



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

DETECCIÓN DE FALLAS EN FILTROS PASIVOS
PARA MITIGAR LA DISTORSIÓN ARMÓNICA

TESIS

Que para obtener el título de:

**Maestro en Ciencias en Ingeniería
Eléctrica**

Presenta:

Juan Osorio Rodríguez

Directos de Tesis:

Dr. Juan Anzures Marín

Co-Director de Tesis:

Ph.D. Efraín Alcorta García



Morelia, Michoacán

November, 2025

Resumen

En esta tesis se aborda el problema de la detección de fallas en filtros pasivos para la mitigación de la distorsión armónica en sistemas de potencia. La presencia de armónicos, originados principalmente por cargas no lineales, deteriora la calidad de la energía, provoca sobrecalentamiento de equipos y incrementa pérdidas. Los filtros pasivos sintonizados se emplean de manera amplia para reducir la distorsión armónica, pero su desempeño depende fuertemente del estado de salud de sus componentes; fallas incipientes en capacitores, inductores o resistencias de amortiguamiento pueden pasar desapercibidas hasta que el filtro deja de cumplir su función.

El objetivo principal de este trabajo es desarrollar y evaluar una metodología de diagnóstico de fallas en filtros pasivos basada en un observador en modo deslizante, capaz de generar residuos sensibles a cambios en los parámetros del filtro y robustos frente a perturbaciones y a errores moderados de modelado. Para ello, se propone primero un modelo matemático en el dominio del tiempo de un filtro pasivo sintonizado, el cual se valida mediante la comparación de sus respuestas con simulaciones realizadas en PSCAD, tanto en régimen permanente como bajo distintas condiciones de carga. .

Los resultados numéricos muestran que el modelo reproduce adecuadamente el comportamiento del filtro y los niveles de distorsión armónica total (THD) en los nodos de interés. Asimismo, los residuos generados por el observador presentan variaciones claras ante fallas como pérdida parcial de capacitancia, incremento en la resistencia de pérdidas o desajustes en la inductancia, manteniendo simultáneamente una baja sensibilidad a variaciones moderadas en las condiciones de operación. Esto permite detectar de forma temprana el deterioro del filtro antes de que se pierda su capacidad de cumplir con los límites de distorsión especificados, abriendo la posibilidad de implementar esquemas de supervisión y mantenimiento predictivo en sistemas donde la calidad de la energía es crítica.

***Palabras Clave:* Filtrado Armónico, Rades Eléctricas, Calidad de la Energía, Diagnóstico de fallas, Observadores Luenberger, Observadores con Modos deslizantes.**

Abstract

This thesis addresses the problem of fault detection in passive filters for harmonic distortion mitigation in power systems. The presence of harmonics, mainly caused by nonlinear loads, deteriorates power quality, leads to equipment overheating and increases losses. Single-tuned passive filters are widely used to reduce harmonic distortion, but their performance strongly depends on the health of their components; incipient faults in capacitors, inductors, or damping resistors may go unnoticed until the filter no longer fulfills its function.

The main objective of this work is to develop and evaluate a fault diagnosis methodology for passive filters based on a sliding mode observer, capable of generating residuals that are sensitive to changes in the filter parameters and robust to disturbances and moderate modeling errors. To this end, a time-domain mathematical model of a single-tuned passive filter is first proposed and validated by comparing its responses with simulations carried out in PSCAD, both in steady state and under different load conditions. Subsequently, based on this model, the sliding mode observer is designed and residuals are defined to distinguish between normal operation and different types of parametric faults.

Numerical results show that the model adequately reproduces the behavior of the filter and the levels of total harmonic distortion (THD) at the nodes of interest. Likewise, the residuals generated by the observer exhibit clear variations in the presence of faults such as partial loss of capacitance, increased loss resistance, or inductance mismatches, while maintaining low sensitivity to moderate variations in operating conditions. This enables early detection of filter degradation before its ability to meet the specified distortion limits is lost, making it possible to implement monitoring and predictive maintenance schemes in systems where power quality is critical.

Contenido

Dedicatoria	III
Resumen	V
Abstract	VII
Contenido	IX
Lista de Figuras	XIII
Lista de Tablas	XV
Lista de Símbolos	XVII
1. Introducción	1
1.1. Planteamiento del Problema	1
1.2. Estado del Arte	3
1.2.1. Detección de fallas utilizando observadores basados en modos desli- zantes	3
1.3. Hipótesis	6
1.4. Objetivos de la Tesis	6
1.4.1. Objetivo general	6
1.4.2. Objetivos particulares	6
1.5. Contribuciones	6
1.6. Descripción de Capítulos	7
2. Preliminares de filtrado armónico	9
2.1. Introducción	9
2.2. Armónicos	10
2.3. Análisis de armónicos	11
2.4. Distorsión armónica total (THD)	13
2.5. Resonancia	13
2.6. Filtros de potencia para mitigar armónicos	14
2.6.1. Filtros pasivos en serie	15
2.6.2. Filtros pasivos en paralelo	16
2.7. Diseño de filtros pasivos sintonizados	17
2.7.1. Filtros pasivos en paralelo	18
2.7.2. Diseño de filtros pasivos sintonizados	19
2.8. Conclusión	22

3. Detección de fallas	25
3.1. Introducción	25
3.1.1. Clases de fallas y fases del diagnóstico de fallas	25
3.2. Detección de fallas basado en el modelo	28
3.2.1. Modelado de sistemas en espacio de estado incluyendo fallas	30
3.2.2. Generación de residuo basado en observadores de estados	31
3.2.3. Desigualdades lineales matriciales	31
3.3. Conclusión	32
4. Diseño de esquema de detección de fallas en filtros armónicos	33
4.1. Introducción	33
4.2. Modelo matemático	33
4.2.1. Esquema de detección de fallas	40
4.2.2. Conclusiones	42
5. Resultados de la implementación del esquema de detección de fallas	43
5.1. Validación del Modelo Matemático del Filtro Pasivo	44
5.1.1. Simulación del Modelo en MATLAB/SIMULINK-PSCAD	44
5.2. Análisis ante Variaciones en los Parámetros Nominales	48
5.2.1. Caso 1- Condiciones nominales	48
5.2.2. Caso 2 - Variación en el valor del capacitor del filtro	49
5.2.3. Adición de una segunda fuente armónica	50
5.3. Implementación del Observador de Luenberger	51
5.3.1. Caso 1 - condiciones iniciales distintas a 0	52
5.3.2. Caso 2 — Falla en el capacitor (C_f)	54
5.3.3. Caso 3 — Falla en el inductor (L_f) con condiciones iniciales distintas a cero	55
5.4. Implementación del Observador de Luenberger con Modos Deslizantes	57
5.4.1. Caso 1 - Condiciones iniciales distintas a 0	57
5.4.2. Caso 2 - Falla en el capacitor (C_f)	58
5.4.3. Caso 3 - Falla en el inductor (L_f) con condiciones iniciales distintas a cero	58
5.5. Comparativa entre Observadores de Luenberger y Luenberger con modos deslizantes	61
5.6. Análisis de residuos para aislamiento de fallas	63
5.6.1. Caso 1: Disminución de 3 % en C_f	63
5.6.2. Caso 2: Disminución de 7 % en C_f	64
5.6.3. Caso 3: Disminución de 5 % en L_f	65
5.6.4. Caso 4: Disminución de 1 % en L_f	65
5.7. Conclusiones	66
6. Conclusiones	67
6.1. Síntesis de hallazgos	67
6.2. Aportaciones de la tesis	68
6.3. Limitaciones	69

6.4. Líneas de trabajo futuro	69
6.5. Conclusiones generales	70
Referencias	73

Lista de Figuras

2.1. Voltaje y corriente tomados por una carga lineal	10
2.2. Voltaje y corriente tomados por una carga no lineal	11
2.3. Tipos de filtros pasivos	16
2.4. Filtro Pasivo en Paralelo	19
3.1. Tipos de metodologías para la detección de fallas	28
4.1. Caso de estudio	34
4.2. Diagrama de bloques, que representa la simulación del filtro pasivo en falla y el observador.	41
5.1. Caso 1: Voltaje de la fuente en Simulink	45
5.2. Caso 1: Voltaje de la fuente en PSCAD	46
5.3. Caso 1: Corriente en el filtro en Simulink	46
5.4. Caso 1: Corriente en el filtro en PSCAD	47
5.5. Caso 1: Corriente de salida en Simulink	47
5.6. Caso 1: Corriente de salida en PSCAD	47
5.7. Porcentaje de distorsión armónica Caso 1	49
5.8. Porcentaje de distorsión armónica Caso 2	50
5.9. Porcentaje de distorsión armónica Caso 3	51
5.10. Caso 1 — Comparación sistema real vs observador (estado $x_3(t)$).	53
5.11. Caso 1 — Error de estimación $e(t) = y(t) - \hat{y}(t)$ para $x_3(t)$	53
5.12. Caso 2 — Comparación sistema real vs observador bajo variación de C_f . . .	54
5.13. Caso 2 — Error de estimación ante variación de C_f	54
5.14. Caso 3 — Comparación sistema real vs observador con variación de L_f y condiciones iniciales no nulas.	55
5.15. Caso 3 — Error de estimación global.	56
5.16. Caso 3 — Error de estimación (ampliación alrededor de $t=15$ s).	56
5.17. Caso 1 - Salida VS OLMD	57
5.18. Caso 1 Error de estado $x_3(t)$	58
5.19. Caso 2 - Salida VS OLMD	59
5.20. Caso 2 - Error de estado $x_3(t)$	59
5.21. Caso 3 - Salida vs OLMD	60
5.22. Caso 3 - Error de estado $x_3(t)$	60

5.23. Caso 3 - Error - acercamiento	61
5.24. Caso 1 - Falla de 3 % sobre capacitor	64
5.25. Caso 2 - Falla de 7 % sobre capacitor	64
5.26. Caso 3 - Falla de 5 % sobre inductor	65
5.27. Caso 4 - Falla de 1 % sobre inductor	66

Lista de Tablas

5.1. Parámetros de simulación para los tres casos de estudio del observador de Luenberger.	52
5.2. Comparación de desempeño entre Luenberger y OLMD por caso.	62

Lista de Símbolos

$x(t)$	Vector de estados del sistema
$\dot{x}(t)$	Dinámica de los estados del sistema.
$\mathbb{R}^n$	Espacio vectorial de dimensión n .
$\mathbb{R}^q$	Espacio vectorial de dimensión q .
$\mathbb{R}^m$	Espacio vectorial de dimensión m .
$e(t)$	Error de seguimiento.
A	Matriz de estado de un sistema LTI
B	Matriz de entradas de un sistema LTI
C	Matriz de salidas de un sistema LTI
LTI	Sistema Lineal Invariante en el Tiempo
THD	Distorsión armónica total
$SMLD$	Sliding Mode Luenberger Observer
$OLMD$	Observador de Luenberger con modos deslizantes
$PSCAD$	Power Systems Computer Aided Design
V_k	Amplitud del componente armónico de orden k en la señal de voltaje
I_k	Amplitud del componente armónico de orden k en la señal de corriente.
V_{rms}	Valor eficaz (<i>root mean square</i>) del voltaje en el sistema.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Planteamiento del Problema

La energía eléctrica en la actualidad se ha vuelto una necesidad para todos los sectores de la población, desde la producción industrial hasta los aparatos electrónicos utilizados en una vivienda común. Por lo tanto, es necesario que no solamente se cuente con ésta en las cantidades necesarias para su uso efectivo, sino que también se necesita realizar una evaluación a los estándares de calidad que ésta contiene. Las variables que se consideran para poder obtener una buena calidad de la energía son: la amplitud, la frecuencia, la forma de la señal, el balance de las fases y la continuidad. Se pueden presentar varios fenómenos que afectan a la calidad de la energía, como son: swells de voltaje (aumento de voltaje momentáneo), sags de voltaje (caída de voltaje momentáneo), sobrevoltaje de alta duración, bajo voltaje de alta duración, interrupciones, transitorios, desbalance de voltaje, fluctuaciones de voltaje y armónicos. Estos fenómenos pueden llegar a tener consecuencias significativas que pueden convertirse en algo más allá que una simple interrupción de la energía eléctrica[Arrillaga et al., 2000]. Un ejemplo podrían ser los armónicos y cómo pueden provocar calentamiento excesivo en los equipos, mala eficiencia energética o deterioro prematuro de los componentes en los equipos.

Los armónicos son de los fenómenos más comunes que se tienen hoy en día, debido a que la tecnología ha avanzado y algunos aparatos se han vuelto de impedancia variable o car-

gas con impedancia no lineal, lo cual genera un armónico al variar su frecuencia. Un armónico es una distorsión en la frecuencia fundamental de la red [Arrillaga and Watson, 2004].

Hoy en día existen diversas maneras para eliminar los armónicos de la red. Entre las soluciones están los filtros activos y pasivos. Los filtros activos se componen de elementos electrónicos como inversores y convertidores para generar corrientes que cancelen selectivamente los armónicos presentes en el sistema. Y los filtros pasivos están compuestos por inductores y capacitores que son diseñados para que entren en resonancia y con ello eliminar la corriente armónica contaminante [Sannino et al., 2003]. Los filtros pasivos han sido los más utilizados por la industria debido a su bajo costo, su diseño simple y facilidad para poder darles mantenimiento. Lamentablemente, debido a que estos son elementos pasivos, no se pueden autorregular para evitar alguna pérdida de sintonía debido a alguna falla o cambio en sus valores de capacitancia o inductancia, lo que ocasiona que, el filtro dejaría de operar correctamente y la contaminación armónica se elevaría, resultando en fenómenos indeseables como, por ejemplo, una sobrecarga en los conductores, sobrecargas y vibraciones en máquinas eléctricas, mal funcionamiento de los relés de protección, presencia de perturbaciones en equipos de control, entre otros problemas [Martinez, 2008]. Este es un problema que se tiene debido a que no se realiza un monitoreo de los elementos por los cuales están compuestos los filtros.

Conforme el paso de los años, la teoría de control ha avanzado creando técnicas más eficientes, efectivas y robustas, como pueden ser técnicas como el control óptimo, modos deslizantes, redes neuronales, entre otros. Estas nuevas técnicas se han podido utilizar en diferentes áreas del control, como el modelado de sistemas, diagnóstico de fallas y operación de sistemas [Chen, 1995]. En las últimas décadas, se ha tenido un gran avance en el área del diagnóstico de fallas. Se han implementado múltiples técnicas para poder lograr un diagnóstico que funcione de manera correcta. El diagnóstico de fallas se puede visualizar en 3 etapas: Detección de fallas, que se refiere a la toma de decisión binaria entre si el sistema se encuentra operando o no de manera correcta Aislamiento de fallas, que se encarga de determinar la ubicación de la falla o identificación de fallas aquí se estima el tamaño, tipo y/o la naturaleza de la falla.[Witczak, 2014]

Así el problema a resolver en el presente trabajo se centran en crear un algoritmo

de detección de fallas que nos indique si existe una variación en los parámetros de un filtro pasivo, mediante el diseño de un observador de Luenberger y observador de Luenberger con modos deslizantes, los cuales se diseñan con fines de comparación de la metodología, pero ambos se encargan de generar señales conocidas como residuos para indicar algún tipo de falla.

1.2. Estado del Arte

En las últimas décadas, los sistemas han experimentado un incremento en su complejidad y automatización, lo que ha incrementado la probabilidad de fallas en alguna etapa de su operación. Como consecuencia, la investigación en el diagnóstico de fallas ha ganado relevancia, ya que las técnicas utilizadas se han perfeccionado y renovado para lograr diagnósticos más precisos y confiables.

1.2.1. Detección de fallas utilizando observadores basados en modos deslizantes

El empleo de observadores para el diagnóstico de fallas es una técnica ampliamente investigada y aplicada en el ámbito de los sistemas de control, dado que permite la estimación de variables internas a partir de las entradas y salidas disponibles del sistema. Entre las diferentes metodologías empleadas, los observadores basados en modos deslizantes han cobrado especial importancia debido a su robustez ante perturbaciones y su capacidad para manejar sistemas no lineales.

En comparación con otros enfoques de diagnóstico, los observadores de modos deslizantes presentan ventajas significativas, tales como la resistencia al ruido, la capacidad para manejar variaciones no modeladas del sistema y su rápida convergencia, características que son esenciales en entornos industriales. Por ejemplo, en [Davila et al., 2005] se presenta el diseño de un algoritmo de observador basado en modos deslizantes de segundo orden para sistemas mecánicos inciertos, en el que se demuestra la convergencia en tiempo finito, a pesar de las incertidumbres inherentes en el modelo matemático.

De igual forma, en [Aguilar-López et al., 2006] se aborda un problema de estima-

ción lineal en un proceso químico, donde se estima el consumo de sustrato, la concentración de sustrato y la biomasa en un reactor biológico de operación continua. A pesar de que las mediciones contienen ruido blanco, el observador basado en modos deslizantes es capaz de estimar correctamente los estados del sistema, lo que confirma la robustez de esta técnica ante ruidos en las mediciones.

El uso de observadores basados en modos deslizantes también se ha implementado en diversas áreas de monitoreo de procesos. En [Escobar et al., 2011], se emplea esta técnica para la detección y el aislamiento de fallas (FDI) en sensores aplicados a un intercambiador de calor de flujo en contra de tubos concéntricos. En este caso, se utilizan observadores no lineales de alta ganancia para generar residuos cuando se presenta una falla en alguno de los sensores. La discrepancia entre el sensor y el observador permite detectar la falla de manera eficiente.

Otra ventaja destacada del diseño de observadores mediante esta técnica es su robustez ante entradas desconocidas o incertidumbres paramétricas en el modelo matemático. Como se expone en [Rosas et al., 2008], los observadores son lo suficientemente robustos frente a estas incertidumbres, y además permiten la estimación de entradas desconocidas mediante la utilización de control equivalente y la convergencia en tiempo finito. En este trabajo, se presenta un observador para sistemas no lineales MIMO de fase mínima.

Otro ejemplo del diagnóstico de fallas mediante el uso de modos deslizantes se presenta en [Aguilera et al., 2013], donde se diseña un observador para la detección de fallas en una máquina inductiva de accionamiento eléctrico. En este estudio, se evalúa la capacidad del observador para detectar fallas en los sensores de corriente de la máquina inductiva, además de desarrollar un banco de observadores capaz de aislar las fallas.

En 2013, se realizó un estudio [Aligia et al., 2013] en el que se empleó la técnica de modos deslizantes para estimar la velocidad lateral de un vehículo de cuatro ruedas durante giros a diferentes velocidades. Este trabajo forma parte de una investigación destinada a mejorar el control de estabilidad durante el giro lateral de vehículos eléctricos, los cuales cuentan con motores individuales en cada rueda. El diseño del observador se basó en un modelo de bicicleta modificado, y los resultados obtenidos mostraron que la técnica es robusta ante variaciones de parámetros y dinámicas no modeladas, como se comprobó mediante

simulaciones.

Existen variantes de los observadores por modos deslizantes, como el diferenciador exacto robusto por modos deslizantes, utilizado en [Delgado-Aguñaga and Begovich, 2014] para la detección y aislamiento de fugas en un sistema de tuberías en tiempo real. Este trabajo considera la presencia de ruido y perturbaciones externas, tales como variaciones en las propiedades físicas del fluido y vibraciones mecánicas introducidas por accesorios como válvulas y acoplamientos. La técnica demostró su capacidad para estimar la posición de fugas menores al 5 % del gasto nominal, superando a otros algoritmos que sólo lograban detectar fugas de alrededor del 10 %.

Además, los observadores basados en modos deslizantes tienen la capacidad de detectar fallas múltiples simultáneas, como se demuestra en [García-Morales et al., 2015]. En este estudio, se realizaron pruebas experimentales en intercambiadores de calor, donde varios sensores presentaron fallas simultáneamente. A pesar de esto, la técnica permitió reconstruir las señales a partir de los sensores operativos restantes, garantizando que el proceso continuara funcionando sin interrupciones.

Los observadores basados en modos deslizantes no se limitan a modelos matemáticos lineales o no lineales convencionales. En [Pérez-Estrada et al., 2015], se explora el diagnóstico de fallas utilizando observadores difusos basados en modos deslizantes, aplicados a un digestor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente. En este trabajo, se implementa un esquema de detección y diagnóstico de fallas en sensores, utilizando umbrales fijos para la evaluación de los residuos y la localización de fallas mediante redundancia analítica.

