

**ESTRATEGIA ACTIVA DE TOLERANCIA A FALLAS PARA EL  
CONTROL BUCK-BOOST DE MICRO-REDES ELÉCTRICAS EN DC**



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA:  
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

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

**TEMA:  
ESTRATEGIA ACTIVA DE TOLERANCIA A FALLAS PARA EL CONTROL  
BUCK-BOOST DE MICRO-REDES ELÉCTRICAS EN DC**

**AUTOR:  
STALIN XAVIER GARRIDO JÁCOME**

**TUTOR:  
LEONY ORTIZ MATOS**

**Quito, agosto 2019**

STALIN XAVIER GARRIDO JÁCOME

**ESTRATEGIA ACTIVA DE TOLERANCIA A FALLAS PARA EL CONTROL BOOST-BUCK DE MICRO-REDES ELÉCTRICAS EN DC**

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2019

Ingeniería Eléctrica

Breve reseña histórica e información de contacto.



**STALIN XAVIER GARRIDO JÁCOME** (D'1989 – O'2019). Realizó sus estudios de nivel secundario en el Colegio “San Luis Gonzaga” de la ciudad de Quito. Egresado de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en estrategia activa de tolerancia a fallas para el control Buck-Boost de Micro-redes eléctricas en DC. [sgarrido@est.ups.edu.ec](mailto:sgarrido@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  
©2019 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 “*ESTRATEGIA ACTIVA DE TOLERANCIA A FALLAS PARA EL CONTROL BUCK-BOOST DE MICRO-REDES ELÉCTRICAS EN DC*” realizado por STALIN XAVIER GARRIDO JÁCOME, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, Agosto de 2019



.....

LEONY ORTIZ MATOS

C.C.: 1754230389

## **CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR**

Yo, STALIN XAVIER GARRIDO JÁCOME, con documento de identificación N° 171638050-4, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado/titulación intitulado: “*ESTRATEGIA ACTIVA DE TOLERANCIA A FALLAS PARA EL CONTROL BUCK-BOOST DE MICRO-REDES ELÉCTRICAS EN DC*”, 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 impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, Agosto de 2019



.....  
STALIN XAVIER GARRIDO JÁCOME

C.C.: 171638050-4

## ÍNDICE GENERAL

1	INTRODUCCIÓN .....	2
2	ANTECEDENTES.....	3
3	MICRO-REDES .....	4
3.1	Micro-Redes en DC.....	4
3.2	Modelado de la Micro-Red .....	5
3.3	El convertidor Buck-Boost .....	6
4	TOLERANCIA A FALLAS .....	6
4.1	Control activo tolerante a fallas .....	7
4.2	Sistemas susceptibles a fallas.....	9
4.3	Desarrollo de un sistema de control tolerante a fallas.....	9
4.4	Control LQG .....	10
5	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	11
5.1	Diseño del controlador LQG.....	11
6	CASO DE ESTUDIO.....	13
6.1	Descripción Matemática Buck y Boost .....	14
6.2	Descripción matemática del control LQG .....	15
7	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	16
8	CONCLUSIONES .....	17
9	TRABAJOS FUTUROS.....	18
10	REFERENCIAS.....	18
11	MATRIZ DE ESTADO DEL ARTE .....	24
12	RESUMEN DE INDICADORES .....	30

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ejemplo de una Micro-Red DC .....	4
Figura 2. Regiones de comportamiento de un sistema [7]. .....	7
Figura 3. Diagrama de bloques de un CTF .....	10
Figura 4. Caso de Estudio MR.....	13
Figura 5. Circuito de estudio Buck-Boost.....	13
Figura 6. Comportamiento del voltaje en DC en el control PI. ....	14
Figura 7. Sistema de Control LQG. ....	15
Figura 8. Comportamiento del voltaje (pu) para el control LQG. ....	16
Figura 9. Comportamiento del voltaje (pu) entre el control LQG y control PI.....	16
Figura 10. Comportamiento del voltaje (pu) para el control LQG ante falla.....	17
Figura 11. Comportamiento del voltaje (pu) para el control LQG ante falla.....	17
Figura 12. Resumen e indicador de la temática.....	30
Figura 13. Indicador de formulación del problema. ....	31
Figura 14. Indicador de solución. ....	31

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Variables del Sistema de Identificación .....	11
Tabla 2. Descripción de variables del algoritmo del LQG.....	12
Tabla 3. Variables del Control LQG.....	15
Tabla 4. Parámetros de la planta.....	16
Tabla 5. Matriz de Estado del Arte .....	24



# ESTRATEGIA ACTIVA DE TOLERANCIA A FALLAS PARA EL CONTROL BUCK-BOOST DE MICRO-REDES ELÉCTRICAS EN DC

## Resumen

La presente investigación propone desarrollar un control tolerante a fallos para convertidores Buck-Boost de Micro-redes (MR) en CC basado en el Control Lineal Cuadrático Gaussiano (LQG) como estrategia activa. El desarrollo de este trabajo se basa en la obtención de un algoritmo de control tolerante a fallas en una MR de corriente continua (CC) para el aumento de confiabilidad del sistema de control desarrollado.

Este sistema permitirá que la MR pueda operar de manera estable dentro de los márgenes de calidad, sin importar los fallos que se generen, ya que la estrategia utilizada es robusta por lo tanto proporcionara una mayor estabilidad dentro del sistema. Para el modelado y la simulación de esta investigación se utilizó Matlab / Simulink.

**Palabras Clave:** Micro-red, control tolerante a fallas, estrategia activa, Buck-Boost, Control Lineal Cuadrático Gaussiano (LQG).

## Abstract

The present study proposes to develop a fault-tolerant control for Buck-Boost converters in DC Microgrids based on the linear-quadratic-Gaussian (LQG) control as an active strategy. The development of this project is based on the application of a fault tolerant control algorithm in a direct current (DC) in order to increase the reliability of the control system.

This system will allow the MG to operate in a stable form within the margins of quality, regardless of the faults that are generated. Due to the robust strategy used in this study, it provides greater stability within the system. For the modeling of this research, Matlab / Simulink will be used.

**Keywords:** Microgrid, fault tolerant control, active strategy, Buck-Boost, Gaussian Quadratic Linear Control (LQG).

# 1 INTRODUCCIÓN

A medida que avanza el tiempo, el uso de energías renovables es una de las necesidades más grandes que busca el ser humano, además del acceso a fuentes ininterrumpidas de energía de calidad. La importancia del uso de este tipo de energías radica en la estabilidad económica, el aporte medioambiental, el aumento de la confiabilidad de los sistemas eléctricos, y fomentar el crecimiento socioeconómico de la población. Generalmente el uso de estas energías busca ser implementada en lugares de difícil acceso y con el objetivo de mejorar la calidad de vida de las personas [1]–[3].

Desde el primer trabajo realizado en el área de control automático por James Watt para el control de velocidad de una máquina de vapor [1] [2], la teoría clásica de control comenzó a poner en evidencia la complejidad en manejar una cantidad de componentes de un sistema, por lo cual han aumentado los estudios hacia los modelos analíticos y el control de complejos sistemas.

El alto grado de complejidad de los sistemas actuales puede ser atribuidos entre otras cosas a [1] [4]–[6]:

La creciente complejidad en los elementos del hardware por lo que se genera mayor diversidad en el comportamiento de las variables de sistema.

El alto grado de confiabilidad que debe poseer el sistema para minimizar el impacto ambiental de la producción a gran escala, evitar pérdidas materiales y el cumplimiento de las normativas mundiales de seguridad y medio ambiente aplicables en cada área de desarrollo.

Al respecto, se puede inferir que los sistemas automatizados deben ir al mismo ritmo de evolución de las estrategias y métodos de control, esto con la finalidad de garantizar un alto grado de confiabilidad y permitan maximizar los resultados esperados con un mínimo de recursos [7].

Esto no se podría lograr si no existieran centros de investigación, el cual han venido realizando investigaciones en el área de control avanzado, mezclando técnicas de computación emergente como la lógica difusa y las redes neuronales con técnicas de control adaptativo y control robusto [8].

Con todos los estudios realizados se ha logrado aumentar considerablemente por la comunidad científica las bases teóricas del conocimiento para desarrollar nuevas herramientas que faciliten el diseño de controladores avanzados y confiables para una aplicación específica [7].

Actualmente se realiza investigaciones para desarrollar conocimientos en el control tolerante a fallas, en vista de que éste es uno de los campos en donde se encuentra la importancia de convertir un sistema de control en una estructura confiable ante perturbaciones y cambios abruptos de los parámetros del sistema [5], [9].

Por todo lo antes expuesto, es necesario que se tenga un enfoque más profundo dentro de las técnicas de control tolerante a fallas y así proponer una estrategia de diseño de leyes de control más eficiente y confiable [9]–[11].

El presente estudio propone analizar el control tolerante a fallas (CTF) de una MR en DC bajo condiciones de

operación degradadas por la ocurrencia de una falla interna del sistema de control.

## 2 ANTECEDENTES

Las fuentes de generación distribuida constituyen la base principal de las MR en DC. Por ello, los métodos de control de voltaje, corrientes y PQ son muy susceptibles ante la ocurrencia de fallos internos del propio sistema de control, como: fallas en sensores, controladores o actuadores. El fallo de estos elementos impide el correcto flujo de potencia en la MR. La generación distribuida (GD) puede reemplazar temporalmente a las grandes generadoras y para ello la confiabilidad de las mismas en una MR pasa a ser una parte fundamental buscando mantener el flujo de potencia bajo niveles necesarios al igual que ;a estabilidad del voltaje en las barras del sistema [12] [13].

En la actualidad es imprescindible mantener un flujo de potencia constante, por lo cual es necesario implementar un apropiado sistema de control en las MRs capaz prevenir interrupciones catastróficas o incluso la pérdida total de la energía [14] [15]. A nivel mundial se puede observar que muchas ciudades han desarrollado sus propias MRs, las cuales se puede conectar y desconectar de la red de distribución y abastecer grandes sistemas de cargas [16].

Una MR debe ser un sistema confiable y seguro, puesto que al ser sistemas integrados por varios tipos de generación, tiene la función de ayudar con una fuente de generación ininterrumpida de energía [14] [17], la misma que puede operar de manera independiente por el uso de recursos energéticos alternativos como: energía

solar, energía eólica, energía térmica [9] [18] [19].

Al estar en situaciones de falla una MR, usualmente tiende a tener una conexión con los sistemas de generación aislados, usualmente son de generación de fuentes renovables como la generación eólica o a través de paneles fotovoltaicos [7], por lo cual se han estudiado diversos modelos de Sistemas de Control Tolerante a Fallas para MR, por lo tanto se considera realizar estudios completos de las MRs y así entender de mejor manera su funcionamiento, topología, modelado e importancia, desde su diseño hasta su implementación [10] [11].

Dentro de la topología de una MR se encuentran varios elementos indispensables para su funcionamiento [12] [13] [18], al existir una falla en algún elemento de estos pueden ocurrir accidentes como anteriormente se comentó, por lo que el estudio que se realiza se basa en ejercer un control de fallos por medio de un método, el mismo que contempla los diferentes tipos de fallas así como también tipos de métodos de control de fallos [8] [20] [21].

Los sistemas de tolerancia a fallas, actualmente son usados con frecuencia dentro de las MR, por lo cual en diferentes estudios se han probado varios de los métodos que existen dentro del tema, cabe recalcar que estos métodos se dividirán en dos grupos y su principal objetivo es la estabilización de un sistema con falla [21]–[23].

La figura 1 muestra un esquema de una MR en DC con todos sus elementos, la cual sufre una falla dentro del sistema de control.

