

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



SENSIBILIDAD DEL DIAGNÓSTICO DE FALLAS PARA
TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS DE LOS MÉTODOS
INSPIRADOS EN MODELO.

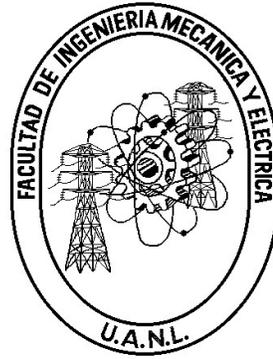
POR:
ING. HECTOR ALEXIS LOZANO FLORES

EN OPCIÓN AL GRADO DE:
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA ELÉCTRICA

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, N.L.

JULIO 2022

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



SENSIBILIDAD DEL DIAGNÓSTICO DE FALLAS PARA
TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS DE LOS MÉTODOS
INSPIRADOS EN MODELO.

POR:
ING. HECTOR ALEXIS LOZANO FLORES

EN OPCIÓN AL GRADO DE:
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA ELÉCTRICA

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, N.L.

JULIO 2022

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Posgrado

Los miembros del Comité de Evaluación de Tesis recomendamos que la Tesis “Sensibilidad del diagnóstico de fallas para transformadores eléctricos de los métodos inspirados en modelo”, realizada por el estudiante Hector Alexis Lozano Flores, con número de matrícula 1667025, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica.

El Comité de Evaluación de Tesis

Dr. Efraín Alcorta García
Director

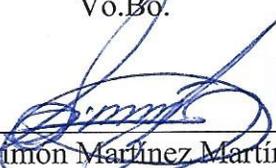
Dr. Carlos Pérez Rojas
Co-director

Dr. Cornelio Posadas Castillo
Revisor

Dr. David Alejandro Díaz Romero
Revisor

Dr. Daniel Guillen Aparicio
Revisor

Vo.Bo.



Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirector de Estudios de Posgrado

Institución 190001

Programa 557520

Acta Núm. 4057

Ciudad Universitaria, a 04 de Julio de 2022.

*Este trabajo está dedicado a mi más grande amor Yessica
Marlen Arroyo Mayorga, que siempre ha estado a mi lado
apoyándome cuando más lo he necesitado.*

Agradecimientos

A mi director de tesis, Dr. Efraín Alcorta García, al guiarme y transmitirme los conocimientos necesarios para la realización de este trabajo de principio a fin, siempre con la paciencia y dedicación que lo caracterizan.

A mi codirector de tesis, Dr. Carlos Pérez Rojas, por siempre atender mis dudas, y por compartir sus conocimientos, los cuales fueron muy enriquecedores para la realización de este trabajo.

A mi amigo, Dr. Roberto Carlos Cabriaes Gómez, por hacerme ver la ingeniería desde otro punto de vista, el cual nunca visualice cuando empecé a estudiar ingeniería, además por sentar las bases que me permitieron interesarme en la investigación y la tecnología.

A mis padres, Mario Alberto Lozano Sandoval y Mireyra Alicia Flores Resendez, por haberme educado con los principios y valores, los cuales hoy me permiten cumplir todas las metas que me he trazado a lo largo de mi vida y las que vienen por delante.

Al CONACYT por su gran apoyo al otorgarme la beca y hacer posible el cumplimiento de la maestría.

Resumen

Sensibilidad del diagnóstico de fallas para transformadores eléctricos de los métodos inspirados en modelo.

Publicación No. _____

Ing. Hector Alexis Lozano Flores

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Asesor: Dr. Efraín Alcorta García

Julio 2022

El siguiente trabajo presenta un enfoque de detección de fallas a partir de mediciones entrada-salida, donde la principal contribución es la capacidad de variar la sensibilidad de detección de fallas de los residuos generados a partir de mediciones disponibles de entrada y salida, para su aplicación en la detección de fallas en transformadores eléctricos.

Para esto se presentan todos los preliminares matemáticos que permiten detectar fallas a través de las mediciones del sistema, de igual forma se proponen los parámetros que nos permitirán modificar la sensibilidad de residuos al momento de diagnosticar fallas.

El algoritmo propuesto se probó en un ejemplo resuelto en la literatura de un reactor químico donde diagnostican fallas en dicho sistema bajo una metodología diferente, de esta forma fue posible comparar el algoritmo propuesto en este trabajo con uno ya desarrollado donde además de comprobar que fue posible variar la sensibilidad de los residuos se logró la capacidad de generar un residuo con una mayor sensibilidad al que está propuesto en la literatura.

Una vez que se comprobó que el algoritmo es capaz de diagnosticar fallas al compararse con uno ya propuesto en la literatura, se procede a realizar pruebas en el transformador eléctrico de potencia, específicamente una falla del tipo de cortocircuito entre espiras donde además de tener resultados satisfactorios al momento de diagnosticar fallas en el transformador, se logró modificar la sensibilidad de diferentes residuos probados con las mismas señales de falla.

Por último, se introdujo una metodología novedosa para la evaluación de los residuos con falla cuando estos predisponen un comportamiento senoidal por el tipo de señal de los sistemas o de falla, donde los resultados de esta evaluación permiten obtener señales las cuales son más fáciles de analizar al momento de reconocer las fallas presentes en el sistema.

Palabras clave: Sensibilidad, Detección de fallas, Algoritmo de detección de fallas, Transformadores eléctricos de potencia, Fallas en transformadores eléctricos de potencia.

Contenido

Lista de figuras	XI
Lista de tablas	XIII
1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Planteamiento del problema	2
1.3. Hipótesis	2
1.4. Objetivo	2
1.4.1. General	2
1.4.2. Específicos	2
1.5. Metodología	3
2. Preliminares	4
2.1. Estado del arte	4
2.1.1. Algoritmos de detección de fallas	4
2.1.2. Diagnóstico de fallas incipientes en transformadores eléctricos	5
2.1.2.1. Métodos basados en señales eléctricas	5
2.2. Generador de residuos basado en datos	7
2.2.1. Filtrado de datos entrada-salida	8
2.2.2. Tratamiento de los datos para armar el generador de residuos	10
2.2.3. Construcción del generador de residuos como observador . . .	11
3. Sensibilidad del diagnóstico de fallas basado en datos	14
3.1. Parámetros que afectan en la sensibilidad	14
3.2. Efecto en la sensibilidad de los parámetros libres de diseño.	15
3.3. Diseño de la sensibilidad de fallas en los residuos	15
3.3.1. Método de evaluación de residuos.	16

3.4.	Ejemplo práctico del algoritmo de diagnóstico de fallas basado en datos	18
3.4.1.	Sistema propuesto	18
3.4.2.	Elaboración de los residuos del sistema del reactor químico	19
3.4.2.1.	Filtrado y tratamiento de datos el en reactor químico	19
3.4.2.2.	Ajuste de la sensibilidad a través de los parámetros de diseño en el reactor químico	22
3.4.2.3.	Residuo número 1	23
3.4.2.4.	Residuo número 2	23
3.4.2.5.	Residuo número 3	24
3.4.2.6.	Residuo número 4	24
3.4.3.	Resultados del algoritmo aplicado al reactor químico	25
3.4.3.1.	Resultados del Residuo 1	25
3.4.3.2.	Resultados del Residuo 2	27
3.4.3.3.	Resultados del Residuo 3	29
3.4.3.4.	Resultados del Residuo 4	31
3.4.3.5.	Residuo Propuesto en la literatura.	32
3.4.4.	Comparación de la sensibilidad entre los residuos	33
4.	Algoritmo de detección de fallas aplicado en el transformador eléctrico	35
4.1.	El transformador eléctrico	35
4.1.1.	Modelo magnético del transformador eléctrico	36
4.1.2.	Modelo de falla entre espiras del transformador eléctrico	43
4.2.	Construcción del generador de residuos para el transformador eléctrico	47
4.2.1.	Ajuste en la sensibilidad de los residuos del transformador eléctrico	47
4.2.1.1.	Residuo número 1 para el transformador eléctrico.	48
4.2.1.2.	Residuo número 2 para el transformador eléctrico.	48
4.2.1.3.	Residuo número 3 para el transformador eléctrico.	49
4.2.1.4.	Residuo número 4 para el transformador eléctrico.	50
4.2.2.	Comparación de los resultados de los residuos del transformador eléctrico	50
4.2.3.	Análisis de los residuos evaluados del transformador eléctrico	53
5.	Conclusiones y trabajos a futuro	55

