



POSGRADOS

MAESTRÍA EN ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN

RPC-SO-30-No.508-2019

OPCIÓN DE
TITULACIÓN:

ARTÍCULOS PROFESIONALES DE ALTO NIVEL

TEMA:

CONTROL TOLERANTE A FALLOS MULTI-
OBJETIVO PARA SISTEMAS BESS ACOPLADOS
ELECTRÓNICAMENTE A MICRO-REDES
ELÉCTRICAS EN CA AISLADAS BASADO EN
IMC Y H_{∞}

AUTOR:

BUESTAN VERA JEAN CARLOS

DIRECTOR:

ORTIZ MATOS LEONY

QUITO - ECUADOR
2021

Autor/a:



Jean Carlos Buestan Vera

Ingeniero Electrónico

Candidato a Magister en Electrónica y Automatización

Mención en Informática Industrial por la Universidad Politécnica

Salesiana – Sede Quito.

jbuestanv@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Leony Ortiz Matos

Ingeniero en Automática

Máster en Automática

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 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 investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

©2021 Universidad Politécnica Salesiana.

QUITO – ECUADOR – SUDAMÉRICA

BUESTAN VERA JEAN CARLOS

CONTROL TOLERANTE A FALLOS MULTI-OBJETIVO PARA SISTEMAS BESS

ACOPLADOS ELECTRÓNICAMENTE A MICRO-REDES ELÉCTRICAS EN CA

AISLADAS BASADO EN IMC Y H ∞

Control Tolerante a Fallos Multi-Objetivo Para Sistema BESS acoplados Electrónicamente a Micro-Redes Eléctricas en CA aisladas Basadas en IMC y $H \infty$

Jean Carlos Buestán Vera and Leony Ortiz Matos

Universidad Politécnica Salesiana - Ecuador

Resumen

La investigación propone una estrategia de tolerancia a Fallas Multi-objetivo para sistemas de almacenamiento por baterías (por sus siglas en inglés BESS) acoplado a la MRH (Micro-Red-Híbrida) tipo Benchmark basada en algoritmos por IMC y H infinito, considerando que el control operará para cualquier perturbación de carga en el sistema. El método propuesto brindará las bases para el desarrollo de metodologías de tolerancia a fallas en MRH, además, contribuirá a mejorar la confiabilidad del BESS y la MRH aislada ante efectos negativos como perturbaciones. Aquellos efectos como: perturbaciones en la carga, perturbaciones no medidas en la carga, perturbaciones de censado, perturbaciones en la salida no censada y ruidos en la medición. En los sistemas BESS, mediante el uso de la electrónica de potencia se adapta la energía en su forma DC a valores AC adecuados en voltaje y frecuencia. La MRH de prueba está compuesta de: Paneles fotovoltaicos (PV), Sistema de almacenamiento de energía (BESS), cargas lineales y no lineales. Mediante la tolerancia a Fallos, su desarrollo se centra en un control basado en los algoritmos IMC y H infinito para eliminar todo tipo señales parásitas. El comportamiento en general tendrá una correcta respuesta a nivel de Voltaje y Corriente, además para mejorar y evitar la acción de control se incluirá un mecanismo conocido Anti WinUp. Todo diseño se centra en controladores, Modelos y Plantas que permitirán ajustar los tiempos de control para mejorar la confiabilidad del BESS y MRH. Finalmente, los resultados serán verificados y comprobados mediante simulación en Matlab/Simulink.

Abstract

The research proposes a multi-objective fault tolerance strategy for battery storage systems (BESS) coupled to the Benchmark type MRH (Micro-Hybrid Network) based on algorithms by IMC and infinite H, considering that the control will operate for any load disturbance in the system. The proposed method will provide the basis for the development of fault tolerance methodologies in MRH, in addition, it will contribute to improve the reliability of the BESS and the isolated MRH against negative effects such as disturbances. Those effects such as: disturbances in the load, unmeasured disturbances in the load, censoring disturbances, disturbances in the uncensored output and noises in the measurement. In BESS systems, by using power electronics the energy in its DC form is adapted to suitable AC values in voltage and frequency. The test MRH is composed of: Photovoltaic (PV) panels, Energy Storage System (BESS), linear and nonlinear loads. By means of fault tolerance, its development is focused on a control based on IMC and infinite H algorithms to eliminate all kinds of parasitic signals. The overall behavior will

have a correct response at the Voltage and Current level, in addition to improve and avoid the control action will include a mechanism known as Anti WinUp. All design is focused on controllers, Models and Plants that will allow to adjust the control times to improve the reliability of the BESS and MRH. Finally, the results will be verified and tested by simulation in Matlab/Simulink.

Palabras clave— Fallas Multi-Objetivo; IMC; H_{∞} ; *BESS*.

1 Introducción

En el momento actual, el avance de nuevas tecnologías utiliza innovadoras fuentes energéticas alternativas y a su vez la capacidad para enlazar diversos equipos que orienta a la transformación de la red eléctrica, llevándola al concepto de Smart Grid (SG)([L.Fernandez and M.Labriet, 2014](#)). Un paso importante esta en la transición de crear nuevas redes que cuenten con la inteligencia necesaria para integrar una red orientada a la generación, almacenamiento distribuido y brindar un suministro de alta calidad y seguridad. Estos aspectos conforman una red denominada Micro-red (MG). Las MG, son un gran potencial para verse como tecnología para la integración de energías renovables variables, no solo es una integración de generación distribuida a la red principal([R.M](#)), también proporciona alta fiabilidad al operar ante fenómenos naturales y en Redes de distribución activa([L.Ortiz and J.L.Gabriel, 2019](#))??. Existen técnicas con el fin de diseñar sistemas de control, capaces de solucionar fallas o perturbaciones abruptas, que a su vez logran la controlabilidad y estabilidad ante las fallas en los sistemas de control.

Dentro del manejo de estos fenómenos entran los controladores robustos, que garantizan el desarrollo ante las incertidumbres que presenta el proceso de diseño orientado al buen rendimiento, para lograr este proceso se explicara dichas técnicas a continuación. En los Sistemas de Almacenamiento por Baterías (por sus siglas en ingles BESS), el uso de un Control en Cascada nos permitirá adaptar un convertidor bidireccional DC/AC, esto tanto para el voltaje y frecuencia. De esta manera se logrará descargar las baterías inyectando potencia activa al sistema en los momentos en los que este lo necesite. Un control Robusto por H infinito es lograr una estabilidad absoluta en lazo cerrado, el control es considerado debido a las dificultades que se presenta en los sistemas invariantes en el tiempo. Los controladores IMC y H infinito proporcionan un mejor rendimiento adaptando MHR tipo benchmark, que permite un control predictivo de modelo no lineal, de esta manera se pretende aumentar la confiabilidad en el sistema de control del BESS acoplado en CA a MRH tipo.

El enfoque de diseño de control multi-objetivo utiliza el método de Control por Modelo Interno (IMC) que se aplica a sistemas lineales de dimensión infinita, donde la dinámica es descrito por funciones de transferencia irracionales. Las entradas a menudo están restringidas en la práctica, pero esta adaptada para proporcionar un control multi-objetivo. Cuando se saturan las entradas se desarrollara un control de compensación antiwindup para solucionar las perturbaciones ocasionadas por el ruido. En el Diseño de controladores óptimos para las salidas con entrada única (SISO), tendrá un enfoque sobre la trayectoria de la referencia, rechazo de medidas y la eliminación de ruido, a su vez tendrá el mismo enfoque en el caso de múltiples entradas (MIMO). El propósito de implementar un control de modelo Interno IMC y H infinito, es minimizar la función de sensibilidad, orientado en el sistema estable que permite una respuesta robusta ante variaciones de las condiciones del controlador. El objetivo de estos métodos es lograr una estabilidad absoluta en lazo cerrado, resultante de incertidumbres admisibles y perturbaciones en el controlador H infinito para la MRH orientada a una señal de referencia.

Una red eléctrica al momento de sufrir fallas técnicas provoca malestar en la sociedad como perdidas económicas, esto se debe a anomalías en la red que comprometen a líneas de distribución como generadores que son de suma importancia al momento de brindar un suministro eléctrico. Estas fallas pueden ser causadas por eventos de la naturaleza que son inevitables como tormentas eléctricas que pueden afectar directamente a una red principal de un sector comercial. Por esta razón se vuelve centro de atención las fallas provocadas por estos fenómenos, es así que por este medio se pretende manifestar la utilidad de métodos de prevención al control Tolerante a Fallas Multi-Objetivo([TOLEDO, 2018](#)). Una red como tal es dependiente de si misma ya que en este caso el manejo de corriente alterna varia de dirección con cambios de voltaje y corriente, lo que en este estudio es indispensable poder manejar este fenómeno para no afectar a las demás partes del sistema y que el comportamiento no influya en la red general([Rahnamay-Naeini and Hayat, 2016](#)).

La micro-red proporciona beneficios al usuario, como maximizar el uso y generar inteligencia para incrementar la eficiencia y minimizar costos. Dentro de las tecnologías para desarrollar la idea previa, el estudio centra el uso de inversores conectados a fuentes para generar corriente continua y sobre todo para el almacenamiento directo a la micro-red, de esta manera se consigue operar en corriente alterna manteniendo la funcionalidad cuando la red principal sufra un fallo, un ejemplo practico se muestra en ([Lorente de la Rubia, 2011](#)).