Finalmente, en 2019, en [Cervantes et al., 2019] se presenta el desarrollo de un algoritmo para la detección de fallas en un proceso de destilación, el cual utiliza un banco de observadores difusos con modos deslizantes. Esta técnica permitió detectar perturbaciones en el voltaje de alimentación del actuador del sistema de calentamiento, así como variaciones en la resistencia calefactora, lo que habilitó la implementación de medidas preventivas o correctivas con base en los resultados obtenidos.

1.3. Hipótesis

Es posible diseñar un algoritmo de detección de fallas robusto para un sistema formado por un filtro armónico pasivo monofásico usando observadores de modos deslizantes.

1.4. Objetivos de la Tesis

1.4.1. Objetivo general

Desarrollar un algoritmo para la detección de fallas capaz de detectar cualquier falla fuera del valor nominal de los componentes de un filtro pasivo para mitigar armónicos usando observadores de modos deslizantes.

1.4.2. Objetivos particulares

- Obtener el modelo matemático de un filtro armónico monofásico.
- Diseñar un observador suficientemente robusto para poder detectar de manera eficiente la falla.
- Diseñar un observador que trabaje de manera óptima con condiciones iniciales distintas de cero.

1.5. Contribuciones

La principal contribución de esta tesis radica en el diseño de un observador con una función discontinua basada en modos deslizantes, capaz de detectar cuando alguno de los componentes del filtro de mitigación de armónicos comienza a mostrar variaciones en sus valores nominales. Asimismo, se busca que este observador tenga la capacidad de aislar el componente defectuoso dentro del sistema, garantizando una detección de falla precisa.

1.6. Descripción de Capítulos

En el capítulo dos se presenta el marco teórico del que tiene alcance el presente trabajo. En el capítulo tres se plantea el modelo matemático que se utilizará para modelar el sistema eléctrico y su filtro, así como la estructura del observador de modos deslizantes; en el capítulo cuatro se analiza y propone el diseño del esquema de detección de fallas y se presentan los resultados obtenidos. Finalmente se presentan las conclusiones y posibles trabajos futuros en el capítulo cinco

Capítulo 2

Preliminares de filtrado armónico

2.1. Introducción

Este capítulo presenta una introducción integral a los conceptos fundamentales de calidad de la energía eléctrica, haciendo especial énfasis en los armónicos y el porcentaje de distorsión armónica total (THD). Asimismo, se describen los principios de funcionamiento y diseño de los filtros pasivos utilizados para la mitigación de armónicos, resaltando su importancia en la estabilidad y eficiencia de los sistemas eléctricos. Finalmente, se abordan los conceptos de diagnóstico de fallas, junto con las técnicas de observadores implementadas a lo largo de este trabajo, proporcionando una base sólida para el desarrollo de los capítulos siguientes.

Uno de los principales problemas que se abordan en el estudio de la red eléctrica es mantener la calidad de la energía, lo cual implica dos cosas, tener calidad en el voltaje y calidad en la corriente que el significado básicamente es que ambas sean una onda sinusoidal de frecuencia única, amplitud y frecuencia constantes [[Bollen, 2003](#)]. De acuerdo con el diccionario autorizado de términos del IEEE 100 la calidad de la energía se define como “el concepto de alimentar y poner a tierra equipos electrónicos de una manera adecuada para la operación de ese equipo y compatible con el sistema de cableado y otros equipos conectados” [[Breitfelder and Messina, 2000](#)].

2.2. Armónicos

Una de las alternativas para medir el nivel de calidad de la energía que se tiene puede ser mediante la distorsión armónica, que representa la desviación entre la forma de onda sinusoidal ideal que deberían tener la tensión de la red o la corriente de carga, y la que tienen en realidad. Siendo la principal causa de generación de armónicos son las cargas “no lineales” [Melendez et al., 2011].

Se les denomina cargas lineales cuando se aplica un voltaje senoidal directamente a cargas tales como resistencias (por ejemplo, lámparas incandescentes), inductancias (por ejemplo, transformadores, motores), capacitores (por ejemplo, condensadores que formen parte de algún equipo) o una combinación de ellos y se produce una corriente proporcional que también es senoidal, como se observa en la Fig. 2.1 [Ramírez, 2008].

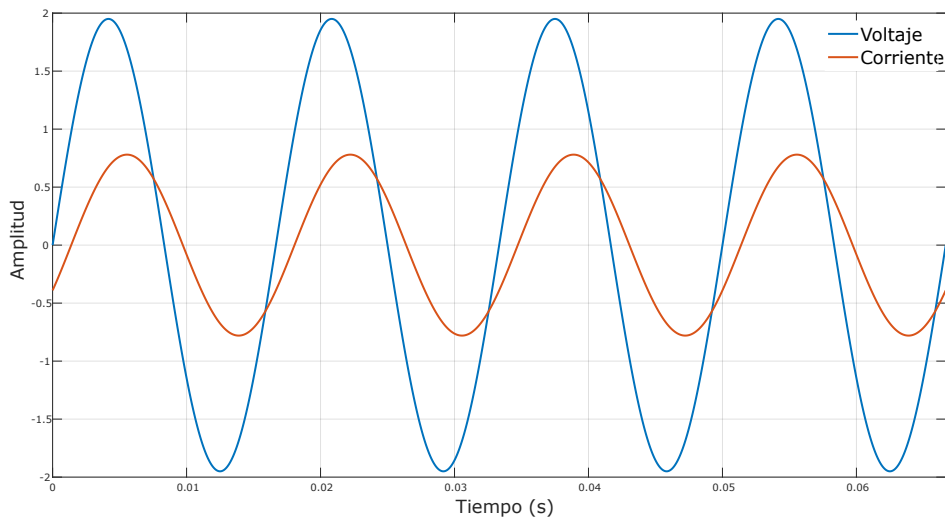


Figura 2.1: Voltaje y corriente tomados por una carga lineal

Por el contrario, las cargas no lineales son aquellas que a pesar de ser alimentadas con una tensión sinusoidal absorben una intensidad no sinusoidal, pudiendo estar la corriente desfasada un ángulo θ respecto a la tensión. Pueden ser simplemente las cargas no lineales en las que la corriente que fluye por ellas no es proporcional a la tensión. Como resultado de esto, cuando se aplica una onda sinusoidal de una sola frecuencia, la corriente resultante no

es de una sola frecuencia [Melendez et al., 2011]. Un armónico, según la norma IEEE-519, está definido como el contenido de la señal, cuya frecuencia es un múltiplo entero de la frecuencia de repetición base o frecuencia fundamental, como se puede observar en la Fig. 2.2 la señal de corriente muestra otras componentes de frecuencia [John, 2001].

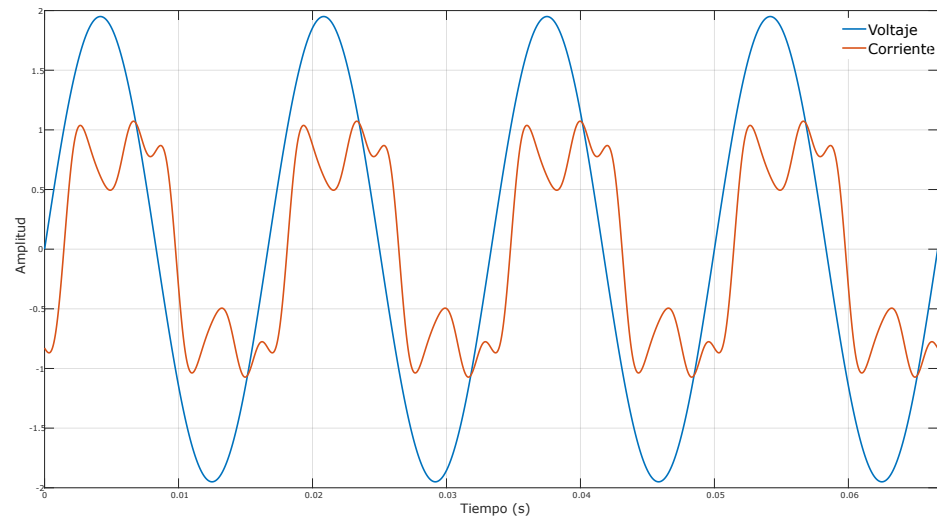


Figura 2.2: Voltaje y corriente tomados por una carga no lineal

Algunos problemas debidos a las corrientes armónicas son los siguientes: calentamiento adicional y posibles sobretensiones (debido a las condiciones de resonancia) en los equipos de distribución y transmisión de los sistemas de suministro de energía, resonancias no previstas, errores en la medición y avería de relés de estos sistemas, interferencia con señales de comunicación y control, funcionamiento defectuoso de motores, generadores, entre otros [Mohan et al., 2009]. Los variadores de velocidad/frecuencia, rectificadores, convertidores de potencia, hornos de inducción, hornos de arco eléctrico son algunos ejemplos de cargas no lineales que contaminan la red eléctrica con armónicos.

2.3. Análisis de armónicos

Para analizar la señal de onda de corriente o de tensión medida, se utiliza el teorema de Fourier que demuestra que una función periódica cualquiera puede descomponerse

en una suma de funciones senoidales, siendo la primera función senoidal (fundamental) de la misma frecuencia que la función original y el resto de las frecuencias múltiplos exactos de la frecuencia fundamental. Estos son los componentes armónicos de la función periódica original. Cada armónica se expresa en función de su orden, las armónicas de segundo, tercer y quinto orden, tienen frecuencias de 120, 180 y 300 Hz respectivamente en sistemas eléctricos con frecuencias de generación de 60 Hz [John, 2001].

El modelo matemático según Fourier para el análisis de una señal periódica no senoidales [González et al., 2006] esta descrita por (2.1):

$$f(t) = \sum_{k=0}^{\infty} ak \cos(k\omega t) + bk \sin(k\omega t) \quad (2.1)$$

Donde, para calcular a_k y b_k se utiliza (2.2) y (2.3):

$$ak = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(k\omega t) dt \quad (2.2)$$

$$bk = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(k\omega t) dt \quad (2.3)$$

Donde:

$f(t)$ = Función periódica

k = Número de armónica

T = Periodo de la señal

ω_1 = Frecuencia angular fundamental

a_k = Coeficientes de las componentes cosenoidales

b_k = Coeficientes de las componentes senoidales

2.4. Distorsión armónica total (THD)

La distorsión armónica total (THD) es una medida del valor efectivo de las componentes armónicas, de tal forma que es el valor eficaz de las armónicas relativas a la fundamental es una forma de determinar el contenido armónico del voltaje o de la corriente en una onda periódica [González et al., 2006], la ecuación matemática es:

$$\%THD = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{k_{\text{máx}}} M_K^2}}{M_1} \times 100 \quad (2.4)$$

Dentro de la ecuación encontramos que M_h representa el valor de la componente armónica h de la corriente o voltaje fundamental que sería M_1 . Los valores eficaces (rms) de las formas de onda se calculan como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los valores eficaces de todos los componentes individuales [Dugan et al., 1996].

$$V_{rms} = \sqrt{\sum_{k=1}^{k_{\text{máx}}} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} V_k\right)^2} \quad (2.5)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{k=1}^{k_{\text{máx}}} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} I_k\right)^2} \quad (2.6)$$

Donde:

- V_k = Amplitud del componente armónico de orden k en la señal de voltaje
- I_k = Amplitud del componente armónico de orden k en la señal de corriente.

2.5. Resonancia

La impedancia es crucial para comprender cómo se comporta la corriente cuando entra en resonancia, dado que su valor influye inversamente en el flujo de corriente. Cuando un circuito RLC es completamente resistivo, la reactancia total es cero, lo que significa que el circuito está en resonancia. Como resultado, se producirá el flujo máximo de corriente posible en el circuito. Existen dos tipos de resonancias que pueden ocurrir: la resonancia

en serie y la resonancia en paralelo. La resonancia en serie se manifiesta en situaciones de alteración durante la operación del sistema, como una falla de fase a tierra. Asimismo, surge cuando la reactancia inductiva es igual a la reactancia capacitiva. Si el capacitor equivalente se conecta en serie con la reactancia equivalente del sistema, también puede producirse resonancia en serie, facilitando una ruta de baja impedancia para la circulación de corrientes armónicas [Basantes Vidal, 2021].

Se dice que el circuito está en resonancia cuando $x_l = x_c$. Por lo tanto, la frecuencia de resonancia en serie está dada por la siguiente ecuación [Kraft and Heydt, 2007].

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.7)$$

De igual manera se puede estudiar la resonancia en paralelo utilizando el análisis de las impedancia o admitancias. Si sabemos que la resonancia ocurre cuando $\frac{1}{X_L} = \frac{1}{X_C}$, y conociendo que $\omega = 1/\sqrt{LC}$, siendo la frecuencia de resonancia, donde $\omega = 2\pi f$, por lo tanto, podemos concluir que la frecuencia de resonancia es la misma en la conexión en serie que en paralelo [Kraft and Heydt, 2007].

2.6. Filtros de potencia para mitigar armónicos

Una vez identificados los inconvenientes derivados de los armónicos en relación con la calidad de la energía, procedemos a abordar la solución a estos mediante el empleo de filtros. El uso de filtros destinados a las componentes armónicas en sistemas de potencia se orienta hacia dos objetivos fundamentales: fungir como sumidero para las corrientes y tensiones armónicas, y proporcionar al sistema la totalidad o una fracción de la potencia reactiva que requiere.

Existen dos maneras de clasificar los filtros. Primordialmente existen los que usan elementos pasivos (inductores, capacitores y resistencias) y la otra manera elementos activos.

Los filtros activos, componentes de tamaño relativamente pequeño y flexibles en su operación en comparación con los filtros pasivos, están compuestos principalmente por componentes electrónicos como amplificadores operacionales, transistores y otros dispositivos semiconductores. La elección de estos componentes depende de la aplicación específica del

filtro activo y de los requisitos de rendimiento. Utilizan algoritmos y técnicas de control para ajustar dinámicamente su respuesta a las condiciones cambiantes de la red eléctrica. Además de abordar el filtrado armónico, amortiguación armónica, aislamiento armónico, terminación armónica, control de potencia reactiva, corrección del factor de potencia, regulación de voltaje, equilibrio de carga y reducción de parpadeo de voltaje, los filtros activos incorporan un inversor o convertidor controlado junto con un bloque de control para obtener las señales deseadas de referencia. Pueden tener diversas configuraciones de conexión, ya sea en serie o paralelo [Akagi, 2005]. Por otro lado, los filtros pasivos que siempre han sido la opción más común para lidiar con los armónicos producidos por grandes cargas industriales, principalmente debido a su bajo costo y alta eficiencia. Estos están compuestos de un capacitor, un inductor y/o una resistencia. Los filtros pasivos se basan en el principio de resonancia eléctrica, donde proporcionan una resistencia mínima al flujo de corriente a una frecuencia resonante específica. Al ajustarse a frecuencias correspondientes a diversos órdenes armónicos, logran reducir de manera considerable la presencia de esos armónicos particulares. Su clasificación abarca filtros sintonizados, sintonizados de segundo orden y filtros pasa altas, determinada por el número de frecuencias resonantes que incorporan [Prasad et al., 2015]. Dentro de las cualidades que tiene cada filtro de esta clasificación se pueden encontrar que los filtros de sintonización únicamente eliminan armónicos de un orden específico, mientras que los de doble sintonización amplían esta capacidad a dos órdenes armónicos. Por otro lado, los filtros pasa altas o pasa bandas se destacan por eliminar los armónicos de altas frecuencias como podrían ser del armónico 11° en adelante [Prasad et al., 2015].

2.6.1. Filtros pasivos en serie

El diseño del filtro pasivo en serie se orientó hacia la supresión de armónicos, demostrando una resistencia significativa frente a las armónicas generadas por la carga. Su estructura incorpora un filtro LC en paralelo, que presenta una impedancia considerablemente alta cuando se alcanza la frecuencia de resonancia ω_r . En situaciones prácticas, este tipo de filtro se recomienda para cargas que operan como fuente de tensión [Candela García, 2009].

En casos donde la corriente demandada por la carga abarca múltiples armónicos, se requiere la instalación de varios filtros en serie. Se deben colocar en serie tantas secciones

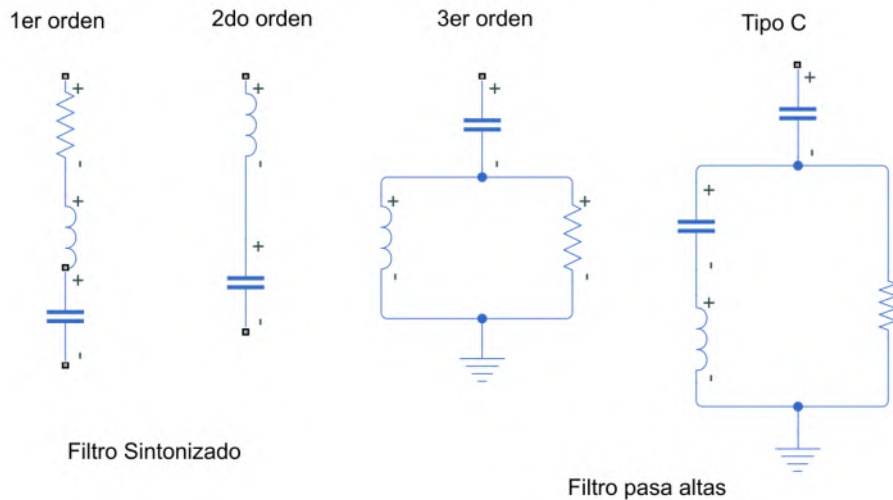


Figura 2.3: Tipos de filtros pasivos

de filtros sintonizados como armónicos se deseen eliminar, siendo comúnmente el 5^o, 7^o, 11^o y 13^o. Para armónicos de orden superior y menor amplitud relativa, se opta por instalar un filtro pasivo de rechazo de altas frecuencias [Candela García, 2009].

2.6.2. Filtros pasivos en paralelo

El filtro pasivo en paralelo desempeña la función de absorber armónicos al proporcionar una vía de baja impedancia para los armónicos de corriente originados en la carga. Su composición incluye un circuito serie LC con baja impedancia en la frecuencia de resonancia. Al integrarse en una red de potencia, actúa como divisor de corriente entre su propia impedancia y la impedancia de la red, presentando un inconveniente ya que la eficacia del filtrado depende tanto de la impedancia de la red como del filtro en sí. El filtro pasivo en paralelo cumple una doble función al absorber armónicos y compensar parcialmente la potencia reactiva. La selección y diseño de estos filtros se llevan a cabo según las necesidades de potencia reactiva del sistema y el tamaño necesario de la batería de condensadores para su compensación [Candela García, 2009].

A pesar de su diseño aparentemente sencillo y su principio de funcionamiento directo, estos filtros pasivos requieren un análisis exhaustivo antes de su instalación en la red, ya que podrían generar problemas de resonancia con la impedancia de la red, con otros

filtros existentes o con las baterías de condensadores.

2.7. Diseño de filtros pasivos sintonizados

Para poder diseñar un filtro pasivo sintonizado para armónicos que trabaje de manera eficiente y permita una operación confiable, se tiene que seguir los siguientes pasos:

1.- Elegir una frecuencia de sintonización para el filtro: este paso es de los más importantes y crucial, se basa en las características armónicas de las cargas involucradas. El filtro se sintonizará ligeramente por debajo de la frecuencia armónica de preocupación para permitir tolerancias en los componentes del filtro y variaciones en la impedancia del sistema. Esto evita que el filtro actúe como un cortocircuito directo para la corriente armónica problemática, reduciendo la carga en los componentes del filtro. También minimiza la posibilidad de una peligrosa resonancia armónica en caso de que los parámetros del sistema cambien y provoquen un desplazamiento en la frecuencia de sintonización [Molano Aguas and Tique Rojas, 2013].

2.- Calcular la capacitancia necesaria para mejorar el factor de potencia: El tamaño del filtro se basa en el requisito de potencia reactiva de la carga para la corrección del factor de potencia. Cuando se convierte un condensador de corrección del factor de potencia existente en un filtro armónico, se proporciona el tamaño del condensador [Molano Aguas and Tique Rojas, 2013]. Se calcula la potencia reactiva que se tiene en el sistema antes de la corrección del factor de potencia y cuanto sería la potencia reactiva del sistema después de la corrección del factor de potencia al valor deseado:

$$Q = V * I * \text{sen}(\cos^{-1} \phi) \quad (2.8)$$

Donde:

Q = Potencia reactiva del sistema

V = Voltaje en rms

I = Corriente en rms

ϕ = Factor de potencia

Se obtiene la diferencia entre ambas potencias reactivas para obtener la cantidad de potencia reactiva que se va a corregir.