Lista de figuras

2.1. Procedimiento para obtener los datos filtrados y así construir el algoritmo detector de fallas.	8
2.2. Observador detectando fallas a partir de datos de la entrada-salida del sistema.	13
3.1. Procedimiento en forma de diagrama de flujo para realizar la evaluación a los residuos.	17
3.2. Salida del sistema del reactor químico.	20
3.3. Entrada del sistema del reactor químico.	20
3.4. Residuo 1 sin la presencia de fallas.	25
3.5. Residuo 1 con falla f_1 del 10%	26
3.6. Residuo 1 con falla f_2 del 1%	26
3.7. Residuo 1 con falla f_3 del 0.1%	27
3.8. Residuo 2 sin la presencia de fallas.	27
3.9. Residuo 2 con falla f_1 del 30%	28
3.10. Residuo 2 con falla f_2 del 5%	28
3.11. Residuo 2 con falla f_3 del 0.5%	29
3.12. Residuo 3 sin la presencia de fallas.	29
3.13. Residuo 3 con falla f_1 del 1.5%	30
3.14. Residuo 3 con falla f_2 del 0.15%	30
3.15. Residuo 3 con falla f_3 del 0.02%	30
3.16. Residuo 4 sin la presencia de fallas.	31
3.17. Residuo 4 con falla f_1 del 0.3%	31
3.18. Residuo 4 con falla f_2 del 0.03%	32
3.19. Residuo 4 con falla f_3 del 0.015%	32
3.20. Residuo propuesto en la literatura	33
4.1. Transformador trifásico de 3 columnas.	36

4.2. Representación de la matriz L	36
4.3. Equivalente magnético del circuito del transformador eléctrico trifásico.	38
4.4. Diagrama de flujo para modelar el transformador eléctrico.	41
4.5. Corrientes de fase en los devanados primarios.	42
4.6. Corrientes de fase y línea en los devanados secundarios.	42
4.7. Corrientes de línea en los devanados primarios.	43
4.8. Esquema de falla de cortocircuito entre espiras en los devanados primario del transformador, siendo un solo devanado el que presenta falla.	44
4.9. Equivalente magnético del circuito del transformador eléctrico trifásico cuando se presenta una falla de corto circuito entre espiras.	44
4.10. Falla del tipo corto circuito entre espiras en la fase A del devanado primario.	46
4.11. Falla del tipo corto circuito entre espiras en la fase a del devanado secundario.	46
4.12. Residuo 1 cuando el transformador presenta un corto circuito entre espiras a diferentes niveles de falla.	51
4.13. Residuo 2 cuando el transformador presenta un corto circuito entre espiras a diferentes niveles de falla.	51
4.14. Residuo 3 cuando el transformador presenta un corto circuito entre espiras a diferentes niveles de falla.	52
4.15. Residuo 4 cuando el transformador presenta un corto circuito entre espiras a diferentes niveles de falla.	52
4.16. Residuo 1 cuando el transformador presenta un corto circuito entre espiras a diferentes niveles de falla después del método de evaluación.	53
4.17. Residuo 2 cuando el transformador presenta un corto circuito entre espiras a diferentes niveles de falla después del método de evaluación.	53
4.18. Residuo 3 cuando el transformador presenta un corto circuito entre espiras a diferentes niveles de falla después del método de evaluación.	54
4.19. Residuo 4 cuando el transformador presenta un corto circuito entre espiras a diferentes niveles de falla después del método de evaluación.	54

Lista de tablas

3.1. Parámetros para diseño de residuos	22
3.2. Sensibilidad de residuos del reactor químico.	34
4.1. Parámetros para diseño de residuos aplicado en el transformador eléctrico.	47
A.1. Longitudes de las diferentes secciones del núcleo del transformador .	57
A.2. Áreas de sección transversal de las diferentes secciones del núcleo del transformador	57
A.3. Número de espiras de cada devanador	57
A.4. Resistencias de los devanados	57
A.5. Constantes de la curva de saturación	57

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

El diagnóstico de fallas en transformadores eléctricos representa un problema de interés, debido a la gran cantidad de transformadores eléctricos utilizados para la distribución y transmisión de energía eléctrica.

La mayoría de las técnicas de monitoreo para transformadores operan fuera de línea, como por ejemplo el análisis de gases disueltos. Esta técnica se puede realizar en tiempos reducidos, sin embargo, es necesario realizar la desconexión del transformador para su aplicación. La utilización de técnicas basada en mediciones eléctricas se ha explorado en los últimos 20 años. Actualmente, los resultados han mejorado significativamente.

De los últimos avances tecnológicos han resultado, que los sensores y equipo de procesamiento sea cada vez más poderoso, además de reducir el costo de los mismos. Esto hace interesante el estudio de técnicas desarrolladas a partir de mediciones eléctricas de las señales que intervienen en los transformadores (voltajes y corrientes). En este contexto, algoritmos de diagnóstico de fallas que utilizan el modelo del transformador (en forma de ecuaciones diferenciales) tienen el inconveniente de identificar los parámetros del modelo. Recientemente, fueron propuestos algoritmos basados en datos. Hay dos grandes áreas, los algoritmos basados en datos (redes neuronales, wavelets, descomposición en componentes principales, etc.) y los que, aunque no hacen uso del modelo, son derivados sobre el supuesto de la existencia de estos modelos.

Esta última familia de métodos tiene la ventaja de que se puede explicar la posibilidad de separar el efecto de diferentes fallas, así como de manejar diferentes ganancias para ajustar la sensibilidad del algoritmo. El ajuste de la sensibilidad al

diagnóstico es un punto que no se ha explorado en las técnicas de diagnóstico de fallas inspiradas en el modelo y es el tema central del trabajo a realizar.

1.2. Planteamiento del problema

Normalmente, la vida útil de un transformador de distribución es de 30 años, pero esta puede reducirse debido a la intensidad de las sobrecargas y frecuencia de fallas en las redes de baja tensión. Por lo que se tiene el riesgo de un mayor número de interrupciones y una mayor gravedad de los daños posibles, tales como incendios provocados por fugas de aceite o explosiones, provocadas por el desgaste, envejecimiento o deterioro de los materiales con los que están fabricados, con el propósito de evitar dichas problemáticas se implementará un algoritmo de diagnóstico de fallas, utilizando el modelo matemático del transformador eléctrico a partir de mediciones entrada y salida, donde se busca ajustar la sensibilidad para determinar el tamaño de las fallas detectables y así desarrollar el algoritmo de diagnóstico de fallas en el lenguaje de programación python.

1.3. Hipótesis

La sensibilidad del diagnóstico de fallas para transformadores eléctricos se puede ajustar mediante modificación de los algoritmos de diseño de la teoría del residuo de sistemas lineales continuos, a partir de mediciones disponibles de entrada y salida.

1.4. Objetivo

1.4.1. General

Estudiar la manera de ajustar la sensibilidad del algoritmo inspirado en modelos para el diagnóstico de fallas en transformadores eléctricos.

1.4.2. Específicos

- Programar los algoritmos de diagnóstico de fallas basados en datos en lenguaje Python.

- Proponer una forma de ajustar la sensibilidad de detección de los residuos de diagnóstico obtenidos mediante técnicas basadas en datos (mediante subespacios).
- Mostrar como el ajuste de la sensibilidad propuesta tiene un efecto en el tamaño de falla mínima detectable cuando se aplica a transformadores eléctricos.

1.5. Metodología

Con el fin de cumplir con los objetivos planteados se establece la siguiente metodología:

1. Se realizará una revisión bibliográfica en dos enfoques, el primero referente a la generación de residuos basada en datos entrada y salida y la segunda referente a las técnicas actuales para detectar fallas en transformadores eléctricos.
2. Se implementará un algoritmo de diagnóstico de fallos basados en datos muestreados y técnicas de identificación por subespacios en lenguaje de programación Python.
3. Se probará el algoritmo antes programado con un ejemplo ya realizado en la literatura para comprobar su correcto funcionamiento.
4. Se revisará la forma de ajustar la sensibilidad de los algoritmos de diagnóstico de fallas y se establecerá una metodología de como realizar dicho ajuste.
5. Obtención de datos del transformador con y sin fallas para generar el residuo de detección de fallas.
6. Se realizará el estudio de detección de fallas al transformador eléctrico con los datos antes obtenidos.
7. Se ajustará la sensibilidad del algoritmo antes programado para su comparación con datos de diferente nivel de falla del transformador.
8. Se evaluarán los resultados obtenidos del generador de residuos aplicado al transformador eléctrico para su análisis.

