

Tipo de artículo: Artículo original

# Control Tolerante a Fallos Multi-Objetivo para BESS acoplados a Micro-redes aisladas basado en IMC y $H^\infty$

## *Multi-Objective Fault Tolerant Control for BESS coupled to isolated Micro-grids based on IMC and $H^\infty$*

Jean Carlos Buestán Vera<sup>1\*</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-0541-0055>

Leony Ortiz Matos<sup>2</sup> , <https://orcid.org/0000-0002-7883-5513>

Alexander Aguila Telez<sup>2</sup> , <https://orcid.org/0000-0001-7749-5644>

<sup>1</sup> Electrónica y Automatización, Universidad Politécnica Salesiana. Correo electrónico. [jbuestanv@est.ups.edu.ec](mailto:jbuestanv@est.ups.edu.ec)

<sup>2</sup> Ingeniería Eléctrica, Grupo de Investigación en Redes Eléctricas Inteligentes, Universidad Politécnica Salesiana. [lortizm@ups.edu.ec](mailto:lortizm@ups.edu.ec)

\* Autor para correspondencia: [jbuestanv@est.ups.edu.ec](mailto:jbuestanv@est.ups.edu.ec)

### Resumen

La investigación propone una estrategia de tolerancia a Fallos 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 ( $H^\infty$ ), considerando que el control operara 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  $H^\infty$  para eliminar todo tipo señales no deseadas. 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 velicados y comprobados mediante simulación en Matlab/Simulink.

**Palabras clave:** Micro-red híbridas aislada; Sistemas de Almacenamiento por Baterías; Control Tolerante a Fallos; Control por Modelo Interno; Control H-infinito

### Abstract

*The research proposes a multi-objective fault tolerance strategy for Battery Energy Storage Systems (BESS) coupled to the Benchmark type Hybrid Microgrid (HMG) based on algorithms by IMC and H-infinity method ( $H^\infty$ ), 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 HMG, in addition, it will contribute to improve the reliability of the BESS and the isolated HMG 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 HMG test system is composed of: Photovoltaic (PV), Battery Energy Storage System (BESS), linear and nonlinear loads. By means of fault tolerance,*



Esta obra está bajo una licencia Creative Commons de tipo Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0)

*its development is focused on a control based on IMC and  $H_\infty$  algorithms to eliminate all kinds of parasitic signals. The overall behavior Will.*

**Keywords:** *Isolated Hybrid Microgrid; Battery Energy Storage Systems; Fault Tolerant Control; IMC Internal Model Control; H-infinity control*

**Recibido:** 08/01/2022

**Aceptado:** 30/04/2022

## 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 está 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, no solo es una integración de generación distribuida a la Red Principal (R.P), también proporciona alta habilidad 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 (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 lograría descargar las baterías inyectando potencia activa al sistema en los momentos en los que este lo necesite. Un control Robusto por  $H_\infty$  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  $H_\infty$  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 HMR 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 descrita por funciones de transferencia irracionales. Las entradas a menudo están restringidas en la práctica, pero está adaptada para proporcionar un control multi -



objetivo. Cuando se saturan las entradas se desarrollará un control de compensación anti-winup 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  $H_\infty$ , 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  $H_\infty$  para la MRH orientada a una señal de referencia.

Una red eléctrica al momento de sufrir fallas técnicas provoca malestar en la sociedad como pérdidas 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 sí misma ya que en este caso el manejo de corriente alterna varía 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).

El uso de inversores conectados a fuentes para generar corriente continua y sobre todo para el almacenamiento directo a la MR consigue operar en corriente alterna elementos de DC, manteniendo su funcionalidad cuando la red principal sufre un fallo, un ejemplo práctico se muestra en (Lorente de la Rubia, 2011). El BESS se enfoca en el punto donde se encuentran acoplados generadores distribuidos altamente dependiente de variables aleatorias y estocásticas (generación solar fotovoltaica y generación eólica) con el objetivo de realizar compensación, o en MRs aisladas (Prompinit, 2015 and Naderipour, 2017).