Una micro-red está enfocada a la integración renovable, el sistema (BESS) se enfoca en el punto común acoplados a nivel de generadores distribuidos. Se define generalmente como sistema de energía integrado operando autónoma mente en paralelo, para que un controlador BESS se valide existe dos escenarios con el cual se desarrolla, el primero es la generación fotovoltaica y la carga de demanda, el segundo escenario opera con generación eólica, fotovoltaica y carga de demanda(● [Prompinit, 2015](#)).

En las MRH, en el ámbito de protección debemos recalcar que el flujo bidireccional permite coordinar un buen manejo sin problemas de la generación distribuida de la red principal, lo que garantiza la confiabilidad del manejo inteligente de las micro redes([et al, 2015](#)).

Dentro del manejo de la micro redes DC/AC, se maneja un convertidor bidireccional como se evidencia en la figura 1 que maneja un control robusto orientado al manejo de H infinito e IMC, cabe recalcar para el manejo de la red inteligente intervienen cargas lineales y no lineales en AC, que a su vez tiene una fiabilidad de un Banco de Baterías que garantiza el manejo de Voltaje y Corriente al sistema en general. Para la red principal son ideal los sistemas BESS, en donde se basan en un banco de baterías provisto con un sistema de control con su respectiva interface utilizando la electrónica de potencia para acondicionar los sistemas de distribución a nivel de energía eléctrica([Naderipour, 2017](#)).

El proyecto a implementar propone un análisis estocástico que fundamenta sus acciones para evitar conflictos de señales parásitas en las salida de nuestro sistema a nivel de Voltaje como Corriente y evitar la propagaciones de fallas a la red principal con técnicas de tolerancia a fallos sobre la Micro-red.

De aquí en adelante este artículo está organizado de la siguiente manera. En la Sección 2 se presenta las Generalidades donde se aborda un estudio previo para Solucionar el Problemas del modelo. En la Sección 3 se presenta Procedimiento para una Estructura de Control. En la Sección 4, Planteamiento del Problema. En la Sección 5, Caso de Estudio, y finalmente en la Sección 7 Conclusiones.

2 Generalidades

La MG brinda una solución inteligente para controlar la generación distribuida hacia las cargas locales, durante las etapas de diseño y planificación([Téllez, 2019](#)). El control Robusto por H infinito es lograr una estabilidad absoluta en lazo cerrado, el control es considerado debido a las dificultades que se presenta en los sistemas invariantes en el tiempo. Los controladores IMC y H infinito proporcionan un mejor rendimiento adaptando MHR tipo benchmark, que permite un control predictivo de modelo no lineal([Li, 2018](#)), de esta manera se pretende aumentar la confiabilidad en el sistema de control del BESS acoplado en CA a MRH tipo([S. Farhati and Abdelkrim, 2011](#)). La selección de una estructura de control se muestra óptimo cuando los controladores se desconectan debido a las fallas de componentes sin rediseño de ninguno de los controladores en línea. El diseño proporciona un marco conveniente para los controladores multi-objetivos([Mesbah and Braatz, 2013](#)) mediante el desacoplamiento de las medidas de rendimiento. La estructura para el diseño óptimo en controladores evitara la mayoría de las compensaciones inherentes a una estructura clásica de control por retroalimentación([B. Beykal and Pistikopoulos, 2018](#)), el enfoque se muestra para permitir el diseño óptimo para controladores tolerantes a fallo([Bao, 2018](#)). Cada controlador de grado de libertad esta encargado de abordar un subconjunto del objetivo de control, cada controlador tiene una degradación de rendimiento durante las fallas de componentes([V. G. Mahesh and Sensarma, 2018](#))([S.Gholami and Aldeen, 2016](#)). El propósito de implementar un control de modelo Interno IMC y H infinito es minimizar la función de sensibilidad, orientado en el sistema estable que permite una respuesta robusta ante variaciones de las condiciones del controlador. El objetivo de estos métodos es lograr una estabilidad absoluta en lazo cerrado, resultante de incertidumbres admisibles y perturbaciones en el controlador H infinito para la MRH orientada a una señal de referencia.

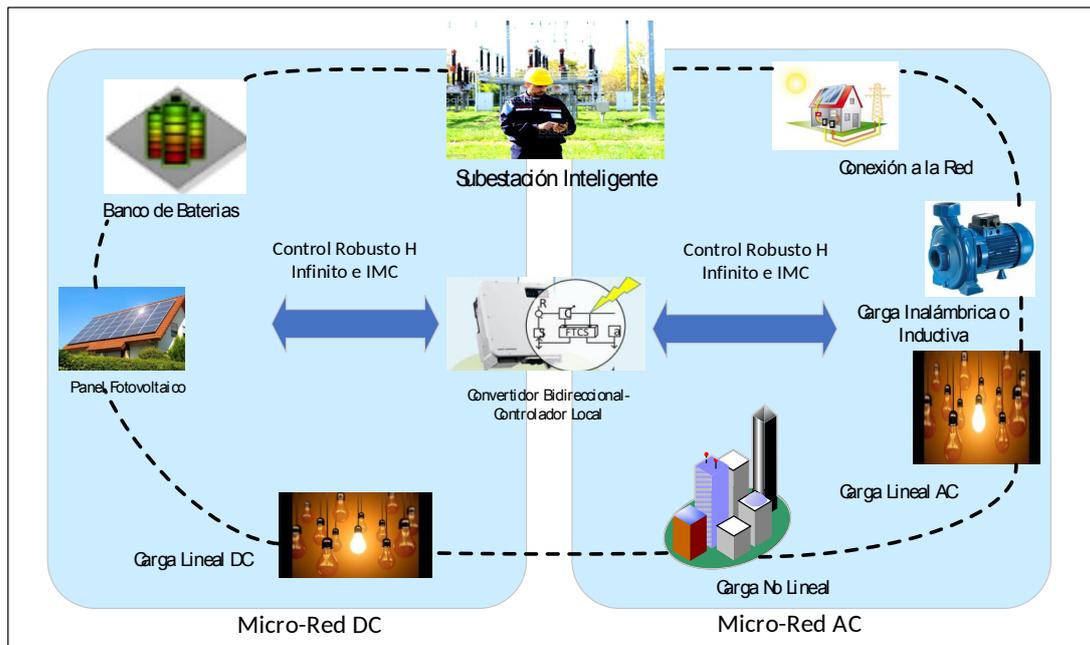


Figura 1: Micro-Red Híbrida DC/AC.

2.1 MÉTODOS DE CONTROL DE SISTEMAS BESS EN CASCADA ORIENTADO AL CONTROL DE VOLTAJE Y ESTUDIO DE LAS ETAPAS DE MODULACIÓN

Los Sistemas de Almacenamiento por Baterías (por sus siglas en inglés BESS), consta de sistemas electroquímicos reversibles que están conformados por un contenedor de electrolito y dos polos de polaridad inversa, estos inmersos en electrolito, es así como estos sistemas brinda un gran soporte a la red. (D.P, 2019). Por esta razón una micro-red está enfocada a la integración renovable, lo cual enfoca un punto común acoplados a nivel de generadores distribuidos. Un controlador BESS para que se valide existe dos escenarios, el primero es la generación fotovoltaica y la carga de demanda, el segundo escenario opera con generación eólica, fotovoltaica y carga de demanda (Prompinit, 2016). Dentro de la transmisión de potencia tenemos deterioros para el control de voltaje en uno o más de los siguientes estados estables que presenta el manejo de limitaciones de estado dinámico:

1. Control de Perfil del Voltaje: En general el mantenimiento deseado por el perfil de tensión de transmisión, Prevención de tensión y limitaciones de sobre tensiones.
2. Control de transmisión de Potencia: mayor potencia en la transmisión, minimización de flujos, voltaje y control de frecuencia.
3. Sistema de estabilización Dinámica: estabilidad en estado estacionario.

En el caso de los equipos BESS en la etapa de la electrónica de potencia para conectarse a la red principal, compone algunas fases:

1. Conversión DC/DC: controla el estado de carga de las baterías.
2. Conversión DC/AC: Realizada por un inversor.

Dentro del control de voltaje hay que recalcar, que la compensación de derivación tiene una capacidad automática para apoyar el nivel de voltaje en un área específica del sistema de potencia. Dentro del desarrollo de control se implementará un controlador proporcional-integral (PI), en este caso pondremos de ejemplo a un control (PI) desacoplado donde K_{I1} , K_{P2} Y K_{I2} son proporcionales y con ajuste de ganancia integral de reguladores de voltaje de CC y CA representadas en la figura 2.