Capítulo 2

Preliminares

2.1. Estado del arte

2.1.1. Algoritmos de detección de fallas

El diagnóstico de fallas ha sido un tema de estudio desde hace más de 30 años, tal es el caso de [1]. De igual forma, el diagnóstico de fallas, principalmente las incipientes, han ocupado mayor atención en recientes años, esto se puede ver en [2] y [3]. Al estudiar fallas, principalmente las incipientes, se puede notar que una característica que se presenta comúnmente es que desarrollan un efecto relativamente pequeño en las salidas del sistema si se compara con la magnitud de las señales involucradas. Para poder hacer frente a estas situaciones, algunos autores como [4] han propuesto el uso de un conjunto de generadores de residuos diseñados a partir de observadores con diferentes enfoques y posteriormente la implementación de un algoritmo para saber cuál es el residuo más adecuado utilizar. Otro inconveniente al momento de diagnosticar fallas es la falta del modelo matemático (en forma de ecuaciones en diferencias o bien diferenciales) a causa de esto han sido propuestas diversas técnicas que utilizan métodos conocidos o denominados como *Data-Driven*, esto se puede apreciar en [5] donde el enfoque fundamental aplicado es la estadística. A su vez, en [6] se utiliza una variante del análisis de componente principal para diagnosticar fallas incipientes cuando se presenta un sistema no lineal.

En [7] se utiliza un enfoque basado en datos (*Data-Driven*) para sistemas continuos, lineales e invariantes en el tiempo (LTI) a partir de mediciones entrada-salida del sistema. Utilizando una técnica de identificación por subespacios y los resultados sobre la relación entre el espacio de paridad aplicando un método basado

en observadores.

Por último, en [8] se realiza una recopilación de los enfoques propuestos para el diagnóstico de fallas incipientes, además de probar algunos de estos enfoques en un sistema de lazo abierto no lineal donde se demuestra la incapacidad de los enfoques de diagnóstico para detectar fallas incipientes en algunos sistemas, demostrando que aún hay trabajo por hacer en dicho tema.

2.1.2. Diagnóstico de fallas incipientes en transformadores eléctricos

Los transformadores de distribución de media a baja tensión cuentan con elementos aislantes que se degradan por excesos de calentamiento producidos por corrientes de falla en las redes de baja tensión y sobrecargas que excedan sus límites de diseño, así como sus años en operación.

En [9], se recopilaron los métodos que en la industria y los recursos académicos son más utilizados en los últimos años obteniendo pruebas establecidas como parte de fallas incipientes químicas, eléctricas y misceláneas, como análisis de gas disuelto, métodos de prueba de aceite, análisis de respuesta de frecuencia de barrido, método de voltaje de recuperación, descarga parcial, prueba de termografía infrarroja, prueba de relación de vueltas, factor de disipación dieléctrica, resistencia del devanado del transformador, prueba de núcleo a tierra y cálculo de resistencia de aislamiento aunque estos métodos como el análisis de gas disuelto es muy confiable tienen la desventaja de que operan fuera de línea.

Otra prueba muy utilizada en el mercado es el análisis de gas disuelto DGA (por sus siglas en inglés), en [10] utilizan una red neuronal profunda entrenada con un conjunto de datos DGA sobre muestreo con el método BorderlineSMOTE para el diagnóstico de fallas en transformadores de potencia. El rendimiento del modelo se comparó con el de los métodos de interpretación DGA tradicionales, las redes neuronales tradicionales (MLP) y una Red Neuronal Profunda (DNN) que trabaja con el conjunto de datos original. Sin embargo, esta red únicamente es empleada para interpretar datos de la prueba DGA la cual opera fuera de línea.

2.1.2.1. Métodos basados en señales eléctricas

En [11] y [12] se propone una nueva técnica para detectar la falla entre espiras del transformador y la ubicación de la falla, instalando una bobina de búsqueda en

el devanado a través de cada rama del transformador, de tal manera que esta bobina mida los enlaces de flujo en diferentes ubicaciones. La detección de fallas se basa en la diferencia y la suma del voltaje inducido entre la bobina de búsqueda. Al usar este método, se puede detectar la ubicación de fallas con muy poca economía y menos tiempo. Este esquema de bobina de búsqueda se puede utilizar para identificar una sola vuelta y fallas muy pequeñas entre vueltas en el transformador.

De igual forma, en [13] se investiga el rendimiento de una técnica de detección de fallas internas de transformadores en línea propuesta recientemente y examina el impacto de los armónicos a través de una simulación no lineal detallada de un transformador utilizando modelos tridimensionales de elementos finitos. A diferencia de las técnicas convencionales de respuesta de frecuencia de barrido fuera de línea, no requiere poner el transformador fuera de servicio y, por lo tanto, se pueden realizar evaluaciones continuas en línea de la integridad mecánica del devanado del transformador. Sin embargo, su aplicación a transformadores de potencia trifásicos prácticos no se ha explorado y requiere más investigación.

Las corrientes de inrush en los transformadores también comprometen el desempeño de los transformadores. Por lo tanto, la discriminación entre las corrientes de inrush y las fallas es muy importante. En [14] se propone una nueva técnica para distinguir la falla interna de los transformadores y otras condiciones transitorias normales (como la corriente de inrush). En el método propuesto se discrimina la corriente de falla interna con precisión y rapidez de las otras condiciones de corriente transitoria (como la conmutación de carga y las corrientes de inrush) mediante el seguimiento de la curva de corriente diferencial. De igual forma, en [15] se analiza una herramienta poderosa como la transformada S para su análisis de frecuencia-tiempo. En este estudio, se extraen algunas características relevantes utilizando la transformada de Clark y la transformada S hiperbólica modificada según las cuales se distinguen y clasifican diferentes condiciones. Estas características incluyen el contorno de energía del primer nivel, el índice de varianza, la desviación estándar del segundo componente armónico y un criterio especial.

Los cortocircuitos entre vueltas se producen debido a daños en el aislamiento de los devanados de los transformadores y pueden provocar fallas catastróficas que afecten a las redes eléctricas. En [16] se presenta un nuevo método sensible basado en la transformada wavelet para identificar fallas entre espiras durante la energización de transformadores de distribución simple. Las corrientes de magnetización se procesan

con la transformada wavelet y utilizando matrices de correlación, que a su vez se utilizan para obtener una densidad espectral de potencia (PSD) de frecuencia de tiempo; estos se utilizan para cuantificar el nivel de daño cuando los devanados del transformador experimentan fallas durante su energización. Sin embargo, solo será posible realizar el diagnóstico cuando se energiza el transformador y no cuando está operando normalmente. Por último, en [17] y [18] se exploró de manera exitosa la detección de fallas internas en transformadores eléctricos por medio de la implementación de observadores donde al utilizar modelo no lineal del transformador, se logró detectar fallas de manera efectiva.

2.2. Generador de residuos basado en datos

La técnica propuesta para resolver el problema central de este trabajo, el cual es diagnosticar fallas internas en transformadores eléctricos y ajustar la sensibilidad, del algoritmo al momento de detectar fallas, parte de estudios propuestos en [7] y [19] donde se realizan diagnósticos efectivos de fallas a partir de datos medidos entrada-salida de sistemas continuos lineales e invariantes en el tiempo (LTI) además en [19] se logró introducir un enfoque capaz de aislar fallas.

Para generar un residuo capaz de diagnosticar fallas en un sistema como el que se muestra a continuación:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + E_f f(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) + Ff(t)\end{aligned}\tag{2.1}$$

sabiendo que $x \in \mathfrak{R}^n$ es el vector de estados, $u \in \mathfrak{R}^{k_u}$ es el vector de entradas de control, $y \in \mathfrak{R}^m$ es el vector de salidas medidas y $f \in \mathfrak{R}^{k_f}$ es el vector de fallas. Para el caso de diagnosticar fallas a través de mediciones entrada-salida no es necesario conocer las matrices del sistema A , B , C , D , E y F , puesto que será posible generar el residuo a través de un acercamiento al modelo matemático a través de la utilización de filtros como los que se muestran en Fig. 2.1 y de esta forma se podrá resolver la problemática del desconocimiento del modelo matemático.