La presente investigación propone el análisis y diseño de una estrategia de control análisis que fundamenta sus acciones en evitar conflictos de señales parasitas y/o fallas a las salidas de nuestro sistema BESS, esto tanto a nivel de voltaje como corriente. Para ello, se propone una estrategia para el Control de voltaje Tolerante a Fallas (CTF) multi-objetivo en BESS acoplados a MRH aisladas basada en Control por Modelo Interno (IMC) y  $H_\infty$ . 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 eventos como: perturbaciones en la carga, perturbaciones no

medidas en la carga, perturbaciones de sensado, perturbaciones en la salida no sensada y ruidos en la medición. Finalmente, los resultados serán verificados y comprobados mediante simulación en Matlab/Simulink.

## Materiales y métodos

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  $H_\infty$  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  $H_\infty$  proporcionan un mejor rendimiento adaptando MHR tipo benchmark, que permite un control predictivo de modelo no lineal (Li,2018) (S. Farhati and Abdelkrim, 2011). La selección de una estructura de control se muestra optimo 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 optimo en controladores evitara la mayoría de las compensaciones inherentes a una estructura clásica de control por retroalimentación (B. Beykal and Pistikopoulos, 2018) (Bao, 2018).

Cada controlador propuesto está encargado de abordar un subconjunto del objetivo de control, de manera que se presente un degradación de rendimiento durante las fallas de sus componentes (V. G. Mahesh and Sensarma,2018) (S.Gholami and Aldeen, 2016). El propósito de implementar un control IMC y  $H_\infty$  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 la estabilidad a lazo cerrado, resultante de incertidumbres admisibles y perturbaciones en el controlador  $H_\infty$  para la MRH orientada a una señal de referencia.

## Métodos de control de sistemas BESS en cascada

Los Sistemas de Almacenamiento por Baterías (por sus siglas en ingles BESS), consta de sistemas electroquímicos reversibles que estan conformados por un contenedor de electrolito y dos polos de polaridad inversa, estos inmersos en electrolito, es así como estos sistemas brindan un gran soporte a la red (D.P,2019). Por esta razón una MR 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: control de Perfil del voltaje, control de



transmisión de potencia, sistema de estabilización dinámica. En el caso de los equipos BESS en la etapa de la electrónica de potencia para conectarse a la red principal, compone algunas fases: conversión DC/DC, conversión DC/AC (ORTIZ, Leony, 2020 and ORTIZ, Leony, et al. 2020)

## **Control Tolerante a Fallos Multi-Objetivo para BESS basado en IMC y $H^\infty$**

Para comprender la situación del modelo estudiado, se tiene considera una MR que supera el margen de error permitido y donde además intervienen señales parasitas que afecta el rendimiento del sistema de control y el BESS. En este sentido, se procederá a desarrollar mediante una simulación digital una ley de control primaria de voltaje de estructura enfocada en un sistema de parámetros distribuidos para un BESS acoplado electrónicamente a MRH aislada tipo benchmark. Uno de los pilares fundamentales para la propuesta es usar un método de identificación dinámica que permita obtener un modelo capaz de representen las dinámicas del BESS acoplado a al MR bajo control (ORTIZ, Leony, 2020).

El diseño de los controladores estará basado en métodos de control por IMC y  $H^\infty$ , que brindaran la fiabilidad y estabilidad del sistema de control en lazo cerrado buscando la tolerancia a fallos. Mediante una topología electrónica en Cascada para un sistema BESS, se realizaron pruebas ante diferentes casos de perturbaciones como bases para obtener el comportamiento dentro dinámico. Estos análisis fueron realizados para un control basado en una estrategia clásica (PI) de múltiples lazos (corriente, voltaje y potencia) del BESS, observado el principalmente el comportamiento del voltaje y la corriente principalmente para escenarios extremos como mínima o máxima demanda. Las perturbaciones y fallos considerados para el diseño y su posterior análisis son los 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 muestra en la Figura 1. Los datos adquiridos del esquema original sirvieron para tomar en cuante el comportamiento en la medición de las perturbaciones.