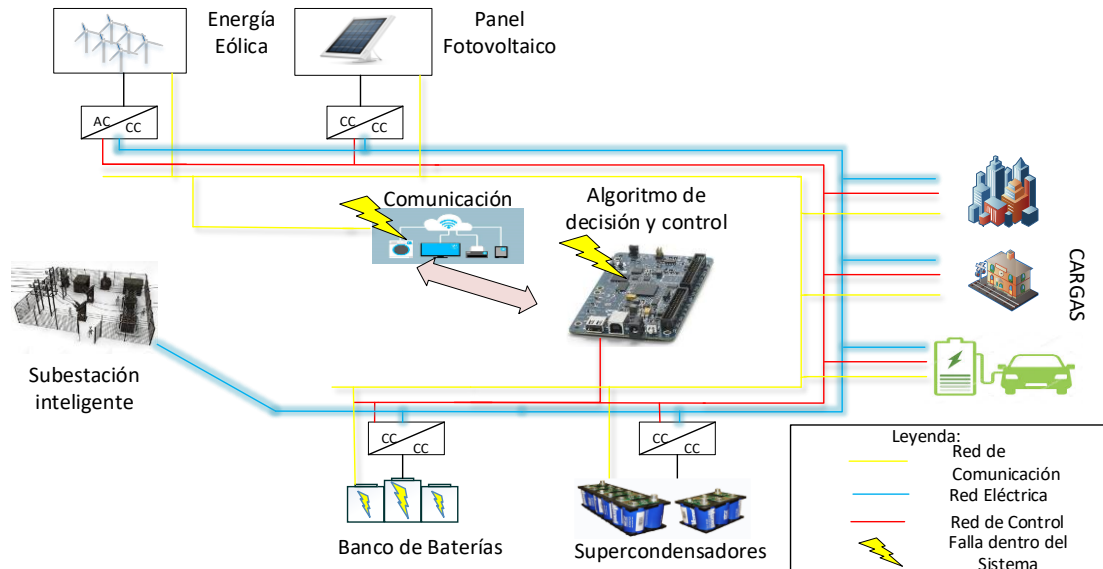


Figura 1. Ejemplo de una Micro-Red DC

### 3 MICRO-REDES

Una MR se basa en la distribución de energía eléctrica desde la generación hasta las cargas que están destinadas, se trata de un sistema bidireccional, al ser bidireccional tiene la capacidad de autoabastecerse, por lo tanto una MR posee algunas ventajas como la función de trabajar aisladamente [24], ser un sistema autónomo, ya que al estar conectada directamente a una red centralizada, también tiene la ventaja de poder perder la conexión con la fuente en base a sus elementos de almacenamiento de energía, generando confiabilidad y costos bajos [14] [16] [17] [25]–[28].

Una MR tiene la capacidad de realizar un reparto de energía sobrante, ya sea con el almacenamiento en sistemas de batería o súper capacitores por ejemplo y una reestructuración del sistema al existir una mayor demanda [17].

Una MR está compuesta por cargas y generadores, los mismos que al formar una red híbrida pueden ocupar energías renovables o convencionales [29].

Como se puede observar en la figura 1, los elementos que tiene una MR son: sistemas de generación ya sean renovables o no, como paneles solares, aerogeneradores, combustibles; sistemas de almacenamiento por ejemplo bancos de baterías, supercondensadores; configuraciones para el uso de cargas, por ejemplo, el sistema central de control, controladores locales, y sistemas de monitoreo como calidad de suministro [14] [30] [31].

Las MR favorecen al medio ambiente, puesto que, al usarse principalmente en lugares aislados bajo generación renovable, permite extender el tiempo de vida, reducir costos y mayor confiabilidad [17] [31].

#### 3.1 Micro-Redes en DC

En esta sección se presentan el modelo de MR en DC [32]. Las MR se dividen en tres tipos, dos de las cuales son usadas continuamente como son redes AC, DC y una configuración conjunta entre ambas conocidas como híbrida [33]–[35].

Estas mediante el uso de convertidores de energía tienen la capacidad de conectarse a las diferentes cargas o hacia una red eléctrica principal. Por esta razón las redes se conectan a baja y media tensión dependiendo del uso que requiera [33] [35].

El control de la frecuencia, al igual que el voltaje son los puntos principales para el control de una MR, en el que la frecuencia se encuentra dentro de un límite definido y así establecer un funcionamiento seguro para el sistema eléctrico. Para poder implementar una distribución de energía en una MR DC, es necesario reducir la tensión de referencia y el aumento de la corriente. Mientras que los objetivos del funcionamiento de la MR son la regulación de voltaje, control del inversor y la carga proporcional [36] [37] mientras que entre los lazos de control de generación tenemos:

Control de generación automática, Capacidad de conmutación de frecuencia, Interruptor de frecuencia de MW, Control automático de frecuencia de carga [37].

Interruptor de voltaje al igual que de excitación [37].

Las MR se pueden clasificar también bajo su nivel de tensión al poder trabajar con sistemas de tensión en DC o en AC, monofásico o trifásico [38].

### **3.2 Modelado de la Micro-Red**

Para el modelado de la MR, se hacen necesarios el uso de diferentes modelos matemáticos dependiendo de que tenga el sistema y los componentes.

Parte del modelado de una MR se basa en el hardware, los mismos que pueden ser desarrollados en diferentes softwares de programación como se puede apreciar en los trabajos [39] [40], los cuales serán

encargados de ejecutar los algoritmos programados y a su vez se realizará el monitoreo correspondiente en base a interface gráfica [24]; en caso de MRs básicas se puede utilizar métodos más convencionales y de un costo bajo como arduino, Raspberry PI o PLCs, tomando en cuenta el ruido eléctrico.

Como se puede observar en la figura 1, tenemos dos tipos de generación, el sistema de generación eólica que está conectado al bus de AC para simular las fuentes de AC, en donde los buses de AC y DC se conectan mediante un transformador trifásico y un convertidor bidireccional para intercambiar energía entre los lados de DC y AC [41].

Para la generación fotovoltaica la salida se conecta al convertidor de DC-DC el cual ayuda en el aumento de la tensión del terminal. Después del convertidor DC es necesario utilizar un condensador de enlace de DC, además de utilizar un filtro a la salida del convertidor con la función de disminuir armónicos de frecuencia alta y así poder evitar la propagación hacia el sistema de alimentación [41].

El uso de un banco de baterías al igual que el de supercondensadores tienen la función de almacenar energía, los mismos que se encuentran conectados a un convertidor bidireccional de DC / DC los mismos que se encuentran conectados al bus DC. El convertidor al encontrarse en modo aislado es capaz de mantener el voltaje estable en el bus DC mediante el uso de carga y descarga [24] [41].

Dentro de las cargas hay que tomar en cuenta ciertas diferencias que tiene una de la otra, se pueden diferenciar ciertos tipos, como de tipo esencial que debe mantenerse un suministro continuo, así

como también cargas móviles, las cuales tienen usos esporádicos [24].

### 3.3 El convertidor Buck-Boost

En la actualidad cada vez van existiendo más campos de uso de un convertidor DC-DC, ya sea en la implementación de fuentes renovables de energía [42], o como un implemento en la electrónica de potencia [43]. Este convertidor es una de las mejores opciones para sistemas híbridos debido a su versatilidad, ya sea para el control de voltaje y corriente, la variación del mismo, entre otros [44]–[46].

Actualmente los convertidores DC-DC tienden a ser de tipo digital en base a los avances tecnológicos, los mismos tienen una salida mayor o menor en comparación al voltaje de entrada, este tipo de convertidor está compuesto por una entrada de control y una de potencia mientras que cuenta con una salida de potencia, por esta razón se los utiliza en la implementación de sistemas con energías renovables [42].

Estos convertidores se clasifican en dos tipos, el primero son los reguladores de voltaje lineal y el segundo el cambio de reguladores de voltaje, al tomar en cuenta los rangos de costo y menor ruido, se establece que los reguladores lineales tienen una mejor aplicación [45].

La eficiencia del convertidor Buck-Boost depende netamente de obtener la menor cantidad de pérdidas gracias a su robustez y respuesta dinámica [47], pese a esto hay que tomar en cuenta las pérdidas que dispone, entre ellas se pueden nombrar las pérdidas del inductor y pérdidas resistivas, las mismas que se logran reducir en función al diseño que se implemente.

Los trabajos [44] [46] [48] muestran al convertidor Buck-Boost como una ayuda

para hallar la salida del sistema, las mismas que pueden llegar a variar, por lo que es necesario el uso de sistemas de control como el PI, PID, entre otros. Estos convertidores tienen comportamiento dinámico no lineal y de fase no mínima, es por ello de controladores más sofisticados nos permitirán tener una salida más confiable dentro de un sistema y así obtener una tensión estable de salida [49].

## 4 TOLERANCIA A FALLAS

La tolerancia a fallas se basa en que, al aparecer una falla dentro del sistema, este será capaz de mantener sus objetivos de control pese a encontrarse una mínimo de degradación de sus funciones, siendo una falla conocida como cualquier cambio que impida un correcto funcionamiento de un elemento del sistema [7].

Las señales de las fallas son normalmente separadas en dos clases: fallas aditivas y fallas no aditivas o multiplicativas. Las fallas aditivas aparecen como términos adicionales en las ecuaciones del modelo de estado del sistema; para los modelos estocásticos entregan variaciones en la medición de las señales [4]–[6] [29].

Un modelo en tiempo continuo que presenta fallas aditivas puede ser modelado de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \frac{dy(t)}{dt} &= A_{ct}x_t + B_{ct}u(t) \\ &\quad + E_{xct}d(t) \\ &\quad + F_{xct}f(t), z(0) \\ &= x_0 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} y(t) &= C_{ct}x_t + D_{ct}u(t) \\ &\quad + E_{yct}d(t) \\ &\quad + F_{yct}f(t) \end{aligned} \quad (2)$$

Donde los nuevos términos son:

$f(t) \rightarrow$  Fallas

$F_{x,ct}$ ,  $F_{y,ct}$  son matrices con las dimensiones apropiadas para el sistema que se está modelando.

Las fallas multiplicativas corresponden a cambios en los parámetros de las ecuaciones de estado. En modelos de tiempo continuo los cambios se presentan en las matrices  $A_{ct}$ ,  $B_{ct}$ ,  $C_{ct}$ ,  $D_{ct}$ ; en tiempo discreto  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  y con cambios en la varianza en el caso de las perturbaciones estocásticas y el ruido. Al encontrar presencia de fallas multiplicativas dentro de un modelo continuo, presentara la siguiente forma [6]:

$$\frac{dy(t)}{dt} = A_{ct}x_t + B_{ct}u(t), \quad (3)$$

$$x(0) = x_0$$

$$y(t) = C_{ct}x_t + D_{ct}u(t) \quad (4)$$

#### 4.1 Control activo tolerante a fallas

En base a la existencia de fallas dentro de un sistema de control, encontrar una ley de control se vuelve más compleja por lo que es necesario modificar el conjunto de objetivos.

Existen dos enfoques para resolver el problema de control tolerante:

**Pasivo:** Busca una ley de control la cual busque cumplir el conjunto de objetivos ya sea en falla o en funcionamiento normal.

**Activo:** Busca una ley de control basada en el estado del sistema en función de parámetros y valoración de las restricciones que puede haber en el sistema [7] [50], el cual para poder ser solucionado se debe tomar en cuenta la acomodación de la falla o mediante la reconfiguración.

La acomodación al fallo se basa en mantener el controlador y modificar los

parámetros, por otro lado, la reconfiguración es la encargada de modificar la ley de control al igual que las entradas y salidas del controlador.