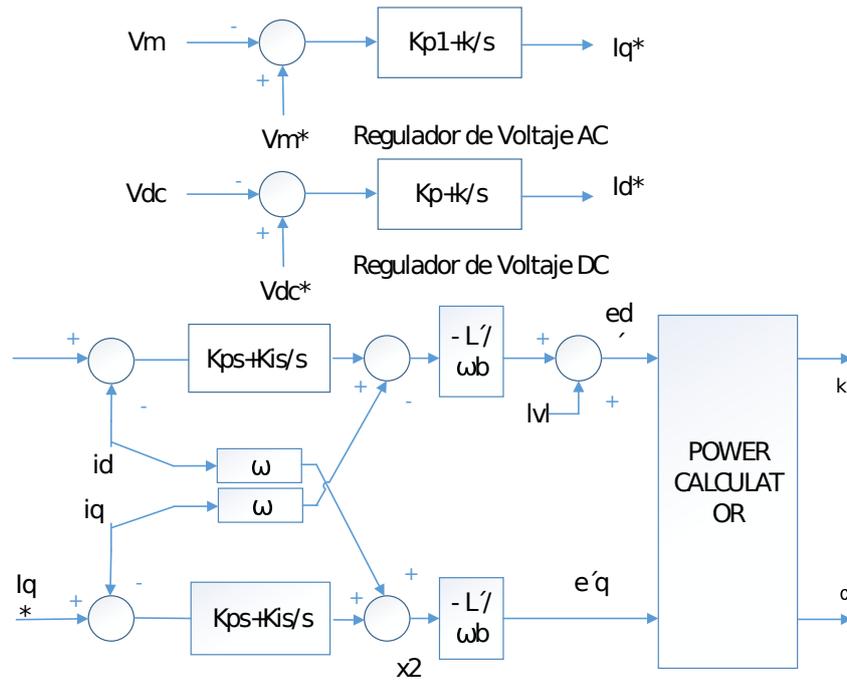


Figura 2: Reguladores de Voltaje de CC y AC.

3 Procedimiento para el Desarrollo de una Estructura de Control para un Diseño Independiente de Controladores Multi-Objetivo

En la formulación del Problema Propuesto, desarrollamos una estructura de control enfocada en un sistema de parámetros Distribuidos. El objetivo del diseño para este sistema de control se enfoca en tres parámetros que garantizara suprimir las perturbaciones y los efectos del ruido(Huerta, 2006).

1. Seguridad en establecer a nivel interno una garantía estable en el sistema de circuito cerrado.
2. Seguimiento constante de las perturbaciones como ruido
3. Eliminar los efectos de ruido de medición.

A nivel de la estructura de Control de retroalimentación, se utiliza un sistema de control Multi-Objetivo que demuestra como intervienen las perturbaciones en determinado sistema de control orientado al proceso de la Planta.

En este caso existe los siguientes parámetros: Ruido de Medición (n) Variable Manipulada (u), Referencia (r), Perturbaciones de carga medida (l_m), Perturbación de carga no medida (l_u), Perturbación de la salida medida (d_m), Perturbación de Salida no Medida (d_u), en este caso como se evidencia en la Figura 3.

Dentro del análisis del controlador Ci se puede entender que son variables que pueden medir directamente una función para garantizar la estabilidad interna de un sistema de circuito cerrado. La figura 3, tiene un inconveniente a nivel de diseño de los controladores para satisfacer los objetivos múltiples de control definidos de forma independiente, de tal manera se concluyo en que no son completamente independiente, esto se debe a que los circuitos cerrados mediante funciones de transferencias que relacionan las entradas del sistema con la salida dependen de múltiples funciones de transferencia del controlador, por esa razón se solucionara con el modelo Interno de Control(IMC), mediante este modelo se diseñaran las variables a controlar para establecer funciones de transferencia que permitan corregir de inmediato cualquier perturbación y tener una estabilidad dentro del sistema de control. La dinámica de un sistema (MIMO) que es invariante en el tiempo (LTI) con dimensión infinita P puede ser descrito por un sistema

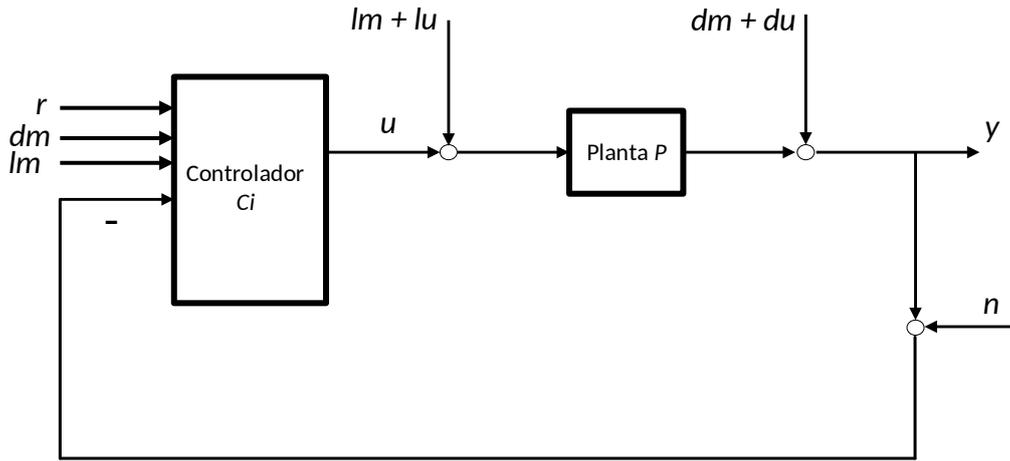


Figura 3: Esquema de un Sistema de control de retroalimentación clásico general donde $C_i = [C_r; C_{dm}; C_{lm}; C_y]$.

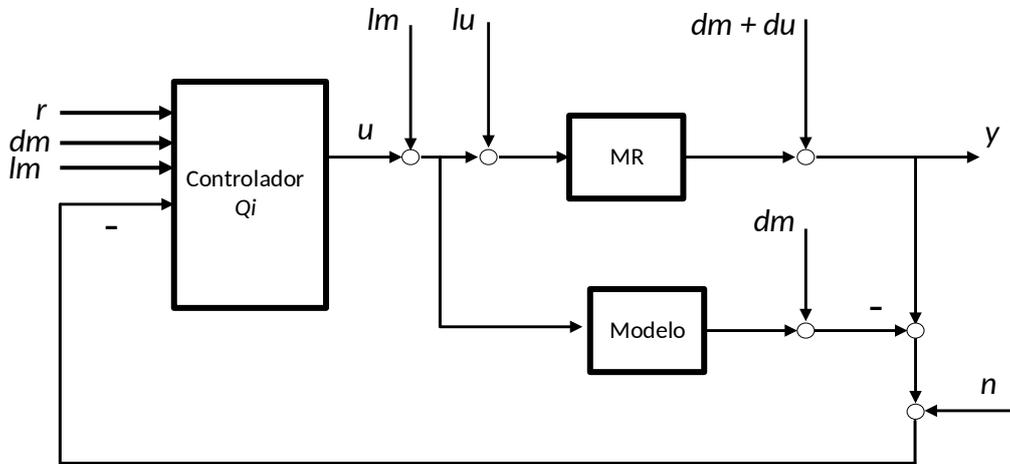


Figura 4: Estructura de control general para un sistema LTI estable donde $C_i = [C_r; C_{dm}; C_{lm}; C_y]$.

matemático abstracto que se lo conoce como Espacio de Estado (Jurado, 2012) (Fernandez, 2002). El mapeo entre todas las variables de las entradas de un sistema de control cerrado, salida de proceso y la variable manipulada es descrita por

$$\begin{bmatrix} y \\ u \end{bmatrix} = H(P, C_i) \begin{bmatrix} r \\ lm \\ lu \\ dm \\ du \\ n \end{bmatrix} \quad (1)$$

Donde la Matriz de Transferencia $H(P,Ci)$ esta desarrollada por

$$\begin{bmatrix} PCr(I + PCy)^{-1} & PClm(I + PCy)^{-1} + (I + PCy)^{-1}P \\ Cr(I + PCy)^{-1} & Clm(I + PCy)^{-1} - Cy(I + PCy)^{-1}P \\ (I + PCy)^{-1}P & PCdm(I + PCy)^{-1} + (I + PCy)^{-1} \\ -Cy(I + PCy)^{-1}P & Cdm(I + PCy)^{-1} - Cy(I + PCy)^{-1} \\ (I + PCy)^{-1} & -PCy(I + PCy)^{-1} \\ (I + PCy)^{-1} & (I + PCy)^{-1} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Un enfoque base dentro de un control óptimo es formular una medida de desempeño en términos de una norma ponderada H_2 o H infinito sobre $H(P,Ci)$ (K.Z, 1996). Varias de las funciones de transferencia en bucle cerrado en 2 relacionan las entradas del sistema con la salida (y) y manipulan la variables (u) que son funciones de múltiples funciones de transferencia del controlador manejado, de este modo los diseños de estas funciones satisfacen los objetivos múltiples de control. Considere la estructura del Modelo de Control Interno en la figura 4, para formulación del diseño de control donde Q_i es el controlador IMC(Morari and Zafirou, 1989), en este caso la figura 3 proporciona una estructura de control para el diseño de controladores multi-objetivos. Es bien sabido que todos los controladores estabilizadores LTI están parametrizados por:

$$Cy = (\tilde{V} - Qy\tilde{N})^{-1}(\tilde{U} + Qy\tilde{M}) \quad (3)$$

Donde Qy es una función de transferencia LTI estable como se interpreta en (K.Z, 1996). Para un Proceso LTI estable, es decir: P es elemento de R^*H infinito, donde $N=P^-, M^-=I, U^-=0$ y $V^-=I$. Esto da lugar a la parametrización de Youla(Mario Salgado, 2005), parametrización de todos los controladores de retroalimentación estabilizadores para un proceso LTI estable P (Mario Salgado, 2005).