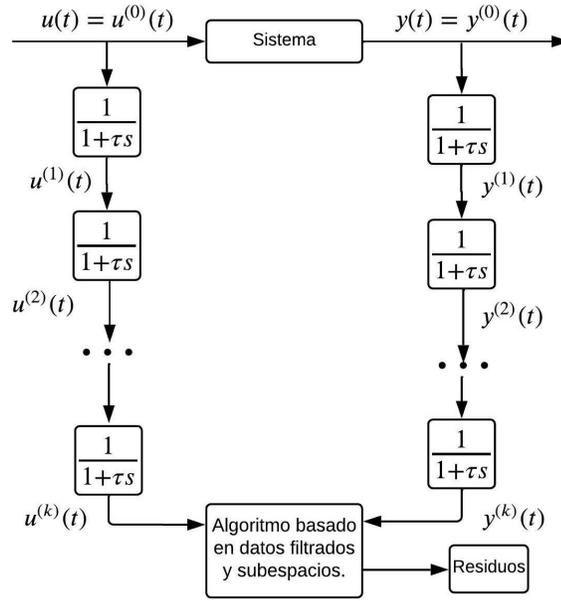


Fig. 2.1: Procedimiento para obtener los datos filtrados y así construir el algoritmo detector de fallas.

2.2.1. Filtrado de datos entrada-salida

Ante la ausencia del modelo matemático del sistema a detectar fallas, es necesario introducir una serie de filtros pasa-bajas de la forma:

$$w = \frac{1}{1 + \tau s} \quad (2.2)$$

donde el parámetro τ es de libre diseño con la condición que tiene que ser mayor a cero aunque si se tiene una ventana muy amplia de datos es recomendable que este sea un número muy pequeño.

Como el filtro está en dominio de Laplace para poder hacer el análisis de como afecta este filtro o series de filtros al sistema mostrado en (2.1) se aplica la transformada de Laplace al sistema antes mencionado tomando como valores iniciales $f(t) = 0$ y $x(0) = 0$ obteniendo:

$$sX(s) = AX(s) + BU(s) \quad (2.3)$$

$$Y(s) = CX(s) + DU(s) \quad (2.4)$$

Una vez realizada la transformada de Laplace se procede a despejar s del filtro

propuesto en (2.2) y se sustituye en (2.3) obteniendo

$$X(s) - wX(s) = \tau wAX(s) + \tau wBU(s) \quad (2.5)$$

Sabiendo que $w = 1 - \tau sw$ y simplificando dicha igualdad en (2.5) nos queda:

$$\begin{aligned} X(s) + \tau wsX(s) &= X(s) + \tau wAX(s) + \tau wBU(s) \\ X(s) + \tau wsX(s) &= (I + \tau wA)X(s) + \tau wBU(s) \\ X(s) &= (I + \tau wA - \tau wsI)X(s) + \tau wBU(s) \\ X(s) &= (I + \tau A)wX(s) + \tau BwU(s) \end{aligned} \quad (2.6)$$

Ahora la ecuación de salida del sistema transformado (2.4) se multiplica en ambos lados por w^s resultando

$$w^s Y(s) = C[w^s X(s)] + D[w^s U(s)] \quad (2.7)$$

Se obtienen las salidas anteriores del sistema a continuación

$$w^{s-1} Y(s) = C[w^{s-1} X(s)] + D[w^{s-1} U(s)] \quad (2.8)$$

En la ecuación que representa la salida anterior se sustituye (2.6) obteniendo

$$w^{s-1} Y(s) = C(I + \tau A)w^s X(s) + C\tau Bw^s U(s) + D[w^{s+1} U(s)] \quad (2.9)$$

Por lo tanto, sustituyendo de manera recurrente la misma ecuación, se obtiene

$$Y(s) = C(I + \tau A)^s w^s + C(I + \tau A)^{s-1} \tau Bw^s U(s) + \dots + C\tau BwU(s) + DU(s) \quad (2.10)$$

A partir de las ecuaciones anteriores es posible definir la ecuación de entradas y salidas siguiente

$$\begin{bmatrix} w^s Y(s) \\ w^{s-1} Y(s) \\ \vdots \\ Y(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C \\ C(I + \tau A) \\ \vdots \\ C(I + \tau A)^s \end{bmatrix} w^s X(s) + \begin{bmatrix} D & 0 & \dots & 0 \\ \tau CB & D & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ \tau C(I + \tau A)^{s-1} B & \dots & \tau CB & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w^s U(s) \\ w^{s-1} U(s) \\ \vdots \\ U(s) \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

En esta última ecuación es posible observar cómo a través de conocer la entrada y salida y tratar estos datos con algunos arreglos matemáticos es posible conocer el comportamiento del sistema interno sin necesidad de conocer las matrices que conforman dicho modelo, y a partir de esto será posible generar residuos basados en datos para el diagnóstico de fallas

2.2.2. Tratamiento de los datos para armar el generador de residuos

Una vez los datos se hayan pasado por la serie de filtros, suponiendo que N muestras de señales filtradas corresponden a un tiempo t_1, \dots, t_N y partiendo de

$$Y_N = \begin{bmatrix} C \\ C(I + \tau A) \\ \vdots \\ C(I + \tau A)^s \end{bmatrix} X_N + \begin{bmatrix} D & 0 & \cdots & 0 \\ \tau C B & D & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ \tau C(I + \tau A)^{s-1} B & \cdots & \tau C B & D \end{bmatrix} U_N \quad (2.12)$$

El número de columnas N será seleccionado de tal forma que se utilice todo el intervalo de tiempo capturado, entonces (2.12) se describe de la siguiente forma

$$Y_N = H_{o\tau} X_N + H_{s\tau} U_N \quad (2.13)$$

donde $Y_N \in \mathfrak{R}^{(k+1)m \times N}$ y $U_N \in \mathfrak{R}^{(k+1)k_u \times N}$. y $X_N \in \mathfrak{R}^{n \times N}$ están definidas como

$$U_N = \begin{bmatrix} u^{(k)}(1) & u^{(k)}(2) & \cdots & u^{(k)}(N) \\ u^{(k-1)}(1) & u^{(k-1)}(2) & \cdots & u^{(k-1)}(N) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ u^{(0)}(1) & u^{(0)}(2) & \cdots & u^{(0)}(N) \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

$$Y_N = \begin{bmatrix} y^{(k)}(1) & y^{(k)}(2) & \cdots & y^{(k)}(N) \\ y^{(k-1)}(1) & y^{(k-1)}(2) & \cdots & y^{(k-1)}(N) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y^{(0)}(1) & y^{(0)}(2) & \cdots & y^{(0)}(N) \end{bmatrix}$$

$$X_N = \begin{bmatrix} x^{(k)} & x^{(k)}(2) & \cdots & x^{(k)}(N) \end{bmatrix}$$

Las matrices (2.14) se les denomina matrices Hankel y se reordenan de la siguiente forma

$$W_N = \begin{bmatrix} Y_N \\ U_N \end{bmatrix}, \quad Q_N = \begin{bmatrix} X_N \\ U_N \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

$$H = \begin{bmatrix} H_{o\tau} & H_{s\tau} \\ 0 & I \end{bmatrix}$$

Se procede a realizar una descomposición en valores singulares (SVD) de las matriz de datos W_N obteniendo de esta

$$W_N = U \Sigma_s V$$

$$U = \begin{bmatrix} U_{11} & U_{12} \\ U_{21} & U_{22} \end{bmatrix}, V = \begin{bmatrix} V_{11} & V_{12} \\ V_{21} & V_{22} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

$$\Sigma_s = \begin{bmatrix} S & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

donde:

$$U \in \mathfrak{R}^{(k+1)(m+k_u) \times (k+1)(m+k_u)}; \Sigma_s \in \mathfrak{R}^{(k+1)(m+k_u) \times N}; V \in N \times N; S \in \mathfrak{R}^{(k_u(k+1)+n) \times (k_u(k+1)+n)}; U_{11} \in \mathfrak{R}^{m(k+1) \times (k_u(k+1)+n)}; U_{12} \in \mathfrak{R}^{m(k+1) \times (m(k+1)-n)}; U_{21} \in \mathfrak{R}^{k_u(k+1) \times (k_u(k+1)+n)};$$

Por la forma de la descomposición SVD se sabe que $\begin{bmatrix} U'_{12} & U'_{22} \end{bmatrix} W_N = 0$, por lo tanto,

$$\begin{bmatrix} U'_{12} & U'_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_{o\tau} & H_{s\tau} \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_N \\ U_N \end{bmatrix} = 0 \quad (2.17)$$

$$\begin{bmatrix} U'_{12} & U'_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_{o\tau} & H_{s\tau} \\ 0 & I \end{bmatrix} = 0$$