Se realizará un cálculo para obtener la reactancia capacitiva, primordialmente obtendremos la reactancia del filtro que esta dada por:

$$X_{Filtro} = \frac{(V_{nom})^2}{VAr} \quad (2.9)$$

La reactancia del filtro a frecuencia fundamental es:

$$X_{Filtro} = X_{Cap} - X_L \quad (2.10)$$

En casos donde la corriente demandada por la carga abarca múltiples armónicos, se requiere la instalación de varios filtros en serie. Se deben colocar en serie tantas secciones de filtros sintonizados como armónicos se deseen eliminar, siendo comúnmente el 5º, 7º, 11º y 13º. Para armónicos de orden superior y menor amplitud relativa, se opta por instalar un filtro pasivo de rechazo de altas frecuencias. La frecuencia de resonancia de estos filtros se determina mediante la ecuación (3.2). No obstante, la implementación de filtros pasivos en serie no es muy extendida debido a su propensión a distorsionar la tensión en el lado de carga. [Candela García, 2009]

2.7.1. Filtros pasivos en paralelo

El filtro pasivo en paralelo desempeña la función de absorber armónicos al proporcionar una vía de baja impedancia para los armónicos de corriente originados en la carga. Su composición incluye un circuito serie LC con baja impedancia en la frecuencia de resonancia. Al integrarse en una red de potencia, actúa como divisor de corriente entre su propia impedancia y la impedancia de la red, presentando un inconveniente ya que la eficacia del filtrado depende tanto de la impedancia de la red como del filtro en sí. En aplicaciones prácticas, este tipo de filtro se recomienda para cargas que actúan como fuente de corriente.

El filtro pasivo en paralelo cumple una doble función al absorber armónicos y compen-

sar parcialmente la potencia reactiva. La selección y diseño de estos filtros se llevan a cabo según las necesidades de potencia reactiva del sistema y el tamaño necesario de la batería de condensadores para su compensación. Cuando la corriente de la carga involucra más de un armónico, se instalan varios filtros en paralelo, generalmente para eliminar armónicos como el 5^o, 7^o, 11^o y 13^o. En el caso de armónicos de orden superior y amplitud relativa pequeña, suele emplearse un filtro pasivo de paso alto.[Candela García, 2009]

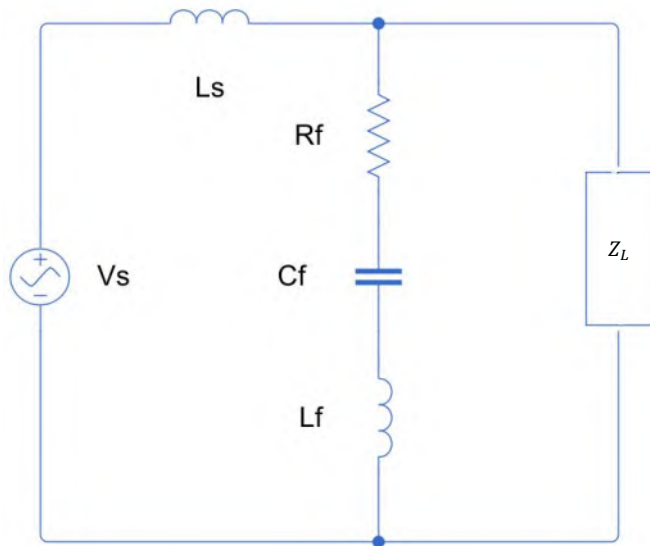


Figura 2.4: Filtro Pasivo en Paralelo

A pesar de su diseño aparentemente sencillo y su principio de funcionamiento directo, estos filtros pasivos requieren un análisis exhaustivo antes de su instalación en la red, ya que podrían generar problemas de resonancia con la impedancia de la red, con otros filtros existentes o con las baterías de condensadores.

2.7.2. Diseño de filtros pasivos sintonizados

Para poder diseñar un filtro pasivo sintonizado para armónicos que trabaje de manera eficiente y permita una operación confiable, se tiene que seguir los siguientes pasos:

1. **Elegir una frecuencia de sintonización para el filtro:** Este paso es de los más

importantes y crucial, se basa en las características armónicas de las cargas involucradas. El filtro se sintonizará ligeramente por debajo de la frecuencia armónica de preocupación para permitir tolerancias en los componentes del filtro y variaciones en la impedancia del sistema. Esto evita que el filtro actúe como un cortocircuito directo para la corriente armónica problemática, reduciendo la carga en los componentes del filtro. También minimiza la posibilidad de una peligrosa resonancia armónica en caso de que los parámetros del sistema cambien y provoquen un desplazamiento en la frecuencia de sintonización.

2. **Calcular la capacitancia. necesaria para mejorar el factor de potencia.** El tamaño del filtro se basa en el requisito de potencia reactiva de la carga para la corrección del factor de potencia. Cuando se convierte un condensador de corrección del factor de potencia existente en un filtro armónico, se proporciona el tamaño del condensador.

Se calcula la potencia reactiva que se tiene en el sistema antes de la corrección del factor de potencia y cuanto sería la potencia reactiva del sistema después de la corrección del factor de potencia al valor deseado:

$$Q = V * I * \sin(\cos^{-1} \phi) \quad (2.11)$$

Donde:

Q = potencia reactiva del sistema

V = voltaje en rms

I =corriente en rms

ϕ =factor de potencia

Se obtiene la diferencia entre ambas potencias reactivas para obtener la cantidad de potencia reactiva que se va a corregir. Se realizará un cálculo para obtener la reactancia capacitiva de la siguiente manera: Primordialmente obtendremos la reactancia del filtro que esta dada por:

$$X_{filtro} = \frac{(V_{nom})^2}{VAr} \quad (2.12)$$

La reactancia del filtro a frecuencia fundamental es:

$$X_{filtro} = X_{Cap} - X_L \quad (2.13)$$

Donde:

V_{nom} = Voltaje RMS nominal del sistema

VA_r = Potencia reactiva que entrega o absorbe el banco de capacitores del filtro

X_{filtro} = Reactancia equivalente del filtro

X_{cap} = Reactancia capacitiva

X_L = Reactancia inductiva

Los filtros no se sintonizan exactamente en el valor de la frecuencia del armónico. Ya que pueden entrar en resonancia con impedancias propias de la carga o de la red.

$$\frac{X_{Cap}}{h} = h * X_L \quad (2.14)$$

Donde:

h = Orden del armónico

Despejando X_{Cap}

$$X_{Cap} = h^2 * X_L \quad (2.15)$$

Despejando X_L y sustituyendo en (2.14) obtenemos:

$$X_{Cap} * (h^2 - 1) = h^2 * X_{filtro} \quad (2.16)$$

y finalmente despejando X_{Cap} :

$$X_{Cap} = \frac{h^2}{h^2 - 1} * X_{filtro} \quad (2.17)$$

Una vez obteniendo la reactancia del capacitor lo consiguiente es confirmar que esta reactancia proporciona la corrección de potencia reactiva que se necesita:

$$VA_r = \frac{V}{X_{cap}} \quad (2.18)$$

Una vez corroborado lo anterior, proseguimos a conseguir el tamaño del condensador que se ocupará:

$$C_{faradios} = \frac{1}{\omega * X_{Cap}} \quad (2.19)$$

Donde:

ω = Velocidad angular

3. **Calcular el valor del tamaño del reactor** Encontrar el valor de la reactancia inductiva, que a una determinada frecuencia entre en resonancia con la del capacitor y proporcione un camino de baja impedancia. Para lo cual se despeja la ecuación (2.15) y se obtiene:

$$X_L = \frac{X_{Cap}}{h^2} \quad (2.20)$$

Con esta reactancia se puede dimensionar el reactor en henrios.

$$L_{henrios} = \frac{X_L}{\omega} \quad (2.21)$$

Existe otra manera de encontrar el valor de la bobina en henrios que es utilizando la ecuación de la resonancia y despejando “L” de esta, quedando de la siguiente manera:

$$L = \left(\frac{1}{2\pi f} \right)^2 \left(\frac{1}{c} \right) \quad (2.22)$$

4. **Elegir componentes comerciales para la construcción** Y finalmente elegir los componentes comerciales para la construcción del filtro y verificar el desempeño del filtro para asegurar que los componentes actúen de manera correcta. [\[Prasad et al., 2015\]](#)

2.8. Conclusión

En este capítulo se presentó una visión integral de los fundamentos de la calidad de la energía eléctrica y de los principales problemas asociados con la presencia de armónicos en los sistemas de potencia. Se estableció que las cargas no lineales constituyen la principal fuente de distorsión en la red, generando efectos adversos como pérdidas adicionales,

resonancias indeseadas, fallos en equipos de protección y afectaciones en la operación de motores y dispositivos sensibles.

Asimismo, se revisaron las bases matemáticas del análisis de armónicos mediante la transformada de Fourier, así como la métrica de distorsión armónica total (THD), herramienta esencial para cuantificar el impacto de los armónicos sobre las formas de onda de tensión y corriente. De igual forma, se explicó el fenómeno de la resonancia y su relevancia en el comportamiento de los circuitos eléctricos, tanto en configuraciones serie como en paralelo.

Finalmente, se abordó el diseño y funcionamiento de los filtros de potencia, en particular de los filtros pasivos sintonizados, destacando su capacidad para mitigar armónicos específicos y contribuir a la compensación de potencia reactiva. El proceso de dimensionamiento de estos filtros, sustentado en la relación entre reactancias, potencia reactiva y frecuencia de sintonía, constituye una herramienta fundamental para garantizar la estabilidad y eficiencia de los sistemas eléctricos.

Este conjunto de conceptos proporciona la base teórica necesaria para el desarrollo de los capítulos posteriores, donde se profundizará en la modelación matemática y en la implementación de técnicas de detección de fallas aplicadas a filtros pasivos de potencia.

Capítulo 3

Detección de fallas

3.1. Introducción

Los sistemas de control modernos están volviéndose cada vez más complejos, y los algoritmos de control están alcanzando niveles de sofisticación cada vez mayores. Por ende, los temas de fiabilidad, seguridad operativa y protección ambiental son cruciales, especialmente para sistemas críticos de seguridad. Se reconoce una creciente necesidad de supervisión en y fuera de línea y diagnóstico de fallos para mejorar la fiabilidad de tales sistemas críticos. Identificar tempranamente las fallas en desarrollo puede prevenir la degradación del sistema, interrupciones en la operación y posibles catástrofes.[[Chen, 1995](#)]

3.1.1. Clases de fallas y fases del diagnóstico de fallas

El sistema controlado está compuesto por actuadores, dinámica del proceso y sensores. Cada una de estas partes está afectada por las llamadas entradas desconocidas, que pueden percibirse como ruido de proceso y de medición, así como perturbaciones externas que actúan sobre el sistema. Cuando se utiliza control basado en el modelo matemático y diagnóstico de fallas basado en redundancia analítica, la entrada desconocida también puede ser tomada en cuenta como la diferencia entre el sistema real y el modelo considerado. [[Chen, 1995](#)] [[Witczak, 2014](#)]

Una “falla” o “fault” se define como una alteración imprevista en el funcionamiento del sis-

tema, aunque no necesariamente implica una falla o descomposición física permanente. Este contratiempo interfiere con la operación normal de un sistema automático, resultando en una disminución en su rendimiento o incluso situaciones de riesgo. Otro término ampliamente utilizado es “avería” o “failure”, que se emplea para indicar un evento catastrófico. Esto implica un colapso total de un componente o función del sistema, mientras que el término falla puede sugerir que un mal funcionamiento puede ser tolerable en su etapa actual. Es esencial diagnosticar cualquier contratiempo lo antes posible, incluso si es tolerable en sus primeras etapas, para evitar consecuencias graves. [Chen, 1995]

Dado que un sistema puede dividirse en tres partes, es decir, actuadores, el proceso y sensores, tal descomposición conduce directamente a tres clases de fallas.

Fallas en el actuador: pueden ser vistos como cualquier mal funcionamiento del equipo que acciona el sistema [Witczak, 2014]. Este tipo de fallas pueden dividirse en tres categorías:

- Bloqueo en posición: El actuador queda bloqueado en una cierta posición en un momento desconocido y no responde a comandos posteriores.

$$u_{i,k} = u_{i,t,f} = \text{const}, \quad \forall k > t_f \quad (3.1)$$

Donde:

$u_{i,k}$ =Representa el valor de una variable de entrada en el instante discreto k , El subíndice i denota el índice de la variable

$u_{i,t,f}$ = Es el valor de referencia de esa misma variable en el instante de falla t_f

- Interrupción: el actuador produce cero fuerza y momento, es decir, se vuelve ineficaz.

$$u_{i,k} = 0, \quad \forall k > t_f \quad (3.2)$$

- Pérdida de efectividad: una disminución en la ganancia del actuador que resulta en una deflexión que es menor que la posición ordenada[Witczak, 2014].

$$u_{i,k} = k_i u_{i,k}^c, \quad 0 < k_i < 1 \quad \forall k > t_f, \quad (3.3)$$

Fallas del proceso (o fallas de componentes): que ocurren cuando algunos cambios en el sistema hacen que la relación dinámica sea inválida [Witczak, 2014].

Fallas del sensor: que pueden ser vistos como variaciones graves en las mediciones. Se pueden considerar dos escenarios de falla del sensor:

- **Bloqueo en posición:** el sensor queda bloqueado en una cierta posición en un momento desconocido y no proporciona el valor actual de la variable medida.

$$y_{i,k} = y_{i,t_f} = \text{const}, \quad \forall k > t_f \quad (3.4)$$

Donde:

$Y_{i,k}$ =Salida medida del sistema en el instante discreto k . El subíndice i identifica qué salida en particular

Y_{i,t_f} =Es el valor de esa salida justo en el instante de la falla t_f

- **Pérdida de precisión en la medición:** una degradación de la precisión de la medición del sensor[Witczak, 2014].

$$y_{i,k} = k_i y_{i,k}^c, \quad \forall k > t_f \quad (3.5)$$

Donde:

K_i = Factor de escala que altera la salida medida

$y_{i,k}^c$ =salida “correcta” o verdadera del sistema

Un sistema de monitoreo que se utiliza para detectar fallas y diagnosticar su ubicación e importancia en un sistema se llama ”sistema de diagnóstico de fallas”. Este sistema consiste en las siguientes fases[Chen, 1995].

- **Detección de fallas:** tomar una decisión binaria - ya sea que se tenga un funcionamiento normal o anormal.
- **Aislamiento de fallos:** determinar la ubicación de la falla, por ejemplo, qué sensor o actuador ha fallado.

- **Identificación de fallas:** estimar el tamaño y el tipo o naturaleza de la falla.

La detección y el aislamiento son absolutamente necesarias para cualquier sistema práctico. El diagnóstico de fallas se considera muy a menudo como detección y aislamiento de fallas, abreviado como FDI.

La identificación de fallas, por otro lado, aunque sin duda útil, puede no ser esencial si no se requiere ninguna acción de reconfiguración.

Hay una variedad de metodologías disponibles para llevar a cabo la detección de fallas, cada una empleando distintas técnicas para lograr este objetivo. Esta diversidad se ilustra de manera clara en la Figura 3.1:



Figura 3.1: Tipos de metodologías para la detección de fallas

3.2. Detección de fallas basado en el modelo

El método de detección de fallas más utilizado es monitorear el nivel de una señal en particular y tomar medidas cuando la señal alcanza un umbral dado. Un enfoque tradicional para la detección de fallas en el contexto de aplicaciones más amplio se basa en métodos de "redundancia de hardware (o redundancia física/paralela)" que utilizan múlti-

ples vías de sensores, actuadores, computadoras y software para medir y/o controlar una variable particular. Típicamente, se aplica un esquema de votación al sistema redundante de hardware para decidir si y cuándo ocurrió una falla y su probable ubicación entre los componentes redundantes del sistema. Los principales problemas encontrados con la redundancia de hardware son el costo adicional de equipo y mantenimiento y, además, el espacio adicional necesario para alojar el equipo [Chen and Patton, 2012].

Dado que agregar más hardware puede ser caro y puede afectar la confiabilidad, tiene sentido usar diferentes mediciones para verificar unas a otras en lugar de tener duplicados de cada pieza por separado. Este es el concepto de "redundancia analítica (funcional)" que utiliza relaciones analíticas (o funcionales) redundantes entre varias variables medidas del proceso monitoreado (por ejemplo, entradas/salidas; salidas/salidas; entradas/entradas). La redundancia analítica hace uso de un modelo matemático del proceso monitoreado y, por lo tanto, a menudo se denomina "enfoque basado en modelos" para la detección de fallas. En la redundancia analítica, se verifica que todo esté en orden al comparar las señales medidas con las predicciones del modelo matemático. Esta comparación se hace observando las diferencias entre las señales reales y las estimadas por el modelo. La mayor ventaja del enfoque basado en modelos es que no se necesitan componentes de hardware adicionales para realizar un algoritmo FDI [Chen and Patton, 2012].

El diagnóstico de fallas basado en modelos puede definirse como la detección, aislamiento y caracterización de fallas en los componentes de un sistema a partir de la comparación de las mediciones disponibles del sistema, con la información a priori representada por el modelo matemático del sistema [Chen, 1995].

Para lograr un sistema de monitoreo completo basado en alguna técnica de diagnóstico de fallas se deben de realizar tres pasos:

1. **Generación de residuo:** Generación de las señales que reflejan la falla. Normalmente llamada como residuo. Esta señal auxiliar está diseñada para reflejar el inicio de una posible falla en el sistema analizado. El residuo debería ser normalmente cero o cercano a cero cuando no hay falla presente, pero claramente diferente de cero cuando ocurre una falla. El algoritmo utilizado para generar residuos se llama generador de residuos

[Chen, 1995].

2. **Evaluación de residuales y toma de decisiones:** En esta etapa se realizan decisiones lógicas sobre cuándo y dónde ocurren las fallas. Para ello, se pueden emplear pruebas de umbral en los valores instantáneos o promedios móviles de los residuos. Además, es posible recurrir a métodos más complejos basados en la teoría estadística de decisiones [Witczak, 2014].
3. **Identificación de fallas:** En esta fase se determina el tipo de falla, su tamaño y causa [Witczak, 2014].

3.2.1. Modelado de sistemas en espacio de estado incluyendo fallas

Lo primero que se debe de realizar en el enfoque basado en modelos, es crear el modelo matemático del sistema a ser monitoreado. La dinámica del sistema será descrita por el siguiente modelo en espacio de estados (3.6) .

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu_R(t) \\ y_R(t) = Cx(t) + Du_R(t) \end{array} \right\} \quad (3.6)$$

Donde $x(t) \in \mathbb{R}^n$ es denominado el vector de estados, $u_R(t) \in \mathbb{R}^n$ es el vector de entradas hacia los actuadores y $y(t) \in \mathbb{R}^p$ es el vector de salida real del sistema. A su vez las matrices $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$, $C \in \mathbb{R}^{p \times n}$ y $D \in \mathbb{R}^{p \times n}$ que respectivamente son la matriz del sistema, matriz de entrada, matriz de salida y matriz que representa un acoplamiento directo entre la salida y la entrada [Castillo, 2008].

Las fallas o averías que pueden afectar a los sensores, actuadores o componentes del sistema durante la operación pueden llegar a ser fallas aditivas o multiplicativas. Esto ocurre debido a un mal funcionamiento o envejecimiento del equipo. Por simplicidad de notación y sin pérdida de generalidad, la matriz D se tomará como una matriz cero.

En presencia de una falla el modelo del sistema se puede escribir como (3.7):

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A_f x(t) + B_f u_R(t) \\ y_R(t) &= C_f x(t) \end{aligned} \quad (3.7)$$

Donde las nuevas matrices del sistema con fallos se pueden definir como (3.8):

$$A_f = A + \delta A; \quad B_f = B + \delta B; \quad C_f = C + \delta C \quad (3.8)$$

δA , δB y δC corresponden a la desviación de los parámetros del sistema con respecto a los valores nominales.

3.2.2. Generación de residuo basado en observadores de estados

La idea básica detrás de los enfoques basados en observadores o filtros es estimar las salidas del sistema a partir de las mediciones (o un subconjunto de mediciones) utilizando observadores que pueden ser de Luenberger, filtros de Kalman, entre otros. Luego, el error de estimación de salida se utiliza como un residuo [Chen, 1995].