El funcionamiento del sistema realimentado puede ser definido por las variables  $x_1$  y  $x_2$ , la Figura 2 nos indica las zonas que deben ser apreciadas en el diseño de un control tolerante a fallos. La zona de comportamiento deseado es la que realiza un buen funcionamiento dentro del sistema [8].

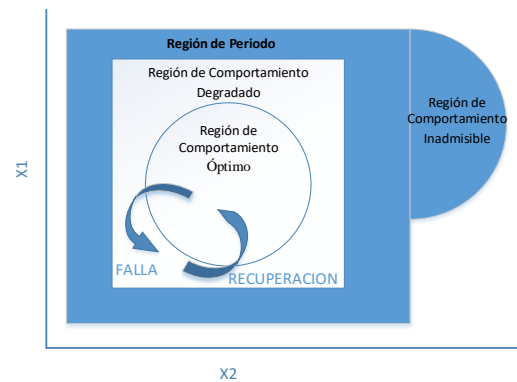


Figura 2. Regiones de comportamiento de un sistema [7].

El controlador cumple la función de mantener en la región al sistema sin importar perturbaciones, incertidumbre ni pequeñas fallas. La región de comportamiento degradado al existir una falla el sistema emigra para seguir funcionando.

Al existir un escenario  $n$ , el controlador deberá activar las acciones correspondientes a la recuperación y así evitar mayores pérdidas en la región de comportamiento admisible y hasta evitar [35] [51].

Una clasificación realizada por el autor Puig [2] [8] se muestra en la figura 3. En ésta se consideran dos tipos de control tolerante a fallos: el control pasivo y el control activo. El primero se basa en el análisis y ejecución de una

nueva ley de control tomando en cuenta el estado del sistema. Al existir una variación, el sistema genera una derivación que llega al sistema de control, su función es la de realizar una compensación en el menor tiempo posible. Por lo cual este control cumple con un diseño robusto que nos ayuda con determinados fallos [52]. Por lo que se necesitara un sistema de diagnóstico de fallos, el cual nos ayudara a dar un orden de activación de un mecanismo [6].

La estrategia a utilizar en base a una metodología sistemática para un sistema de control tolerante a fallas, va a depender del elemento que tenga la falla [50] [51] [53]

Una posible clasificación de tolerancia a fallas, en donde existen dos tipos de mecanismos de tolerancia a fallas los cuales son la reposición del elemento en falla y las estrategias de control. El primer mecanismo se divide en dos grandes grupos y son conocidas como estrategias de control tolerante activas y estrategia de control tolerante pasivas, cada una de ellas está compuesta por diferentes métodos, entre las estrategias activas varios métodos o técnicas como: técnicas de acomodación del control off-line, la cual busca una ley de control que compense el fallo ya encontrado y las técnicas de acomodación del control on-line, la cual a partir de una estimación busca encontrar una ley de control después de generarse el fallo. El segundo mecanismo se divide en redundancia física, en donde se estudian las fallas en actuadores y sensores, mientras que la redundancia química, se concentra en actuadores y sensores.

Si el proceso controlado dispone de redundancia física, para realizar la misma

función, entonces la estrategia de tolerancia va a reemplazar el componente en fallo por otro igual, pese a ser una estrategia costosa.

En el caso de que no exista redundancia física, se clasifican en fallas de sensores, actuadores y de la propia planta para actuar de la siguiente manera: para acomodar fallos en sensores se suele utilizar sensores virtuales, que se basan en la estimación de la medida del sensor en fallo a partir de las mediciones de los demás sensores existentes en el sistema; mientras que en actuadores y planta, se hace el rediseño de controladores, utilizando mecanismos de acomodación del fallo y reconfiguración, dependiendo del camino que se elija ya sea cambiar la ley o la estructura de control [6].

El control tolerante activo, consiste en la detección del dispositivo que tiene la falla diseñando una nueva ley de control, la cual podrá configurar la falla ya sea, activando un mecanismo o dando un mensaje de desconexión instantánea [7].

El control robusto tiene la facilidad de ser insensible a cualquier perturbación para el sistema [52].

La estabilización simultanea de varios dominios limitados de estabilidad, se basa en una técnica de control robusto la cual fue desarrollada por Bravo [10] en George Mason University, Virginia, USA, esta nos servirá como una base de investigación hacia otras técnicas de control como la propuesta por Blanke and Lunze [6], para el control tolerante a fallas, de esta manera se resume el mismo como un complemento dentro de las técnicas de control utilizadas.

Según varios escritores el control robusto y adaptativo, son tomados en cuenta desde el control tolerante a fallas [20] [54] [55], de los cuales se puede



notar la necesidad del estudio basado en la inserción de las fallas del sistema como parte de los métodos de control tolerantes a fallos y así probar junto a un algoritmo y se aplica al modelo de MR.

La estrategia metodológica empleada en el estudio servirá como base para establecer una guía de los pasos que se pueden utilizar para la obtención de resultados utilizando ciertos estudios ya realizados anteriormente para el cumplimiento de los objetivos propuestos.

#### **4.2 Sistemas susceptibles a fallas**

Para certificar la confiabilidad de un sistema ante la presencia de fallas, es importante tener el conocimiento real de sus componentes y la interacción de las leyes.

Conforme aumenta la complejidad de visualizar una falla, es necesario aumentar el análisis hasta los puntos de componentes, la estructura y a la posible propagación de estas fallas.

Para poder alcanzar las fallas es fundamental poseer la siguiente información [56] [57]

Posibles fallas

Posibilidades de detección y aislamiento de fallas severas

Posibles reconfiguraciones

Para realizar esta estrategia hay que basarse en el modelado de la dinámica del sistema objeto de estudio, el análisis basado en componentes y el análisis estructural.

#### **4.3 Desarrollo de un sistema de control tolerante a fallas**

Cuando la complejidad de los sistemas aumenta, la necesidad de confiabilidad obliga al diseñador de los sistemas de

control para poder encontrar una máxima cobertura hacia las posibles fallas que pueden ocurrir y de los efectos asociados a éstas. La clasificación mostrada en la figura 3 representa una estrategia sistemática de diseño planteada por Izadi [57], Bøgh [4], L. Ortiz [58], la misma que da una base lógica para poder seguir una serie de pasos y así encontrar información del funcionamiento del sistema en uso.

La metodología para el desarrollo de sistemas tolerantes a falla, se aplicará después de haber establecido la definición inicial del sistema y la descripción de los requisitos [56].

Los pasos necesarios para este proceso son [18]:

- a. Modelado de la falla: Dentro de este modelado es utilizada la técnica de Análisis de Modos de Fallas y Efectos (AMFE) desarrollada por Blanke [6]. Este busca construir un AMFE para cada elemento del sistema que tenga alguna falla, esta toma el nombre de modos de fallas de componentes.
- b. Análisis de propagación de fallas: en este paso, a través de la estructura del sistema, los modos de falla encontrados son extendidos para poder encontrar cuales son los efectos de cada componente en falla [56] [59].
- c. Estimación del daño: Sirve para encontrar y hacer una clasificación en base a los efectos finales de cada falla, en base a esto buscar cuál es el daño que podría ocurrir en base a las mismas [56] [59].
- d. Análisis de relaciones: En este paso se identifica la información acerca de los efectos de las fallas, componentes y señales que puedan ser usadas para el diseño del sistema de detección, en base a esto se definen que fallas van a ser detectadas [56] [59].

- e. Análisis estructural: En base a un análisis del sistema, se busca información reiterada para poder encontrar las fallas seleccionadas anteriormente [56] [59].
- f. Selección de la acción a ejecutar: Para este paso se toma en cuenta que todas las fallas son detectables y aislables, la función principal de este paso, es frenar la propagación dentro del sistema buscando una estructura fiable que pueda actuar en contra de ellas [56] [59].
- g. Diseño del sistema de detección: Dentro de esta sección se procede al diseño de un sistema de aislamiento a fallas y diagnóstico. Se busca cual es la mejor metodología dependiendo del sistema en cuestión [52] [60].
- h. Diseño de la acción de reconfiguración: Se basa en la capacidad de que, al darse una falla se realiza una reacomodación del sistema, las acciones que se pueden tomar son la reconfiguración del sistema o a su vez el uso de componentes redundantes [4] [56] [59].

La figura 4 muestra el diagrama de bloques de un sistema de control tolerante a fallas de múltiples dominios acotados, este diagrama se basa en un sistema tolerante a fallas, el cual consta de varias plantas  $Po\dots, Pn$ , y según el diagnóstico de falla seleccionara su compensador  $Co\dots, Cn$ .

Básicamente al aumentar la complejidad del sistema, disminuye la confiabilidad [61] por lo que al ser n grande la complejidad de cálculo aumenta y baja la confiabilidad.

Se puede realizar una división en subconjuntos al total de fallas que se puedan generar en base al análisis de propagación de fallas (FPA) [60], de esta

manera las fallas tendrán que aparecer en el orden de que cada falla va apareciendo mientras se haya degradado el sistema.

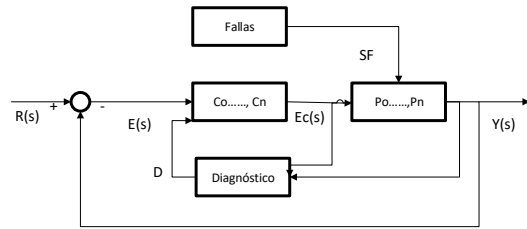


Figura 3. Diagrama de bloques de un CTF

#### 4.4 Control LQG

Mediante la elaboración del control robusto se ha podido minimizar el efecto de las fallas dentro de sistemas, sin embargo, al existir fallas que no se pueden manejar dentro de un enfoque pasivo, es necesario realizar una detección en línea y así poder reacomodarlas deteniendo su propagación, la forma activa de tolerancia a fallas busca una forma de reestructurar el controlador [62].

Trabajos como [63] y [64], han realizado aportes para la construcción de modelos contra fallas, buscando la función de formar residuos desde la diferencia existente entre las salidas reales y las estimadas en basa a un observador, dando varios modelos como las técnicas  $H2 / LQG$ , el método  $H\infty$ , el filtro de Kalman y el observador de modo deslizante [65].

Los sistemas de control tienen la obligación de aumentar su rendimiento, eficiencia, robustez, disminuir el esfuerzo de control y economía. El LQG es una estrategia de control que ayuda con la obtención de un mejor comportamiento de una red, sistemas, etc. Una estrategia de control como el LQG en comparación con los controladores clásicos PIs, PID's mejora la respuesta dinámica del sistema ante

falla internas (abrupta o incipiente), proporcionándoles tolerancia y resiliencia [66].

El LQG es un método que se va utilizando con mayor frecuencia en distintos campos, desde MR hasta la robótica como tal, debido a su robustez y tolerancia ante fallas. Este método de control cumple la misión de aplacar los disparos de fallas y asimilar de mejor forma el mismo [66]–[69].

Cabe mencionar que un sistema de control LQG, trabaja normalmente con tiempos indefinidos al igual que con tiempos definidos, en este caso para el diseño de un controlador estable, el controlador LQG funciona bajo la estimación de una retroalimentación debido a un filtro de Kalman y ruido blanco gaussiano. El control LQG básicamente es la unión de un Estimador Lineal Cuadrático (LQE) y un Regulador Lineal Cuadrático (LQR) [66] [69].

## 5 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En esta sección se detallará la descripción técnica, modelamiento y algoritmos de los sistemas utilizados en la investigación, donde se realizará una explicación técnica desde el punto de identificación de la planta dentro del convertidor Buck-Boost, hasta el modelo de control utilizado, en este caso el modelo LQG.