De esta forma se puede notar que

$$\begin{aligned} U'_{12} H_{o\tau} &= 0 \\ U'_{12} H_{s\tau} + U'_{22} &= 0 \end{aligned} \quad (2.18)$$

Así mismo, se puede identificar que es posible generar unas matrices que se aproximen al modelo matemático del sistema a evaluar ($H_{o\tau}$ y $H_{s\tau}$) a través del tratamiento de los datos filtrados, obteniendo como resultados las siguientes matrices

$$\begin{aligned} H_{o\tau}^\perp &= U'_{12} \\ H_{o\tau}^\perp H_{s\tau} &= -U'_{22} \end{aligned} \quad (2.19)$$

2.2.3. Construcción del generador de residuos como observador

El primer paso para la construcción del generador de residuos es armar las matrices P_m y P_{k_u} donde τ es el valor del filtro utilizado en (2.2) y C_i^j representa el

coeficiente binomial de i y j .

$$P_m = \begin{bmatrix} I_{m \times m} & 0 & \cdots & 0 \\ C_1^0 I_{m \times m} & C_1^1 \tau I_{m \times m} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ C_s^0 I_{m \times m} & C_s^1 \tau I_{m \times m} & \cdots & C_s^s \tau^s I_{m \times m} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

$$P_{k_u} = \begin{bmatrix} I_{k_u \times k_u} & 0 & \cdots & 0 \\ C_1^0 I_{k_u \times k_u} & C_1^1 \tau I_{k_u \times k_u} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ C_s^0 I_{k_u \times k_u} & C_s^1 \tau I_{k_u \times k_u} & \cdots & C_s^s \tau^s I_{k_u \times k_u} \end{bmatrix}$$

Con ayuda de las matrices P_m y P_{k_u} es posible generar los vectores v_s y ρ_s los cuales son fundamentales para la construcción del residuo estos vectores se apoyan de un parámetro de diseño denominado α el cual su único requisito es ser diferente de 0.

$$\begin{aligned} v_s &= \alpha U'_{12} P_m \\ \rho_s &= -\alpha U'_{22} P_{k_u} \end{aligned} \quad (2.21)$$

Una vez generados los vectores v_s y ρ_s se continúa con la construcción de las matrices que forma el generador de residuos, las cuales son G , J , L , w , ρ , v .

$$G = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 & g_1 \\ 1 & \cdots & 0 & g_2 \\ \vdots & & & \vdots \\ 0 & \cdots & 1 & g_s \end{bmatrix}; J = \begin{bmatrix} \rho_{s,0} \\ \rho_{s,1} \\ \vdots \\ \rho_{s,s-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ \vdots \\ g_s \end{bmatrix} \rho_s; L = - \begin{bmatrix} v_{s,0} \\ v_{s,1} \\ \vdots \\ v_{s,s-1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ \vdots \\ g_s \end{bmatrix} v_{s,s}$$

$$w = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 & -1 \end{bmatrix}; p = \rho_{s,s}; v = v_{s,s} \quad (2.22)$$

Donde g_1 , g_2 , \dots , g_s están relacionadas con los polos del observador.

La implementación del generador de residuos es a través de un observador como se muestra en la Fig 2.2 logrando un diagnóstico eficaz a través de los datos medidos de la entrada-salida. El residuo toma este nombre ya que la salida del observador es la comparación de la señal nominal sin falla y la señal que presenta falla, si el generador de residuo da como salida 0 se entiende que el sistema no está presentando ninguna falla. El observador o generador residual tiene la forma de un sistema lineal invariante

en el tiempo (LTI).

$$\begin{aligned} \dot{z} &= Gz(t) + Ju(t) + Ly(t) \\ r(t) &= wz(t) + pu(t) + vy(t) \end{aligned} \tag{2.23}$$

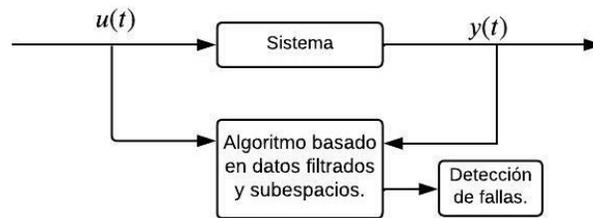


Fig. 2.2: Observador detectando fallas a partir de datos de la entrada-salida del sistema.

Capítulo 3

Sensibilidad del diagnóstico de fallas basado en datos

En este capítulo se discute la manera de modificar la sensibilidad de los residuos. Mediante la modificación considerada en este trabajo y desarrollada más adelante, es posible hacer una búsqueda para obtener residuos con una mejor detección a fallas pequeñas. Primero se establecen los grados de libertad disponibles, en forma de parámetros de diseño.

3.1. Parámetros que afectan en la sensibilidad

En la construcción del generador residual se observa que se tienen 3 datos que se consideran de libre diseño, los cuales son los parámetros τ , α y los polos del observador, los cuales están relacionados a $g_1, g_2 \cdots g_s$.

La τ es el primer parámetro que se tiene que determinar, pero se puede notar que dicho parámetro al estar relacionado con el filtro de (2.2) afecta más a la formación de la matriz W_N que al generador de residuos en sí, por lo tanto, la τ ayuda a tener una mejor calidad del sistema y no tener ruidos, pero no afectaría la sensibilidad del generador de residuos.

Otro parámetro libre de diseño es α la cual es empleada en (2.20) para la formación de las matrices P_m y P_{k_u} y estas matrices al estar directamente relacionadas con (2.21) y (2.22) se puede ver que al variar la magnitud del vector α se obtienen diferentes generadores de residuos los cuales tienen comportamiento más o menos sensible ante la presencia de una misma falla.

El último parámetro de libre diseño es la ubicación de los polos, el cual está relacionada directamente con la matriz G del observador y de esta forma se intuye que al modificar dichos valores el observador se genera de forma diferente y estas combinaciones generan residuos que se comportan de manera diferente a fallas de la misma magnitud.

3.2. Efecto en la sensibilidad de los parámetros libres de diseño.

En el enfoque propuesto se tienen 2 parámetros que permiten la modificación de la sensibilidad ante de detección de fallas, que son los polos del observador y el vector α como se mencionó en la sección anterior, el primer parámetro ya se ha estudiado anteriormente en [20] donde se logró un ajuste en la sensibilidad al variar los polos del observador, sin embargo, lo que se logró fue una magnificación del efecto del cambio cuando hay una falla es decir ayuda a amplificar la señal del residuo ante la presencia de una falla, pero no mejora el algoritmo ante la posibilidad de detectar fallas más pequeñas.

El segundo parámetro, es decir α históricamente no ha sido estudiado el cuánto al efecto de la sensibilidad ante la presencia de fallas, esto se debe a que es un parámetro que está escondido en la generación de los residuos, entonces, se puede considerar que es exclusivo de la metodología propuesta por el trabajo donde nos ayuda a tener una mejor precisión ante las entradas y salidas del observador, esto se debe a que está directamente relacionado con las matrices que multiplican las entradas y salidas del observador entonces al escoger la mejor combinación de este vector es posible detectar los cambios más pequeños entre el sistema con y sin falla y de esta forma considerar que el residuo es más sensible.

3.3. Diseño de la sensibilidad de fallas en los residuos

Para lograr residuos más o menos sensibles se tiene que proponer diferentes valores de los parámetros de diseño que sí afectan al diseño del generador residual y ver cómo estos valores afectan en la sensibilidad de detección de fallas. Para esto se

procede a obtener residuos con diferentes asignaciones (arbitrarias) de los parámetros τ , α y los coeficientes del polinomio característico deseado para el generador de residuos representado en G . Los pasos requeridos para construir los generadores de residuos, una vez que se establezcan valores a los parámetros antes mencionados, son los siguientes, [7]:

Algoritmo 1 Construcción del generador residuos.