Se considera una planta lineal, observable e invariable en el tiempo representada por su modelo matemático en espacio de estados, con la suposición de que se conocen la estructura y los parámetros del modelo se utiliza (3.9) para realizar la estimación.

$$\begin{aligned} \hat{\dot{x}}(t) &= A\hat{x}(t) + Bu(t) + He(t) \\ \hat{y}(t) &= C\hat{x}(t) \end{aligned} \quad (t) \quad (3.9)$$

La señal de residuo se define (3.10):

$$e(t) = y(t) - C\hat{x}(t) \quad (3.10)$$

Donde la matriz H se conoce como la matriz de retroalimentación del observador, la cual puede ser diseñada a través de ubicación de polos, desigualdades lineales matriciales, entre otros métodos.

3.2.3. Desigualdades lineales matriciales

Las desigualdades matriciales lineales (LMIs, por sus siglas en inglés) tienen una importante aplicación en la teoría de control reduciendo los problemas en el cálculo de la

solución con el fin de convertirlo en un problema de optimización. Las LMI's surgieron de la teoría de la estabilidad de Lyapunov, a través de la definición de una ecuación candidata cuadrática del estado [Boyd et al., 1994].

$$v(\dot{x}(t)) = x(t)^T P x(t) \quad (3.11)$$

Pero esto se lograría sólo si existía una matriz P que cumpliera lo siguiente:

Teorema: El sistema (3.6) sera estable si y solo si existe una matriz P simetrica, definida positiva tal que satisfaga (3.12)

$$A^t P + P A < 0 \quad (3.12)$$

Una desigualdad matricial es una restricción convexa expresada usualmente de la forma.

$$F(x) = F_0 + \sum_{i=1}^m x_i f_i > 0 \quad (3.13)$$

Donde $x_i \in R^m$, $F_i \in R^{n \times n}$. Lo que quiere decir esta desigualdad es que $F(x)$ es una matriz definida positiva tal que;

$$z^T F(x) z > 0, \forall z \neq 0, z \in R^n \quad (3.14)$$

Una de las características de la matriz es que es una matriz simétrica, además de que $F_i, i = 0, 1, \dots, m$ y finalmente es una matriz fija y los vectores x es la variable. La matriz $f(x)$ es una función afín a los elementos de x .

3.3. Conclusión

En este capítulo se presentaron los conceptos fundamentales que permiten comprender tanto el caso de estudio que se abordará en el capítulo siguiente, como la técnica y los elementos necesarios para entender el tipo de observador que se empleará en la detección de fallas. Asimismo, se explicó el funcionamiento de los filtros utilizados para la mitigación de armónicos y su comportamiento cuando entran en resonancia con alguna corriente armónica. De igual manera, se abordaron las Desigualdades Lineales Matriciales (LMI), las cuales constituyen una técnica para determinar la ganancia necesaria que garantice la convergencia del observador de estados hacia la estabilidad.

Capítulo 4

Diseño de esquema de detección de fallas en filtros armónicos

4.1. Introducción

Existen diversas configuraciones de filtros pasivos diseñados para la mitigación de armónicos en sistemas eléctricos, cada una con características y aplicaciones particulares que permiten optimizar su desempeño según las condiciones de la red. Sin embargo, la eficacia de estos filtros puede verse comprometida si alguno de sus componentes experimenta variaciones respecto a sus parámetros nominales, ya sea por envejecimiento, fallas o condiciones de operación adversas. En esta tesis se analiza una configuración donde el filtro se coloca en paralelo a las corrientes que entran al circuito, con el objetivo de evaluar su comportamiento ante posibles alteraciones en sus elementos constitutivos, lo que permitirá comprender su impacto en la atenuación de armónicos y en la estabilidad del sistema.

4.2. Modelo matemático

El problema por resolver es detectar fallas en un filtro pasivo utilizado para mitigar armónicos en un sistema eléctrico. Este filtro se encuentra conectado a un modelo simplificado de una red eléctrica, el cual está representado como una fuente de corriente, que a su vez está siendo afectada por una corriente armónica contaminante. El circuito

bajo análisis está compuesto de la siguiente manera: una fuente de corriente, representada por un equivalente de Norton [Alexander and Sadiku, 2013], con una rama en paralelo que contiene el filtro pasivo, el cual está conformado por un inductor y un capacitor conectados en serie. Paralelo a este filtro se encuentra la fuente de corriente armónica que actúa como la fuente contaminante. En el funcionamiento de los filtros pasivos, pueden surgir fallas que alteren el comportamiento de la corriente armónica, afectando su correcto desempeño y provocando un aumento en la magnitud de la distorsión armónica. Dichas fallas pueden ocurrir en ambos componentes principales el inductor y el capacitor, causando variaciones en los parámetros del sistema y resultando en la pérdida de resonancia.

A continuación se describe el desarrollo para obtener el modelo matemático del filtro pasivo.

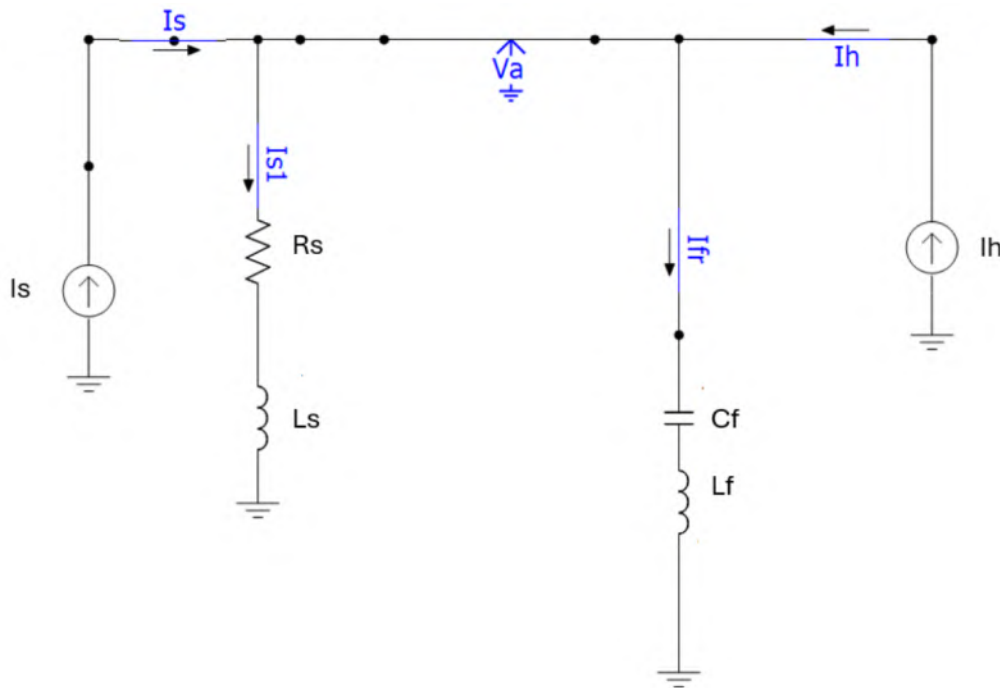


Figura 4.1: Caso de estudio

Para ello se proponen tres variables de estado

- Voltaje en el capacitor del filtro $x_1(t) = v_{cf}(t)$
- Corriente en el inductor del filtro $x_2(t) = i_{fr}(t)$

- Corriente en el inductor del equivalente de Norton de la fuente $x_3(t) = i_{s1}(t)$

Donde

- V_{cf} = Voltaje en el capacitor.
- I_{fr} = Corriente en el filtro.
- C_f = Capacitancia en el filtro.
- I_{s1} = Corriente en el inductor del equivalente de Norton.
- R_s = Resistencia del equivalente de Norton.
- L_s = Inductancia del equivalente de Norton.
- L_f = Inductancia de la bobina del filtro.
- I_s = Corriente de la fuente.
- I_h = Corriente contaminante armonica

Aplicando la ley de voltajes de kirchoff al circuito de la Figura 4.1.

$$V_a = V_{RS} + V_{LS} = (I_{s1})(R_s) + (L_s)\left(\frac{dI_{s1}}{dt}\right) \quad (4.1)$$

También;

$$V_a = V_{cf} + V_{Lf} = V_{cf} + (L_f)\left(\frac{dI_{fr}}{dt}\right) \quad (4.2)$$

$$I_{fr} = I_{cf} = (C_f)\left(\frac{dV_{cf}}{dt}\right) \quad (4.3)$$

asi,

$$\left(\frac{dV_{cf}}{dt}\right) = \frac{I_{fr}}{C_f} \quad (4.4)$$

Aplicando ley de corrientes

$$I_s + I_h = I_{s1} + I_{fr} \quad (4.5)$$

Despejando I_{s1}

$$I_{s1} = I_s + I_h - I_{fr} \quad (4.6)$$

Derivando y haciendo $\frac{dI_{S1}}{dt} = \dot{I}_{s1}$

$$\dot{I}_{s1} = \dot{I}_S + \dot{I}_h - \dot{I}_{fr} \quad (4.7)$$

También despejando I_{fr} de 4.5

$$I_{fr} = I_S + I_h - I_{S1} \quad (4.8)$$

Y derivando

$$\dot{I}_{fr} = \dot{I}_S + \dot{I}_h - \dot{I}_{s1} \quad (4.9)$$

Si sabemos que:

$$(I_{S1})(R_S) + (L_S)(\dot{I}_{S1}) = V_{Cf} + (L_f)(\dot{I}_{fr}) \quad (4.10)$$

$$(L_S)(\dot{I}_{S1}) = V_{Cf} + (L_f)(\dot{I}_S + \dot{I}_h - \dot{I}_{s1}) - (I_{S1})(R_S) \quad (4.11)$$

$$(\dot{I}_{S1})(L_S + L_f) = -(I_{S1})(R_S) + V_{Cf} + (L_f)(\dot{I}_S + \dot{I}_h) \quad (4.12)$$

$$(\dot{I}_{S1}) = -\frac{(I_{S1})(R_S)}{(L_S + L_f)} + \frac{(V_{Cf})}{(L_S + L_f)} + \frac{(L_f)}{(L_S + L_f)}(\dot{I}_S + \dot{I}_h) \quad (4.13)$$

Usando (4.9)

$$\dot{I}_{fr} = \frac{(I_{S1})(R_S)}{(L_S + L_f)} - \frac{(V_{Cf})}{(L_S + L_f)} - \frac{(L_f)}{(L_S + L_f)}(\dot{I}_S + \dot{I}_h) + \dot{I}_S + \dot{I}_h \quad (4.14)$$

$$\dot{I}_{fr} = \frac{(I_{S1})(R_S)}{(L_S + L_f)} - \frac{(V_{Cf})}{(L_S + L_f)} + (\dot{I}_S + \dot{I}_h) \left[1 - \frac{(L_f)}{(L_S + L_f)} \right] \quad (4.15)$$

Si:

$$I_s = I_s \text{ máx}[\text{sen}(2\pi ft)] \quad (4.16)$$

donde $I_s \text{ máx}$ es el valor máximo o pico de la corriente sinusoidal

$$\dot{I}_S = I_s \text{ máx}[\cos(2\pi ft)(2\pi ft)] \quad (4.17)$$

$$I_h = I_h \text{ máx}[\text{sen}(2\pi nft)] \quad (4.18)$$

Donde $I_h \text{ máx}$ es la amplitud máxima (de pico) de la corriente del armónico h

$$\dot{I}_h = I_h \text{ máx}[\cos(2\pi nft)(2\pi nft)] \quad (4.19)$$

$$\dot{I}_S + \dot{I}_h = I_s \text{ máx}[\cos(2\pi ft)(2\pi ft)] + I_h \text{ máx}[\cos(2\pi nft)(2\pi nft)] \quad (4.20)$$

Sea

$$\dot{I}_S + \dot{I}_h = u \quad (4.21)$$

Donde:

f =frecuencia fundamental

t =tiempo

n =número de corriente armónica

Reescribiendo en espacio de estado:

$$\dot{x}_1(t) = \frac{1}{C_f} x_2(t) \quad (4.22)$$

$$\dot{x}_2(t) = \frac{(R_S)}{(L_S + L_f)} x_3(t) - \frac{1}{(L_S + L_f)} x_1(t) + \left[1 - \frac{(L_f)}{(L_S + L_f)}\right] u \quad (4.23)$$

$$\dot{x}_3(t) = -\frac{(R_S)}{(L_S + L_f)} x_3(t) + \frac{1}{(L_S + L_f)} x_1(t) + \left[\frac{(L_f)}{(L_S + L_f)}\right] u \quad (4.24)$$

El modelo en espacio de estados para el filtro pasivo se representa por (4.25):

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{C_f} & 0 \\ -\frac{1}{(L_S + L_f)} & 0 & \frac{(R_S)}{(L_S + L_f)} \\ \frac{1}{(L_S + L_f)} & 0 & -\frac{(R_S)}{(L_S + L_f)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 - \frac{(L_f)}{(L_S + L_f)} \\ \frac{(L_f)}{(L_S + L_f)} \end{bmatrix} u \quad (4.25)$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

Una vez obtenido el modelo del filtro se requiere diseñar el observador para el proceso de detección de fallas.

Diseño de observadores

Dada la problemática que se tiene, se requiere de diseñar un observador utilizando la redundancia analítica. La redundancia analítica hace uso de un modelo matemático del proceso monitoreado y, por lo tanto, a menudo se denomina enfoque basado en modelos para la detección de fallas. En la redundancia analítica, se verifica la dinámica del sistema comparando las señales medidas con las predicciones del modelo matemático. Esta comparación se hace observando las diferencias entre las señales reales y las estimadas por el modelo. La mayor ventaja del enfoque basado en modelos es que no se necesitan componentes de hardware adicionales para realizar un algoritmo FDI [Chen and Patton, 2012].

Tomando en cuenta que nuestro modelo matemático es lineal, observable e invariable en el tiempo, la estructura del observador basado en modos deslizantes con la cual se generara la señal de residuos es descrita por (4.27) y (4.28):

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L(y(t) - \hat{y}(t)) + \varphi(t) \quad (4.27)$$

$$\hat{y}(t) = C\hat{x}(t) \quad (4.28)$$

Donde:

$$\varphi(t) = k[\text{sign}(Pe(t))] \quad (4.29)$$

$$e(t) = x(t) - \hat{x}(t) \quad (4.30)$$

donde P es una matriz definida positiva y $k > 0$. Las ganancias L (son las ganancias del observador) y la matriz P se calculan mediante técnicas basadas en LMI considerando el concepto de estabilidad cuadrática [Khalil, 1996]. Para este caso, se propuso la función cuadrática del error candidata de Lyapunov, definida positiva:

$$V(e(t)) = e(t)^T P e(t) \quad (4.31)$$

Para el análisis de estabilidad y diseño del observador se busca que $\dot{V}(e(t)) < 0$. Desarrollando

$$\dot{V}(e(t)) = \dot{e}(t)^T P e(t) + e(t)^T P \dot{e}(t) \quad (4.32)$$

Donde la dinámica del error es:

$$\dot{e}(t) = \dot{x}(t) - \hat{\dot{x}}(t) = (A - LC)e(t) - \varphi \quad (4.33)$$

Sustituyendo en (4.32)

$$\dot{v}(e(t)) = [(A - LC)e(t)]^T P e(t) + e(t)^T P [(A - LC)e(t)] - \phi \quad (4.34)$$

$$\dot{v}(e(t)) = e(t)^T (A - LC)^T P e(t) + e(t)^T P (A - LC)e - \phi \quad (4.35)$$

$$\dot{v} = e(t)^T [(A - LC)^T P + P(A - LC)] e(t) - \phi \quad (4.36)$$

para que $\dot{v} < 0$ se requiere que $[(A - LC)^T P + P(A - LC)] < 0$

$$A^T P - C^T L^T P + PA - PLC < 0 \quad (4.37)$$

Haciendo un cambio de variable $N = PL$ tal que $L = P^{-1}N$

$$A^T P + PA - C^T N^T - NC < 0 \quad (4.38)$$

Es posible utilizar para la LMI (4.38) un parametro de diseño conocido como velocidad de convergencia α [Tanaka and Wang, 2004], tal que;

$$A^T P + PA - C^T N^T - NC + 2\alpha P < 0 \quad (4.39)$$

donde $\alpha > 0$.

El error de estado sera asintoticamente estable si y sólo si se satisfacen la desigualdad (4.39).

4.2.1. Esquema de detección de fallas

El esquema de detección de fallas propuesto en este trabajo se basa en un enfoque pasivo, el cual ha sido implementado de manera fuera de línea durante la fase experimental. Sin embargo, el procedimiento propuesto tiene el potencial de ser adaptado para su ejecución en línea.

Para llevar a cabo la detección, se emplea un modelo analítico del sistema eléctrico, específicamente del filtro pasivo utilizado para la mitigación de armónicos. Este modelo se deriva a partir de las ecuaciones diferenciales que describen el comportamiento dinámico del circuito en condiciones normales de operación.

La técnica de detección se fundamenta en el análisis de residuos, los cuales son generados mediante el uso de observadores con modos deslizantes. Estos observadores permiten estimar el comportamiento nominal del sistema a partir de las entradas y salidas disponibles. La comparación entre las salidas estimadas y las reales permite obtener residuos, cuya dinámica se ve alterada ante la presencia de fallas en los elementos del filtro.

Las variables monitorizadas son las corrientes del filtro y del sistema, las cuales presentan variaciones características cuando alguno de los componentes del filtro (como inductores o capacitores) experimenta desviaciones en sus parámetros nominales. Asimismo, se analiza el efecto que estas fallas provocan sobre el índice de distorsión armónica total (THD), como un indicador adicional del deterioro del desempeño del sistema.

Mediante este esquema se logra realizar tanto la detección de fallas, al identificar desviaciones significativas en los residuos, como el aislamiento, al asociar la forma y comportamiento de dichos residuos con fallas específicas en determinados componentes del filtro.

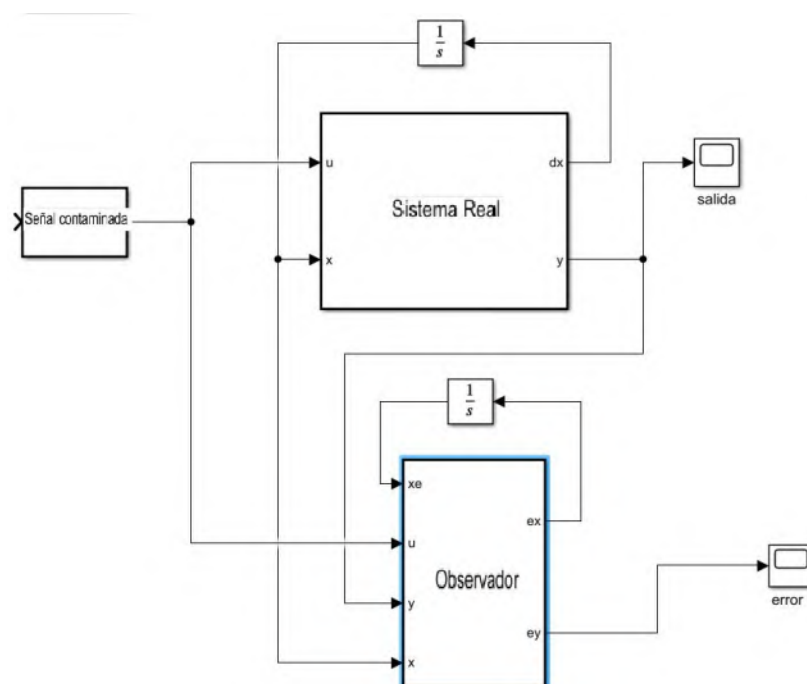


Figura 4.2: Diagrama de bloques, que representa la simulación del filtro pasivo en falla y el observador.

4.2.2. Conclusiones

En este capítulo se presentó el caso de estudio correspondiente al sistema de filtrado pasivo utilizado para la mitigación de armónicos en sistemas eléctricos, mismo que sirvió como base para el desarrollo de una metodología de detección de fallas. Se estableció un modelo matemático detallado del filtro, lo cual permitió comprender su comportamiento dinámico bajo condiciones nominales y sirvió como punto de partida para la implementación de herramientas de detección.

A partir de dicho modelo, se diseñó un esquema de detección de fallas con enfoque pasivo, utilizando observadores con modos deslizantes, los cuales permiten estimar las variables internas del sistema y generar residuos que reflejan posibles alteraciones en los parámetros de los componentes del filtro.

El esquema propuesto permite realizar la detección y aislamiento de fallas al analizar el comportamiento de las corrientes del sistema y del filtro, así como su efecto en el índice de distorsión armónica total (THD). Esta estrategia representa una solución viable y robusta para identificar fallas en etapas tempranas, lo que puede contribuir significativamente a la mejora de la confiabilidad y eficiencia de sistemas eléctricos que emplean filtros pasivos.