Cabe recalcar que al trabajar sobre un CTF se aplicara fallas de censado de tipo abrupto para poder distinguir de mejor manera el cumplimiento de la función que tiene el control LQG.

### 5.1 Diseño del controlador LQG

Encontrar el modelado e identificación de la planta: Este paso es uno de los más importantes dentro del estudio, puesto

que da la base para proceder a la simulación de cada controlador que se quisiera ocupar.

En la tabla 1, se puede observar la identificación de variables de entrada y salida del sistema que son necesarias para encontrar el modelado y la identificación de la planta.

Tabla 1. Variables del Sistema de Identificación

VARIABLES	DESCRIPCIÓN
y_v_indet1	Salida Book
y2_v_indet1	Salida Boost
u1_1_indet	Entrada Book
u_2_indet	Entrada Boost
t1_2	Tiempo Book
t2_2	Tiempo Boost

Estas variables tienen la función de encontrar por medio de su análisis en Matlab el modelo matemático de la planta, y que posteriormente se utilizara para el diseño del controlador LQG tolerante a fallos.

Para encontrar el modelo matemático de la planta en espacio de estados se utilizó herramientas de Matlab / Simulink basada en la estructura de modelos lineales discretos en este caso la metodología ARX, con el cual se garantiza un valor bastante aceptable, captando el comportamiento dinámico.

Cabe recalcar que para este caso se utilizó un controlador PI, el cual nos entregara los resultados a base de espacio de estados.

Al obtener los valores de planta se obtuvieron 4 matrices (A, B, C y D) del espacio de estado, tanto para el control Buck como para el control Boost.

Con estas plantas se podrá realizar el diseño del control LQG, donde se tomará en cuenta el siguiente algoritmo.

Para realizar el modelo LQG se debe tomar en cuenta las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} x(t) &= Ax(t) + Bu(t) + Gw(t) \\ y(t) &= Cx(t) + v(t) \end{aligned} \quad (5)$$

Donde  $x(t)$  es el vector de estado,  $u(t)$  es el vector de entrada de control,  $y(t)$  es el vector de salida medido,  $w(t)$  y  $v(t)$  son procesos de ruido blanco estocástico asociados con el proceso y medida. Mientras que las matrices  $A, B, G, C$ , no tienen variación de tiempo.

Se asumen valores de los estados los cuales son cero, mientras que  $w(t)$  y  $v(t)$  son ruido. Se procede a buscar los valores de covarianza para  $w(t)$  y  $v(t)$ .

En el caso de tener los resultados necesarios se puede realizar una retroalimentación con el Filtro de Kalman, el cual nos ayuda a reducir las perturbaciones del sistema en caso de que el modelo LQG no sea tan robusto, para lo cual tendremos las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} \hat{x}(t) &= (A - K_k C)\hat{x}(t) \\ &\quad + Bu(t) \\ &\quad + K_k y(t) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\hat{y}(t) = C\hat{x}(t)$$

Dada la realimentación del Control LQG, se logra obtener las ganancias óptimas de todo el sistema, por lo cual de ser necesario se agrega un filtro de Kalman para ser un sistema aumentado como se explicó anteriormente. Este nuevo sistema contiene el error de estimación [70].

La tabla 2 indica la descripción de las variables usadas en el algoritmo LQG, las mismas que tienen una gran importancia específicamente para poder entender algunas partes del algoritmo “Control LQG”.

Tabla 2. Descripción de variables del algoritmo del LQG

Variables	Descripción
$K_k$	Ganancia de estimación de estado óptima
$\hat{x}(t)$	Estados estimados
$K_f$	Ganancia de realimentación óptima
$P_k$	Matriz semi-definida positiva
$J_k$	Función de costo
$Q_f$	Matriz simétrica semi-definida positiva
$R_f$	Matriz simétrica definida positiva

En base a las variables mostradas en la tabla 2, se implementa la formulación del siguiente algoritmo:

#### Algoritmo 1: Control LQG [71]

**Paso 1 – Inicio**

**Paso 2 - Definir valores:** ( $P(s), u(t), dm(t), L(t), K(t), w(s), v(s)$ ) |  $P(s) \in s \quad dm(t) \in [0 \infty)$

**Paso 3 - Salida:** ( $y(t), uplanta(t)$ ) |  $uplanta(t) \in R$

**Paso 4 - Inicialización de Matrices**  
 $Ax(t)=Aa, Bu(t)=Ba, Cx(t)=Ca$

**Paso 5 – Proceso de metodología**

$$\begin{aligned} x(t) &= Ax(t) + Bu(t) + Gw(t) \\ y(t) &= Cx(t) + v(t) \\ \hat{x}(t) &= (A - K_k C)\hat{x}(t) + Bu(t) + K_k y(t) \\ \hat{y}(t) &= C\hat{x}(t) \\ J_k &= E\{(x - \hat{x})^T (x - \hat{x})\} \\ AP_k + P_k A^T + GWG^T - P_k C^T V^{-1} C P_k &= 0 \\ K_k &= P_k C^T V^{-1} \\ J_f &= \int_0^T (z^T Q_f z + u^T R_f u) dt \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
A^T P_f + P_f A - P_f B R_f^{-1} B^T P_f + Q_f &= 0 \\
K_f &= R_f^{-1} B^T P_f \\
Q &= C^T C \\
R &= \rho I \\
Q_{ii} &= \frac{1}{\text{Max}(x_{ii}^2)} \\
R_{ii} &= \frac{1}{\text{Max}(u_{ii}^2)} \\
\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{e}(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A - BK_f & BK_f \\ 0 & A - CK_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ e(t) \end{bmatrix} \\
&\quad - \begin{bmatrix} G & 0 \\ G & -K_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w(t) \\ v(t) \end{bmatrix} \\
y(t) &= [C \quad 0] \begin{bmatrix} x(t) \\ e(t) \end{bmatrix} + [0 \quad 1] \begin{bmatrix} w(t) \\ v(t) \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

**Paso 6 - Visualización de resultados del sistema**

**Retorna: y(t)**

**Paso 7 - FIN**

## 6 CASO DE ESTUDIO

La MR de nuestra investigación, se basa en un sistema de corriente continua, la cual está alimentada por un Bus de carga; esta MR consta de un convertidor Buck-Boost bidireccional, el cual será encargado de aumentar o disminuir el voltaje de salida del sistema.

Esta MR tiene un sistema de almacenamiento de energía en base a un banco de baterías (BESS), a su vez al bus de carga se tiene un convertidor Boost el cual está conectado a planta fotovoltaica.

Para este estudio se debe realizar un análisis directamente sobre los elementos en falla, por lo que no es necesario solamente implementar métodos de diagnóstico, sino también, algoritmos de control, los mismos que buscan mantener un control del voltaje en la MR.

Este estudio parte de una MR según se muestra en la figura 5. La MR consta de una Bus DC de 300V, con un Convertidor Buck-Boost bidireccional DC /CD 1 de 0.65 kW, el cual estará alimentando un Banco de Baterías

(BESS), estas baterías son de Litio y constan de un voltaje nominal de 120 V, capacidad nominal de 800 Ah, con una carga inicial del 80% y el tiempo de respuesta de la batería será de 3 s. En el aspecto eléctrico el algoritmo K-Means tiene una importancia crucial, debido a que permite la agrupación de escenarios para modelar por ejemplo la velocidad del viento, la iluminación solar y la demanda de carga, para la incorporación de energías renovables en el Sistema de Distribución.

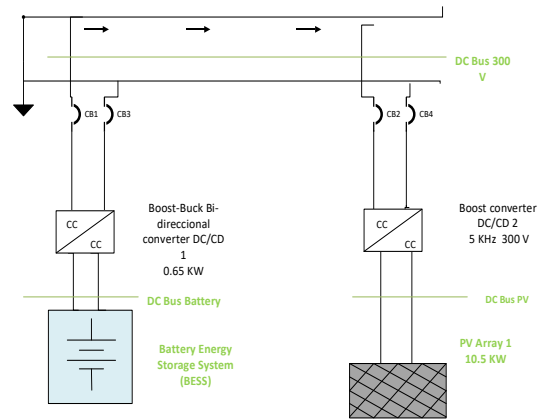


Figura 4. Caso de Estudio MR.

A su vez desde el Bus DC, también se tiene conectado un convertidor Boost DC /CD el cual funciona a 5 kHz y 300V, el mismo que estará alimentado por un panel solar que cumple con las siguientes características: PV 10.5 kW formación de 42 \* SunTech STP - 250S-20 /Wd (Nser=6 Npar=7),

En la figura 5, se puede ver el circuito del convertidor Buck-Boost.

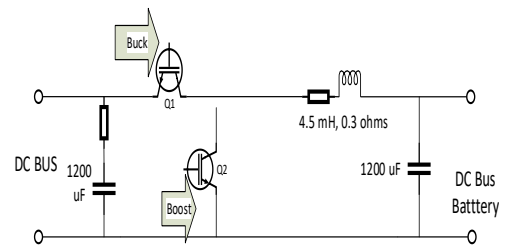


Figura 5. Circuito de estudio Buck-Boost

## 6.1 Descripción Matemática Buck y Boost

El diseño se basa en modelos lineales discretos, específicamente en el uso del modelo ARX (Modelos Autoregresivos con Variables Exógenas) que a través del software Simulink/Matlab se encontraron los valores de planta,

tomando en cuenta que el diseño del mismo se realiza en base a un control PI de espacio de estados, cabe recalcar que el uso del control PI es netamente un método clásico para la comparación del resultado final. En base a esto se obtienen las matrices para cada convertidor .

*Matrices del modelo en espacio de estado para el modo Boost:*

$$A = \begin{bmatrix} -49.97 & 14.77 & 13.79 & 0.59 & 1.69 & -0.13 \\ 379.55 & 1345.36 & 70.93 & -412.15 & 34.14 & 27.60 \\ -516.44 & -1511.74 & -121.34 & 440.19 & -47.07 & -3.69 \\ 1140.42 & 4203.00 & 258.47 & -1275.11 & 105.49 & 90.39 \\ -63.25 & -392.85 & -5.92 & 99.26 & -54.69 & 76.71 \\ 301.91 & 1126.92 & 16.71 & -378.26 & 0.20 & 79.68 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$B = \begin{bmatrix} -823530.85 \\ -24549089.42 \\ 25473894.47 \\ -77722580.17 \\ -1427809.04 \\ -26100171.62 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$C = [8.62 \quad 27.69 \quad 0.97 \quad -7.39 \quad 3.56 \quad -3.53] \quad (9)$$

$$D = [1054.35] \quad (10)$$

*Matrices del modelo en espacio de estado para el modo Buck:*

$$A = \begin{bmatrix} -80.33 & 413.99 & 240.47 & 250.14 & -215.62 & -117.13 \\ -432.40 & 83.46 & -68.37 & -142.55 & 151.46 & -106.06 \\ -287.52 & 69.89 & 14.32 & -92.31 & 172.03 & -44.55 \\ 360.41 & 153.99 & -181.17 & -1442.39 & 1481.12 & -87.82 \\ 140.55 & 55.51 & -3.31 & -1011.67 & -1595.05 & 1380.25 \\ -105.51 & 119.97 & 90.84 & 1337.50 & 151.71 & -758.26 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$B = [99.25 \quad 87.22 \quad 42.40 \quad -744.06 \quad -744.06 \quad 45.54]^T \quad (12)$$

$$C = [76.79 \quad -23.65 \quad -10.64 \quad 491.53 \quad -120.11 \quad 436.20] \quad (13)$$

$$D = [-24.59] \quad (14)$$

En la figura 6, se puede observar el comportamiento dinámico simulado para un control PI.