$$Cy(I + PCy)^{-1} \quad Qy = Qy(I - PQy)^{-1}. \quad (4)$$

Se reemplaza 4 en 2, lo que permite las posible funciones de transferencia de bucle cerrado LTI que son internamente estables, por lo que $H(P,Ci)$ toma la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} PCr(I + PCy)^{-1} & PClm(I + PCy)^{-1} + (I + PCy)^{-1}P \\ Cr(I + PCy)^{-1} & Clm(I + PCy)^{-1} - Cy(I + PCy)^{-1}P \\ (I - PQy)P & PCdm(I + PCy)^{-1} + (I + PCy)^{-1} \\ -QyP & Cdm(I + PCy)^{-1} - Cy(I + PCy)^{-1} \\ I - PQy & -PQy \\ -Qy & -Qy \end{bmatrix} \quad (5)$$

La expresión en 5 implica que la estabilidad interna del sistema global de bucle cerrado requiere las funciones de transferencia sean estables

$$Cr(I + PCy)^{-1} \quad Clm(I + PCy)^{-1} \quad Cdm(I + PCy)^{-1} \quad (6)$$

Mediante los sistemas de ecuaciones de Q_r, Q_{lm} y Q_{dm} se tiene las siguientes expresiones:

$$\begin{bmatrix} Q_r = Cr(I + PCy)^{-1} \\ Q_{lm} = Clm(I + PCy)^{-1} - Cy(I + PCy)^{-1}P \\ Q_{dm} = Cdm(I + PCy)^{-1} - Cy(I + PCy)^{-1} \end{bmatrix} \quad (7)$$

De la definición de Cy (es decir 4) se deduce que $Cr, Clm,$ y Cdm en 8 abarcan el conjunto de todos los controladores de retroalimentación estabilizadores para cualquier Q_r, Q_{lm} y Q_{dm} estable, respectivamente. Esto implica que 5 es internamente estable. La inserción de 8 en 5 simplifica la matriz de transferencia $H(P;Ci)$ a

$$\begin{bmatrix} PQ_r & P(I + Q_{lm}) & (I - PQy)P & I + PQ_{dm} \\ Q_r & Q_{lm} & -QyP & Q_{dm} \\ I - PQy & -PQy & & \\ -Qy & -Qy & & \end{bmatrix} \quad (8)$$

El diagrama de bloques de la Figura 4 tiene la misma matriz de transferencia en bucle cerrado de transferencia de lazo cerrado que en 8 y, por lo tanto, es equivalente al sistema de control clásico por retroalimentación de la Figura 3. La estructura de control de la Figura 4 no es restrictiva para sistemas LTI estables ya que implica el conjunto de todos los controladores estabilizadores C_i para cualquier sistema estable Q_i . La estructura de control de la Figura 4 puede ser utilizada para la implementación de IMC sustituyendo el P inferior de la Figura 4 por un modelo de proceso P (Mesbah and Braatz, 2013).

4 Planteamiento del Problema

Para comprender la situación del modelo estudiado, se tiene una micro red inestable que supera el margen de error permitido que además interviene las señales parásitas que afecta el rendimiento del sistema, estas causas se dan por efectos externos conocidos como fenómenos climáticos que a su vez también pueden ser fallas humanas al momento de monitorear o controlador dichos sistemas. La consecuencias que presentan son a nivel estructural y general de un sistema de distribución eléctrica que permite brindar un servicio de calidad a la comunidad.

Para lograr los objetivos, se plantean tres etapas, las cuáles se irán desarrollando conforme el orden de los objetivos propuestos. En la primera etapa se hará una estudio y análisis del estado del arte, de manera que se puede saber si otros investigadores ya han tenido como temática de estudio el “Control Tolerante a Fallos Multi-objetivo para Sistemas BESS acoplados electrónicamente a Micro-redes Eléctricas en CA Aisladas basado en IMC y H infinito”, y cuáles fueron sus aportes científicos, para luego ser comparados y ver el que mejor se adapta al tema de estudio planteado en este artículo.

En la segunda etapa se definirá una estrategia de identificación y selección de los modelos obtenidos y almacenarlos en una base de datos, esto se lo hará a través del uso del software Matlab. Se realizarán las simulaciones correspondientes hasta obtener el algoritmo de cada fuente de generación distribuida y con ello obtener los distintos modelos.

En la tercera etapa se desarrolla el análisis de resultados con las conclusiones respectivas. Mediante las simulaciones respectivas se evaluará el desempeño de la estrategia de tolerancia a fallas propuesta ante diferentes eventos de falla y su efecto sobre la MRH.

A través de las 3 etapas mencionadas se procederá a desarrollar mediante una simulación digital una ley de control de voltaje primaria para un BESS acoplado electrónicamente a MRH aislada tipo benchmark.

Uno de los pilares fundamentales en el proyecto propuesto es diseñar un algoritmo para identificación dinámica que permitan representen las dinámicas bajo control de la MRH y en particular del sistema BESS

4.1 Diseño y Modelado de controladores a Través de Algoritmos de Estudio basados en IMC Y H infinito

Para el diseño de los controladores, se pretende utilizar algoritmos en base a un control por IMC y H infinito, que brindara la fiabilidad y estabilidad del sistema de control en lazo cerrado a través de la Tolerancia a Fallos. Mediante una Red Bidireccional con topología en Cascada Tipo Bess, se implementara pruebas a diferentes casos de Perturbaciones que servirá como base para obtener el comportamiento dentro de una red eléctrica inestable y de esa manera controlar diferentes comportamientos a nivel de Modulación de Voltaje y Corriente.

A través de un control BESS, se pretende analizar los efectos de las perturbaciones en un Control PI en Cascada para observar el comportamiento del Voltaje y Corriente en mínima como máxima demanda trabajando en Corriente Alterna (CA). Las Perturbaciones que se manejan para la prueba sera las siguientes: Perturbación en la medición de Salida (dm), Perturbación de la Salida no medida(du), Perturbación no medida en la carga(lu) y Perturbación en la carga(lm), como se ilustra en la Figura 3 todo el proceso a simular sera manejado en el Software Matlab/Simulink.

A través de la perturbaciones evaluadas, se realizo una conversión de tiempo y sintonización a un 1 segundo, por esa razón se procedió a realizar dicha conversión como se muestra en la tabla 1 para evaluar dicho fenómeno con un margen de error de $\pm 5\%$.

Los Datos adquiridos del esquema original sirvieron para adquirir el comportamiento de medición de las perturbaciones, que serán tratados mediante una sintonización orientada en una regla de tres sobre un tiempo estimado de 1 segundo para garantiza una mejor confiabilidad como se muestra en la tabla 1, es así que aquéllos datos servirán para el diseño de los algoritmos y controladores que se desarrollaran a continuación.

Tabla 1: Sintonización de Perturbaciones.

Perturbación	<i>Datos Sintonizados(s)</i>
Perturbación en la medición de salida	0.465
Perturbación de la salida no medida	1.50
Perturbación no medida en la carga	0.65
Perturbación en la carga	0.45

Tabla 2: Algoritmo 2:Diseño Qdm por Control Multi-Objetivo por H infinito

Paso 1	Entrada:Espacio Estado $P=ss(A,B,C,D)$ $T_{s_{power}} = 5e - 6; T_{s_{control}} = T_{s_{power}} * 10$
Paso 2	Diseño Bucle:Fijar Polos,Ganancia DC $M = M/(dcgain(M)*dcgain(P(1,:)))$ $R_{ideal} = P * M;$
Paso 3	Bucle H infinito: $\omega_c = bandwidth(P(1,:) * M)$
Paso 4	Definir Datos Para el ancho de Banda
Paso 5	Uso de NCFSYN $[Cinf, \gamma] = ncfsyn(Pw);$ $Cinf = -Cinf;$ $perf_{margin} = 1/\gamma$
Paso 6	Pre Filtro $C1 = Wi * Cinf * Wo; L = P * C1;$ Pre Filtro $Qhat = (T(1,:) * Q0) R_{ideal}(1, :);$ $Qhat = minreal(Qhat, [], false);$ $Q = Q0 * Qhat$
Paso 7	Control General $Controller = 100 * [C1 Q]$ $Controller = minreal(Controller, [], false);$
Paso 8	Retorna

Tabla 3: Algoritmo1:Obtención del modelo por IMC.

Paso 1	Entrada:($y_s, u, t \in R$) $x = \lambda; K = 1$
Paso 2	Salida: ($Q(s) \in s$)
Paso 3	Inicialización:[num den]:num=[k=1]; den=[$\lambda + 1$] ² : <i>Filtro</i> $G1 = tf(num, den)$, Ecuación Filtro
Paso 4	Ecuación del Modelo a Controlar $G2 = tf(num2, den2)$
Paso 5	Adquisición del Controlador $Gc = G1 * inv(G2)$, se simulo las respuestas en base a la estructura de IMC variando lamda
Paso 6	Retorna a las Entradas

5 Caso de Estudio

5.1 Algoritmo Para el Diseño de Controladores por IMC

Para desarrollar un algoritmo adecuado es importante adquirir la función de transferencia del sistema, por lo cual el controlador esta orientado hacia la tolerancia a Fallos, todo este análisis se baso en un estudio experimental del manejo de los controladores por IMC. Para el diseño del Controlador se adquirió una función transferencia de manera linealizada a través de un conversor en cascada, orientado a un control PI de mínima demanda para el estudio del Voltaje como de la Corriente.

