distribuida acopladas electrónicamente a micro – redes AC/DC,” Universidad Politécnica Salesiana, 2020.
- [19] F. M. Armas Chamorro and L. Ortiz Matos, “Modelización con Petri Net de una aplicación automática de diagnóstico y restauración de avería en sistema de distribución,” Universidad Politécnica Salesiana, 2015.
- [20] J. L. M. Bastidas and L. O. Matos, “Localización de fallas en microredes eléctricas basado en un modelo Markoviano.,” Universidad Politécnica Salesiana, 2018.
- [21] B. E. Ramírez Velasco and L. Ortiz Matos, “Estudio comparativo de métodos de detección e identificación de fallas (FDI) de sensado sobre el Control Local de micro redes Electricas Híbridas AC/DC,” 2020, [Online]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/19170>.
- [22] A. F. Falcón Ayala and L. Ortiz Matos, “Confiabilidad en microredes eléctricas AC/DC usando control robusto  $H_\infty$  y estrategias de tolerancia a fallas,” Universidad Politécnica Salesiana, 2019.
- [23] G. K. Chinchuña Toledo and L. Ortiz Matos, “Mejoramiento de la fiabilidad en microredes mediante el control robusto de voltaje usando técnicas pasivas de tolerancia a fallos,” Universidad Politécnica Salesiana, 2018.
- [24] M. Hosseinzadeh and F. R. Salmasi, “Fault-Tolerant Supervisory Controller for a Hybrid AC/DC Micro-Grid,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no. 4, pp. 2809–2823, 2018, doi: 10.1109/TSG.2016.2620803.
- [25] G. X. Álvarez Yanchapanta and H. I. Vaca Vallejo, “Diseño de una microred híbrida a base de energía fotovoltaica y energía térmica diesel para reducir la

- contaminación ambiental.,” *Dep. Eléctrica y Electrónica la Univ. las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga*, pp. 1–5, 2013.
- [26] S. Jadidi, H. Badihi, and Y. Zhang, “Passive Fault-Tolerant Control of PWM Converter in a Hybrid AC/DC Microgrid,” *2019 IEEE 2nd Int. Conf. Renew. Energy Power Eng. REPE 2019*, pp. 90–94, 2019, doi: 10.1109/REPE48501.2019.9025123.
- [27] B. N. Alhasnawi, B. H. Jasim, and B. E. Sedhom, “Distributed secondary consensus fault tolerant control method for voltage and frequency restoration and power sharing control in multi-agent microgrid,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 133, no. August 2020, p. 107251, 2021, doi: 10.1016/j.ijepes.2021.107251.
- [28] A. Vargas-Martínez, L. I. M. Avila, Y. Zhang, L. E. Garza-Castañón, and E. R. C. Ortiz, “Model-based Fault-tolerant Control to Guarantee the Performance of a Hybrid Wind-Diesel Power System in a Microgrid Configuration,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 19, pp. 712–719, 2013, doi: 10.1016/j.procs.2013.06.094.
- [29] A. Téllez, A. Robayo, G. López, L. Ortiz, I. Isaac, and J. González, “Optimal sizing of distribution transformers using exhaustive search algorithm,” 2019, doi: 10.1109/FISECIGRE48012.2019.8984965.
- [30] A. T. Aguila, L. M. Ortiz, and R. Orizondo, “Optimal Location and Dimensioning of Capacitors in Microgrids Using a Multicriteria Decision Algorithm,” *Heliyon*, vol. 7, no. August, 2021, doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e08061.
- [31] L. Ortiz Matos, A. Aguila Tellez, R. C. Hincapié Reyes, and J. . González Sanchez, “Multi-Criteria Optimization of the Deployment of a Grid for Rural Electrification Based on a Heuristic Method,” *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 73, no. 1, p. 012020, 2017, doi: 10.1088/1755-1315/73/1/012020.
- [32] K. Wang, Y. Ma, P. Ding, R. Mu, and R. Sun, “Operation control strategy for photovoltaic/battery micro-grid,” *China Int. Conf. Electr. Distrib. CICED*, no. 2018051900000001, pp. 821–824, 2018, doi: 10.1109/CICED.2018.8592593.
- [33] U. Akram, M. Khalid, and S. Shafiq, “Optimizing a grid-connected micro-grid with optimal renewable generation and battery energy storage,” *2017 9th IEEE-GCC Conf. Exhib. GCCCE 2017*, 2018, doi: 10.1109/IEEEGCC.2017.8448232.
- [34] Y. Lv, C. Long, and T. Cai, “Research on Coordinated Operating Control of Micro-Grid Power System Including Wind Power, Photovoltaic System And Battery Storage,” *Proc. 2014 Int. Conf. Mach. Learn. Cybern.*, no. 3, pp. 13–16, 2014.
- [35] R. Mantilla Miranda, “Redes Neuronales Artificiales,” *Charlas Fis.*, pp. 1–15, 1999, doi: 10.1016/S0210-5691(05)74198-X.
- [36] S. Bharti, S. Dewangan, and S. Ram, “Performance of wind farm distribution system under balanced and unbalanced condition with SVC &