Como se puede observar se toma en cuenta cómo se comporta el voltaje para el bus DC controlado por un PI. Cabe recalcar que en esta simulación aún no se hace uso de la falla.

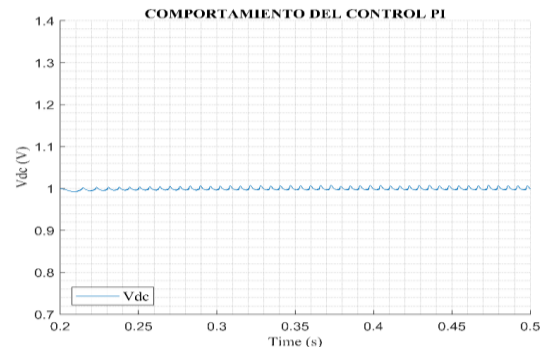


Figura 6. Comportamiento del voltaje en DC en el control PI.

## 6.2 Descripción matemática del control LQG

Al existir una falla dentro de esta MR, es necesaria la implementación de un Control Tolerante a Fallas que cumpla con la función de estabilizar al sistema, en nuestro caso se establecerá un sistema

de Control LQG, donde la falla simulada es de tipo abrupta para poder ver la diferencia entre el control PI y el y control LQG.

En la figura 7, se puede observar el diseño del control LQG.

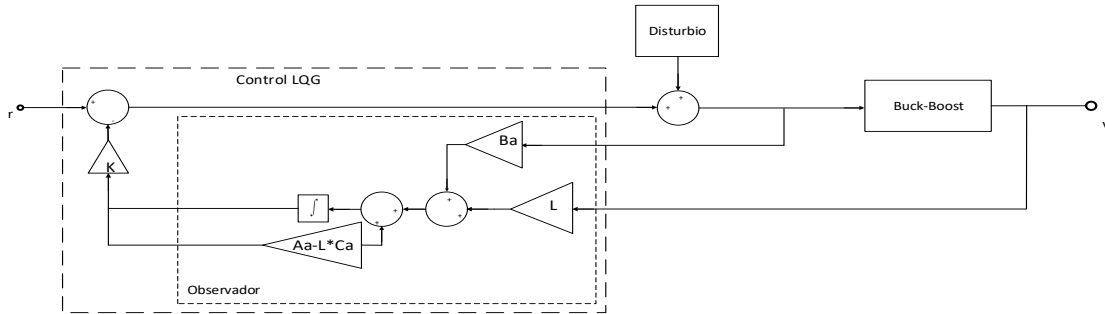


Figura 7. Sistema de Control LQG.

En la tabla 3 se puede observar las variables utilizadas para el control LQG.

Tabla 3. Variables del Control LQG

Variables	Descripción
Aa_ident_Boost/ Buck	Matriz de estado Boost/ Buck
Ba_ident_Boost/ Buck	Matriz de ganancia de entrada de control Boost/ Buck
Ca_ident_Boost/ Buck	Matriz de estado medida Boost/ Buck
K_ident_Boost/ Buck	Ganancia del Estimador LQ

Continuación Tabla 3

Variables	Descripción
L_ident_Boost/ Buck	Estimador LQ
Q	Simétrica positiva
W	Varianza de estado
V	Varianza de ruido
R	Estimador LQG

$$Aa\_ident\_Boost = \begin{bmatrix} -49,98 & 14,78 & 13,79 & 0,59 & 1,69 & -0,14 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & -821,00 & 8192,14 \\ 379,56 & 1345,00 & 70,93 & -412,00 & 34,15 & 27,60 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & -2545,25 & 2247,39 \\ -516,40 & -1512,00 & -121,30 & 440,20 & -47,10 & -3,70 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 2458,25 & -3258,54 \\ 1140,40 & 4203,00 & 258,48 & -1275,00 & 105,50 & 90,40 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & -852,24 & 8453,23 \\ -63,25 & -393,00 & -5,92 & 99,26 & -54,70 & 76,72 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & -137,06 & 1012,74 \\ 301,92 & 1127,00 & 16,71 & -378,00 & 0,20 & 79,68 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & -354,21 & 3044,52 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & -210,00 & -1826,00 & -8548,00 & -2251,00 & -379,22 & -2247,41 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 1,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 1,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 1,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 1,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 1,00 & 0,00 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$Ba\_ident\_Boost = [-8157,41 \quad -2469,34 \quad 3218,54 \quad -8758,42 \quad -145,89 \quad -35422,66 \quad 0,00 \quad 0,00 \quad 0,00 \quad 0,00 \quad 0,00 \quad 0,00 \quad 0,00]^T \quad (16)$$

$$Ca\_ident\_Boost = [8,62 \quad 27,70 \quad 0,97 \quad -7,40 \quad 3,57 \quad -3,50 \quad 0,00 \quad 0,00 \quad 0,00 \quad 0,00 \quad 0,00 \quad 0,00 \quad 0,00] \quad (17)$$

Los resultados obtenidos del algoritmo propuesto “Control LQG” son los siguientes:

$$R=0.01$$

$$K_{ident\_Boost} = [-86,22 \quad -276,91 \quad -9,76 \quad 73,95 \quad -35,65 \quad 35,34] \quad (18)$$

$$L_{ident\_Boost} = [0,71 \quad 22,09 \quad -26,22 \quad 71,71 \quad 3,08 \quad 20,64 \quad -0,00 \quad 0,00 \quad 0,00 \quad -0,00 \quad 0,00 \quad 0,00]^T \quad (19)$$

Se reemplaza los datos en (5), para así obtener la gráfica del Sistema de Control LQG. Para este caso de estudio, se utilizó programación en Matlab, con lo cual se tiene como resultado la figura 8 con el Controlador Robusto LQG.

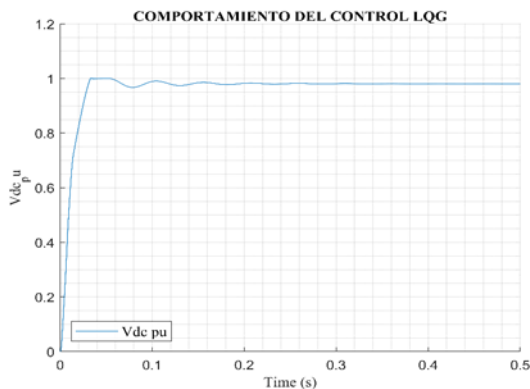


Figura 8. Comportamiento del voltaje (pu) para el control LQG.

En la figura 9, se puede observar una comparación entre el control LQG y el control PI bajo el sistema PU, donde la línea azul corresponde a la señal de voltaje de salida del control LQG, mientras que la señal de color naranja corresponde al control PI.

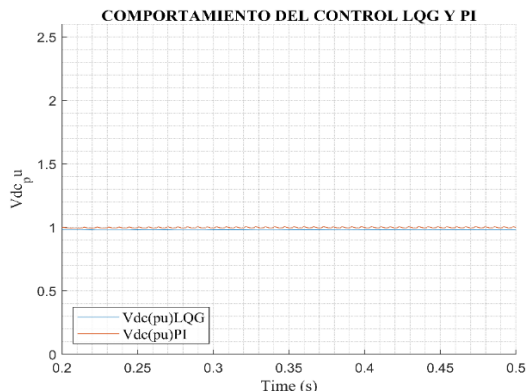


Figura 9. Comportamiento del voltaje (pu) entre el control LQG y control PI.

En la tabla 4 se pueden observar los parámetros de la planta utilizada.

Tabla 4. Parámetros de la planta

Sistema	Tipo	P <sub>transf</sub> (kW)	Voltaje (V)
PV	DC	1,95	294,4
BESS	DC	0,000125	129,9
Load	DC	3,851	0,9812

Finalmente, para demostrar la eficiencia del controlador LQG, se ha realizado la simulación del control PI, el cual es un controlador usado anteriormente con frecuencia, este es un punto muy importante para poder entender la función que cumple cada uno de los controladores, a continuación, se realizaran las mismas simulaciones tomando en cuenta fallas de sensado abruptas.

## 7 ANÁLISIS DE RESULTADOS

El estudio abarca el problema de un sistema tolerante a fallas, por lo que el control se basa en mantener una estabilidad continua dentro del rango del Bus DC de 300 v (cabe mencionar que las gráficas se han manejado bajo el sistema PU), el mismo que cumple con la necesidad de ser un controlador robusto ya que se han empleado el uso de fallas de sensado abruptas además de perturbaciones. El análisis de resultados propuesto se basa en la realización de un sistema de control tolerante a fallas basado en la metodología LQG. En donde las fallas actuaran al tiempo de



0.25 s, observando la respuesta para cada uno de los controladores que se utilizaron.

Bajo este análisis se puede observar que es notoria la mejora del sistema bajo falla entre un controlador PI y el controlador LQG, siendo el control PI utilizado netamente para comparación de resultados, se cumple con los objetivos planteados. Cabe recalcar que el control establece la funcionalidad de poder conservar la regulación en base a la referencia de voltaje, y también llega a compensar los diferentes efectos de las fallas en general.

En la figura 10, se puede observar la señal de voltaje de salida bajo el control LQG basado en el sistema pu.

Al ser activada una falla de sensado de tipo abrupta al tiempo de 0.25 s, su comportamiento se mantiene dentro de un margen estable pese a la degradación que existe en el sistema.

Tomando en cuenta la gráfica, se puede demostrar que el control tolerante a fallas basado en la estrategia de control LQG implementado en este estudio entrega una respuesta afirmativa.

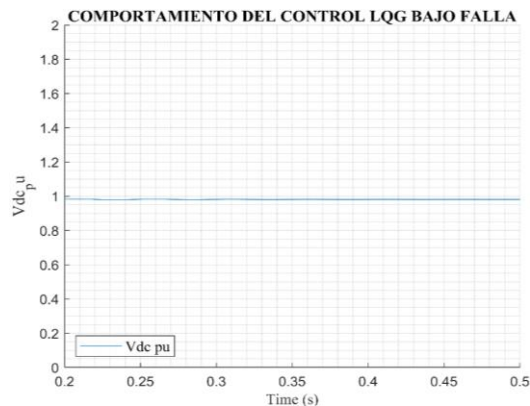
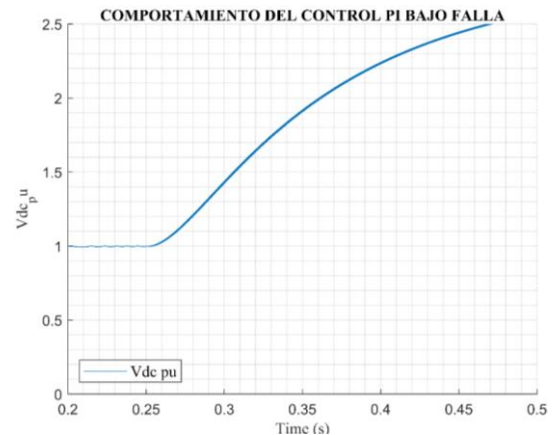


Figura 10. Comportamiento del voltaje (pu) para el control LQG ante falla

En la figura 11, se puede observar la señal de voltaje de salida bajo el control PI basado en el sistema pu.

Al igual que en la gráfica 10, se activa una falla en las mismas condiciones de tiempo y tipo, donde su comportamiento es erróneo debido a la falta de robustez que ofrece este controlador en el sistema.



Basándose en la gráfica, se puede observar que el controlador PI no cumple satisfactoriamente con la tolerancia a fallas en este sistema.