A continuación se maneja la adquisición de la función de transferencia base, adquirida del conversor en cascada con lo cual mediante el algoritmo tenemos la capacidad de adquirir un controlador óptimo en base al Estudio matemático de un Control por Modelo Interno. Dentro de la estructura de control general para un sistema LTI-Qi se encuentran controladores Qr, Qlm, Qdm y Qy que sera rediseñados en base a un control robusto mediante un Filtro Pasa Bajo para trabajar con el concepto matemático por IMC elegido según el orden que represente la función de transferencia P(s). Cabe recalcar que Qr, Qlm y Qdm tienen una velocidad de respuesta inmediata que tendrá un efecto directo a la salida (y). Qy Prioriza el control de Múltiples Objetivos que elimina los efectos de perturbaciones y ruido de medicino.

Mediante la Relación Perturbación-Salida se tiene:

$$\frac{Y(S)}{d(s)} = \frac{1}{1 + C * G} \quad (9)$$

$$\frac{Y(S)}{r(s)} = \frac{C(S) * G(s)}{1 - C(s) * G1(s) + C(s) * G(s)} \quad (10)$$

Aplicado un estudio por Álgebra de Bloques del diseño Estándar de un IMC, se tiene:

Relación Referencia-Salida esta expresada en la ecuación 10

Relación Perturbación-Salida:

$$\frac{Y(S)}{d(s)} = \frac{1 - C(S) * G1(s)}{1 - C(s) * G1(s) + C(s) * G(s)} \quad (11)$$

A través de este estudio representaremos el proceso con el modelo:

Si el modelo es perfecto eventualmente se tiene que La Planta es igual al Modelo, lo que en Lazo cerrado tendríamos lo siguiente:

$$\frac{Y(S)}{r(s)} = C(s) * G(s) \quad (12)$$

$$\frac{Y(S)}{d(s)} = 1 - C(s) * G(s) \quad (13)$$

Por lo que la ecuación del controlador es la inversa del Modelo:

$$C(s) = \frac{1}{G1(s)} \quad (14)$$

Para el Diseño del controlador se Implementara un Filtro Activo de Primer que eliminara todo ruido de medición al momento de trabajar en la tolerancia a Fallos donde la ecuación final queda expresado de la siguiente manera

$$C(s) = \frac{1}{G1(s)} * \frac{1}{(\lambda s + 1)^n} \quad (15)$$

Con los parámetros de (lambda) y (n) elegidos garantizamos que el controlador C(s) sea

Tabla 4: Variables.

Nomenclatura	Variables
$C(s)$	Controlador
$Y(s)$	Salida del Sistema
$d(s)$	Ruido no Deseado
$r(s)$	Referencia
$G(s)$	Planta
$G1(s)$	Modelo

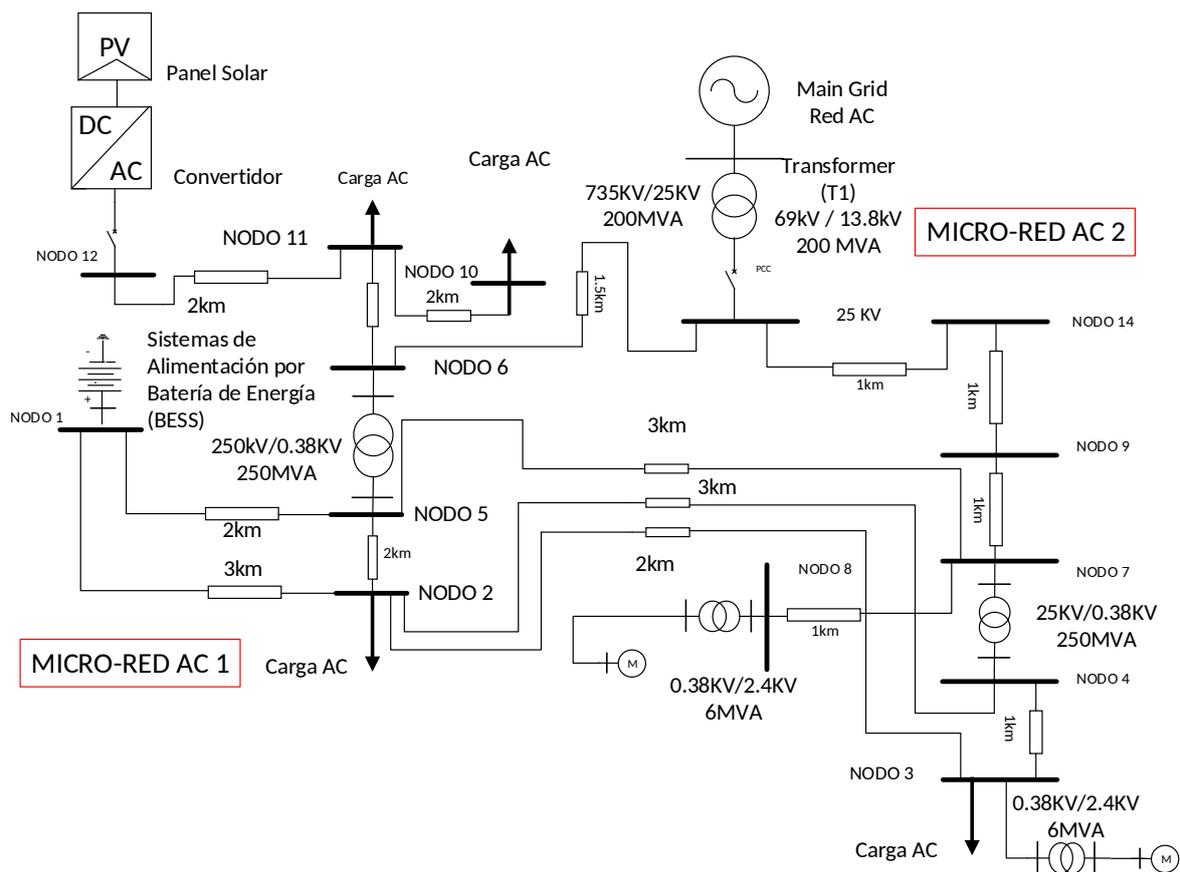


Figura 5: Caso de Estudio.

el adecuado

Mediante la aplicación de métodos de identificación se obtiene las funciones de transferencia y en base a la metodología propuesta se obtiene las siguientes funciones por IMC y H infinito.

Para Q_r , mediante la metodología por IMC se obtuvo la función de transferencia:

Ecuación Base:

$$\frac{6,322s + 15,57}{s^2 + 109,2s + 291,6} \quad (16)$$

Ecuación Q_r Mediante el Algoritmo:

$$Q_r = \frac{s^2 + 109,2s + 291,6}{6,322e - 4s^3 + 0,127997s^2 + 6,6334s + 15,57} \quad (17)$$

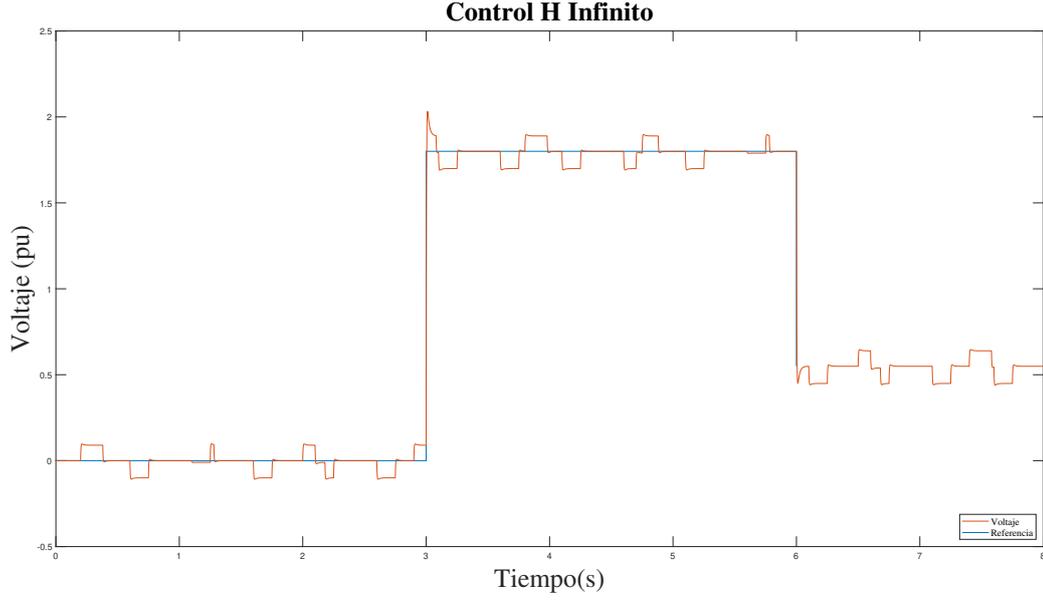


Figura 6: Respuesta por H infinito.