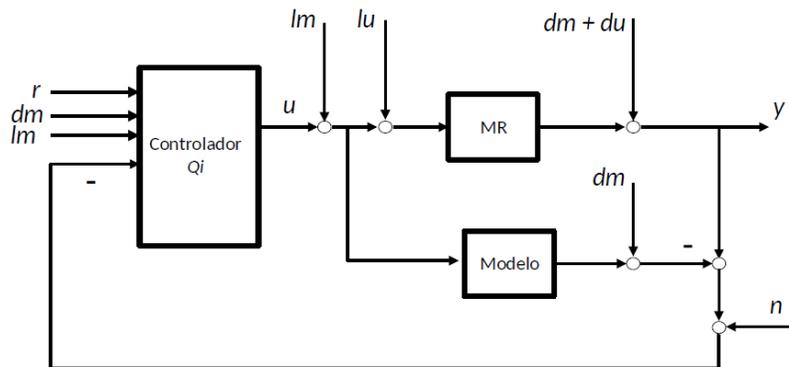
## **Procedimiento de diseño de controladores multi-objetivo**

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): el primero es considerado como la seguridad para establecer a nivel interno una garantía estable para el sistema de circuito cerrado, segundo, el seguimiento y rechazo constante a las perturbaciones, por último, 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 1.



**Figura 1.** Estructura de control general donde  $C_i = [C_r; C_{dm}; C_{lm}; C_y]$ .

Dentro del análisis del controlador  $C_i$  se puede entender como variables que pueden medirse directamente para garantizar la estabilidad interna de un sistema de a lazo cerrado. Para satisfacer los objetivos múltiples de control definidos de forma independiente, se propone el diseño  $C_i$  en conjunto con un esquema IMC. La dinámica de un sistema (MIMO) que es invariante en el tiempo (LTI) con dimensión infinita  $P$  puede ser descrito por un sistema matemático abstracto que se lo conoce como espacio de estado (Jurado, 2012 and Fernández, 2002). En este sentido 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:

$$\begin{bmatrix} y \\ u \end{bmatrix} = H(P, C_i) \begin{bmatrix} r \\ l_m \\ l_u \\ d_m \\ d_u \\ n \end{bmatrix} \tag{1}$$

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

$$\begin{bmatrix} PCr(I + PCy)^{-1} & PCl_m(I + PCy)^{-1} + (I + PCy)^{-1}P \\ Cr(I + PCy)^{-1} & Cl_m(I + PCy)^{-1} - Cy(I + PCy)^{-1}P \\ (I + PCy)^{-1}P & PCd_m(I + PCy)^{-1} + (I + PCy)^{-1} \\ -Cy(I + PCy)^{-1}P & Cdm(I + PCy)^{-1} - Cy(I + PCy)^{-1} \\ & (I + PCy)^{-1} & -PCy(I + PCy)^{-1} \\ & (I + PCy)^{-1} & (I + PCy)^{-1} \end{bmatrix} \tag{2}$$

Un enfoque base dentro de un control óptimo es formular una medida de desempeño en términos de una norma ponderada  $H_2$  o  $H_\infty$  sobre  $H(P, C_i)$  (K.Z, 1996). Varias de las funciones de transferencia en bucle cerrado en la ecuación (2) relacionan las entradas del sistema con la salida ( $y$ ) y manipulan las 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 IMC (figura 1) para la formulación del diseño de control donde  $Q_i$  es el controlador IMC (Morari and Zafiriou, 1989). Los controladores estabilizadores LTI están parametrizados por:

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

Donde  $Q_y$  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  $R^*H_\infty$ , 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,  $H(P, C_i)$  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  $C_y$  (es decir 4) se deduce que  $C_r$ ,  $C_{lm}$ , y  $C_{dm}$  en 8 abarcan el conjunto de todos los controladores de retroalimentación estabilizadores para cualquier  $Q_r$ ,  $Q_{lm}$  y  $Q_{dm}$  estable, esto implica que 5 es internamente estable. La inserción de 8 en 5 simplifica la matriz de transferencia  $H(P; C_i)$  a

$$\begin{bmatrix} PQ_r & P(I + Q_{lm}) & (I - PQ_y)P & I + PQ_{dm} \\ & Q_r & Q_{lm} & -Q_yP & Q_{dm} \\ & & I - PQ_y & -PQ_y & \\ & & -Q_y & -Q_y & \end{bmatrix} \quad (8)$$

La estructura de control de la Figura 1 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 1 puede ser utilizada para la implementación de IMC sustituyendo el  $P$  inferior de la Figura 1 por un modelo de proceso  $P$  (Mesbah and Braatz, 2013).

Algoritmo de diseño de  $Q_{dm}$  para el Control Multi-Objetivo por  $H_\infty$ .