Figura 11. Comportamiento del voltaje (pu) para el control LQG ante falla

Por lo tanto, se ha demostrado que el control LQG propuesto, cumple con su función y permite establecer que, para este tipo de fallas el control LQG efectúa satisfactoriamente los resultados esperados en base al presente estudio, basándose en la comparación de dichos controladores, podemos argumentar la eficiencia en el control tolerante a fallas con la estructura de control LQG.

## 8 CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este trabajo permiten cumplir con los objetivos propuestos en la investigación, al plantear la base teórica necesaria para desarrollar y aplicar un procedimiento a seguir para el diseño de controladores tolerantes a fallas mediante el control Buck-Boost a través de la técnica de estabilidad directa en base al método LQG. Al analizar las referencias

consultadas y plantear el procedimiento de diseño, se puede hacer énfasis en los siguientes aportes generados:

El uso de una metodología para analizar los sistemas en base a los componentes permite generalizar la forma de análisis mediante el modelado genérico de cada uno de los componentes y la formación de subsistemas. La aplicación de estos análisis basados en componentes en sistemas complejos, asegura la estructuración sistemática de toda la información contenida en los componentes, lo cual disminuye la posibilidad de obviar fallas y facilita la tarea de diseño de los sistemas de control, incrementando la confiabilidad de los mismos.

Se propuso el uso de las técnicas de diagnóstico de fallas para implementar mecanismos de reconfiguración, de tal manera que se puede calcular más de un compensador estabilizante, donde cada uno de ellos, sólo compensará un subconjunto de plantas del conjunto total, y un sistema de diagnóstico seleccionará cual es el compensador que debe ser usado en cada situación.

Al diseñar los compensadores es necesario tomar en cuenta el tiempo de establecimiento, con respecto al período mínimo de ocurrencia de falla, ya que ante la ocurrencia de fallas con una frecuencia mayor a la que puede responder el sistema según sus parámetros de diseño, éste puede tornarse inestable en comparación a otros métodos de control de fallas, al utilizar el método LQG, se pudo observar que el controlador es lo suficientemente robusto para soportar disparos en base a fallas abruptas y mucho menos incipientes como se pudo confirmar gracias a la simulación realizada.

## 9 TRABAJOS FUTUROS

Existen muchos métodos que pueden complementar esta investigación en el área de diagnóstico de fallas. Toda la información que se encuentra contenida en las variables del sistema puede ser sintetizada mediante el uso de sistemas inteligentes, para aumentar la eficiencia minimizando el tiempo de detección de fallas y la precisión en su aislamiento y en la cuantificación.

Otras técnicas de control pueden ser usadas partiendo de la información contenida en los elementos del sistema y la metodología planteada, se puede investigar el uso del diagnóstico para activar alguna superficie de deslizamiento en el control por modo deslizante o el uso de alguna otra técnica de control no lineal.

## 10 REFERENCIAS

- [1] M. Perez, A. Perez H, and E. Perez B, "Introducción a los sistemas de control," *Univ. Autónoma Nuevo León - Fac. Ing. Mecánica Y Eléctrica*, no. February, p. 69, 2008.
- [2] G. Cembranoa, J. Quevedob, M. Salameroc, V. Puigb, J. Figuerasa, and J. Martic, "Optimal control of urban drainage systems. Acase study," *J. Am. Geriatr. Soc.*, vol. 31, no. 4, pp. 213–215, 2002.
- [3] K. Wang, Z. Ouyang, R. Krishnan, L. Shu, and L. He, "A game theory-based energy management system using price elasticity for smart grids," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 11, no. 6, pp. 1607–1616, 2015.
- [4] D. Version, *Fault Tolerant Control Systems - a Development*

*Method and Real-Life Case Study*  
Søren Abildsten Bøgh Department  
of Control Engineering. 1997.

- [5] R. Geometry and G. Analysis, *Fault Detection and Diagnosis in Engineerin Systems*. .
- [6] M. Blanke, M. Kinnaert, J. Lunze, and M. Staroswiecki, *Diagnosis and fault-tolerant control, third edition*. 2016.
- [7] V. Puig, J. Quevedo, T. Escobet, B. Morcego, and C. Ocampo, “Control Tolerante a Fallos ( parte I ): Fundamentos y Diagnóstico de Fallos,” *Rev. Iberoam. Automática e informática Ind.*, vol. 1, no. 1, pp. 15–31, 2004.
- [8] V. Puig, J. Quevedo, T. Escobet, B. Morcego, and C. Ocampo, “Control Tolerante a Fallos: Mecanismos de tolerancia y sistema de supervisor,” *Rev. Iberoam. Automática e Inform. Ind.*, vol. 1, no. 2, pp. 4–21, 2004.
- [9] F. J. Arteaga *et al.*, “Intelligent system for simultaneous stabilization with multiple bounded stability domains in process control,” *Neural Networks*, no. July, pp. 1–14, 2004.
- [10] F. J. Arteaga-Bravo and G. O. Beale, “Simultaneous stabilization with multiple bounded domains of stability in chemical process control,” pp. 830–835, 2002.
- [11] M. Bounded, S. Domains, and R. Control, “Simultaneous Stabilization Example,” pp. 1–12, 2004.
- [12] H. Liao, C. Xu, J. Song, and Y. Yu, “Green power generation technology for distributed power supply,” *2008 China Int. Conf. Electr. Distrib. CICED 2008*, no. 4, 2008.
- [13] T. Zhou and B. Francois, “Energy management and power control of a hybrid active wind generator for distributed power generation and grid integration,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 1, pp. 95–104, 2011.
- [14] B. P. Singh and M. M. Gore, “Smart DC Microgrid,” pp. 100–128, 2018.
- [15] P. Arboleya *et al.*, “Efficient Energy Management in Smart Micro-Grids : ZERO Grid Impact Buildings,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, no. 2, pp. 1055–1063, 2015.
- [16] E. H. R. Cámara, L. C. O. López, L. J. R. Castellanos, and R. J. P. Escalante, “Diseño de una Micro Red Eléctrica Inteligente con Sistema Fotovoltaico y Celda de Combustible,” *Pist. Educ.*, no. 120, pp. 516–532, 2016.
- [17] J. P. Fossati, “Revisión bibliográfica sobre micro redes inteligentes. Literature review of microgrids,” *Mem. Trab. Difusión Científica y Técnica*, vol. 9, pp. 13–20, 2011.
- [18] A. Jorgensen, R. Izadi-Zamanabadi, and M. Kristensen, “Prototype software for automated structural analysis of systems,” *IFAC Proc. Vol.*, vol. 37, no. 11, pp. 511–517, 2004.
- [19] P. Arboleya *et al.*, “Efficient energy management in smart micro-grids: ZERO grid impact buildings,” *IEEE Trans. Smart*

- Grid*, vol. 6, no. 2, pp. 1055–1063, 2015.
- [20] H. Niemann and J. Stoustrup, “Reliable control using the primary and dual Youla parameterizations,” no. December, pp. 4353–4358, 2004.
- [21] L. Zheng, W. Hu, Y. Min, and J. Ma, “A Novel Method to Monitor and Predict Voltage Collapse: The Critical Transitions Approach,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 2, pp. 1184–1194, 2018.
- [22] J. E. Vernottel *et al.*, “High Fidelity Simulation of Power System Dynamics,” *IEEE Comput. Appl. Power*, vol. 8, no. 1, pp. 37–41, 1995.
- [23] 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.
- [24] D. Micro and C. Francisco, “Estrategia para la Gestión de una Micro Red,” no. December, 2018.
- [25] 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.
- [26] D. Carrión and L. Ortiz, “Generación distribuida a partir de bicicletas estáticas y sistemas híbridos,” *Ingenius*, vol. 10, pp. 44–48, 2013.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] J. L. Blas Arroyo, “1. Introducción 11,” *Políticos en Confl. una aproximación pragmáticodiscursiva al debate Elect. cara a cara*, pp. 1–16, 2016.
- [30] A. E. Cabrera *et al.*, “Modelación dinámica de la demanda y oferta de una micro-red eléctrica,” no. December, pp. 147–162, 2014.
- [31] J. A. Guacaneme, D. Velasco, and C. L. Trujillo, “Revisión de las características de sistemas de almacenamiento de energía para aplicaciones en micro redes,” *Inf. Tecnol.*, vol. 25, no. 2, pp. 175–188, 2014.
- [32] P. Magne, B. Nahid-Mobarakeh, and S. Pierfederici, “Dynamic Consideration of DC Microgrids With Constant Power Loads and Active Damping System—A Design Method for Fault-Tolerant Stabilizing System,” *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 2, no. 3, pp. 562–570, 2014.
- [33] Z. Chen, K. Wang, Z. Li, and T. Zheng, “A review on control strategies of AC/DC micro grid,” *Conf. Proc. - 2017 17th IEEE Int. Conf. Environ. Electr. Eng. 2017*

- 1st IEEE Ind. Commer. Power Syst. Eur. IEEEIC / I CPS Eur. 2017*, 2017.
- [34] J. Hare, X. Shi, S. Gupta, and A. Bazzi, "Fault diagnostics in smart micro-grids: A survey," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 60, no. February 2018, pp. 1114–1124, 2016.
- [35] G. K. Chinchuña Toledo and L. Ortiz Matos, "Mejoramiento de la fiabilidad en microrredes mediante el control robusto de voltaje usando técnicas pasivas de tolerancia a fallos," Universidad Politécnica Salesiana, 2018.
- [36] A. Tah and D. Das, "An Enhanced Droop Control Method for Accurate Load Sharing and Voltage Improvement of Isolated and Interconnected DC Microgrids," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 7, no. 3, pp. 1194–1204, 2016.
- [37] S. E. Mhankale and A. R. Thorat, "Droop Control Strategies of DC Microgrid: A Review," *Proc. 2018 Int. Conf. Curr. Trends Toward. Converging Technol. ICCTCT 2018*, pp. 372–376, 2018.
- [38] T. S. Elliot and L. Gidding, "Redes de," no. July, pp. 519–527, 2015.
- [39] S. Nicolaie and A. Chihaiia, "LabVIEW Design and Simulation of a Small Scale Microgrid LABVIEW DESIGN AND SIMULATION OF A SMALL SCALE MICROGRID," no. March, 2016.
- [40] F. M. G. S. N. Singh, "Demand-Side Management System for Autonomous DC Microgrid for Building," 2017.
- [41] C. Padmanabharaju and A. V. Reddy, "Simulation Modeling and Control of Hybrid Ac / Dc Microgrid," vol. 6, no. 1, pp. 17–24, 2016.
- [42] Y. Zhou, "Study of buck-boost photovoltaic inverter based on discrete sliding mode control strategy," *2011 2nd Int. Conf. Mech. Autom. Control Eng. MACE 2011 - Proc.*, pp. 1643–1647, 2011.
- [43] M. Rios-bolivar, "Control Robusto de un Convertidor Buck-Boost ante Variaciones en la Carga," no. October 2007, 2016.
- [44] C. Restrepo, T. Konjedic, F. Flores-Bahamonde, E. Vidal-Idiarte, J. Calvente, and R. Giral, "Multisampled Digital Average Current Controls of the Versatile Buck-Boost Converter," *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 7, no. 2, pp. 879–890, 2019.
- [45] N. Aguirre, A. Carvajal, and S. Martínez, "Convertidor DC a DC Buck-Boost."
- [46] A. Alam, L. Tao, K. Habib, and S. Khan, "Model predictive control for disturbance rejection and robust stability in Buck-Boost converter," *Proc. 2016 IEEE Adv. Inf. Manag. Commun. Electron. Autom. Control Conf. IMCEC 2016*, pp. 892–895, 2017.
- [47] S. Alejandro and B. Martorell, "Diseño e implementación de convertidor buck-boost bidireccional para manejo de supercondensadores," 2017.
- [48] M. N. M. Haque, M. Naeem-Ur-