El Controlador Q_r esta diseñado con $\lambda=0.01$ con una $n=2$, lo que permite al controlador deseado tener una respuesta de compensación a los 0.3 segundos eliminando totalmente el ruido, como a su vez es en el caso de Q_y que tiene la misma respuesta que Q_r .

Ecuación Q_y Mediante el Algoritmo:

$$Q_y = \frac{1,5s + 1}{0,000225s^3 + 0,0455s^2 + 2,3s + 5} \quad (18)$$

$$Q_{lm} = -1 \quad (19)$$

En el diseño del Controlador Q_{dm} , se realizo mediante un Control Óptimo Multi-Objetivo por H infinito, a través de un algoritmo implementado mediante un control por Espacio Estado de la Ecuación Base de Q_{dm} , de tal manera se obtuvo los datos necesarios para la respuesta eliminando el Ruido No deseado.

$$Q_{dm} = \frac{1,0255s + 2,025 + 0,05}{1,5s^2 + 1,015s^2 + 0,01} \quad (20)$$

A través de la Ecuación 25, se obtiene los Datos de Espacio Estado:

$$A = \begin{bmatrix} -0,6767 & -0,0067 \\ 1,0000 & 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$C = [-0,8876 \quad 0,0288] \quad (23)$$

$$D = [0,6833] \quad (24)$$

A través del Algoritmo 2, se procede a obtener la respuesta por H infinito mediante el controlador Q_{dm} y a su vez verificado por el método por IMC asegurar su con fiabilidad:

$$Q_{dm} = \frac{1,5 + 1,015s + 0,01}{0,0001025s^4 + 1,0,0207s^3 + 1,066s^2 + 2,026s + 0,05} \quad (25)$$

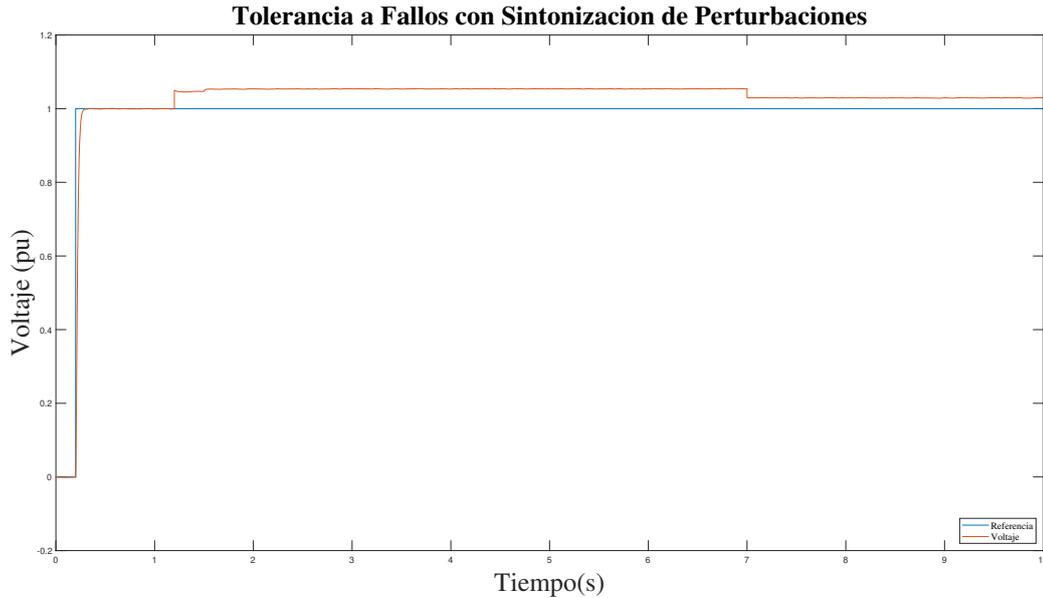


Figura 7: Respuesta FTC ante fallos.

El Modelo estudiado se centra en un Modelo BESS, que pretende solucionar los efectos de las perturbaciones mediante controles Robustos y Diseños en Sistema de Lazo cerrado por esa razón nuestro estudio se basa en la figura 5.

6 Análisis de Resultados

Dentro del estudio mediante algoritmos desarrollados, se implementó de manera correcta los procesos de identificación orientados a los sistemas de control. A través de los métodos usados se adquirió las Ecuaciones de Transferencias y de esa manera evidenciaremos mediante gráficas los comportamientos correctos a nivel de Voltaje y Corriente en nuestra Micro-Red. Al poner a prueba nuestro Sistema BESS mediante un Control PI con Tolerancia a Fallos favoreció de manera positiva los resultados a la salida de nuestro Sistema Implementado.

Aplicando la correcta sintonización de las perturbaciones como se detallo en la tabla 1 y adquisición de los nuevos controladores Q_r, Q_{lm}, Q_{dm} y Q_y se obtuvo la siguiente respuesta representada en la figura 7.

De la misma manera se logró tener una respuesta adecuada en la estabilidad del sistema, como se puede evidenciar la respuesta del comportamiento dinámico de los controladores son eficientes para eliminar el ruido de medición y mejora la capacidad en la tolerancia a fallos.

Como se observa en la figura 7, tenemos una respuesta favorables pero no fiable por el hecho que no se encuentra estable en la dinámica de nuestro sistema a lograr, por esa razón se pretende implementar una Saturación (JONATHAN IVANOV, 2017) por el problema de rechazo a las perturbaciones no medibles, lo cual describe que el controlador Q_{dm} a pesar de tener un comportamiento estable hacia la respuesta del sistema que no tiene la robustez suficiente para solucionar por completo la retroalimentación de los actuadores.

Como se ve en la Figura 8, se logro tener una mejor respuesta eliminando la perturbación a los dos segundos como se observa en la figura 7 representada como un escalón y siendo ya inestable en ese lapso de tiempo observado, lo cual mediante la saturación se logra estabilizar hasta presentar otro fenómeno de inestabilidad.

De la misma manera para resolver dicho fenómeno se decidió implementar una estrategia de control clásica Anti-Wind Up que a través de su diseño de control existe un camino de retroalimentación en términos de integración, por tal razón se regulara dicha salida hacia la entrada

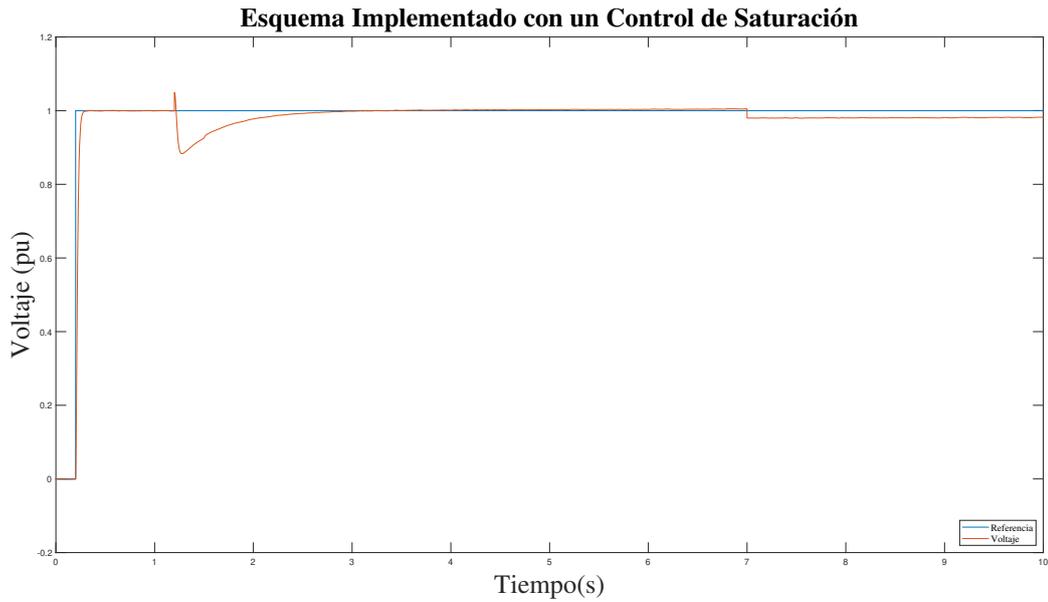


Figura 8: FTC con Saturacion.