Paso 1	Entrada:Espacio Estado $P=ss(A,B,C,D)$ $T_{spower} = 5e - 6; T_{scontrol} = T_{spower} * 10$
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 $[C_{inf}, \gamma] = ncfsyn(Pw);$ $C_{inf} = -C_{inf};$ $perf_{margin} = 1/\gamma$ $C1 = W_i * C_{inf} * W_o; L = P * C1;$
Paso 6	Pre Filtro $Q_{hat} = (T(1,:) * Q_0) R_{ideal}(1, :);$ $Q_{hat} = minreal(Q_{hat}, [], false);$ $Q = Q_0 * Q_{hat}$
Paso 7	Control General $Controller = 100 * [C1 Q]$ $Controller = minreal(Controller, [], false);$
Paso 8	Retorna

## Procedimiento de diseño de controladores por IMC

Para desarrollar un algoritmo adecuado por IMC es importante obtener primeramente un modelo del sistema. Para el diseño del controlador por IMC se adquirió una función transferencia del BESS mediante el uso de un método de

identificación dinámica linealizando alrededor del punto de operación, tanto para el voltaje como para la corriente. A continuación, se manejará 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 en base a la matemática del IMC.

Dentro de la estructura de control general para un sistema LTI-Qi (Figura 1) se encuentran los controladores  $Q_r$ ,  $Q_{lm}$ ,  $Q_{dm}$  y  $Q_y$  que serán rediseñados en base a un control robusto usando un Filtro Pasa Bajo para trabajar con el concepto matemático en función del orden de la función de transferencia  $P(s)$ . Cabe recalcar que  $Q_r$ ,  $Q_{lm}$  y  $Q_{dm}$  tienen una velocidad de respuesta inmediata que tendrá un efecto directo a la salida ( $y$ ).  $Q_y$  prioriza el control de Múltiples Objetivos que elimina los efectos de perturbaciones y ruido de medicino. Mediante la relación perturbación-Salida se tiene:

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

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

Donde:

$C(s)$  es la función de transferencia de Controlador;

$Y(s)$  es la salida del Sistema;

$d(s)$  es el ruido no deseado,

$r(s)$  es la referencia o el valor deseado;

$G(s)$  es la función de transferencia de la planta;

$G1(s)$  es la copia del modelo de la planta.

Aplicado un estudio por álgebra de bloques del diseño estándar de un IMC, se tiene la relación referencia-salida expresada en la ecuación 10 y la relación perturbación-salida de la ecuación 11:

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

Si el modelo es perfecto eventualmente se tiene que la planta es igual al modelo, y por consiguiente a lazo cerrado tendríamos lo siguiente:

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



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

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

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

Para el diseño del controlador se implementará un filtro de primer que eliminará todo ruido de medición al momento de trabajar en la Tolerancia a Fallos, donde la ecuación final queda expresada según la ecuación 15 y con los parámetros de (lambda) y (n) elegidos de manera de garantizar que el controlador C(s) sea el adecuado.

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

Algoritmo de diseño para el IMC.

Paso 1	Entrada: (ys,u,t ∈ R)x = λ; K = 1
Paso 2	Salida: (Q(s) ∈ s)
Paso 3	Inicialización: [num den]: num=[k=1]; den=[lambda+1] <sup>2</sup> : Filtro
Paso 4	G1=tf(num,den), Ecuación Filtro 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

## Resultados y discusión

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de los métodos descritos en la sección anterior. La estrategia de Control de Voltaje Tolerante a Fallas Multi-objetivo para Sistemas BESSs acoplado en AC a MRHs desarrollada anteriormente basada en algoritmos por IMC y H∞, considera dos puntos de operaciones principales para su análisis (máxima demanda y mínima demanda). El método propuesto busca contribuir a mejorar la confiabilidad del BESS acoplados a MRH aislada ante eventos como: perturbaciones en la carga, perturbaciones no medidas en la carga, perturbaciones de sensado, perturbaciones en la salida no sensada y ruidos en la medición. En la tabla 1 se muestran los tiempos de concurrencia de las diferentes perturbaciones. La MRH de prueba está compuesta de: paneles fotovoltaicos (PV), sistema de almacenamiento de energía por baterías (BESS), cargas lineales y no lineales. El igual que el sistema Benchmark descrito anteriormente, el esquema de control es modelado y verificado mediante simulación en Matlab / Simulink (ORTIZ, L., et al 2020).