1. Proponer valores de τ , N , g_1, \dots, g_s y s .
 2. Aplicar el filtro mostrado en Fig. 2.1.
 3. Construir W_N a partir de los datos recopilados del filtro antes mencionado.
 4. Descomponer en valores singulares (SVD) la matriz W_N y obtener U_{12} y U_{22} .
 5. Calcular las matrices P_m y P_{k_u} a partir de (2.20)
 6. Proponer α y calcular vectores v_s y p_s a partir de (2.21).
 7. Seleccionar los polos del observador a partir de $g_1, g_2 \dots g_s$ garantizando que G sea estable.
 8. Calcular G, J, L, w, ρ, v a partir de (2.22).
 9. Implementar el generador de residuos como se muestra en Fig. 2.2.
-

3.3.1. Método de evaluación de residuos.

Aunque es posible identificar cuando se presenta una falla en un sistema en forma de señal senoidal a través de la salida de residuos, por medio de la magnitud en la amplitud de la señal de salida del residuo, esto no resulta muy amigable para analizar, de tal forma que es difícil observar como se comporta el residuo a diferentes magnitudes de fallas. Es por esto que en esta sección se propone un método para la evaluación de los residuos que presentan este comportamiento y de esta manera a través de la señal de salida del método de evaluación tener un panorama más sencillo al momento de diagnosticar la falla.

El método consiste en aplicar una integral numérica del residuo para de esta forma tener el área que contiene cada residuo para posteriormente promediar estas áreas y poder tener una señal que permanezca casi estática en valor y conforme a la magnitud de este valor, saber qué tan pequeña o grande es la falla que se presenta. Como la señal del residuo es senoidal, presenta una parte negativa y otra positiva,

es por esto que antes de empezar a aplicar la integral será necesario obtener el valor absoluto de la señal para de esta forma solo tener valores positivos.

Una vez que se tiene la señal del residuo aplicada con el valor absoluto, la cual se nombra R , se evalúa la señal con una serie de operaciones, las cuales están plasmadas en el diagrama flujo de la Fig. 3.1. Donde los datos t_o , t_f y f se refieren al tiempo inicial donde comienza la evaluación, tiempo final de la evaluación y la frecuencia en la cual se está evaluando, respectivamente.

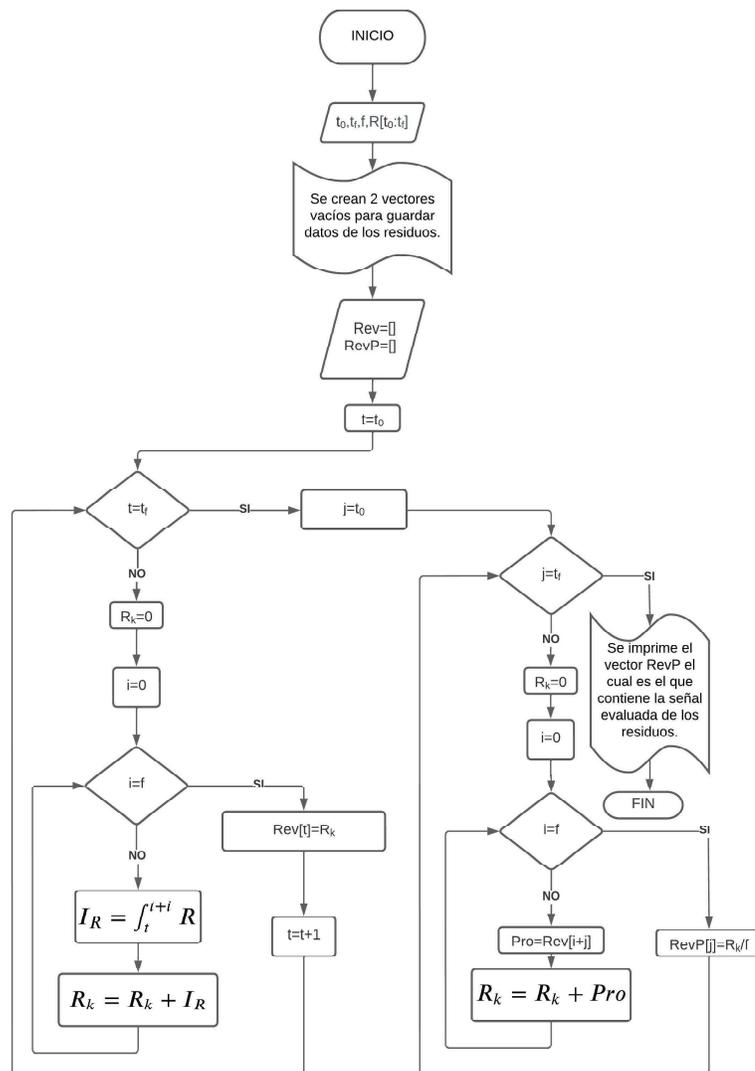


Fig. 3.1: Procedimiento en forma de diagrama de flujo para realizar la evaluación a los residuos.

3.4. Ejemplo práctico del algoritmo de diagnóstico de fallas basado en datos

Con la finalidad de probar qué tan confiable es el generador de residuos al momento de detectar fallas, en este capítulo se aplican todos los conceptos abordados en el capítulo anterior en un ejemplo tomado de [21] específicamente de la página 82 donde aplica un diseño de generador de residuos diferente al propuesto en este trabajo, en un reactor químico. De esta forma será posible comparar la efectividad del generador de residuos sugerido en este trabajo y compararlo con uno ya realizado en la literatura, de igual forma se recomiendan de manera arbitraria distintos parámetros de diseño para poder realizar diversos residuos y de esta forma ver el efecto de los parámetros en cuestión con la sensibilidad de detección de fallas.

3.4.1. Sistema propuesto

El sistema de reactor químico propuesto tiene la forma mostrada en (3.1) considerado como un sistema lineal invariante en el tiempo (LTI).

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + Ed(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (3.1)$$

Los vectores de estados, entrada y salida considerados para el reactor químico son:

$$x(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_o(t) \\ T_o(t) \\ T_w(t) \\ T_m(t) \end{bmatrix} \quad u(t) = \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ u_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3,6C_i(t) \\ 3,6T_i(t) \\ 36T_{wi}(t) \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ y_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_o(t) \\ T_o(t) \\ T_w(t) \end{bmatrix}$$

donde

$C_o(t)$ Concentración del producto químico.

$T_o(t)$ Temperatura del producto.

$T_w(t)$ Temperatura del agua de las camisas del intercambiador de calor.

$T_m(t)$ Temperatura del refrigerante.

$C_i(t)$ Concentración de entrada del reactivo.

$T_i(t)$ Temperatura de entrada.

$T_{wi}(t)$ Temperatura de entrada del agua refrigerante.

Donde el autor propone las siguientes matrices para el sistema:

$$A = \begin{bmatrix} -3,6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -3,6702 & 0 & 0,0702 \\ 0 & 0 & -36,2588 & 0,2588 \\ 0 & 0,6344 & 0,7781 & -1,4125 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad E = \begin{bmatrix} 1 \\ 20,758 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

El término $d(t)$ representa la no linealidad del sistema y es igual a:

$$d(t) = 3,012 \times 10^{12} e^{-\frac{1,2515 \times 10^7}{x_2(t)}} \quad (3.4)$$

3.4.2. Elaboración de los residuos del sistema del reactor químico

3.4.2.1. Filtrado y tratamiento de datos en reactor químico

Para poder generar los residuos en el sistema del reactor químico es necesario realizar una simulación del sistema anteriormente propuesto, esto para tener información del sistema tanto en la entrada como en la salida y de esta forma poder utilizar el filtro propuesto en (2.2) para generar la matriz W_N . Los valores iniciales de $u(0)$ así como de $x(0)$ sugeridos por el autor son los siguientes.

$$u(0) = \begin{bmatrix} 34,632 \\ 1641,6 \\ 29980 \end{bmatrix} \quad x(0) = \begin{bmatrix} 0,3412 \\ 525,7 \\ 472,2 \\ 496,2 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Obteniendo como resultado de la simulación la siguiente salida del sistema.

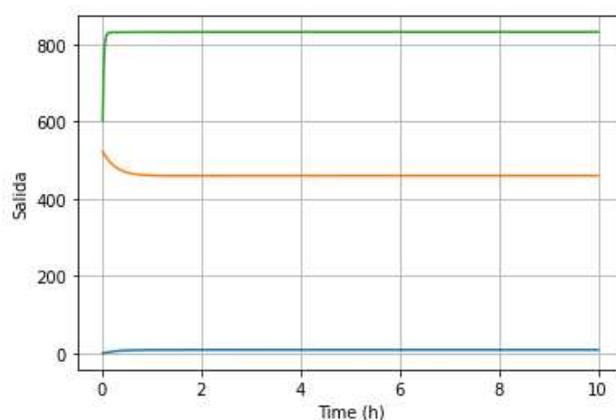


Fig. 3.2: Salida del sistema del reactor químico.

La señal de color azul representa la salida asociada al primer estado del sistema, la de color naranja se asocia al segundo estado y por último la de color verde se asocia al tercer estado.