- Rahman, S. C. Sarkar, M. S. Miah, I. Ahammad, and M. A. Islam, "Design and simulation of a forcible buck-boost controlling solar powered DC motor," *IEEE Int. Conf. Power, Control. Signals Instrum. Eng. ICPSI 2017*, pp. 131–136, 2018.
- [49] S. Palanidoss and T. V. S. Vishnu, "Experimental analysis of conventional buck and boost converter with integrated dual output converter," *Int. Conf. Electr. Electron. Commun. Comput. Technol. Optim. Tech. ICEECCOT 2017*, vol. 2018-Janua, pp. 323–329, 2018.
- [50] 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.
- [51] 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.
- [52] R. J. Patton, "Fault-Tolerant Control: The 1997 Situation," *IFAC Proc. Vol.*, vol. 30, no. 18, pp. 1029–1051, 2017.
- [53] M. Blanke, M. Kinnaert, J. Lunze, and M. Staroswiecki, "Diagnosis and fault-tolerant control, third edition," *Diagnosis Fault-Tolerant Control. Third Ed.*, no. August, pp. 1–695, 2016.
- [54] H. Noura, M. Ouladsine, U. P. Cézanne, and A. Iii, "Sensor and Actuator Fault-Tolerant Control Scheme applied to a Winding Machine," no. January 2014.
- [55] H. Niemann and J. Stoustrup, "Passive fault tolerant control of a double inverted pendulum - A case study example," *IFAC Proc. Vol.*, vol. 36, no. 5, pp. 927–932, 2003.
- [56] M. Blanke, W. Christian Frei, F. Kraus, J. Ron Patton, and M. Staroswiecki, "What is Fault-Tolerant Control?," *IFAC Proc. Vol.*, vol. 33, no. 11, pp. 41–52, 2017.
- [57] R. Izadi-Zamanabadi, "Fault-tolerant Supervisory Control: System Analysis and Logic Design." 1999.
- [58] 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.
- [59] R. Wang and J. Wang, "Fault-tolerant control with active fault diagnosis for four-wheel independently driven electric ground vehicles," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, no. 9, pp. 4276–4287, 2011.
- [60] J. L. M. Bastidas and L. O. Matos, "Localización de fallas en microredes eléctricas basado en un modelo Markoviano.," Universidad Politécnica Salesiana, 2018.
- [61] F. J. Arteaga-bravo, M. A. Contramaestre, M. A. Vizcaya, G. O. Beale, B. S. Domain, and C. Factorization, "Software system for simultaneous stabilization with

- multiple bounded domains in process control using factorization approach,” *Electr. Eng.*, no. July, pp. 1–12, 2004.
- [62] U. S. Zamad, A. P. Deshpande, and S. C. Patwardhan, “LQG CONTROL WITH RECONFIGURABLE STATE ESTIMATOR UNDER SENSOR AND ACTUATOR FAILURES,” vol. 1, pp. 147–152, 2007.
- [63] J. Prakash, S. C. Patwardhan, and S. Narasimhan, “A Supervisory Approach to Fault-Tolerant Control of Linear Multivariable Systems,” pp. 2270–2281, 2002.
- [64] P. Taylor, A. E. Ashari, A. K. Sedigh, and M. J. Yazdanpanah, “Reconfigurable control system design using eigenstructure assignment : static , dynamic and robust approaches Reconfigurable control system design using eigenstructure assignment : static , dynamic and robust approaches,” no. May 2015, pp. 37–41.
- [65] A. Y. Fallah and T. Taghikhany, “Sliding Mode Fault Tolerant Control for Actuator Failure in Civil Introduction :,” pp. 1–11.
- [66] L. Zhu, J. Liu, M. Cupelli, and A. Monti, “Decentralized linear quadratic Gaussian control of multi-generator MVDC shipboard power system with constant power loads,” *2013 IEEE Electr. Sh. Technol. Symp. ESTS 2013*, pp. 308–313, 2013.
- [67] M. Rahman, S. K. Sarkar, S. K. Das, and Y. Miao, “A comparative study of LQR, LQG, and integral LQG controller for frequency control of interconnected smart grid,” *3rd Int. Conf. Electr. Inf. Commun. Technol. EICT 2017*, vol. 2018-Janua, no. December, pp. 1–6, 2018.
- [68] V. Tzoumas, L. Carlone, G. J. Pappas, and A. Jadbabaie, “Sensing-Constrained LQG Control,” *Proc. Am. Control Conf.*, vol. 2018-June, pp. 197–202, 2018.
- [69] S. Shahravanmehr and A. Fakharian, “LQG controller based on fuzzy logic to control the power of wind turbine,” *Proc. 2015 10th IEEE Conf. Ind. Electron. Appl. ICIEA 2015*, pp. 1548–1553, 2015.
- [70] A. Kalbat, “Linear Quadratic Gaussian (LQG) Control of wind turbines,” *2013 3rd Int. Conf. Electr. Power Energy Convers. Syst. EPECS 2013*, vol. 0, no. 2, pp. 1–5, 2013.
- [71] A. Kalbat, “Linear Quadratic Gaussian ( LQG ) Control of Wind Turbines,” vol. 0, no. 0.

# 11 MATRIZ DE ESTADO DEL ARTE

Tabla 5. Matriz de Estado del Arte

Estrategia activa de tolerancia a fallas para el control Buck-Boost de Micro-redes eléctricas en DC.																				
DATOS				TEMÁTICA				FORMULACION DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA		ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN		SOLUCIÓN PROPUESTA				
ITEM	AÑO	ESTRATEGIA ACTIVA DE TOLERANCIA A FALLAS PARA EL CONTROL BUCK-BOOST DE MICRO-REDES ELÉCTRICAS EN DC	CITAS	Estrategia de Tolerancia a Fallas	Micro-Redes	Control Tolerante a Fallas	Tipos de Fallas	Metodos de Tolerancia a Fallas	Control LQG	Control PI	Retroalimentacion del Sistema	Metodos Activos de Tolerancia a Fallos	Arquitectura de Control Tolerante a Fallas	Sistemas no lineales	Control Robusto LQG	Modelación del sistema de Control	Control Buck-Boost	Simulación de Control Tolerante a Fallos	Análisis del sistema de Control Mediante LQG	Estudio de estabilidad de voltaje bajo Falla
1	2008	Introducción a los sistemas de control,	5	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>										<input checked="" type="checkbox"/>				
2	2004	Optimal control of urban drainage systems. A case study	2		<input checked="" type="checkbox"/>									<input checked="" type="checkbox"/>						<input checked="" type="checkbox"/>
3	2015	A game theory-based energy management system using price elasticity for smart grids	1		<input checked="" type="checkbox"/>															
4	1997	Fault-tolerant Supervisory Control: System Analysis and Logic Design.	3	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>		
5	1998	Fault Detection and Diagnosis in Engineering System	1	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>						<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>				
6	2016	Diagnosis and fault-tolerant control	6	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>					<input checked="" type="checkbox"/>		
7	2004	Intelligent system for simultaneous stabilization with multiple bounded stability domains in process control	3	<input checked="" type="checkbox"/>							<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>



## Estrategia activa de tolerancia a fallas para el control Buck-Boost de Micro-redes eléctricas en DC.

Estrategia activa de tolerancia a fallas para el control Buck-Boost de Micro-redes eléctricas en DC.																				
DATOS				TEMÁTICA				FORMULACION DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA		ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN		SOLUCIÓN PROPUESTA				
ITEM	AÑO	ESTRATEGIA ACTIVA DE TOLERANCIA A FALLAS PARA EL CONTROL BUCK-BOOST DE MICRO-REDES ELÉCTRICAS EN DC	CITAS	Estrategia de Tolerancia a Fallas	Micro-Redes	Control Tolerante a Fallas	Tipos de Fallas	Metodos de Tolerancia a Fallas	Control LQG	Control PI	Retroalimentación del Sistema	Metodos Activos de Tolerancia a Fallos	Arquitectura de Control Tolerante a Fallas	Sistemas no lineales	Control Robusto LQG	Modelación del sistema de Control	Control Buck-Boost	Simulación de Control Tolerante a Fallos	Análisis del sistema de Control Mediante LQG	Estudio de estabilidad de voltaje bajo Falla
8	2014	Sensor and Actuator Fault-Tolerant Control Scheme applied to a Winding Machine	3	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>
9	2004	Reliable control using the primary and dual Youla parameterizations	3	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>		
10	2003	Passive fault tolerant control of a double inverted pendulum - A case study example	1	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>					<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>
11	2016	Diagnosis and fault-tolerant control	6	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>					<input checked="" type="checkbox"/>		
12	2004	Prototype software for automated structural analysis of systems	3			<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>					<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>				
13	2002	Simultaneous stabilization with multiple bounded domains of stability in chemical process control	1		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>										
14	2006	Simultaneous Stabilization Example	2		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>
15	2008	Green power generation technology for distributed power supply	2		<input checked="" type="checkbox"/>						<input checked="" type="checkbox"/>									
16	2012	Energy management and power control of a hybrid active wind generator for distributed power generation and grid integration	3		<input checked="" type="checkbox"/>						<input checked="" type="checkbox"/>									

## Estrategia activa de tolerancia a fallas para el control Buck-Boost de Micro-redes eléctricas en DC.

Estrategia activa de tolerancia a fallas para el control Buck-Boost de Micro-redes eléctricas en DC.																				
DATOS				TEMÁTICA				FORMULACION DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA		ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN		SOLUCIÓN PROPUESTA				
ITEM	AÑO	ESTRATEGIA ACTIVA DE TOLERANCIA A FALLAS PARA EL CONTROL BUCK-BOOST DE MICRO-REDES ELÉCTRICAS EN DC	CITAS	Estrategia de Tolerancia a Fallas	Micro-Redes	Control Tolerante a Fallas	Tipos de Fallas	Metodos de Tolerancia a Fallas	Control LQG	Control PI	Retroalimentación del Sistema	Metodos Activos de Tolerancia a Fallos	Arquitectura de Control Tolerante a Fallas	Sistemas no lineales	Control Robusto LQG	Modelación del sistema de Control	Control Buck-Boost	Simulación de Control Tolerante a Fallos	Análisis del sistema de Control Mediante LQG	Estudio de estabilidad de voltaje bajo Falla
17	2015	Efficient energy management in smart micro-grids: ZERO grid impact buildings	2		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>		
18	2000	High Fidelity Simulation of Power System Dynamics	1		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>														
19	2018	A Novel Method to Monitor and Predict Voltage Collapse: The Critical Transitions Approach	3		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>							
20	2017	Multi-Criteria Optimization of the Deployment of a Grid for Rural Electrification Based on a Heuristic Method	1		<input checked="" type="checkbox"/>															
21	2004	Control Tolerante a Fallos: Mecanismos de tolerancia y sistema de supervisor	3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>		
22	2016	Reconfiguration Strategy for Fault Tolerance of Power Distribution Systems Using Petri Net		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>				
23	2012	A Decentralized Fault-Tolerant Control System for Accommodation of Failures in	1	<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>
24	2015	A Micro-Grid Distributed Intelligent Control and Management System	1		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>														
25	2004	Control Tolerante a Fallos ( parte I): Fundamentos y Diagnóstico de Fallos		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>						