**Tabla 1.** Tiempo de ocurrencia de perturbaciones y fallas consideradas.

<b>Perturbación</b>	<b>Tiempo de ocurrencia (s)</b>
Perturbación en la medición de salida	0.465
Perturbación de la salida no medida	1.5
Perturbación no medida en la carga	0.65
Perturbación en la carga	0.45

Mediante la aplicación de métodos de identificación dinámica se obtienen las funciones de transferencia y los modelos en espacio de estado necesarios para el diseño adecuado de del Control Tolerante a Fallos basado en métodos por IMC y  $H_\infty$ . El controlador  $Q_r$  está diseñado con  $\lambda = 0.01$  para  $n = 2$ , el diseño le permite tener una respuesta de compensación bastante rápida (0.3 s) y en gran medida permite eliminar el ruido. Para el caso de  $Q_y$ , que tiene la misma respuesta que  $Q_r$  también se tiene en cuenta estos mismos valores. Para  $Q_r$ , mediante la metodología por IMC se obtuvo la función de transferencia:

$$Q_r = \frac{s^2 + 109,2s + 291,6}{6,322e - 4s^3 + 0,127997s^2 + 6,6334s + 15,57} \tag{16}$$

Ecuación  $Q_y$  mediante el algoritmo propuesto:

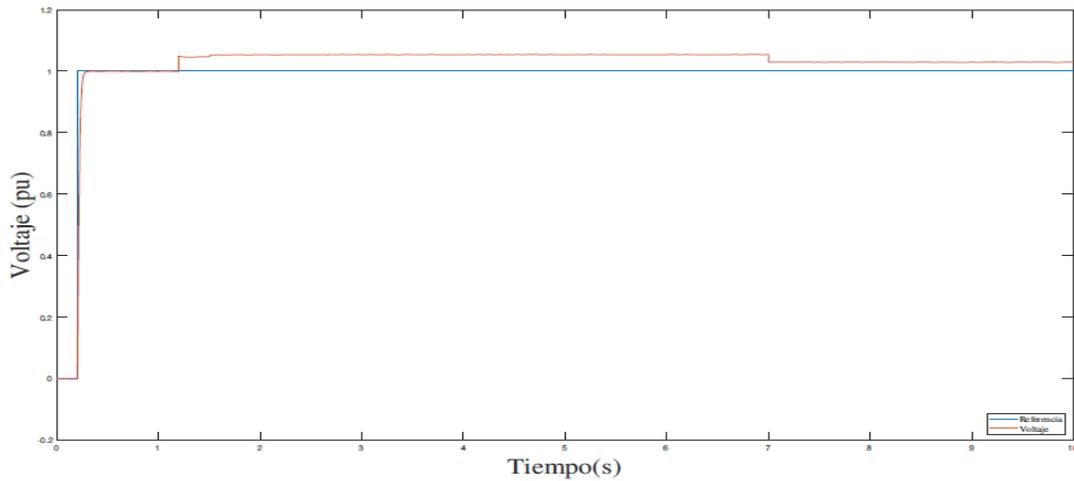
$$Q_y = \frac{1,5s + 1}{0,000225s^3 + 0,0455s^2 + 2,3s + 5} \tag{17}$$

$$Q_{lm} = -1 \tag{18}$$

En el diseño del controlador  $Q_{dm}$ , se realizó mediante un control óptimo multi-objetivo por  $H_\infty$ , en el espacio de estado obtenido para el problema del BESS, de esta manera se obtuvieron los datos necesarios para su diseño considerando la respuesta para eliminar el Ruido no deseado.