- STATCOM,” *Int. Conf. Electr. Power Energy Syst. ICEPES 2016*, pp. 182–187, 2017, doi: 10.1109/ICEPES.2016.7915927.
- [37] J. Aho and J. Turunen, “Power quality support for industrial load using hybrid SVC,” *IET Conf. Publ.*, vol. 2013, no. 615 CP, pp. 4–7, 2013, doi: 10.1049/cp.2013.1049.
- [38] X. Yang, W. Wang, and W. Jin, “The influence and control measures of distributed photovoltaic generation on the voltage in distribution system,” *China Int. Conf. Electr. Distrib. CICED*, no. 0335, pp. 5–6, 2012, doi: 10.1109/CICED.2012.6508538.
- [39] D. Jacome and A. Águila, “Localización y dimensionamiento óptimo de dispositivos SVC para la compensación de potencia reactiva en SEP,” *Sci. Technol. Educ. Res.*, pp. 1–17, 2017.
- [40] H. Ebrahimirad, A. Choobdar, and G. R. Dehnavi, “A new control approach for voltage quality improvement in distribution power system by means of an SVC,” *IET Conf. Publ.*, no. 538 CP, pp. 583–586, 2008, doi: 10.1049/cp:20080588.
- [41] C. E. Ojeda Y, Pabón L, “Compensador estático var para sistemas de distribución Var static compensator for distribution systems,” *Mundo Fesc*, vol. 11, no. 21, pp. 70–86, 2021.
- [42] S. G. Kuniyoshi Tsunedomi, Shigeru Tamura, Takahiro Omori, Yasuhiro Imazu, Tadashi Sodeyama, Douglas Cheung, Mike Parr, “Effectiveness of D-SVC on Rural Networks,” *C I R E D 22nd Int. Conf. Electr. Distrib.*, no. 0664, pp. 10–13, 2013.
- [43] N. Demirovic, “Impact of statcom and svc to voltage control in systems with wind farms using induction generators (IG),” *IET Conf. Publ.*, vol. 2016, no. CP711, pp. 16–21, 2016, doi: 10.1049/cp.2016.1069.
- [44] R. Gitibin and F. Hoseinzadeh, “Comparison of D-SVC and D-STATCOM for performance enhancement of the distribution networks connected WECS including voltage dependent load models,” *20th Electr. Power Distrib. Conf. EPDC 2015*, no. April, pp. 90–100, 2015, doi: 10.1109/EPDC.2015.7330479.
- [45] W. Tian, Y. Wang, W. Deng, and L. Li, “H-infinity control for a class of multiple time delay fuzzy descriptor systems,” *Proc. - 2013 6th Int. Conf. Intell. Networks Intell. Syst. ICINIS 2013*, vol. 1, pp. 115–118, 2013, doi: 10.1109/ICINIS.2013.36.
- [46] D. N. Abara and A. Lanzon, “H-infinity-PID controller for an open-loop unstable system,” *2017 IEEE 3rd Int. Conf. Electro-Technology Natl. Dev. NIGERCON 2017*, vol. 2018-Janua, no. 3, pp. 134–138, 2018, doi: 10.1109/NIGERCON.2017.8281886.
- [47] L. O. M. Andrés Fernando Falcón Ayala, “Confiabilidad en Microredes Eléctricas Ac/Dc Usando Control Robusto  $H_{\infty}$  y Estrategias de Tolerancia a Fallas,” Universidad Politécnica Salesiana, 2019.