Con esta base teórica y metodológica, en el siguiente capítulo se procederá a validar el funcionamiento del esquema mediante simulaciones, evaluando su desempeño ante diferentes escenarios de falla.

Capítulo 5

Resultados de la implementación del esquema de detección de fallas

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir del desarrollo y análisis del modelo matemático del filtro pasivo, así como la implementación de técnicas de detección de fallas mediante observadores de estados. El propósito principal es validar la eficacia del modelo propuesto y evaluar el desempeño de diferentes esquemas de estimación frente a alteraciones en los parámetros del sistema.

Inicialmente, se realiza una comparación entre el modelo matemático y un modelo equivalente simulado en PSCAD, con el objetivo de demostrar la validez del enfoque analítico. Posteriormente, se estudia el comportamiento del sistema ante desviaciones en los parámetros nominales, analizando su impacto en el contenido armónico y en el porcentaje de distorsión.

A continuación, se implementa un observador de Luenberger para estimar los estados del sistema y detectar fallas, considerando distintos escenarios como condiciones iniciales diferentes de cero y variaciones paramétricas. Posteriormente, se repiten las mismas pruebas utilizando un observador de modos deslizantes, con el fin de realizar una comparación detallada del desempeño de ambos enfoques.

Finalmente, se incluye una sección de análisis comparativo, donde se discuten los principales resultados en términos de precisión, robustez, tiempo de detección y sensibili-

dad. Esta evaluación permite establecer conclusiones relevantes sobre la aplicabilidad de los observadores utilizados para tareas de detección de fallas en filtros pasivos.

5.1. Validación del Modelo Matemático del Filtro Pasivo

Para garantizar una comparación justa entre plataformas, se empleó el mismo conjunto de condiciones y señales de excitación en ambas simulaciones. En particular, se utilizó un integrador de *paso fijo* con paso de muestreo $\Delta t = 10 \mu s$ ($f_s = 100$ kHz) y una duración de simulación de $T_{obs} = 0.5$ s en *MATLAB/Simulink* y en PSCAD. Las condiciones iniciales se establecieron en cero para la validación nominal. Antes de la comparación, las señales se sincronizaron temporalmente y se verificó la consistencia de unidades. Para evitar sesgos por transitorios iniciales, el análisis numérico (RMS, picos, y, cuando aplica, THD) se efectuó en la ventana $[t_0, t_f] = [0.05 \text{ s}, 0.50 \text{ s}]$. Las métricas reportadas incluyen valores RMS, amplitudes pico y el error relativo entre plataformas. Con esta metodología, la validación se centra en la equivalencia dinámica de las formas de onda y magnitudes clave bajo condiciones nominales.

5.1.1. Simulación del Modelo en MATLAB/SIMULINK-PSCAD

En el capítulo anterior se presentó el desarrollo del modelo matemático que será utilizado para analizar el comportamiento de un filtro pasivo bajo distintas condiciones operativas. Como primer paso en la validación de dicho modelo, se llevaron a cabo simulaciones destinadas a observar su respuesta bajo condiciones nominales, es decir, sin alteraciones en los parámetros del sistema, y con el filtro sintonizado en resonancia para lograr una adecuada atenuación de armónicos presentes en la señal.

PSCAD (Power Systems Computer Aided Design) es un software especializado para modelar y simular sistemas de potencia en el dominio del tiempo. Permite construir redes eléctricas con componentes pasivos y activos, estudiar transitorios electromagnéticos, armónicos/THD, eventos de falla y estrategias de control. Es ampliamente usado para validar modelos y analizar el comportamiento dinámico de sistemas antes de implementarlos en hardware.

Los parámetros utilizados para esta primera prueba se detallan a continuación:

- Resistencia del sistema (R_S): 1Ω
- Inductancia del sistema (L_S): 0.01Ω
- Capacitor del filtro (C_f): $19.22\mu F$
- Inductor del filtro (L_f): $0.0406H$
- Fuente de corriente del sistema: 17 A
- Fuente de corriente armonica: tercera armonica, 5 A

Con estos valores, se realizaron simulaciones tanto en MATLAB/Simulink como en PSCAD, con el fin de comparar los resultados y verificar que el modelo matemático reproduce adecuadamente el comportamiento del sistema físico. Las siguientes gráficas muestran una comparación entre las principales variables del sistema obtenidas en ambos entornos. La Figura 5.1 muestra la evolución del voltaje de la fuente en el modelo matemático implementado en Simulink, mientras que la Figura 5.2 presenta el resultado equivalente obtenido en PSCAD.

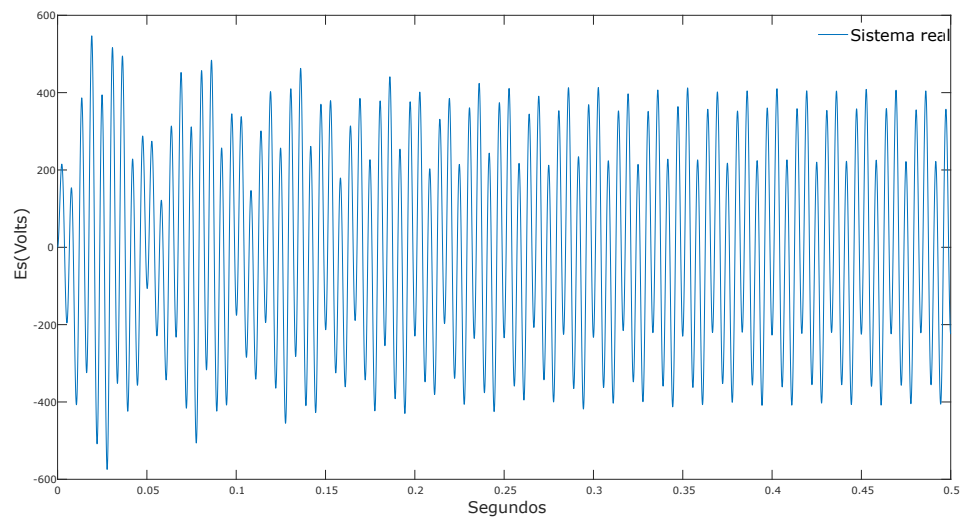


Figura 5.1: Caso 1: Voltaje de la fuente en Simulink



Figura 5.2: Caso 1: Voltaje de la fuente en PSCAD

En cuanto a la corriente del filtro, la Figura 5.3 presenta el resultado obtenido con el modelo matemático en Simulink, y la Figura 5.4 muestra la correlativa en PSCAD.

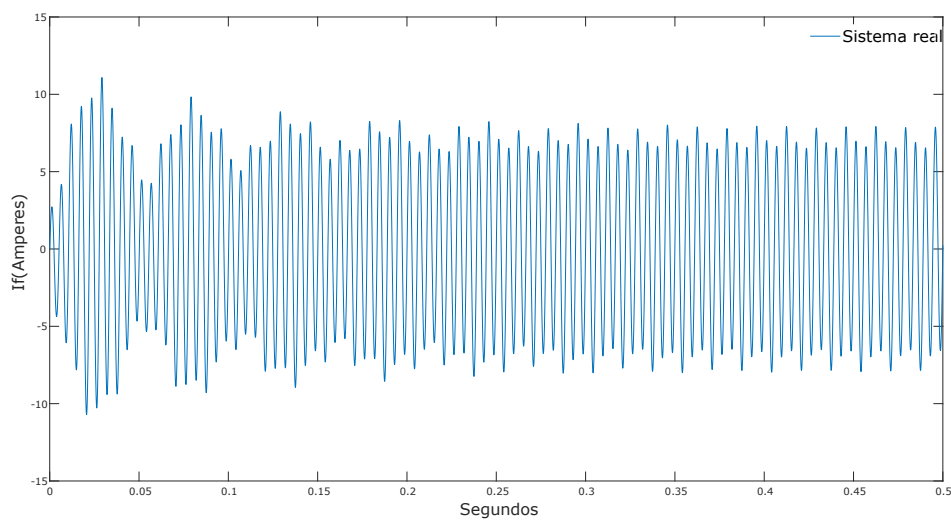


Figura 5.3: Caso 1: Corriente en el filtro en Simulink

Finalmente, las Figuras 5.5 y 5.6 comparan la corriente de salida del sistema en ambos entornos, lo que permite corroborar la consistencia entre el modelo matemático y la simulación en PSCAD.

Es fácil observar de los resultados anteriores una alta concordancia entre ambas plataformas de simulación, lo cual valida el modelo matemático propuesto. Las señales

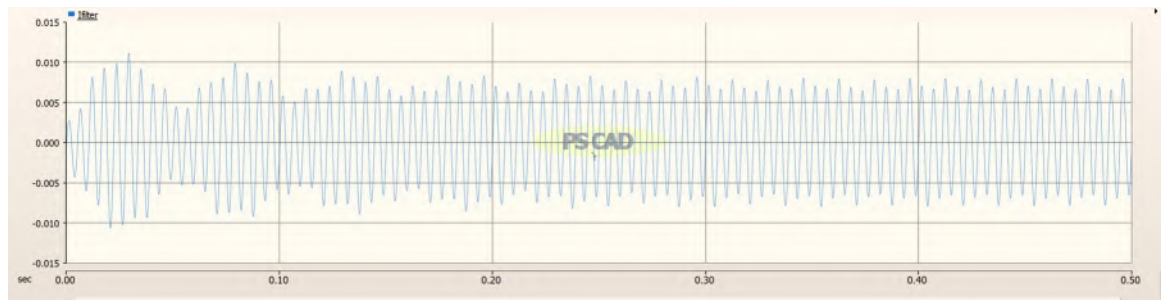


Figura 5.4: Caso 1: Corriente en el filtro en PSCAD

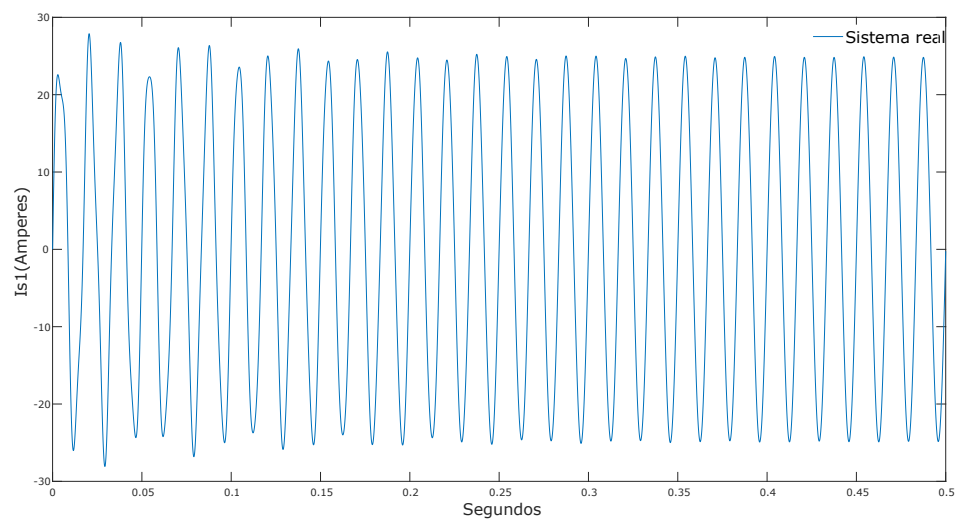


Figura 5.5: Caso 1: Corriente de salida en Simulink

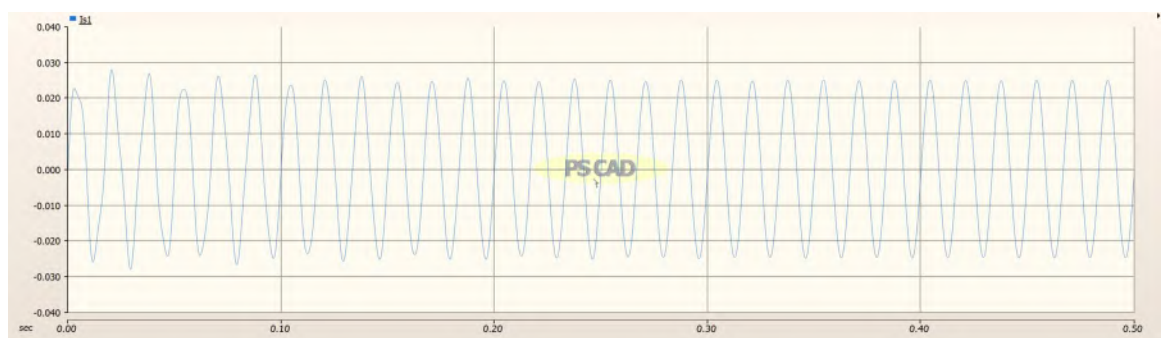


Figura 5.6: Caso 1: Corriente de salida en PSCAD

de voltaje y corriente presentan formas de onda equivalentes en magnitud y frecuencia, reflejando adecuadamente la respuesta del sistema real. A partir de esta validación inicial, se procede al análisis de los siguientes escenarios de estudio, en los cuales se evaluará el comportamiento del modelo ante variaciones en los parámetros nominales y la presencia de fallas.

5.2. Análisis ante Variaciones en los Parámetros Nominales

Con base en los resultados obtenidos en la sección anterior, se procede a realizar un análisis más detallado de la señal de salida del sistema. Esta etapa tiene como objetivo evaluar el impacto que generan variaciones en los valores nominales de los componentes del filtro pasivo sobre el porcentaje de distorsión armónica total (THD, por sus siglas en inglés) de la corriente de salida.

Las pruebas se llevarán a cabo empleando tanto el modelo matemático implementado en MATLAB/Simulink como el modelo físico-simulativo desarrollado en PSCAD. En ambos casos, se extraerán los datos de las señales y se calculará el THD empleando la ecuación (2.4), con el propósito de verificar la consistencia de resultados entre las dos plataformas.

5.2.1. Caso 1- Condiciones nominales

En este primer caso se utiliza el mismo conjunto de parámetros del análisis anterior, sin introducir alteraciones en los valores nominales. El resultado obtenido en PSCAD se muestra en la Figura 5.7.

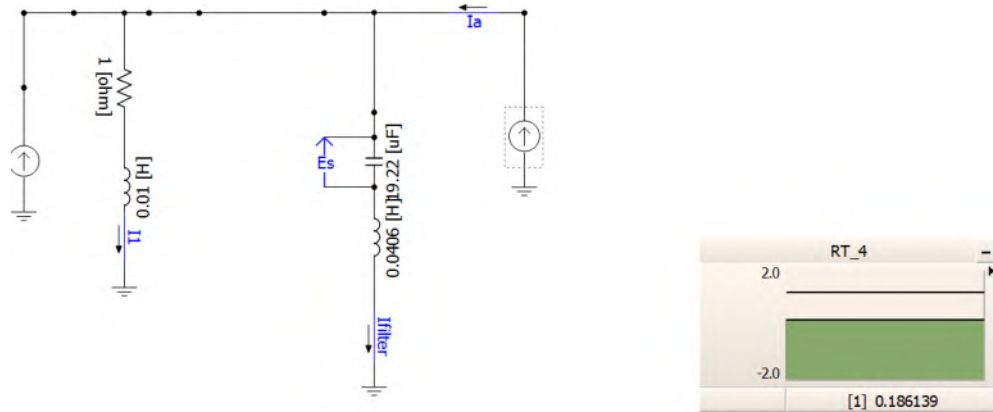


Figura 5.7: Porcentaje de distorsión armónica Caso 1

A partir de los datos obtenidos en Simulink y aplicando la ecuación (2.4), se calculó un valor de 0.2030 % de distorsión armónica. Se puede observar un error de 0.0169 %

5.2.2. Caso 2 - Variación en el valor del capacitor del filtro

En este escenario, se simula una falla en el filtro modificando el valor nominal de la capacitancia. Los parámetros empleados son:

- Resistencia del sistema (R_S): 1Ω
- Inductancia del sistema (L_S): 0.01Ω
- Capacitor del filtro (C_f): $21\mu F$
- Inductor del filtro (L_f): $0.0406H$
- Fuente de corriente del sistema: 17 A
- Fuente de corriente armónica: tercera armónica, 5 A

El resultado obtenido en PSCAD se presenta en la Figura 5.8.

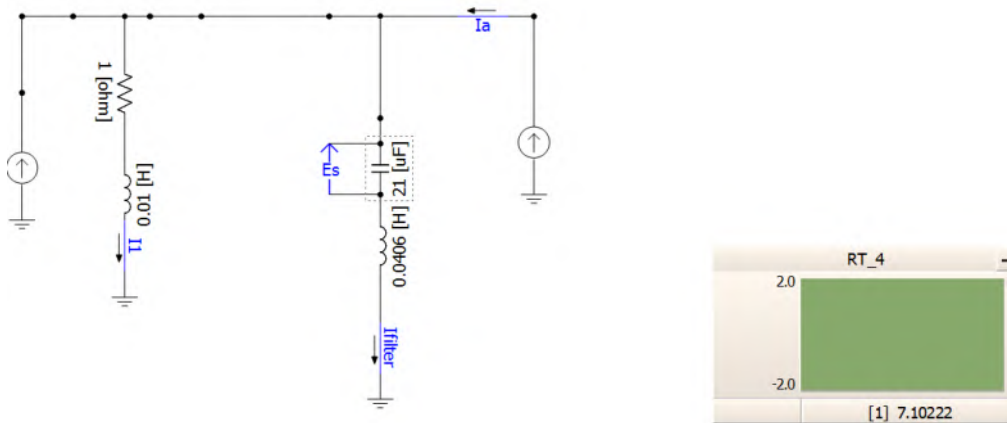


Figura 5.8: Porcentaje de distorsión armónica Caso 2

En el modelo de Simulink, aplicando nuevamente la ecuación (2.4), se obtuvo un valor de 7.0841 % de distorsión armónica, se puede apreciar un error de diferencia de 0.0181 % entre ambas plataformas.

5.2.3. Adición de una segunda fuente armónica

En este último caso, se mantiene la falla del caso anterior y se añade una segunda fuente de corriente armónica correspondiente a la 5ta armónica, con una amplitud de 2A. El resultado obtenido en PSCAD se ilustra en la Figura 5.9.

A partir del modelo de Simulink, el cálculo de la distorsión arroja un valor de 10.8980 %. Se puede apreciar un error de 0.0238 %.

Los resultados muestran que el modelo matemático es capaz de reproducir con alta precisión el comportamiento real del sistema, incluso bajo condiciones de falla y con la presencia de fuentes adicionales de armónicos. Esto valida su uso como herramienta de análisis para predecir el impacto de variaciones en los parámetros del filtro y para realizar

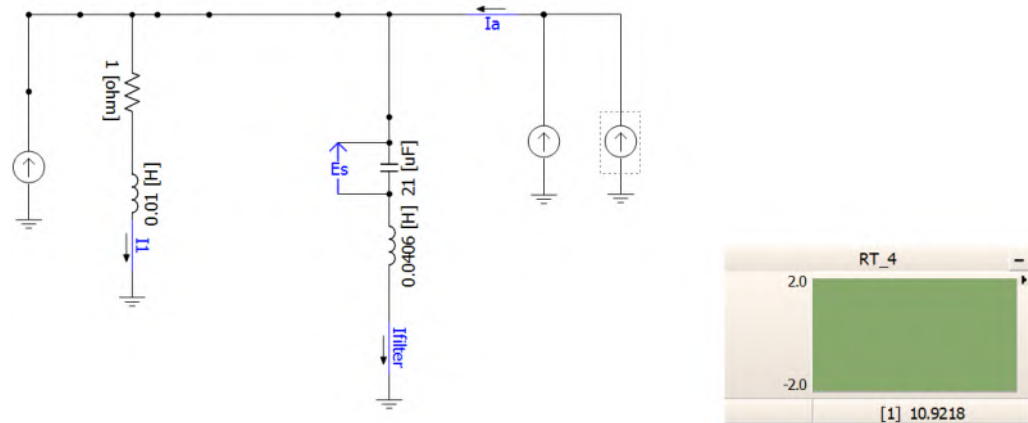


Figura 5.9: Porcentaje de distorsión armónica Caso 3

estudios orientados a la detección de fallas mediante observadores.