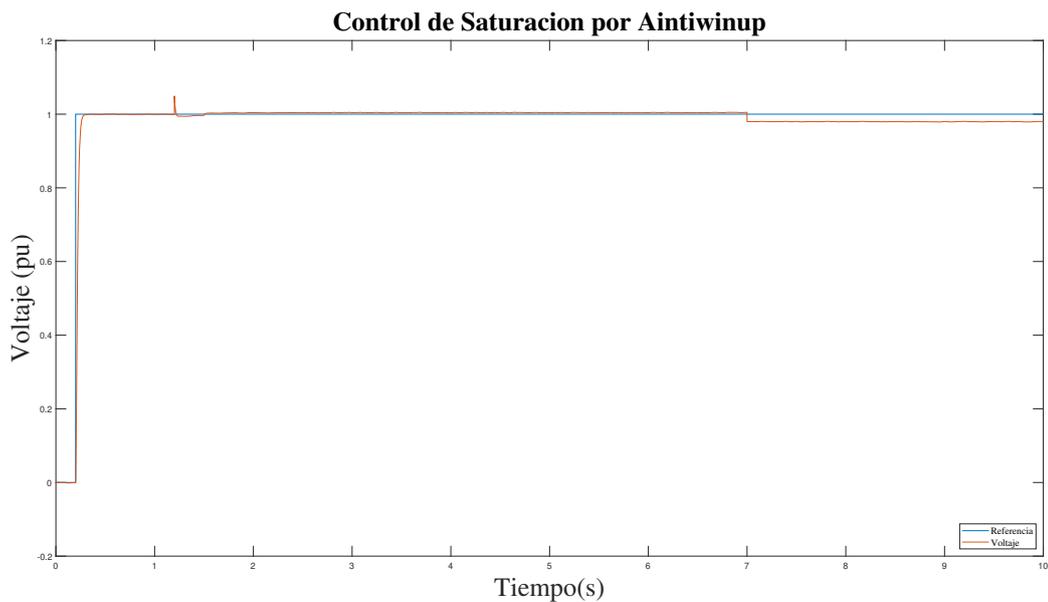


Figura 9: FTC Saturado con estrategia de control Anti-Wind Up.

del integrador, para su diseño se basó su estudio mediante los siguientes documentos (Mesbah and Braatz, 2013) (JONATHAN IVANOV, 2017).

En lo que se refiere al comportamiento por H infinito como se observa en la figura 6, se puede ver la eficacia al momento de eliminar el ruido de medición.

Mediante todo este proceso evidenciado tenemos el comportamiento del voltaje con el manejo de las perturbaciones sintonizadas con el control PI en donde se compararon su comportamiento en base a las tolerancias a fallos con el control mencionado donde sus respuestas estarán evaluadas por el sistema BESS

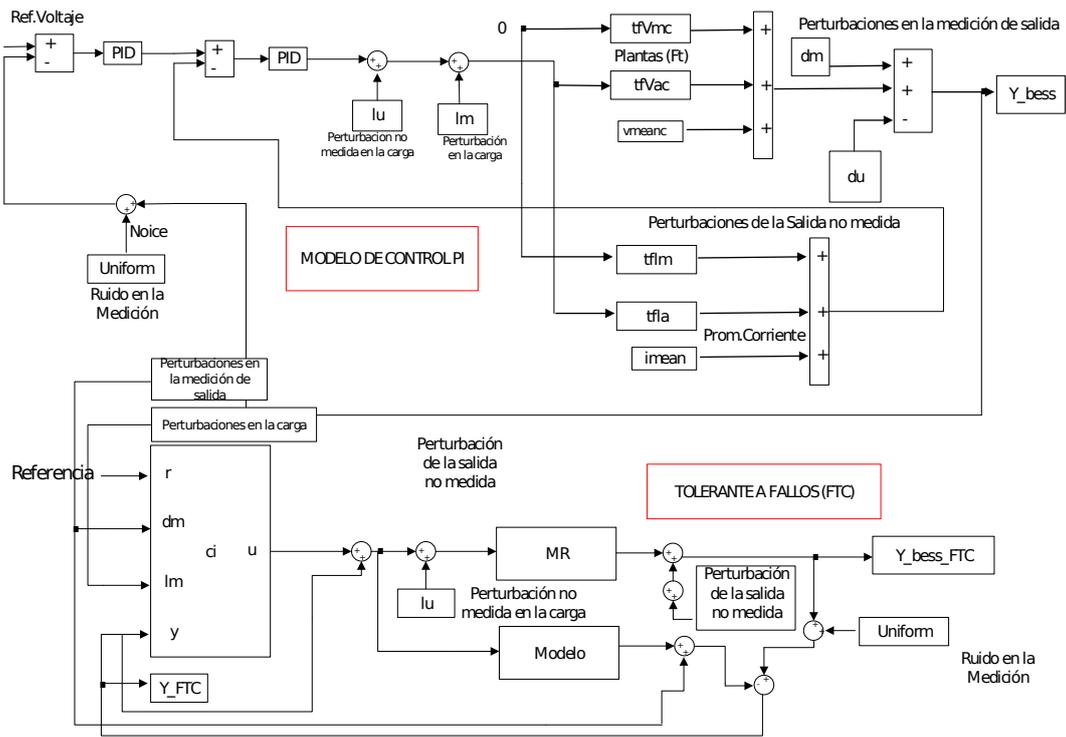


Figura 10: Estructura de Control PI y Manejo de Estructura Tolerante a Fallos.

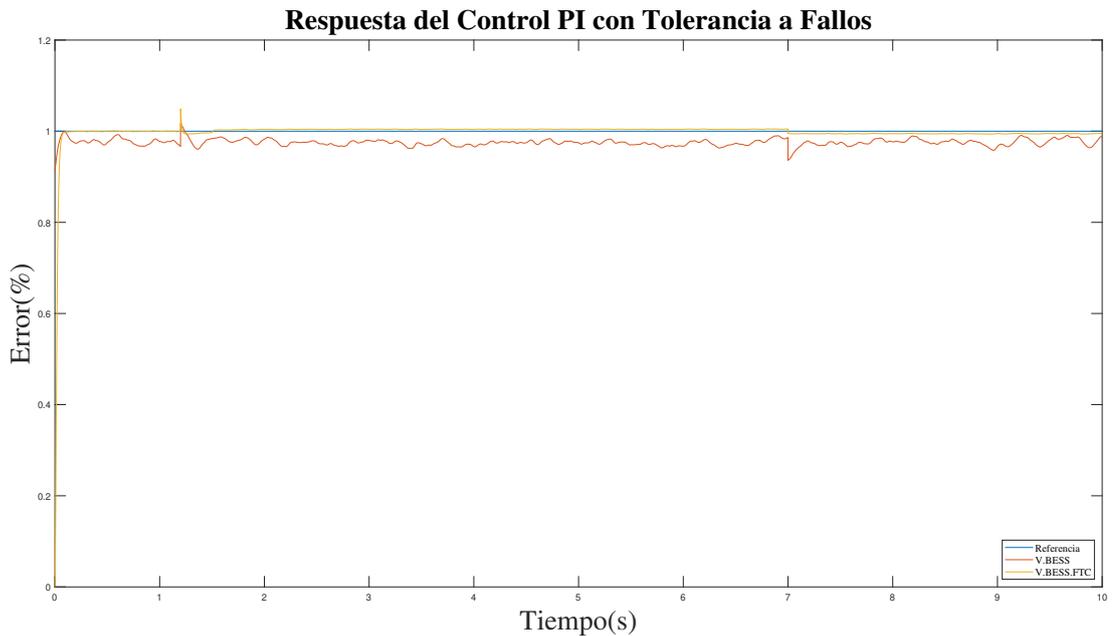


Figura 11: Salida de Voltaje BESS mediante Tolerancia a Fallos con un Control PI .

dando como respuesta la salida del sistema.

Una vez Desarrollado el esquema de la figura 11, se obtuvo la respuesta del sistema deseado después de los datos y respuestas adquiridas, en donde se evaluara las respuestas de voltaje a su salida del sistema

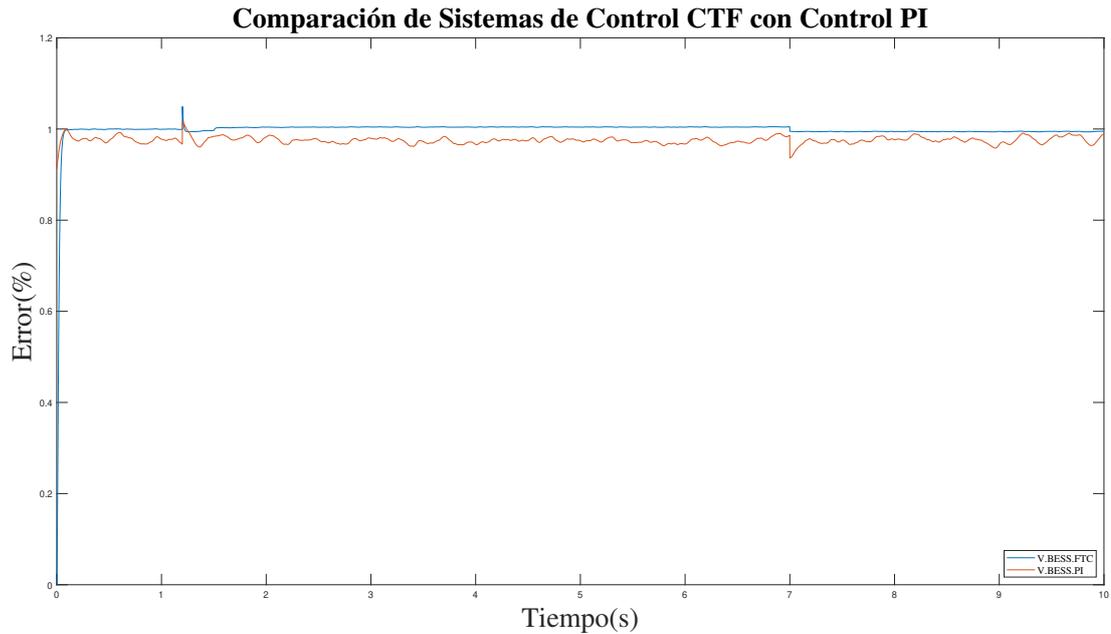


Figura 12: Voltaje BESS Control PI VS Voltaje Control FTC.

de forma gráfica.