## 11. Matriz de Estado del Arte

Tabla 3. Matriz Estado del Arte

SISTEMA DE CONTROL TOLERANTE A FALLOS PASIVO PARA DISPOSITIVOS DE COMPENSACIÓN DINÁMICOS INSTALADOS EN MICRO-RED HIBRIDA INTELIGENTES BASADOS EN $H_{\infty}$ Y REDES NEURONALES ARTIFICIALES																											
DATOS			TEMÁTICA					FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETOS					RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA								
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	MICRO-RED HIBRIDAS	SVC	CONTROL TOLERANTE A FALLOS	REDES NEURONALES	H INFINITO	METODOLOGÍA DE CONTROL TOLERANTE A FALLOS	ESTIMADOR DE ESTADOS	SISTEMA TOLERANTE A FALLOS	CONTROLADOR PI	H INFINITO	MICRO-REDES TIPO BENCHMARK	FALLA DE SENSADO	ROBUSTEZ	INESTABILIDAD EN EL SISTEMA	FALLAS MAL INTENCIONADAS	CONTROL H INFINITO	REDES NEURONALES	ARX PETRI NETS	SISTEMA TOLERANTE A FALLOS	H INFINITO	SISTEMA TOLERANTE A FALLOS	REDES NEURONALES	PID	
1	2021	Hybrid Control of Renewable Based Microgrid Synchronized to 3P4W AC Distribution Network	49	✗										✗			✗										
2	2021	Comprehensive review on the strategies for controlling the interconnection of AC and DC microgrids	10	✗										✗													
3	2015	Pronóstico de la demanda eléctrica residencial basado en el modelo de regresión adaptativa multivariante spline (MARS)	22	✗										✗	✗	✗											
4	2020	A review on control and fault-tolerant control systems of AC/DC microgrids	20	✗		✗			✗		✗			✗	✗							✗		✗			
5	2021	A scalable and reconfigurable hybrid AC/DC microgrid clustering architecture with decentralized control for coordinated operation	7	✗													✗										
6	2013	Diseño de una smart grid para un sistema híbrido de energía Design of a smart grid for a hybrid power system		✗										✗	✗												
7	2019	Microgrid Optimal Planning in Two Functional Modes Grid Connected and the Intentional Islanding	91	✗										✗	✗												

DATOS			TEMÁTICA					FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETOS				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA							
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	MICRO-RED HIBRIDAS	SVC	CONTROL TOLERANTE A FALLOS	REDES NEURONALES	H INFINITO	METODOLOGIA DE CONTROL TOLERANTE A FALLOS	ESTIMADOR DE ESTADOS	SISTEMA TOLERANTE A FALLOS	CONTROLADOR PI	H INFINITO	MICRO-REDES TIPO BENCHMARK	FALLA DE SENSADO	ROBUSTEZ	INESTABILIDAD EN EL SISTEMA	FALLAS MAL INTENCIONADAS	CONTROL H INFINITO	REDES NEURONALES	ARX PETRI NETS	SISTEMA TOLERANTE A FALLOS	H INFINITO	SISTEMA TOLERANTE A FALLOS	REDES NEURONALES	PID
8	2018	Fault-Tolerant Supervisory Controller for a Hybrid AC/DC Micro-Grid	1800	☒		☒			☒		☒				☒		☒					☒		☒		
9	2013	Energía Fotovoltaica Y Energía Térmica Diesel Para Reducir La Contaminación Ambiental		☒	☒																					
10	2019	Passive Fault-Tolerant Control of PWM Converter in a Hybrid AC/DC Microgrid	69	☒		☒					☒				☒							☒		☒		
11	2021	Distributed secondary consensus fault tolerant control method for voltage and frequency restoration and power sharing control in multi-agent microgrid	5	☒		☒			☒		☒			☒		☒		☒				☒		☒		
12	2013	Model-based fault-tolerant control to guarantee the performance of a hybrid wind-diesel power system in a microgrid configuration	4	☒	☒	☒					☒			☒	☒							☒		☒		
13	2018	Operation control strategy for photovoltaic/battery micro-grid	836	☒										☒												
14	2017	Optimizing a grid-connected micro-grid with optimal renewable generation and battery energy storage	386	☒										☒		☒										
15	2014	RESEARCH ON COORDINATED OPERATING CONTROL OF MICRO-GRID POWER SYSTEM INCLUDING WIND POWER, PHOTOVOLTAIC SYSTEM AND BATTERY STORAGE	321	☒		☒								☒												
16	1999	Redes Neuronales Artificiales	8				☒			☒										☒					☒	
17	2016	Performance of wind farm distribution system under balanced and unbalanced condition with SVC & STATCOM	8	☒	☒									☒												
18	2013	Power quality support for industrial load using hybrid SVC	4	☒	☒										☒		☒									
19	2012	The influence and control measures of distributed photovoltaic generation on the voltage in distribution system	245	☒										☒												
20	2017	Localización y dimensionamiento óptimo de dispositivos SVC para la compensación de potencia reactiva en SEP	6	☒	☒									☒												



## 12. Resumen de Indicadores