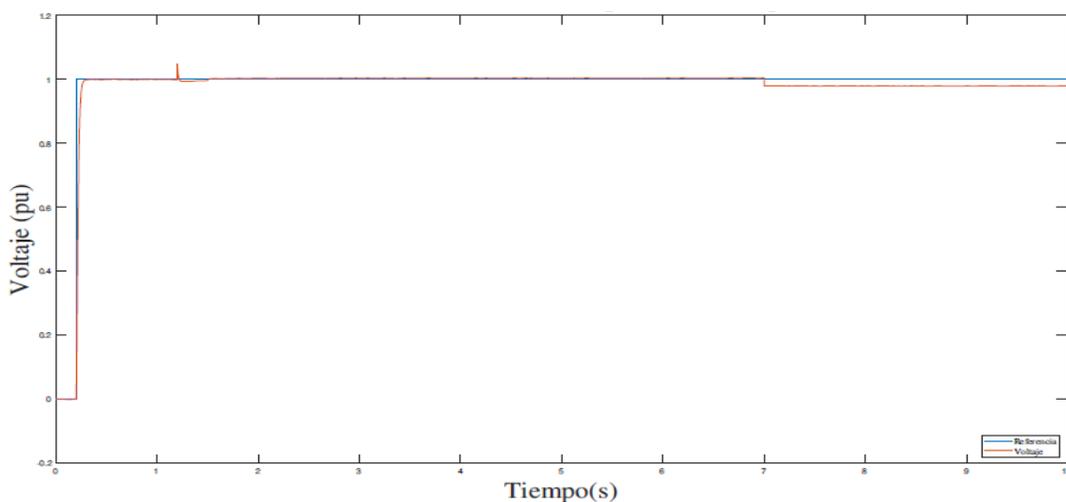
$$Q_{dm} = \frac{1,0255s + 2,025 + 0,05}{1,5s^2 + 1,015s^2 + 0,01} \tag{19}$$

Aplicando la sintonía obtenida anteriormente, y sometiendo al sistema ante las fallas y perturbaciones que se muestran en la Tabla 1 se obtuvo la siguiente respuesta representada en la figura 2.



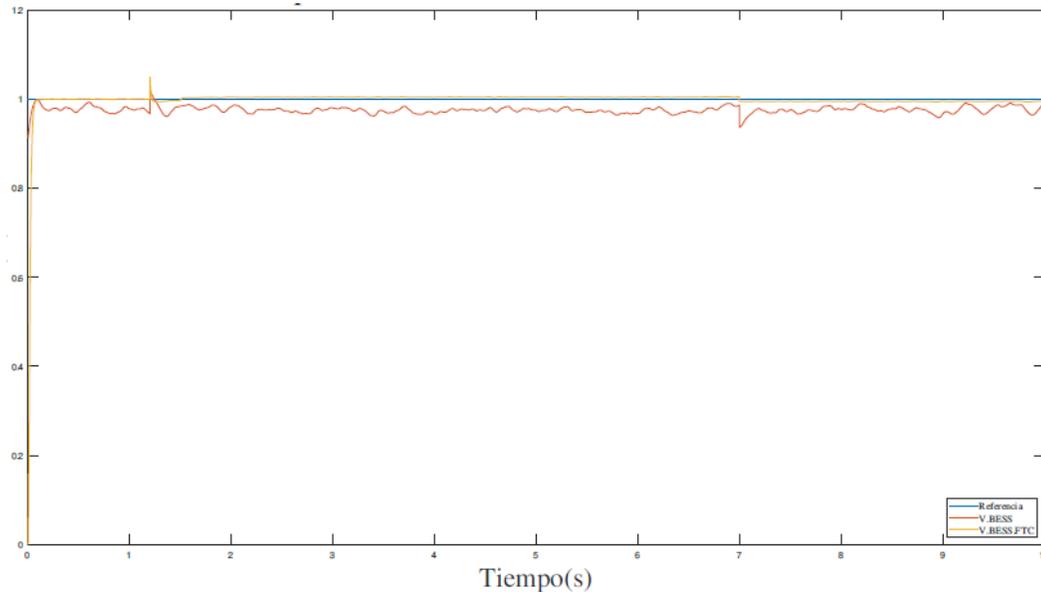
**Figura 2.** Respuesta FTC ante fallos y perturbaciones.

Como se puede apreciar en la figura anterior se pudo lograr tener una respuesta adecuada para el sistema de control ante las perturbaciones y fallos. Se puede evidenciar la respuesta dinámica del comportamiento del esquema de tolerancia a fallo y la eliminación del ruido de medición, sin embargo, a pesar de tener una respuesta favorable, esta puede ser mejorada. Para lograr mejorar la respuesta dinámica, se implementa una saturación conjunto con esquema Anti-Windup (JONATHAN IVANOV, 2017, Braatz, 2013 and JONATHAN IVANOV, 2017) sobre el controlador Qdm buscando mejorar su desempeño dinámico ante la retroalimentación de los actuadores. Como se puede apreciar en la Figura 3, la propuesta anterior logra obtener una mejor respuesta eliminando la perturbación.