5.3. Implementación del Observador de Luenberger

En esta sección se analiza el desempeño del observador de Luenberger bajo distintas condiciones de operación, con el objetivo de evaluar su capacidad de estimación y su robustez frente a alteraciones en los parámetros nominales del filtro y variaciones en las condiciones iniciales del sistema. Estas pruebas permiten identificar el efecto que tienen los cambios en los valores de los componentes y en el estado inicial sobre la precisión de la estimación, la velocidad de convergencia y la estabilidad de la respuesta. Para este fin, se diseñaron tres escenarios representativos: (1) condiciones iniciales distintas a 0, (2) alteración en el valor de uno de los componentes del filtro, y (3) alteración combinada con condiciones iniciales distintas de cero. Cada escenario fue simulado tanto en MATLAB/Simulink y los resultados fueron analizados para evaluar el comportamiento del observador.

Casos de estudio y parámetros. La Tabla 5.1 resume los parámetros modificados en

cada caso, los valores nominales y alterados, así como las condiciones iniciales empleadas. El orden de los casos obedece al tipo de perturbación analizada y no implica una jerarquía de complejidad.

Caso	Parametros alterados	Valor nominal	Valor alterado	Condiciones iniciales
1	Ninguno	-	-	[1000, 20, 60]
2	Capacitancia del filtro (C_f)	19.22 μF	16.77 μF	cero
3	Inductancia del filtro (L_f) + C.I.	0.0406H	0.04266H	[1000, 25, 30]

Tabla 5.1: Parámetros de simulación para los tres casos de estudio del observador de Luenberger.

Las ganancias del observador se muestran en (5.1):

$$L = 1.0e + 04 * \begin{bmatrix} 0.0001 & 2.6005 & 0.0010 \\ 2.6005 & 0.0000 & 0.0010 \\ 0.0010 & 0.0010 & -0.0019 \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

5.3.1. Caso 1 - condiciones iniciales distintas a 0

Se replica el escenario nominal de la Sección 4.1.1, pero imponiendo CI distintas de cero en el observador para evaluar su convergencia y el tamaño del error una vez alcanzado el régimen estacionario. En caso concreto, se reporta el estado $x_3(t)$ (corriente de salida).

Las CI empleadas fueron $\mathbf{x}(0) = [1000, 20, 60]^\top$. Las Figuras 5.10 y 5.11 muestran, respectivamente, la superposición *sistema real vs observador* y el error de estimación.

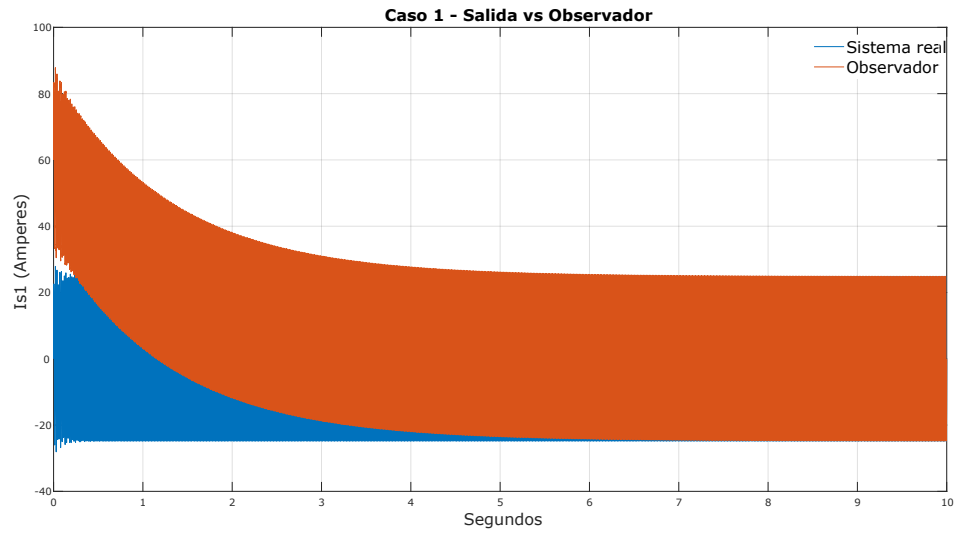


Figura 5.10: Caso 1 — Comparación sistema real vs observador (estado $x_3(t)$).

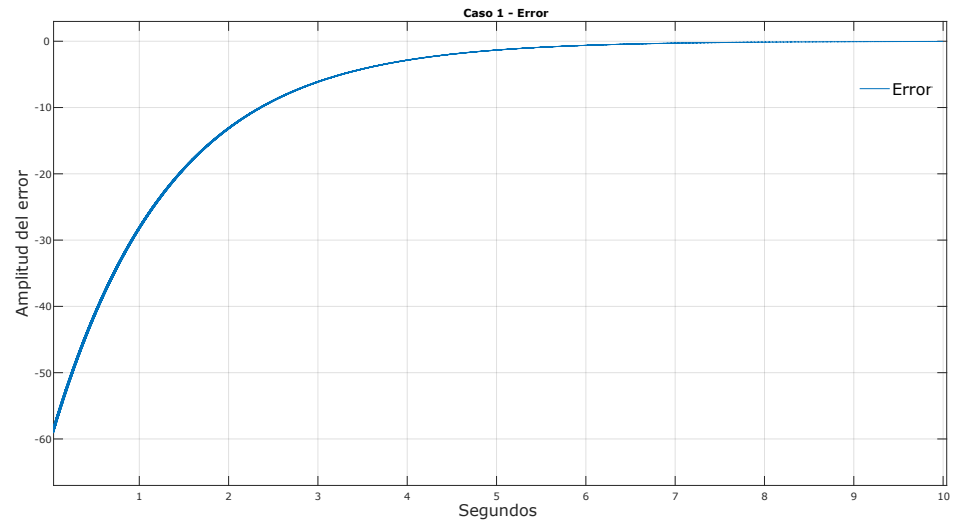


Figura 5.11: Caso 1 — Error de estimación $e(t) = y(t) - \hat{y}(t)$ para $x_3(t)$.

El observador converge hacia la salida real con un tiempo de asentamiento aproximado de 8 s, reduciendo el error a valores cercanos a cero una vez alcanzado el régimen estacionario.

5.3.2. Caso 2 — Falla en el capacitor (C_f)

Se introduce una variación del C_f del 100 % al 87.23 % de su valor (de 19.22 a 16.77 μF , equivalente a una disminución de 12.77 %), manteniendo CI nulas. Las Figuras 5.12 y 5.13 presentan la superposición *sistema vs. observador* y el error.

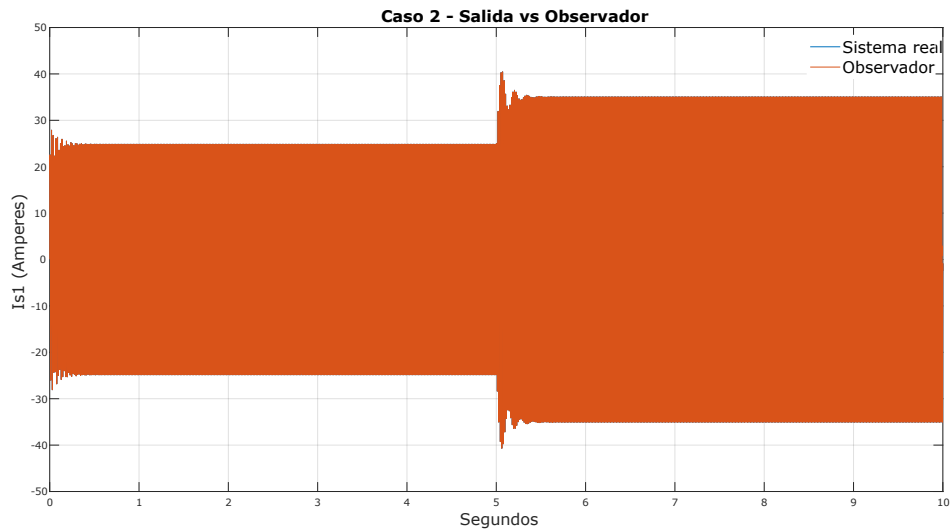


Figura 5.12: Caso 2 — Comparación sistema real vs observador bajo variación de C_f .

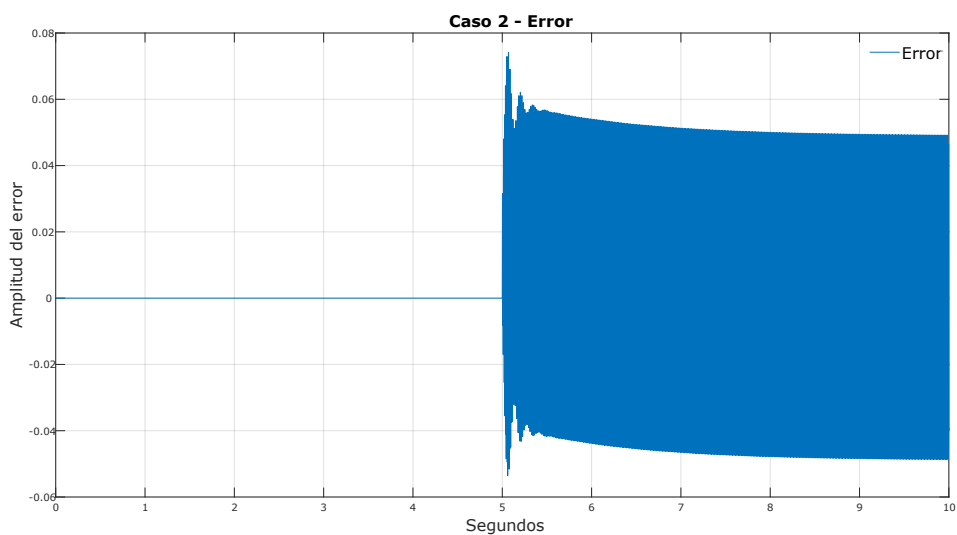


Figura 5.13: Caso 2 — Error de estimación ante variación de C_f .

A pesar del cambio paramétrico, el observador mantiene capacidad de seguimiento. El error de salida alcanza aproximadamente 0.08 A (pico), coherente con la pérdida de sintonía del filtro.

5.3.3. Caso 3 — Falla en el inductor (L_f) con condiciones iniciales distintas a cero

Se altera L_f de 0.0406 a 0.04266 H (+5%) y se imponen CI no nulas $\mathbf{x}(0) = [1000, 25, 30]^T$. La falla se aplica en $t = 15$ s para observar la respuesta transitoria y la sensibilidad del observador. Las Figuras 5.14–5.15 presentan la superposición y el error (con una vista global y una ampliación alrededor del instante de falla).

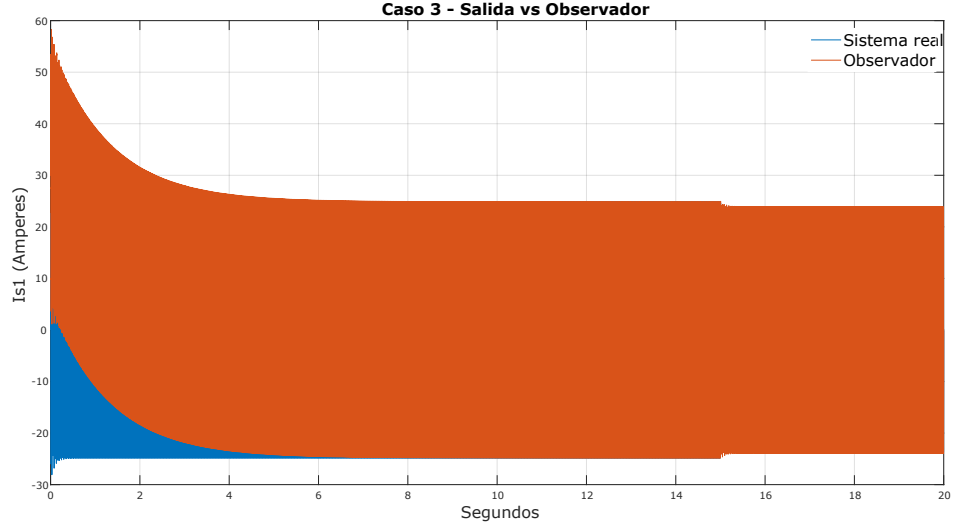


Figura 5.14: Caso 3 — Comparación sistema real vs observador con variación de L_f y condiciones iniciales no nulas.

Antes de la falla, el observador converge en ~ 8 s. Al aplicarse la variación en L_f (en $t = 15$ s), el error registra un pico cercano a 0.3 A, evidenciando sensibilidad a la alteración paramétrica, tras lo cual tiende nuevamente a estabilizarse.

Los resultados obtenidos muestran que, aunque el observador de Luenberger presenta una buena capacidad de estimación bajo condiciones nominales, su rendimiento se ve afectado ante variaciones significativas en los parámetros del filtro y en las condiciones

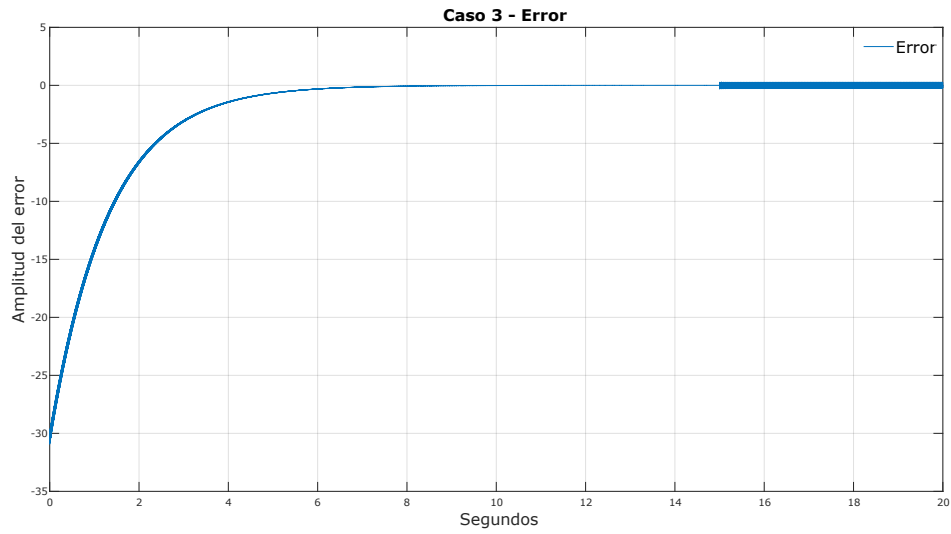


Figura 5.15: Caso 3 — Error de estimación global.

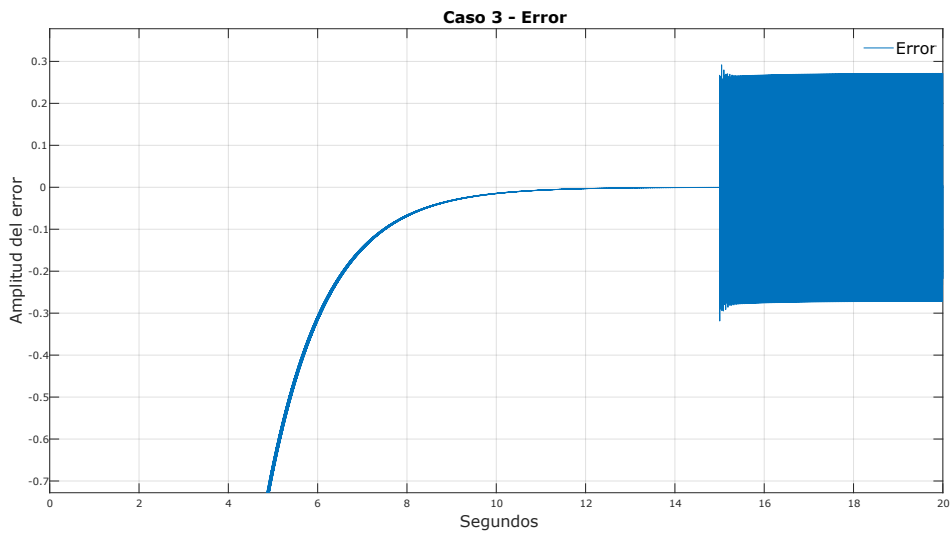


Figura 5.16: Caso 3 — Error de estimación (ampliación alrededor de $t=15$ s).

iniciales, reflejándose en mayores errores transitorios y tiempos de convergencia más largos. Esta disminución en el desempeño justifica la necesidad de explorar técnicas más robustas, como el observador con modos deslizantes, cuyo análisis se desarrollará en la siguiente sección.

5.4. Implementación del Observador de Luenberger con Modos Deslizantes

En esta sección se implementa un observador por modos deslizantes (OLMD) con el propósito de incrementar la robustez frente a incertidumbres paramétricas, perturbaciones no modeladas y variaciones en las condiciones iniciales, en comparación con el observador de Luenberger analizado en la Sección 4.3. El objetivo es mejorar la precisión de la estimación y reducir los tiempos de convergencia bajo escenarios representativos de operación y falla del filtro pasivo.

Se utilizarán los mismos casos de estudio que en la Sección 4.3, a fin de asegurar una comparación pareja entre ambos observadores y resaltar las diferencias de desempeño..

5.4.1. Caso 1 - Condiciones iniciales distintas a 0

Se replica el caso de estudio nominal, imponiendo condiciones iniciales distintas de cero en el observador para evaluar su rapidez de convergencia y la magnitud del error residual. Los resultados se muestran en las Figuras 5.17 y 5.18.

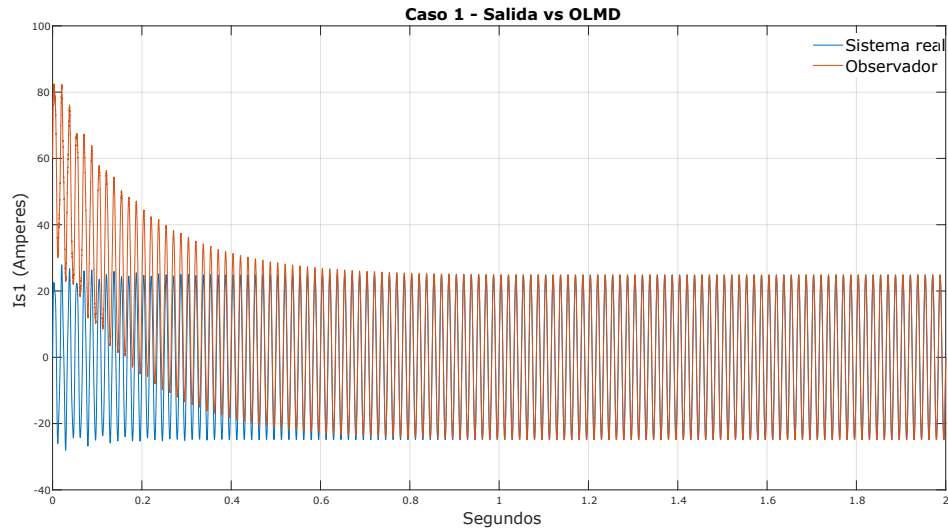


Figura 5.17: Caso 1 - Salida VS OLMD

Se introduce una variación en el capacitor del filtro para representar una falla

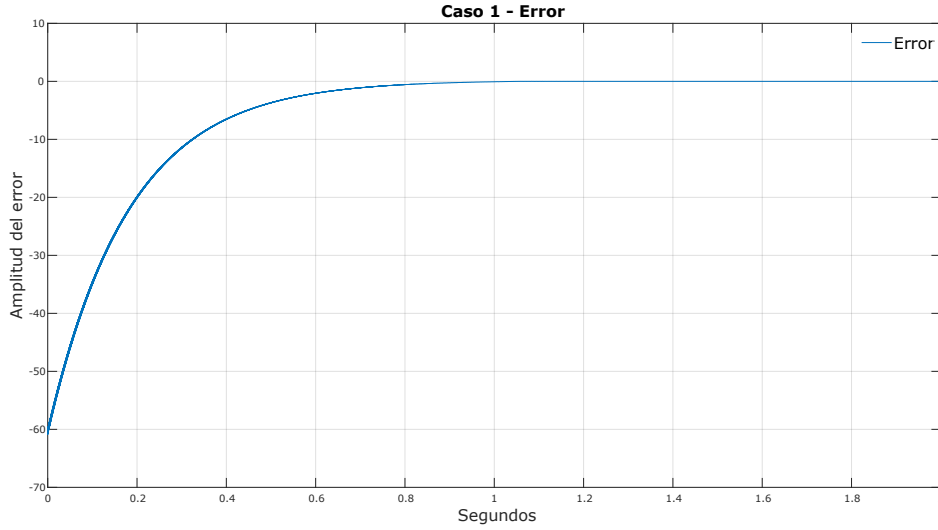


Figura 5.18: Caso 1 Error de estado $x_3(t)$

paramétrica (de $19.22 \mu\text{F}$ a $16.77 \mu\text{F}$, disminución de 12.77%), con condiciones iniciales nulas. Las Figuras 5.19 y 5.20 presentan la comparación de salidas y el error correspondiente.