A través de los resultados obtenidos se realizó un estudio comparativo sobre los controladores PI y Control por Tolerancia a Fallos donde en los dos sistemas se probaron con las mismas perturbaciones donde existió mejor rendimiento y respuesta es por FTC como se ve en la figura 12, de esta manera se sustenta una simulación digital a través de una ley de control de voltaje para un BESS acoplado electrónicamente a la MRH. En el ámbito de diseño se puede desarrollar un control por FTC Multi-Objetivo basado en algoritmos por IMC y H infinito. El desempeño probado se evidencia en cada figura y comportamiento desarrollado en este trabajo sobre las MRH, de esta manera se cumple los objetivos específicos a cumplir.

7 Conclusiones

Dentro del desarrollo en el ámbito de las micro-redes orientadas a la corriente alterna tiene la función de establecer un convertidor que permitirá garantizar el inversor multifuncional, mediante la interfaz del sistema de corriente continua con el sistema de corriente alterna para la inyección de potencia activa y reactiva solicitada para las funciones auxiliares para garantizar este inversor.

Las señales de prueba están orientados a las funciones de energía o de potencia límite, el objetivo centra en el desempeño de disminuir los inconvenientes presentados a nivel de la señal de error y se resuelve con el método H infinito e IMC mediante los algoritmos implementados.

En los Sistemas BESS, tanto para el voltaje y la frecuencia se logra descargar las baterías inyectando potencia activa al sistema cuando la red lo necesite.

En los Sistemas de Almacenamiento por Baterías (por sus siglas en inglés BESS), el uso de la electrónica de potencia adapta la energía en su forma DC a valores de AC adecuados, esto tanto para el voltaje y la frecuencia. De esta manera se logrará descargar las baterías inyectando potencia activa al sistema en los momentos en los que este lo necesite.

Este estudio a implementar las micro-redes en general usan combinaciones convencionales y sobretodo se centra en brindar eficiencia energética renovable con sistemas de almacenamiento óptimos para

desarrollar una respuesta a la demanda que tiene los suministros de energía.

IMC tiene el propósito de combinar el controlador óptimo del proceso nominal con un pasa bajo para filtrar y compensar el rendimiento del circuito cerrado, la aplicación del modelo de control IMC en la Micro-red demuestra los resultados que se deben obtener en la implementación del controlador.

Dentro de la estructura de control para un óptimo proceso es fundamental el emparejamiento entre las variables a controlar y las manipuladas, la estrategia de control a manejar debe constar de una buena estrategia tanto la estructura de control como un control adecuado para implementar y satisfacer las necesidades dentro de las micro redes orientadas a la corriente alterna. Uno de los controles que ha tenido éxito es la retroalimentación proporcional-integral (PI)

Cabe recalcar que a través de los resultados obtenidos un Control por Tolerancia a Fallos brinda estabilidad y eficiencia ante un Control PI dentro del ámbito para el manejo de perturbaciones sobre las Micro-Redes Inteligentes ante Corriente Alterna.

Mediante el análisis de perturbaciones medidas y no medidas hacia la carga del sistema, se pudo obtener un estudio enfocado a un Control Robusto que a la final nos demostró ser tan eficiente en el área de Diseño de Controladores para disminuir el efecto de sobre picos a nivel de Voltaje y Corriente.

Conforme se adquirió y mejoro cada respuesta de voltaje y Corriente, se observo que cada comportamiento y solución dada iba de la mano de un Correcto Diseño evocado por IMC, ya que su proceso matemático y algoritmo daba la fiabilidad de una correcta respuesta ante cualquier perturbación.

El efecto antiwinup, nos da una herramienta muy importante porque evita que la corriente sobrepase el límite máximo, lo cual contrae efectos negativos al control PI.

A través de los métodos y control Robusto implementados, no solo se tuvo una respuesta completa hacia las perturbaciones del sistema, por esa razón el sistema AntiWinUp no solo mejoro la señal de control sino suavizo el efecto y de esa manera mejoro el comportamiento para los actuadores del sistema.

Cada Proceso en adquirir y mejorar los controladores han sido enfocado a un análisis matemático e informática para evidenciar los resultados de manera eficaz y tener una mínima respuesta ante las respuestas de medición.

Todo controlador Robusto implementado como IMC y H infinito, pretende dar una solución eficaz ante las Tolerancia a Fallos y comprobar mediante un Control PI la eficiencia de los controladores implementados en cada control para una respuesta adecuada ante la salida de Voltaje.

Todo Control Implementado es esencial para mantener los correctos niveles de Voltaje Y corriente ante el modelo implementado.

8 Agradecimientos

Agradezco al Ingeniero Leony por compartir sus conocimientos en la rama de la ingeniería Eléctrica y a la vez por el apoyo a conocer un nuevo mundo que es la Ingeniería de Control y el Trabajo en conjunto para lograr los Objetivos Propuestos.

A mis Padres por el apoyo y Esfuerzo por cumplir una meta mas junto a Ellos.

En memoria de mis abuelos que están en el cielo acompañándome y dándome sus bendiciones cada día para ser un mejor Profesional

Referencias

- Microrredes basadas en electrónica de potencia : Características , operación y estabilidad. 20.
- Robust and optimal control. prentice-hall. 1996.
- Aplicaciones técnicas y económicas de sistemas bess en parques eólicos y fotovoltaicos en el sistema eléctrico chileno. 2019.
- C. A. F. B. Beykal, F. Boukouvala and E. N. Pistikopoulos. Optimal design of energy systems using constrained grey-box multi-objective optimization. *Conference*, 2018.
- Bao. Research on symmetrical fault tolerant control of independent microgrid based on adaptive virtual impedance. *Conference*, 2018.
- P. A. et al. Efficient energy management in smart micro-grids: Zero grid impact buildings. 2015.
- A. V. Fernandez. Modelado y control en el espacio de estados. *Tesis*, 2002.
- V. S. Huerta. Perturbaciones en la red eléctrica. *Conferencia*, 2006.
- A. C. JONATHAN IVANOV. “estudio del desempeño de controladores avanzados en el control de sistemas con saturación en el actuador. *TESIS*, 2017.
- J. G. Jurado. Diseño de sistemas de control multivariable por desacoplo con controladores pid. *Tesis*, 2012.
- L. L.Fernandez, E.Gomez and M.Labriet. Estudio sobre las microredes y su aplicacion a proyectos de electrificación de zonas rurales. 2014, 2014.
- Z. G. Li, Ping. Imc-based pid control of servo motors with extended state observer. *Conference*, 2018.
- J. Lorente de la Rubia. Estudio sobre el estado actual de las smart grids. 2011.
- A. J. I. L.Ortiz, R.Orizondo and J.L.Gabriel. “heliyon hybrid ac / dc microgrid test system simulation : grid-connected mode. 05, 2019.
- E. S. Mario Salgado, Rodrigo Musalem. Parametrización alternativa de youla. *conferencia*, 2005.
- A. Mesbah and R. D. Braatz. Design of multi-objective control systems with optimal failure tolerance. *conferencia*, 2013.
- M. Morari and E. Zafriou. Robust process control. 1989.
- A.-M. Z. R. V. K. K. A. . M. M. R. Naderipour, A. Optimal planning in a developing industrial microgrid with sensitive loads. *conferencia*, 2017.
- . K. S. Prompinit, K. Design of active power controller of a bess in ac microgrids. *Conference*, 2016.
- M. Rahnamay-Naeini and M. M. Hayat. “cascading failures in interdependent infrastructures: An interdependent markov-chain approach. 2016.
- H. A. S. Farhati, S. Bel and M. N. Abdelkrim. H infinity loop shaping control of time delay systems. *Conference*, 2011.
- S. S. S.Gholami and M. Aldeen. Sensor fault tolerant control of microgrid. *Conference*, 2016.
- G. K. C. TOLEDO. Mejoramiento de la fiabilidad en microredes mediante el control robusto de voltaje usando técnicas pasivas de tolerancia a fallos. 2018.
- L. O. M. L. B. G. J. W. S. A. A. Téllez. An arx-petri nets algorithm for active identification of an ac/dc microgrid simulation. *Conference*, 2019, 2019.

S. I. V. G. Mahesh and P. Sensarma. A fault tolerant controller for pv inverter in microgrid application. *Conference*, 2018.

. K. S. • Prompinit, K. Design of active power controller of a bess in ac microgrids. *conferencia*, 2015.

9 Biografía



Jean Carlos Buestan. Realizo sus estudios secundarios en la Unidad Educativa San Luis Gonzaga de la ciudad de Quito, Graduado en la Universidad Politécnica Salesiana de Ingeniero Electrónico con la especialidad en sistemas Industriales. Su trabajo se basa en el manejo de voltaje en la micro-red Eléctrica con un control IMC y H en CA con el manejo de la tolerancia a Fallos acoplados electrónicamente



Leony Ortiz Matos 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. Forma parte del equipo académico de la carrera de Ingeniería Eléctrica de Universidad Politécnica Salesiana Quito-Ecuador