**Figura 3.** Respuesta FTC & Anti-Windup ante fallos y perturbaciones.





**Figura 4.** Voltaje de salida de BESS: Esquema de Tolerancia a Fallos y control en cascada PI.

A través de los resultados obtenidos (Figura 4) se realizó un estudio comparativo entre un método de control clásico PI y el Control Tolerante a Fallos propuesto en este trabajo ante las mismas condiciones de operación. Como se observa en la Figura 4 el mejor rendimiento y respuesta corresponde a la estrategia FTC. En el ámbito de diseño se pudo lograr una propuesta de un FTC Multi-Objetivo basado en algoritmos por IMC y  $H_{\infty}$  capaz de mantener el desempeño del sistema BESS acoplado electrónicamente a una MRH en AC ante diversos eventos de fallos y/o perturbaciones.

## Conclusiones

En el ámbito del desarrollo de las Micro-redes aisladas orientadas a la corriente alterna se presenta un esquema de Control Tolerante a Fallos para un inversor de un sistema BESS reducir los inconvenientes presentados ante diversos eventos de fallos y/o perturbaciones. El esquema IMC tiene el propósito de combinar el controlador óptimo del proceso nominal con un pasa bajo para filtrar y compensar el rendimiento a lazo cerrado. EL uso del esquema de control IMC en la Estrategia de Tolerancia a Fallos demuestra resultados excelentes ante el rechazo a fallos y perturbaciones.

Para la estructura de control óptimo es fundamental el considerar emparejamiento entre las variables a controlar y las manipuladas. Cabe recalcar que a través de los resultados obtenidos un Control Tolerancia a Fallos brinda la estabilidad y eficacia en conjunto con el uso de técnicas robustas como complementos a este tipo de estrategia.

Conforme se adquirió y mejoró cada respuesta de voltaje, se observó que cada comportamiento y solución dada iba de la mano de una correcta metodología de diseño. Comenzando desde la obtención de modelos capaces de representar las dinámicas en estudio hasta el estudio y análisis de las estrategias de control en base a los objetivos y restricciones de control. Adicionalmente el complemento con otras acciones como el Anti-winup, brindan herramientas complementarias importante a tener presente para mejorar el comportamiento de los controladores. A través de los métodos y el control robusto multi-objetivo implementados, no solo se tuvo una respuesta satisfactoria ante las perturbaciones del sistema, sino que además se mejoró en gran medida la acción de control suavizando el efecto de las fallas sobre el comportamiento de los actuadores o inversor del sistema BESS.

### **Conflictos de intereses**

No se declaran conflictos de intereses.

### **Contribución de los autores**

1. Conceptualización: Jean Carlos Buestán Vera y Leony Ortiz.
2. Curación de datos: Jean Carlos Buestán Vera y Leony Ortiz
3. Análisis formal: Jean Carlos Buestán Vera y Leony Ortiz
4. Adquisición de fondos: Jean Carlos Buestán Vera y Leony Ortiz
5. Investigación: Jean Carlos Buestán Vera y Leony Ortiz
6. Metodología: Jean Carlos Buestán Vera y Leony Ortiz
7. Administración del proyecto: Jean Carlos Buestán Vera y Leony Ortiz
8. Recursos: Jean Carlos Buestán Vera y Leony Ortiz
9. Software: Jean Carlos Buestán Vera y Leony Ortiz
10. Supervisión: Leony Ortiz
11. Validación: Jean Carlos Buestán Vera y Leony Ortiz
12. Visualización: Jean Carlos Buestán Vera y Leony Ortiz
13. Redacción – borrador original: Jean Carlos Buestán
14. Redacción – revisión y edición: Jean Carlos Buestán Vera y Leony Ortiz



## Financiamiento

La investigación no requirió de fuentes de financiamiento externo.