5.4.2. Caso 2 - Falla en el capacitor (C_f)

Ahora se expone el comportamiento en el mismo caso pero exponiendo al sistema una falla en el capacitor que se representa en un cambio dentro de los parámetros nominales del filtro. Los resultados que se obtuvieron están expuestos en las siguientes gráficas. La Figura 5.19 muestra la diferencia que existe entre el sistema real y el observador. En la Figura 5.20 se puede observar cual es el error de $x_3(t)$.

5.4.3. Caso 3 - Falla en el inductor (L_f) con condiciones iniciales distintas a cero

Se altera el inductor del filtro (de 0.0406 a 0.04266 H, incremento de 5%) e imponen condiciones iniciales no nulas al observador. La perturbación se aplica en un instante $t = t_{\text{falla}}$ (véase el *zoom* en el error). Los resultados se ilustran en las Figuras 5.21–5.23.

Antes de la falla, el OMD converge rápidamente aún con $\text{CI} \neq 0$. Tras la variación de L_f en t_{falla} , se observa un sobrepico en el error seguido de nueva estabilización, lo que

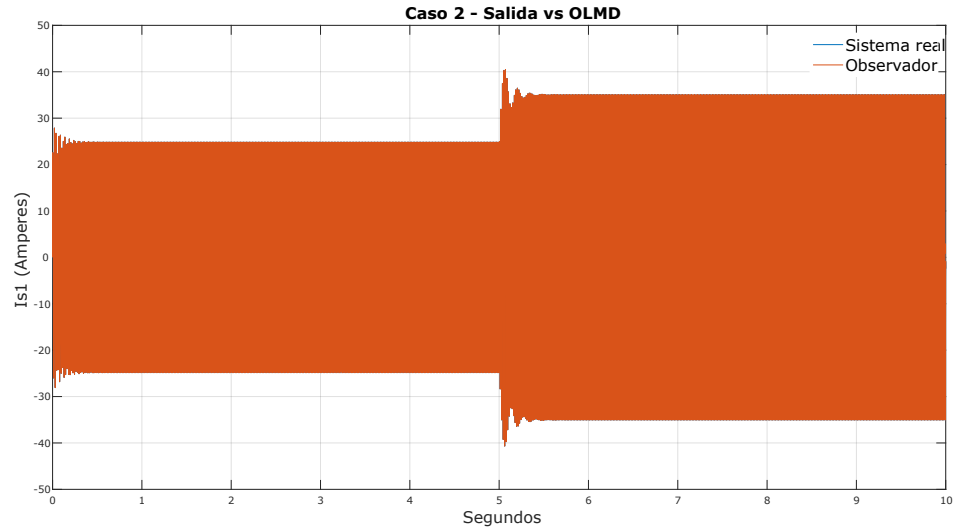
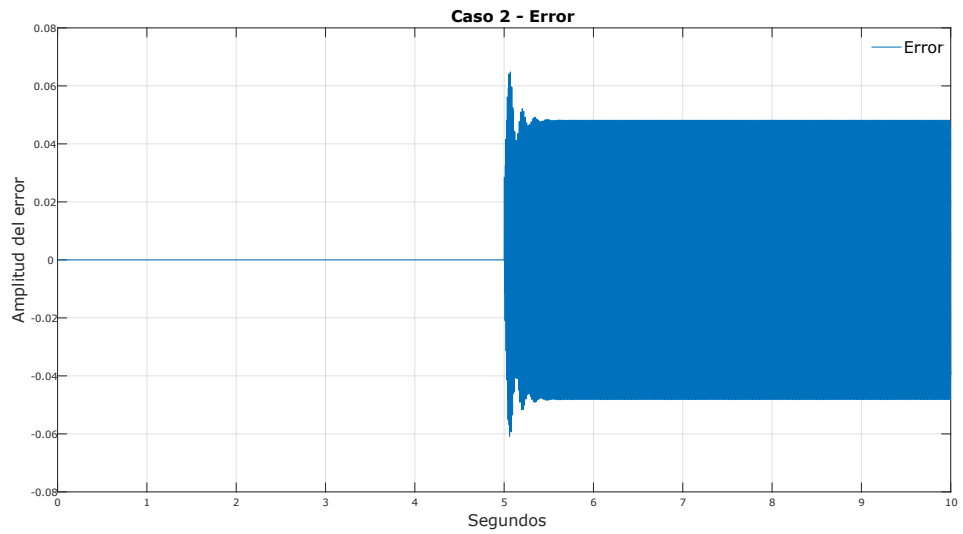


Figura 5.19: Caso 2 - Salida VS OLMD

Figura 5.20: Caso 2 - Error de estado $x_3(t)$

evidencia sensibilidad suficiente para detección y robustez frente a la alteración.

El observador por modos deslizantes mostró convergencia rápida y robustez frente a CI no nulas y variaciones paramétricas en C_f y L_f , con errores residuales reducidos en régimen y sensibilidad suficiente para propósitos de detección. En la Sección 4.5 se presenta

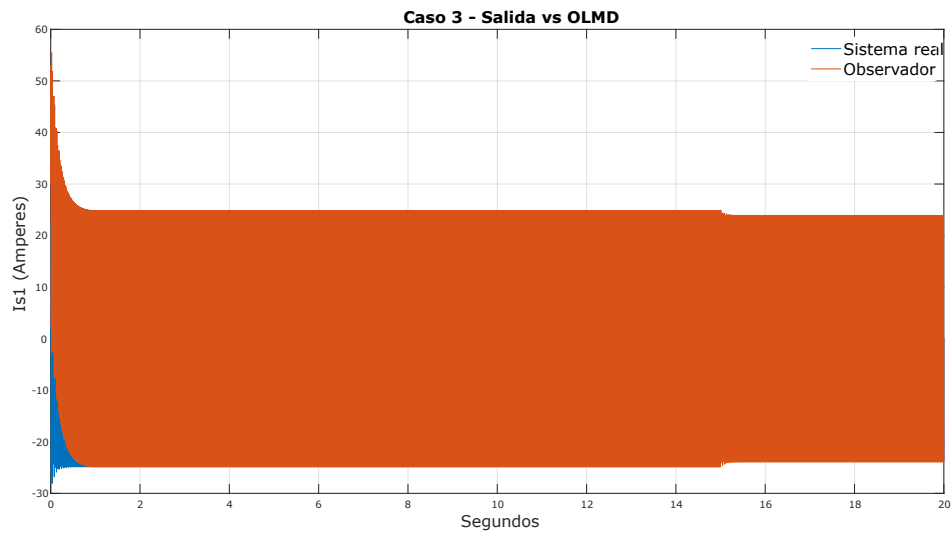
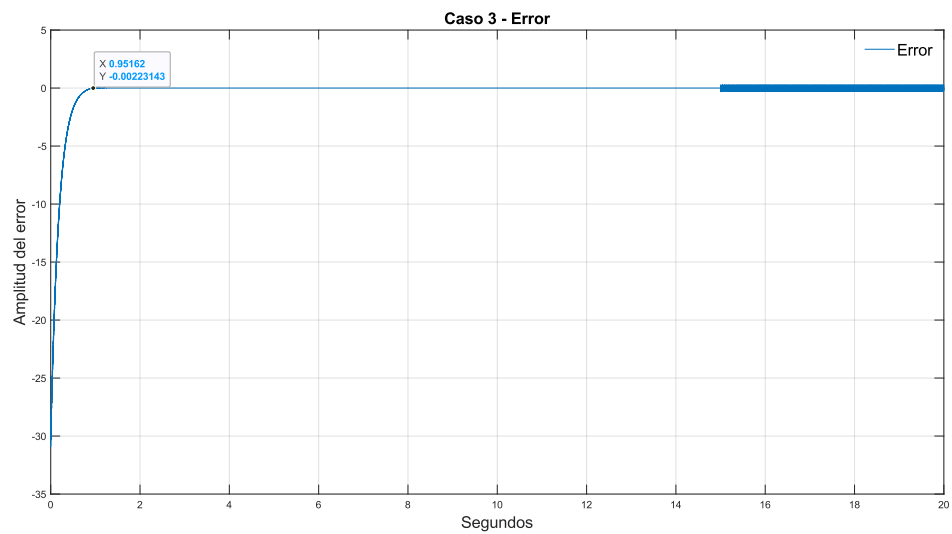


Figura 5.21: Caso 3 - Salida vs OLMD

Figura 5.22: Caso 3 - Error de estado $x_3(t)$

la comparación cuantitativa frente al observador de Luenberger.

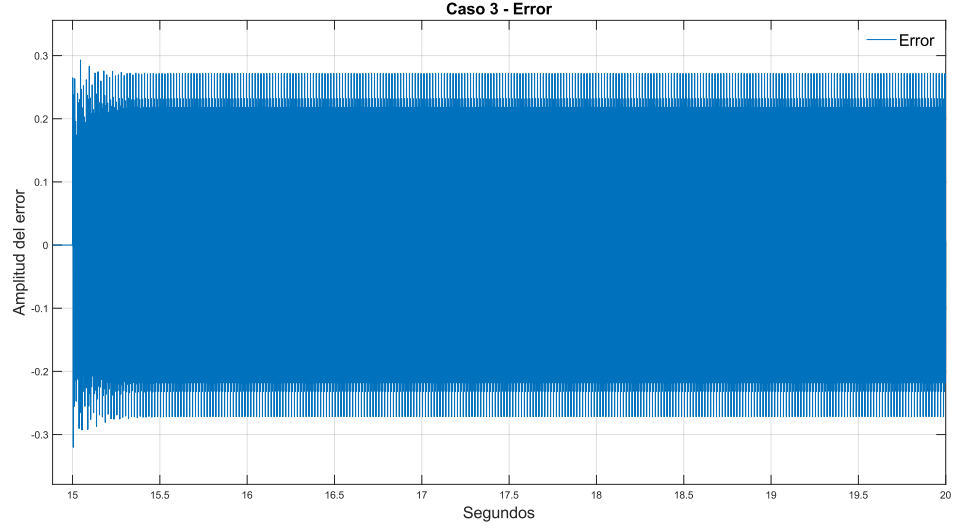


Figura 5.23: Caso 3 - Error - acercamiento

5.5. Comparativa entre Observadores de Luenberger y Luenberger con modos deslizantes

En esta sección se presenta una comparación cuantitativa y cualitativa entre el observador de Luenberger (Sección 4.3) y el observador por modos deslizantes (OMD, Sección 4.4). El objetivo es evaluar, bajo un protocolo homogéneo, las diferencias de desempeño en términos de precisión de la estimación, rapidez de convergencia y sensibilidad ante perturbaciones e incertidumbres paramétricas, así como su utilidad práctica para detección de fallas en filtros pasivos.

Protocolo de comparación. Se replicaron los tres escenarios definidos previamente: (i) condiciones iniciales distintas de cero ($CI \neq 0$), (ii) variación del capacitor C_f ; y (iii) variación del inductor L_f con $CI \neq 0$. En ambos observadores se emplearon las mismas señales de entrada, paso de muestreo T_s , duración de simulación y ventanas de análisis.

Métricas. Para cada caso se reportan: (i) error máximo $\|e\|_\infty = \max_t |y(t) - \hat{y}(t)|$, (ii) error cuadrático medio $RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum e^2}$, (iii) tiempo de convergencia t_{conv} (primer instante a partir del cual $|e(t)| < 0.02 \max |y|$ y se mantiene por una ventana fija).

Caso	Luenberger			OLMD		
	$\ e\ _\infty$ [A]	RMSE [A]	t_{conv} [s]	$\ e\ _\infty$ [A]	RMSE [A]	t_{conv} [s]
1) $CI \neq 0$	60.4551	12.6230	10.5	60.4128	5.7422	1.03
2) $C_f \downarrow 12.77\%$	0.0740	0.0263	NA	0.0648	0.0224	NA
3) $L_f \uparrow 5\% + CI$	30.4608/0.2960	5.5024	9.60	30.4328/0.2960	2.0429	0.9129

Tabla 5.2: Comparación de desempeño entre Luenberger y OLMD por caso.

Discusión de resultados

En los tres escenarios, el OLMD presenta una **ventaja sistemática** frente al observador de Luenberger en las métricas que reflejan desempeño sostenido y rapidez:

Caso 1 ($CI \neq 0$). Ambos observadores comparten prácticamente el mismo pico inicial $\|e\|_\infty \approx 60.4$ A, dominado por las condiciones iniciales. La diferencia aparece en la *energía del error* y en la *velocidad*: el OMD reduce el RMSE de 12.6230 a 5.7422 A (reducción de $\sim 55\%$) y el tiempo de convergencia de 10.5 a 1.03 s (mejora de $\sim 90\%$). Esto confirma su mayor capacidad de rechazo a CI distintas de cero sin incrementar el pico máximo.

Caso 2 (Falla en capacitor). Las discrepancias son más sutiles porque el desajuste es moderado y no induce grandes transitorios; aun así, el OMD mejora $\|e\|_\infty$ de 0.0740 a 0.0648 A ($\sim 12\%$) y RMSE de 0.0263 a 0.0224 A ($\sim 15\%$). El t_{conv} se marca como NA en ambos porque el error ya se encuentra bajo el umbral relativo prácticamente desde el inicio de la ventana; el criterio no discrimina en este caso.

Caso 3 (Falla en inductor + CI). Se reportan dos picos en $\|e\|_\infty$ (*global/local*). El valor global (~ 30.46 A) vuelve a estar dominado por las CI, mientras que el local (0.2960 A) captura el entorno de la falla. En ambos observadores los picos son comparables, pero el OMD reduce sustancialmente el error sostenido: el RMSE baja de 5.5024 a 2.0429 A ($\sim 63\%$ de reducción) y t_{conv} de 9.60 a 0.9129 s ($\sim 90\%$ más rápido). Tras la perturbación, el OMD absorbe el transitorio y restituye el régimen con mayor celeridad, lo cual es deseable para fines de detección.

En síntesis, aunque los *picos máximos* pueden coincidir, el *comportamiento en régimen* y el *tiempo de restablecimiento* favorecen consistentemente al OMD. Esta diferencia se refleja en RMSE y t_{conv} , que son las métricas más representativas para evaluar **robustez**

y **operatividad** del esquema de detección: menor energía de error y menor tiempo bajo perturbaciones implican **menos falsas alarmas** y **residuos más limpios** para la lógica de detección/aislamiento.

5.6. Análisis de residuos para aislamiento de fallas

Además de detectar la presencia de una falla, se busca discriminar su tipo (variación en C_f o en L_f) a partir del residuo $r(t) = y(t) - \hat{y}(t)$. La detección se realiza con un umbral arrojado por la función anterior.

Con el fin de ilustrar el procedimiento, se analizaron cuatro casos representativos de falla, modificando los valores nominales de los componentes y observando la respuesta del residuo. Los parámetros nominales del filtro utilizados en todos los casos se resumen a continuación:

- Resistencia del sistema (R_S): 1Ω
- Inductancia del sistema (L_S): 0.01Ω
- Capacitor del filtro (C_f): $16.57\mu F$
- Inductor del filtro (L_f): $0.0472H$
- Fuente de corriente del sistema: 22 A
- Fuente de corriente armónica: tercera armónica, 10 A

5.6.1. Caso 1: Disminución de 3% en C_f

En este primer escenario, el capacitor del filtro se reduce un 3% respecto a su valor nominal. La Figura 5.24 muestra la evolución temporal del residuo para este caso.

Se observa que el valor máximo del residuo es aproximadamente 0.01, lo que indica una perturbación muy pequeña.

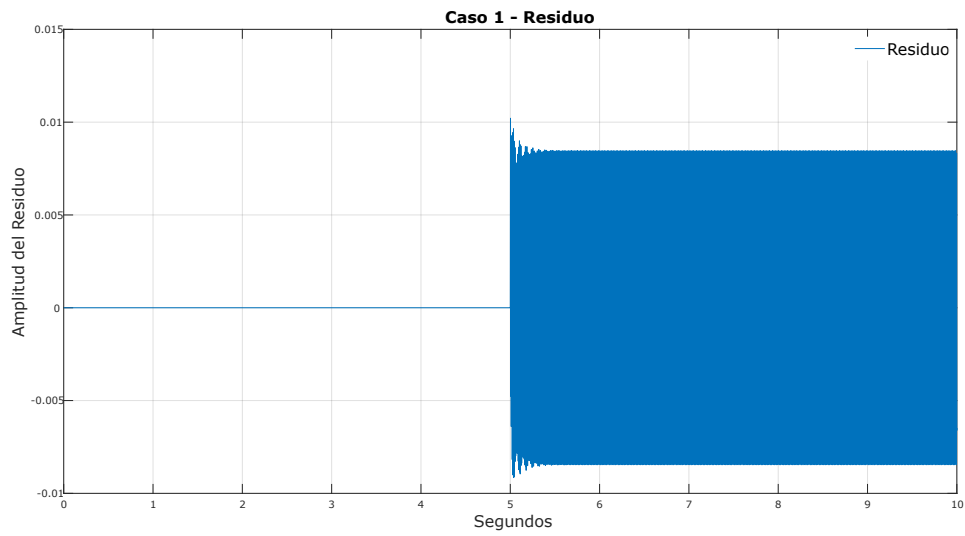


Figura 5.24: Caso 1 - Falla de 3 % sobre capacitor

5.6.2. Caso 2: Disminución de 7 % en C_f

En el segundo escenario se reduce el capacitor un 7 %. Los resultados se muestran en la Figura 5.25.

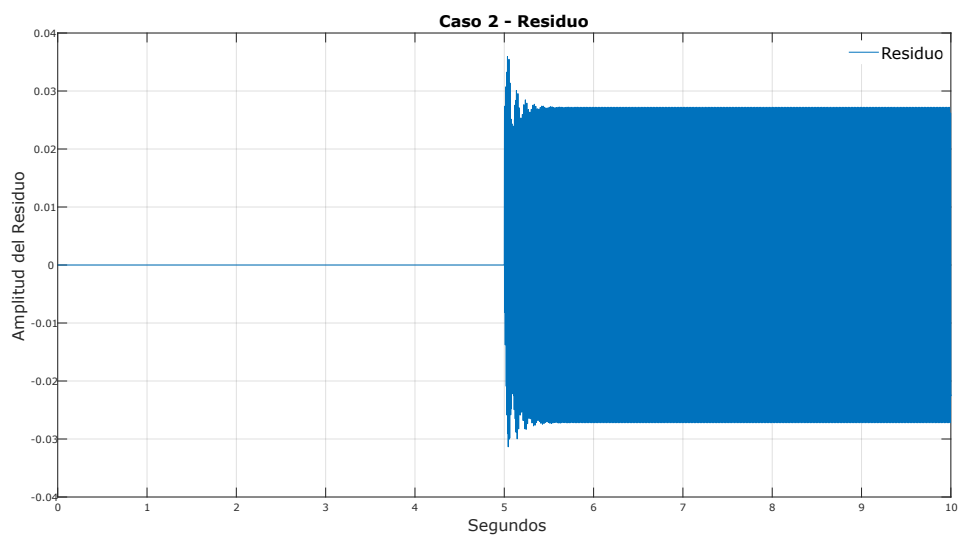


Figura 5.25: Caso 2 - Falla de 7 % sobre capacitor

En este caso, el residuo aumenta hasta un máximo de 0.03, evidenciando una mayor desviación respecto al comportamiento nominal.

5.6.3. Caso 3: Disminución de 5 % en L_f

Para el tercer caso se reduce el valor de L_f en un 5 %. La Figura 5.26 presenta la evolución del residuo.