Así como se obtuvieron las señales de salida del sistema de igual forma, se procede a realizar lo mismo con la señal de entrada del sistema.

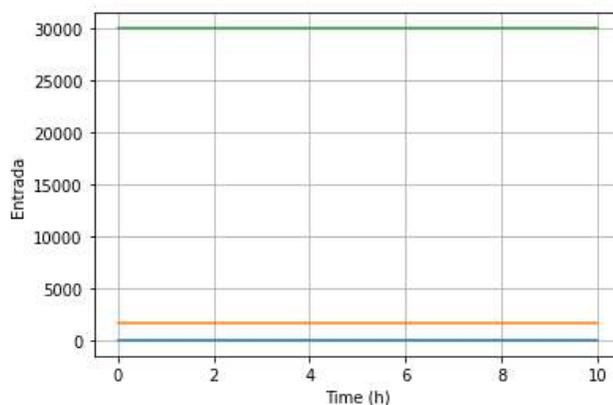


Fig. 3.3: Entrada del sistema del reactor químico.

La señal de color azul representa la entrada 1 del sistema, la señal de color naranja representa la segunda entrada del sistema y por último la señal de color verde es la entrada 3 del sistema. Se puede notar que estas señales se mantienen constante con respecto al tiempo, esto debido a que las entradas del sistema son un valor numérico constante.

Una vez que se tienen los datos de las señales de entrada y salida del sistema, es posible aplicar el filtro propuesto en (2.2) donde el valor de τ para este sistema será tomado como 0.5.

Ahora es posible generar la matriz W_N si se toma un número de 6 muestras, es decir $N = 6$ y el sistema al tener un número de 3 salidas y 3 entradas da como resultado una matriz de dimensiones 12×6 la cual se muestra continuación.

$$W_N = \begin{bmatrix} 0 & 7,05 & 9,24 & 9,56 & 9,61 & 9,61 \\ 0 & 405,2 & 452,49 & 458,89 & 459,81 & 459,96 \\ 0 & 715,75 & 816,10 & 829,49 & 831,29 & 831,53 \\ 0,3412 & 9,3827 & 9,61 & 9,6198 & 9,6199 & 9,6199 \\ 525,7 & 460,44 & 459,73 & 459,91 & 459,97 & 459,98 \\ 472,2 & 831,2 & 831,5 & 831,56 & 831,57 & 831,57 \\ 0 & 29,94 & 34,01 & 34,54 & 34,62 & 34,63 \\ 0 & 1419,44 & 1612,13 & 1637,69 & 1641,08 & 1641,53 \\ 0 & 25922,92 & 29441,95 & 29908,64 & 29970,53 & 29978,74 \\ 34,632 & 34,632 & 34,632 & 34,632 & 34,632 & 34,632 \\ 1641,6 & 1641,6 & 1641,6 & 1641,6 & 1641,6 & 1641,6 \\ 29980 & 29980 & 29980 & 29980 & 29980 & 29980 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Realizando la descomposición SVD a W_N se obtiene que U_{12} y U_{22} son iguales a

$$U_{12} = \begin{bmatrix} -0,025372747483419323 & -0,46337414542153416 \\ 0,006087386270870731 & 0,11117192522880749 \\ -0,03412133555371206 & -0,6231466902768884 \\ -0,03290035951869133 & -0,6008484100895192 \\ 0,007569674484959253 & 0,1382424709464069 \\ -0,001907559536293846 & -0,03483713015759254 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$U_{22} = \begin{bmatrix} 1,0490272954464144e - 06 & -0,46337414542153416 \\ 4,9723995285443036e - 05 & 0,11117192522880749 \\ 0,0009081064423729539 & -0,6231466902768884 \\ -6,318173479696092e - 05 & -0,6008484100895192 \\ 0,9970051062862508 & 0,1382424709464069 \\ -0,05469475640529376 & -0,03483713015759254 \end{bmatrix}$$

Debido a que el parámetro τ propuesto para el filtrado de los datos es 0.5 y que el sistema tiene 3 salidas y 3 entradas, las matrices P_m y P_{k_u} quedan de la siguiente

forma

$$P_m = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,5 \end{bmatrix} \quad P_{k_u} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,5 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

3.4.2.2. Ajuste de la sensibilidad a través de los parámetros de diseño en el reactor químico

Con la finalidad de generar residuos que sean más sensibles que otros, en esta sección se desarrollan 4 residuos con diferentes parámetros seleccionados arbitrariamente, mismos que se podrán ver en la tabla (3.1)

Tabla 3.1: Parámetros para diseño de residuos

Residuos	Parámetros		
	τ	α	g
r_1	0.5	[1,0]	-720,-804,-296,-39
r_2	0.5	[1,0]	-2280,-2036,-546,-51
r_3	0.5	[0,1]	-2280,-2036,-546,-51
r_4	0.5	[0,1]	-720,-804,-296,-39

Con ayuda de esos parámetros es posible generar las matrices y vectores para obtener el residuo en forma de observador.

3.4.2.3. Residuo número 1

Resolviendo las operaciones pertinentes para la generación de las matrices y vectores del primer residuo, se obtienen las siguientes

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -720 \\ 1 & 0 & 0 & -804 \\ 0 & 1 & 0 & -296 \\ 0 & 0 & 1 & -39 \end{bmatrix}; J = \begin{bmatrix} -0,0227465 & 358,922 & -19,691 \\ -0,0253685 & 400,298 & -21,9609 \\ -0,00932035 & 147,058 & -8,06838 \\ -0,0012015 & 18,943 & -1,04011 \end{bmatrix}$$

$$L = \begin{bmatrix} -11,8188 & 2,719 & -0,6526 \\ -13,1841 & 3,03314 & -0,731764 \\ -4,82743 & 1,11044 & -0,247244 \\ -0,599734 & 0,137736 & -0,0021223 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$w = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}; p = \begin{bmatrix} 3,15e^{-5} & -0,49 & 0,02734 \end{bmatrix}$$

$$v = \begin{bmatrix} -0,016 & -0,0037 & -0,00095 \end{bmatrix}$$

3.4.2.4. Residuo número 2

Resolviendo las operaciones pertinentes para la generación de las matrices y vectores del segundo residuo, se obtiene

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -2280 \\ 1 & 0 & 0 & -2036 \\ 0 & 1 & 0 & -546 \\ 0 & 0 & 1 & -51 \end{bmatrix}; J = \begin{bmatrix} -0,0720282 & 1136,59 & -62,3529 \\ -0,0642885 & 1014,45 & -55,6528 \\ -0,0172181 & 271,684 & -14,9052 \\ -0,00158059 & 24,9251 & -1,36828 \end{bmatrix}$$

$$L = \begin{bmatrix} -37,481 & 8,62334 & -2,1405 \\ -33,4507 & 7,69606 & -1,90682 \\ -8,93998 & 2,05665 & -0,485689 \\ -0,797136 & 0,183154 & -0,0135677 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$w = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}; p = \begin{bmatrix} 3,15e^{-5} & -0,49 & 0,02734 \end{bmatrix}$$

$$v = \begin{bmatrix} -0,016 & -0,0037 & -0,00095 \end{bmatrix}$$

3.4.2.5. Residuo número 3

Resolviendo las operaciones pertinentes para la generación de las matrices y vectores del tercer residuo, se obtiene

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -2280 \\ 1 & 0 & 0 & -2036 \\ 0 & 1 & 0 & -546 \\ 0 & 0 & 1 & -51 \end{bmatrix}; \quad J = \begin{bmatrix} -1,31543 & -62,3529 & 1,26897 \\ -1,17408 & -55,6528 & 1,13083 \\ -0,314448 & -14,9052 & 0,290709 \\ -0,0288658 & -1,36828 & 0,0116076 \end{bmatrix}$$

$$L = \begin{bmatrix} -684,504 & 157,485 & -39,0912 \\ -610,9 & 140,551 & -34,8236 \\ -163,268 & 37,5599 & -8,86997 \\ -14,5578 & 3,34489 & -0,247782 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$w = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}; p = \begin{bmatrix} 0,00057 & 0,0273 & -0,00056 \end{bmatrix}$$

$$v = \begin{bmatrix} -0,3004 & 0,06912 & -0,01741 \end{bmatrix}$$

3.4.2.6. Residuo número 4

Resolviendo las operaciones pertinentes para la generación de las matrices y vectores del cuarto residuo, se obtiene