## Referencias

- MEDINA, Ricardo David. Microrredes basadas en electrónica de potencia: características, operación y estabilidad. *Ingenius*, 2014, no 12, p. 15-23.
- PARADA PINO, Daniel Esteban. Aplicaciones técnicas y económicas de sistemas BESS en parques eólicos y fotovoltaicos en el sistema eléctrico chileno. 2018.
- BEYKAL, Burcu, et al. Optimal design of energy systems using constrained grey-box multi-objective optimization. *Computers & chemical engineering*, 2018, vol. 116, p. 488-502.
- BAO, Huayao, et al. Research on symmetrical fault tolerant control of independent microgrid based on adaptive virtual impedance. En 2018 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC). IEEE, 2018. p. 1-5.
- ARBOLEYA, Pablo, et al. Efficient energy management in smart micro-grids: ZERO grid impact buildings. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2015, vol. 6, no 2, p. 1055-1063.
- HUERTA, Víctor Sánchez. Perturbaciones en la red eléctrica. Artículo Técnico del Dpto. de Ingeniería, Universidad de Quintana Roo, 2006, vol. 1.
- JAÉN SOLORZANO, Jonathan Ivanov, et al. Estudio del desempeño de controladores avanzados en el control de sistemas con saturación en el actuador. 2019. Tesis de Maestría. Espol.
- GARRIDO, J.; VÁZQUEZ, F.; MORILLA, F. Diseño de sistemas de control multivariable por desacoplo con controladores PID. En X Simposio CEA de Ingeniería de Control. 2012. p. 64-71.
- DE ALAMINOS, J., et al. Estudio sobre las microrredes y su aplicación a proyectos de electrificación de zonas rurales. *Energía sin fronteras*, 2014.
- LI, Ping; ZHU, Guoli. IMC-based PID control of servo motors with extended state observer. *Mechatronics*, 2019, vol. 62, p. 102252.
- ORTIZ, Leony, et al. Hybrid AC/DC microgrid test system simulation: grid-connected mode. *Heliyon*, 2019, vol. 5, no 12, p. e02862.
- SALGADO, Mario; MUSALEM, Rodrigo; SILVA, Eduardo. Parametrización alternativa de Youla. *Revista Facultad de Ingeniería-Universidad de Tarapacá*, 2005, vol. 13, no 2, p. 71-83.



- MESBAH, Ali; BRAATZ, Richard D. Design of multi-objective control systems with optimal failure tolerance. En 2013 European Control Conference (ECC). IEEE, 2013. p. 2963-2968.
- MORARI, Manfred; ZAFIRIOU, Evangelos. Robust process control. Morari, 1989.
- NADERI, M., et al. Optimal planning in a developing industrial microgrid with sensitive loads. Energy Reports, 2017, vol. 3, p. 124-134.
- PROMPINIT, Krisada; KHOMFOI, Surin. Design of active power controller of a BESS in AC microgrids. En 2015 12th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON). IEEE, 2015. p. 1-6.
- RAHNAMAY-NAEINI, Mahshid; HAYAT, Majeed M. Cascading failures in interdependent infrastructures: An interdependent Markov-chain approach. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, vol. 7, no 4, p. 1997-2006.
- ORTIZ, Leony, et al. A review on control and fault-tolerant control systems of AC/DC microgrids. Heliyon, 2020, vol. 6, no 8, p. e04799.
- ORTIZ, Leony, et al. A novel strategy for dynamic identification in AC/DC microgrids based on ARX and Petri Nets. Heliyon, 2020, vol. 6, no 3, p. e03559.
- H. A. S. Farhati, S. Bel and M. N. Abdelkrim. H infinity loop shaping control of time delay systems. Conference, 2011.
- GHOLAMI, Sasan; SAHA, Sajeeb; ALDEEN, Mohammad. Sensor fault tolerant control of microgrid. En 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM). IEEE, 2016. p. 1-5.
- CHINCHUÑA TOLEDO, Grace Katerine. Mejoramiento de la fiabilidad en microredes mediante el control robusto de voltaje usando técnicas pasivas de tolerancia a fallos. 2018. Tesis de Licenciatura. Universidad Politécnica Salesiana. Carrera de Ingeniería Eléctrica. Sede Quito.
- MATOS, Leony O., et al. An ARX-petri nets algorithm for active identification of an AC/DC microgrid simulation. En 2019 IEEE 4th Colombian Conference on Automatic Control (CCAC). IEEE, 2019. p. 1-6.
- GAUTAM, Vasav; ILLINDALA, Mahesh S.; SENSARMA, Parthasarathi. A fault tolerant controller for PV inverter in microgrid application. En 2018 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES). IEEE, 2018. p. 1-6.
- PROMPINIT, Krisada; KHOMFOI, Surin. Design of active power controller of a BESS in AC microgrids. En 2015 12th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON). IEEE, 2015. p. 1-6.