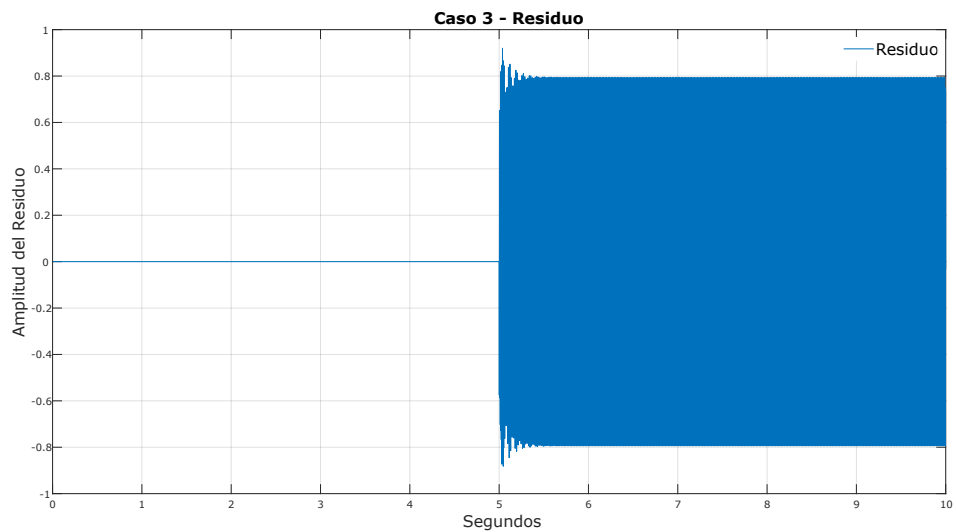


Figura 5.26: Caso 3 - Falla de 5 % sobre inductor

El residuo alcanza un valor máximo cercano a 0.92, considerablemente mayor que en los casos de falla en el capacitor, lo que permite establecer un umbral de separación entre los tipos de falla.

5.6.4. Caso 4: Disminución de 1 % en L_f

Finalmente, se estudia un caso con una reducción menor en L_f (1 %), para analizar la sensibilidad del método ante variaciones pequeñas. Los resultados se ilustran en la Figura 5.27.

En este caso, el valor máximo del residuo es 0.1348, lo que confirma que, aun con fallas de baja magnitud, el residuo conserva una amplitud claramente diferenciable respecto a los casos de falla en el capacitor.

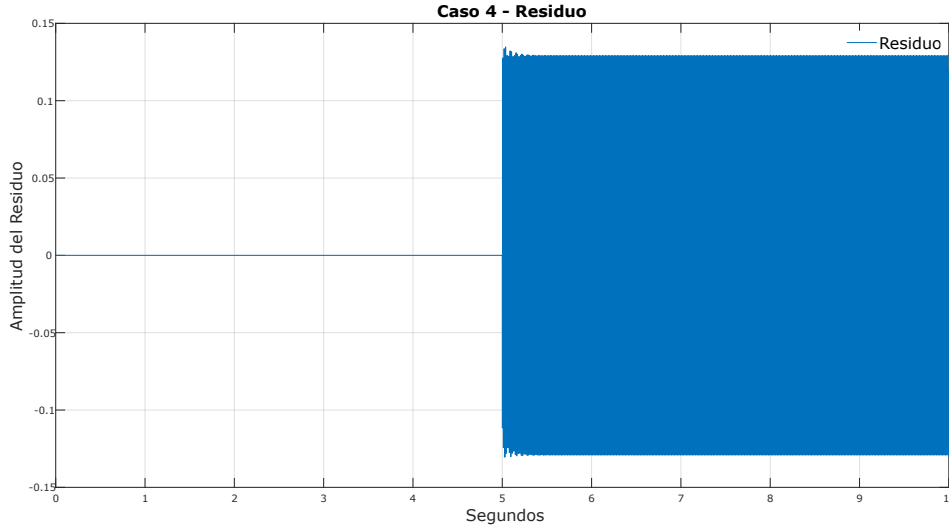


Figura 5.27: Caso 4 - Falla de 1 % sobre inductor

Los resultados anteriores permiten concluir que el análisis del residuo es una herramienta útil no sólo para detectar la presencia de una falla, sino también para discriminar el tipo de componente afectado. Las fallas en el inductor generan residuos de mayor amplitud que las fallas en el capacitor, lo que hace posible establecer un umbral que sirva como criterio de clasificación. Este método resulta simple y de fácil implementación, aunque su efectividad dependerá de la correcta elección del umbral y de la magnitud de la falla.

5.7. Conclusiones

En términos globales, el OLMD presenta *mejor robustez* ante $CI \neq 0$ y variaciones en C_f y L_f , reflejada en menores RMSE y t_{conv} ; por su parte, el observador de Luenberger constituye una alternativa eficiente y de *baja complejidad* bajo condiciones cercanas al nominal y desajustes acotados. En aplicaciones orientadas a la *detección de fallas* con incertidumbre paramétrica y condiciones iniciales no nulas, el OMD se perfila como la opción preferente; en operación rutinaria con requisitos de implementación simples, Luenberger resulta adecuado.

Capítulo 6

Conclusiones

Este trabajo abordó la *detección de fallas en filtros de potencia pasivos* mediante (i) la formulación y validación de un modelo matemático del sistema, (ii) la evaluación del impacto de variaciones paramétricas sobre la distorsión armónica total (THD), y (iii) el diseño, implementación y comparación de dos esquemas de observación de estados orientados a la detección de fallas: Luenberger y un observador por modos deslizantes (OMD). A continuación se sintetizan los hallazgos, aportaciones, limitaciones y líneas de trabajo futuro.

6.1. Síntesis de hallazgos

1. **Validez del modelo.** El modelo matemático reprodujo con fidelidad el comportamiento observado en PSCAD/Simulink tanto en régimen nominal como bajo variaciones paramétricas. La comparación de señales y el cálculo de THD mostraron concordancia, lo que respalda el uso del modelo como base para análisis y detección.
2. **Efecto de variaciones paramétricas.** Cambios moderados en los componentes del filtro alteran de manera medible las salidas y el porcentaje de distorsión armónica. El marco de casos de estudio permitió cuantificar estas variaciones y su traducción en residuo/errores de estimación, habilitando su uso como *huellas* de falla.
3. **Desempeño de los observadores.** En la comparativa (Cap. 4), el OLMD mostró ventajas consistentes frente a Luenberger en *error sostenido* (RMSE) y *rapidez de*

convergencia:

- **Caso 1 (CI $\neq 0$):** RMSE de 12.6230 a 5.7422 A (reducción $\sim 55\%$) y t_{conv} de 10.5A a 1.03 s ($\sim 90\%$ más rápido), con picos máximos similares (~ 60.4 A) dominados por las CI.
- **Caso 2:** mejoras más sutiles pero consistentes en $\|e\|_{\infty}$ (0.0740 a 0.0648 A, $\sim 12\%$) y RMSE (0.0263 a 0.0224 A, $\sim 15\%$). El criterio de t_{conv} resultó no discriminante (NA) por encontrarse el error bajo umbral desde el inicio.
- **Caso 3:** RMSE de 5.5024 a 2.0429 A ($\sim 63\%$ de reducción) y t_{conv} de 9.60 a 0.9129 s ($\sim 91\%$ más rápido). Los picos máximos *global/local* fueron comparables entre observadores, pero el OMD restableció el régimen con mayor celeridad tras la perturbación.

En síntesis, el OLMD ofrece mayor **robustez y rapidez** ante CI no nulas e incertidumbre paramétrica, mientras que Luenberger es competitivo en condiciones cercanas al nominal con menor complejidad de sintonía.

6.2. Aportaciones de la tesis

1. **Modelo validado para evaluación de fallas.** Se estableció y verificó un modelo matemático capaz de reproducir el comportamiento del filtro pasivo y su sensibilidad a variaciones paramétricas, habilitando análisis *what-if* sin depender exclusivamente de herramientas de simulación comercial.
2. **Marco reproducible de evaluación.** Se definieron casos de estudio y un conjunto de métricas objetivas ($\|e\|_{\infty}$, RMSE, t_{conv} y, cuando aplica, t_{det}), además de rutinas de cálculo y apoyo a la documentación (tablas/figuras), que permiten comparar observadores de forma transparente y repetible.
3. **Comparativa sistemática de observadores.** Se implementó y contrastó un observador de Luenberger y un OLMD en escenarios nominales y de falla, cuantificando ventajas y compromisos prácticos (sintonía, sensibilidad a ruido y rapidez) para su empleo en detección.

6.3. Limitaciones

1. **Validación principalmente en simulación.** No se realizaron ensayos en banco de pruebas o *hardware-in-the-loop*; por tanto, no se evaluó el impacto de ruido de medición real, cuantización, desbalances trifásicos o no idealidades del sensor/actuador.
2. **Modelo y umbrales.** El esquema de detección se basó en un umbral estadístico fijo sobre el residuo (ventana RMS); su desempeño puede variar con el nivel de ruido y las condiciones de operación. Asimismo, el modelo empleado no incorpora no linealidades fuertes (saturaciones, variación de frecuencia de red, etc.).
3. **Sintonía del OLMD.** La elección de ganancias (p.ej., K y la capa límite ε) exige cuidado para balancear robustez y ruido; en discretización, el *chattering* residual debe mitigarse.

6.4. Líneas de trabajo futuro

1. **Validación experimental.** Implementar los observadores en un banco de pruebas (o HIL) con mediciones reales, cuantificando sensibilidad a ruido, latencias, saturaciones y cargas desbalanceadas.
2. **Observadores robustos/adaptativos.** Explorar variantes H_∞ , super-twisting para reducir *chattering*, observadores de entrada desconocida (UIO) o ganancias adaptativas dependientes del punto de operación.
3. **Ampliación del modelo.** Considerar redes trifásicas desbalanceadas, variación de frecuencia, ruido en señales, modelos de sensor y no linealidades; estudiar filtros activos/híbridos y su interacción con el esquema de observación.
4. **Implementación en tiempo real.** Evaluar costos computacionales y arquitectura embebida (DSP/FPGA), incluyendo sincronización de muestreo, filtrado antialias y gestión de precisión numérica.

6.5. Conclusiones generales

En este trabajo se desarrolló y evaluó una estrategia de detección de fallas en filtros pasivos para mitigar la distorsión armónica, basada en el diseño de un observador de estados aplicado a un modelo matemático detallado del filtro. A partir de la formulación del modelo en el dominio del tiempo y su validación frente a simulaciones en PSCAD, fue posible contar con una representación suficientemente precisa del comportamiento dinámico del filtro bajo condiciones nominales y de falla.

Los resultados de la validación mostraron que la respuesta del modelo propuesto reproduce con buena exactitud las formas de onda de corriente y tensión obtenidas en PSCAD, así como los niveles de distorsión armónica total (THD) en los nodos de interés. Esta concordancia permitió utilizar el modelo como base confiable para el diseño del observador y para la generación de escenarios de falla mediante variaciones paramétricas en los elementos del filtro (inductancias, capacitores y resistencias de amortiguamiento).

Con el observador diseñado, se logró estimar los estados no medidos del filtro y construir residuos sensibles a la presencia de fallas. Se verificó que, ante cambios en los valores de los componentes (como pérdida parcial de capacitancia, incremento en la resistencia de pérdidas o desajustes en la inductancia), los residuos presentan variaciones claras y diferenciables respecto a la operación normal. Esto permite no solo detectar la ocurrencia de la falla, sino también asociar el patrón del residuo con el tipo de alteración presente en el filtro.

Asimismo, se observó que la estrategia propuesta mantiene un desempeño adecuado aun cuando existen incertidumbres moderadas en los parámetros nominales y variaciones en las condiciones de operación, lo que evidencia cierta robustez del observador frente a perturbaciones y errores de modelado. En particular, el esquema de detección continúa identificando correctamente la presencia de fallas sin generar un número excesivo de falsas alarmas, siempre que las desviaciones se mantengan dentro de los rangos analizados.

En conjunto, puede concluirse que la combinación de un modelo detallado del filtro pasivo y un observador de estados adecuadamente diseñado constituye una herramienta efectiva para la detección de fallas en filtros de mitigación armónica. Esta aproximación

abre la posibilidad de implementar esquemas de supervisión en tiempo real que faciliten el mantenimiento predictivo, reduzcan tiempos de indisponibilidad y mejoren la continuidad del servicio en aplicaciones donde la calidad de la energía es un requisito crítico.

Referencias

- [Aguilar-López et al., 2006] Aguilar-López, R., Soto-Cortés, G., and Neria-González, M. (2006). Monitoreo en línea de un bioreactor continuo empleando observadores de modo deslizante. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 5(1):1–4.
- [Aguilera et al., 2013] Aguilera, F., De la Barrera, P., De Angelo, C., and Espinoza Trejo, D. (2013). Diagnóstico de fallas de sensor con enfoque geométrico para accionamientos con máquinas de inducción. *XV Reunión de Trabajo en el Procesamiento de la Información y Control, RPIC2013*, pages 777–782.
- [Akagi, 2005] Akagi, H. (2005). Active harmonic filters. *Proceedings of the IEEE*, 93(12):2128–2141.
- [Alexander and Sadiku, 2013] Alexander, C. K. and Sadiku, M. N. (2013). *Fundamentos de circuitos eléctricos*. AMGH Editora.
- [Aligia et al., 2013] Aligia, D. A., Magallán, G. A., De Angelo, C. H., and Roqueiro, N. (2013). Monitoreo de la dinámica lateral de un vehículo eléctrico: Parte i. estimación mediante un observador por modos deslizantes. *XV Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control*.
- [Arrillaga and Watson, 2004] Arrillaga, J. and Watson, N. R. (2004). *Power system harmonics*. John Wiley & Sons.
- [Arrillaga et al., 2000] Arrillaga, J., Watson, N. R., and Chen, S. (2000). *Power system quality assessment*. John Wiley & Sons.

- [Basantes Vidal, 2021] Basantes Vidal, J. D. (2021). Metodologías de cálculo para el análisis de fenómenos de resonancia en sistemas eléctricos de potencia. B.S. thesis.
- [Bollen, 2003] Bollen, M. H. (2003). What is power quality? *Electric power systems research*, 66(1):5–14.
- [Boyd et al., 1994] Boyd, S., El Ghaoui, L., Feron, E., and Balakrishnan, V. (1994). *Linear matrix inequalities in system and control theory*. SIAM.
- [Breitfelder and Messina, 2000] Breitfelder, K. and Messina, D. (2000). Ieee 100: the authoritative dictionary of ieee standards terms. *Standards Information Network IEEE Press. v879*, pages 1–11.
- [Candela García, 2009] Candela García, J. I. (2009). Aportaciones al filtrado híbrido paralelo en redes trifásicas de cuatro hilos.
- [Castillo, 2008] Castillo, L. (2008). *Ingeniería de Sistemas de Control Continuo*.
- [Cervantes et al., 2019] Cervantes, M. H., Anguiano, A. d. C. T., Marin, J. A., Juárez, E. E., Hernández, G. F. O., and Ramirez, M. d. C. G. (2019). Sistema fdd para actuador de potencia calefactora basado en observadores difusos con modos deslizantes.
- [Chen, 1995] Chen, J. (1995). *Robust residual generation for model-based fault diagnosis of dynamic systems*. PhD thesis, University of York.
- [Chen and Patton, 2012] Chen, J. and Patton, R. J. (2012). *Robust model-based fault diagnosis for dynamic systems*, volume 3. Springer Science & Business Media.
- [Davila et al., 2005] Davila, J., Fridman, L., and Levant, A. (2005). Second-order sliding-mode observer for mechanical systems. *IEEE transactions on automatic control*, 50(11):1785–1789.
- [Delgado-Aguíñaga and Begovich, 2014] Delgado-Aguíñaga, J. and Begovich, O. (2014). Aislamiento de una fuga en tiempo real en una tubería plástica mediante un observador basado en modos deslizantes.

- [Dugan et al., 1996] Dugan, R. C., McGranaghan, M. F., Beaty, H. W., and Santoso, S. (1996). Electrical power systems quality.
- [Escobar et al., 2011] Escobar, R., Astorga-Zaragoza, C., Téllez-Anguiano, A., Juárez-Romero, D., Hernández, J., and Guerrero-Ramírez, G. (2011). Sensor fault detection and isolation via high-gain observers: Application to a double-pipe heat exchanger. *ISA transactions*, 50(3):480–486.
- [García-Morales et al., 2015] García-Morales, J., Adam-Medina, M., Escobar, R., Astorga-Zaragoza, C., and Garcia-Beltran, C. (2015). Diagnóstico de fallas múltiples en los sensores de un intercambiador de calor empleando observadores por modos deslizantes basado en el algoritmo super-twisting. *Revista mexicana de ingeniería química*, 14(2):553–565.
- [González et al., 2006] González, M. S. E., Guerrero, J. A. M., and Ramos, L. A. C. (2006). Las cargas no lineales, su repercusión en las instalaciones eléctricas y sus soluciones. *Conciencia tecnológica*, (32):10.
- [John, 2001] John, P. (2001). Practical guide to power factor correction and harmonics.
- [Khalil, 1996] Khalil, H. K. (1996). *Nonlinear Systems*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2nd edition.
- [Kraft and Heydt, 2007] Kraft, L. and Heydt, G. (2007). A method to analyze voltage resonance in power systems. *IEEE transactions on power apparatus and systems*, (5):1033–1037.
- [Martinez, 2008] Martinez, D. A. S. (2008). Factores que afectan la calidad de la energía y su solución. *Academia. Edu*.
- [Melendez et al., 2011] Melendez, C., Mara, W., and Cevallos, H. (2011). Adquisición de datos para el análisis de armónicos en sistemas eléctricos usando labview.
- [Mohan et al., 2009] Mohan, N., ROBBINS, W., and UNDELAND, T. (2009). *Electrónica de potencia*. Mc Graw Hill.

- [Molano Aguas and Tique Rojas, 2013] Molano Aguas, J. S. and Tique Rojas, R. E. (2013). Diseño y construcción de un kit de filtros pasivos para la mitigación de corrientes armónicas.
- [Pérez-Estrada et al., 2015] Pérez-Estrada, A., Adam-Medina, M., Rodríguez-Jarquín, J., Martínez-Sibaja, A., and Astorga-Zaragoza, C. (2015). Diagnóstico y aislamiento de fallas basado en observadores por modos deslizantes para un digestor anaerobio modelado en lpv ts.
- [Prasad et al., 2015] Prasad, H., Sudhakar, T., and Chilambarasan, M. (2015). Mitigation of current harmonics in a solar hybrid system by installation of passive harmonic filters. In *2015 International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC)*, pages 0345–0349. IEEE.
- [Ramírez, 2008] Ramírez, E. T. (2008). Distorsión armónica. *Autom. Product. Y Calid. SaCV*, 222:1–31.
- [Rosas et al., 2008] Rosas, P., Rosas, D., and Alvarez, J. (2008). Observación y estimación en tiempo finito de una clase de sistemas no lineales de fase mínima. *Sin publicar*.
- [Sannino et al., 2003] Sannino, A., Svensson, J., and Larsson, T. (2003). Power-electronic solutions to power quality problems. *Electric Power Systems Research*, 66(1):71–82.
- [Tanaka and Wang, 2004] Tanaka, K. and Wang, H. O. (2004). *Fuzzy control systems design and analysis: a linear matrix inequality approach*. John Wiley & Sons.
- [Witczak, 2014] Witczak, M. (2014). *Fault diagnosis and fault-tolerant control strategies for non-linear systems*, volume 266. Springer.

Juan Osorio Rodriguez

DETECCIÓN DE FALLAS EN FILTROS PASIVOS PARA MITIGAR LA DISTORSIÓN ARMÓNICA.pdf

 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::3117:525820092

Fecha de entrega

10 nov 2025, 9:28 a.m. GMT-6

Fecha de descarga

10 nov 2025, 9:40 a.m. GMT-6

Nombre del archivo

DETECCIÓN DE FALLAS EN FILTROS PASIVOS PARA MITIGAR LA DISTORSIÓN ARMÓNICA.pdf

Tamaño del archivo

3.7 MB

94 páginas

18.240 palabras

94.513 caracteres

14% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 14%  Fuentes de Internet
- 5%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión

-  **Caracteres reemplazados**
15 caracteres sospechosos en N.º de páginas
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	Maestría en ciencias en Ingeniería Eléctrica	
Título del trabajo	Detección de Fallas en Filtros Pasivos para Mitigar La Distorsión Armónica	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Juan Osorio Rodríguez	juan.osorio.rodriguez@umich.mx
Director	Juan Anzures Marín	juan.anzures@umich.mx
Codirector	Efraín Alcorta García	
Coordinador del programa	Norberto García Barriga	norberto.garcia@umich.mx

Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	Si	Se utilizo para ser mas claros en algunos párrafos y se diera a entender de mejor manera.

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	No	
Traducción a otra lengua	No	
Revisión y corrección de estilo	Si	Algunos párrafos fueron corregidos para su mejor entendimiento.
Análisis de datos	No	
Búsqueda y organización de información	No	
Formateo de las referencias bibliográficas	No	
Generación de contenido multimedia	Si	Algunos mapas mentales fueron realizados con IA.
Otro	No	

Datos del solicitante	
Nombre y firma	Juan Osorio Rodríguez
Lugar y fecha	10/11/2025 Morelia, Michoacán