## Estrategia activa de tolerancia a fallas para el control Buck-Boost de Micro-redes eléctricas en DC.

Estrategia activa de tolerancia a fallas para el control Buck-Boost de Micro-redes eléctricas en DC.																				
DATOS				TEMÁTICA				FORMULACION DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA		ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN		SOLUCIÓN PROPUESTA				
ITEM	AÑO	ESTRATEGIA ACTIVA DE TOLERANCIA A FALLAS PARA EL CONTROL BUCK-BOOST DE MICRO-REDES ELÉCTRICAS EN DC	CITAS	Estrategia de Tolerancia a Fallas	Micro-Redes	Control Tolerante a Fallas	Tipos de Fallas	Metodos de Tolerancia a Fallas	Control LQG	Control PI	Retroalimentación del Sistema	Metodos Activos de Tolerancia a Fallos	Arquitectura de Control Tolerante a Fallas	Sistemas no lineales	Control Robusto LQG	Modelación del sistema de Control	Control Buck-Boost	Simulación de Control Tolerante a Fallos	Análisis del sistema de Control Mediante LQG	Estudio de estabilidad de voltaje bajo Falla
26	2018	Mejoramiento de la fiabilidad en microrredes mediante el control robusto de voltaje usando técnicas pasivas de tolerancia a fallos		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>
27	2016	Estrategia de tolerancia a fallas por condiciones ambientales para IEDS en subestaciones de distribución		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>				
28	2017	Fault-Tolerant Control: The 1997 Situation	3	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>				
29	2017	What is Fault-Tolerant Control?	2	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>
30	2010	Fault-tolerant Supervisory Control: System Analysis and Logic Design.	3	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>		
31	2014	Aalborg Universitet Prototype Software for Automated Structural Analysis of Systems	1		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>														
32	2015	Modelización con Petri Net de una aplicación automática de diagnóstico y restauración de avería en sistema de distribución,		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>					<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>		
33	2018	Localización de fallas en microrredes eléctricas basado en un modelo Markoviano		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>					<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>		

## Estrategia activa de tolerancia a fallas para el control Buck-Boost de Micro-redes eléctricas en DC.

Estrategia activa de tolerancia a fallas para el control Buck-Boost de Micro-redes eléctricas en DC.																				
DATOS				TEMÁTICA				FORMULACION DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA		ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN		SOLUCIÓN PROPUESTA				
ITEM	AÑO	ESTRATEGIA ACTIVA DE TOLERANCIA A FALLAS PARA EL CONTROL BUCK-BOOST DE MICRO-REDES ELÉCTRICAS EN DC	CITAS	Estrategia de Tolerancia a Fallas	Micro-Redes	Control Tolerante a Fallas	Tipos de Fallas	Metodos de Tolerancia a Fallas	Control LQG	Control PI	Retroalimentación del Sistema	Metodos Activos de Tolerancia a Fallos	Arquitectura de Control Tolerante a Fallas	Sistemas no lineales	Control Robusto LQG	Modelación del sistema de Control	Control Buck-Boost	Simulación de Control Tolerante a Fallos	Análisis del sistema de Control Mediante LQG	Estudio de estabilidad de voltaje bajo Falla
34	2014	Dynamic Consideration of DC Microgrids With Constant Power Loads and Active Damping System—A Design Method for Fault-Tolerant Stabilizing System	1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>					<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>						
35	2011	Study of buck-boost photovoltaic inverter based on discrete sliding mode control strategy		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>								<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>
36	2016	Study of buck-boost photovoltaic inverter based on discrete sliding mode control strategy		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>						<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			
37	2019	Multisampled Digital Average Current Controls of the Versatile Buck-Boost				<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>					<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>
38	2017	Convertidor DC a DC Buck-Boost.		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>						<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>
39	2017	Model predictive control for disturbance rejection and robust stability in Buck-Boost converter		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			
40	2017	Model predictive control for disturbance rejection and robust stability in Buck-Boost converter				<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>
41	2018	Design and simulation of a forcible buck-boost controlling solar powered DC motor		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			

## Estrategia activa de tolerancia a fallas para el control Buck-Boost de Micro-redes eléctricas en DC.

Estrategia activa de tolerancia a fallas para el control Buck-Boost de Micro-redes eléctricas en DC.																				
DATOS				TEMÁTICA				FORMULACION DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA		ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN		SOLUCIÓN PROPUESTA				
ITEM	AÑO	ESTRATEGIA ACTIVA DE TOLERANCIA A FALLAS PARA EL CONTROL BUCK-BOOST DE MICRO-REDES ELÉCTRICAS EN DC	CITAS	Estrategia de Tolerancia a Fallas	Micro-Redes	Control Tolerante a Fallas	Tipos de Fallas	Metodos de Tolerancia a Fallas	Control LQG	Control PI	Retroalimentación del Sistema	Metodos Activos de Tolerancia a Fallos	Arquitectura de Control Tolerante a Fallas	Sistemas no lineales	Control Robusto LQG	Modelación del sistema de Control	Control Buck-Boost	Simulación de Control Tolerante a Fallos	Análisis del sistema de Control Mediante LQG	Estudio de estabilidad de voltaje bajo Falla
42	2018	Experimental analysis of conventional buck and boost converter with integrated dual output converter		<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>						<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>			
43	2004	Software system for simultaneous stabilization with multiple bounded domains in process control using factorization approach	1	<input checked="" type="checkbox"/>					<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>							
44	2004	Control tolerante a fallas mediante técnicas de estabilización simultánea con múltiples dominios de estabilidad				<input checked="" type="checkbox"/>														
45	2013	Decentralized linear quadratic Gaussian control of multi-generator MVDC shipboard power system with constant power loads	2	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
46	2011	Fault-tolerant control with active fault diagnosis for four-wheel independently driven electric ground vehicles,	2			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>												
47	2015	LQG controller based on fuzzy logic to control the power of wind turbine	2			<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
48	2013	Linear Quadratic Gaussian (LQG) Control of wind turbines,	3	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
			CANTIDAD:	30	17	34	17	28	12	5	19	20	19	20	5	29	10	20	12	15

## 12 RESUMEN DE INDICADORES

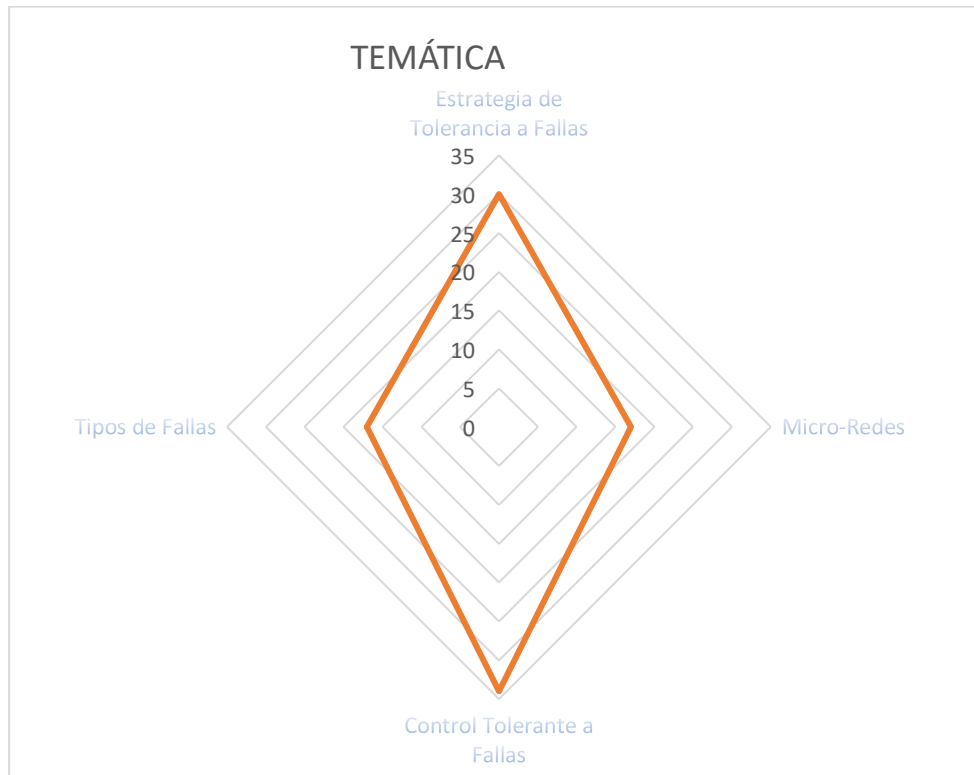


Figura 12. Resumen e indicador de la temática.

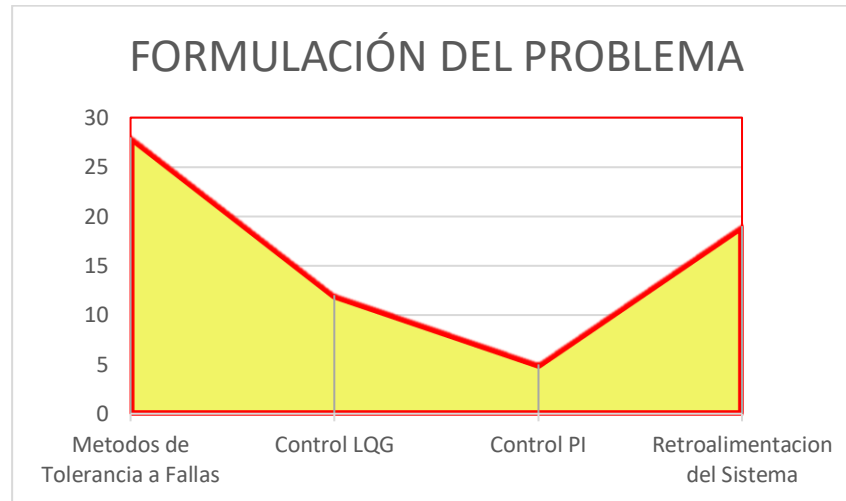


Figura 13. Indicador de formulación del problema.

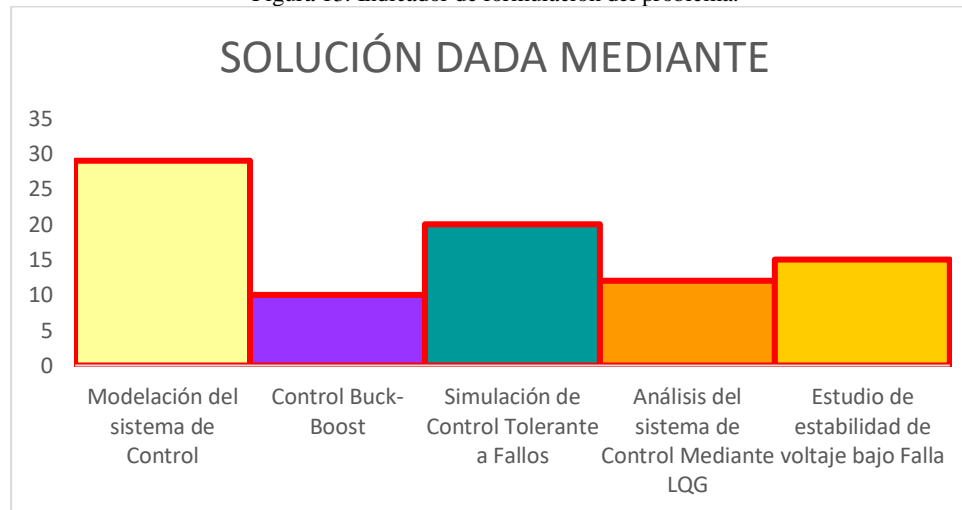


Figura 14. Indicador de solución.