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -720 \\ 1 & 0 & 0 & -804 \\ 0 & 1 & 0 & -296 \\ 0 & 0 & 1 & -39 \end{bmatrix}; \quad J = \begin{bmatrix} -0,415411 & -19,691 & 0,389381 \\ -0,463297 & -21,9609 & 0,43618 \\ -0,170215 & -8,06838 & 0,149749 \\ -0,0219426 & -1,04011 & 0,00484151 \end{bmatrix}$$

$$L = \begin{bmatrix} -215,842 & 49,6561 & -11,9182 \\ -240,777 & 55,3932 & -13,364 \\ -88,1618 & 20,2796 & -4,51533 \\ -10,9527 & 2,51544 & -0,0387588 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$w = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}; p = \begin{bmatrix} 0,00057 & 0,0273 & -0,00056 \end{bmatrix}$$

$$v = \begin{bmatrix} -0,3004 & 0,06912 & -0,01741 \end{bmatrix}$$

3.4.3. Resultados del algoritmo aplicado al reactor químico

Para probar como afectan las fallas, en cada residuo se proponen 3 fallas con diferentes magnitudes o porcentajes en cada residuo, para de esta forma conocer cuánto es el porcentaje mínimo de falla que es capaz de detectar cada residuo y así conocer y corroborar que fue posible generar residuos más o menos sensibles que otros ante fallas iguales de diferente magnitud.

- f_1 está asociada a una falla en la primera entrada del reactor químico cuando $t > 4$ horas, donde la señal de falla es $f_1 = x \% \sin(2(t - 4))u_1(t)$
- f_2 está asociada a una falla en la segunda entrada del reactor químico cuando $t > 4$ horas, donde la señal de falla es $f_2 = x \% \sin(2(t - 4))u_2(t)$
- f_3 está asociada a una falla en la tercera entrada del reactor químico cuando $t > 4$ horas, donde la señal de falla es $f_3 = x \% u_3(t)$

Donde $x\%$ se refiere al porcentaje de falla en el sistema de medición, por ejemplo una falla del 20% es equivalente a multiplicar por un factor de 0.2.

3.4.3.1. Resultados del Residuo 1

Al momento de correr el primer residuo, el cual está implementado como observador y se desarrolla en el lenguaje de programación PYTHON, en Fig. 3.4 se observa de la siguiente forma cuando no hay presencia de ninguna falla.

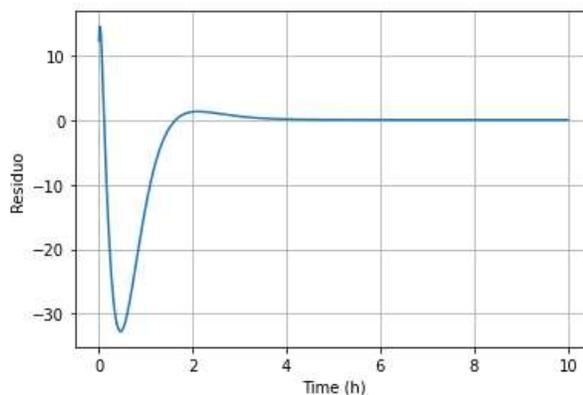


Fig. 3.4: Residuo 1 sin la presencia de fallas.

Se puede observar en la Fig. 3.4 que el residuo converge a 0 esto debido a que no hay presencia de fallas. En cambio, sí se activa la falla f_1 a un nivel del 10% se puede observar en la Fig. 3.5 como se modifica el comportamiento de dicho residuo.

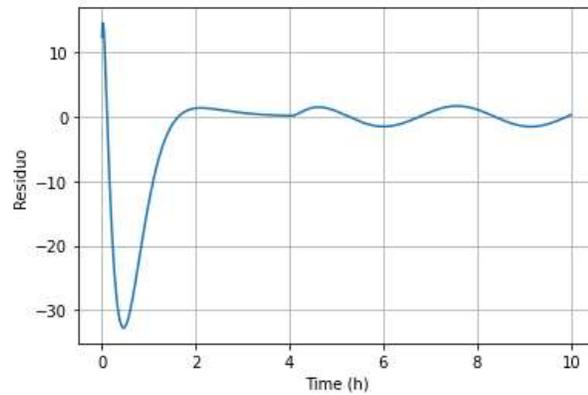


Fig. 3.5: Residuo 1 con falla f_1 del 10%

De la Fig. 3.5 se puede notar cómo antes de llegar a 4 horas, el residuo 1 ante la presencia de la falla 1 converge a 0, pero pasando de estas 4 horas el residuo toma un comportamiento sinusoidal, esto debido a la forma de la señal de f_1 , este comportamiento diferente de 0 a partir de las primeras 4 horas es considerado como la presencia de la falla en el residuo. Ahora se procede a probar el residuo 1 con la falla f_2 en un nivel del 1% (Fig. 3.6).

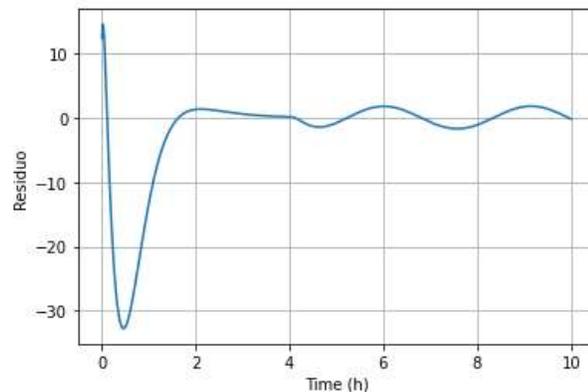


Fig. 3.6: Residuo 1 con falla f_2 del 1%

Se observa como el residuo 1 ante la presencia de f_2 tiene un comportamiento muy similar a cuando se presentó la falla f_1 , esto debido a que ambas señales de

fallas tienen la misma forma. En la Fig. 3.7 se observa como se comporta el residuo 1 ante la presencia de f_3 a un nivel del 0.1 %.

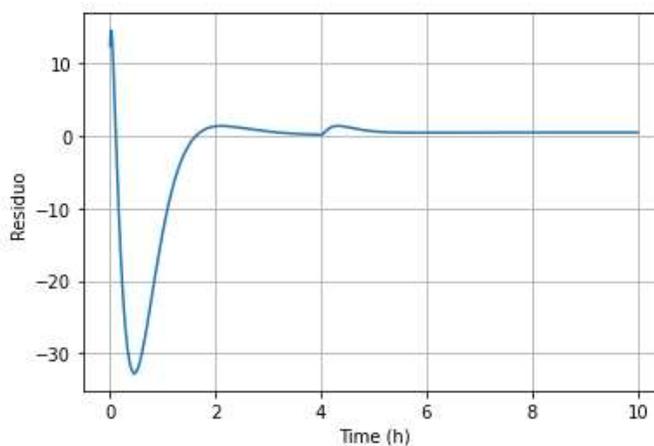


Fig. 3.7: Residuo 1 con falla f_3 del 0.1 %

3.4.3.2. Resultados del Residuo 2

En esta sección se realizan las pruebas al residuo número 2 el cual en la Fig. 3.8 se puede observar el comportamiento de este ante la ausencia de fallas, en la Fig 3.9 cuando está presente f_1 a una intensidad del 30 %, en la Fig. 3.10 cuando se presenta f_2 a un nivel del 5 % y por último en la Fig. 3.11 cuando se aplica la falla f_3 con una intensidad del 0.5 %.

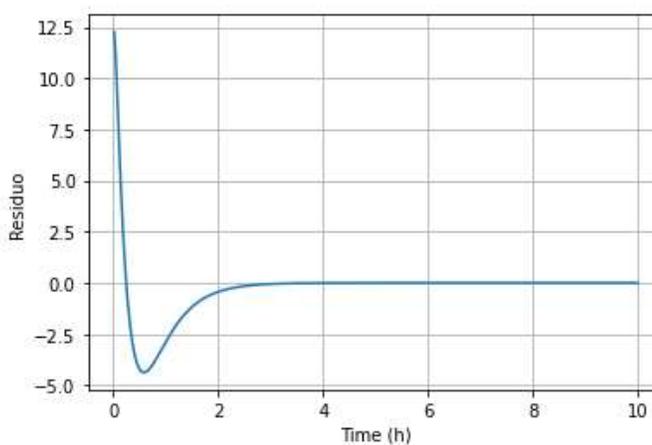


Fig. 3.8: Residuo 2 sin la presencia de fallas.

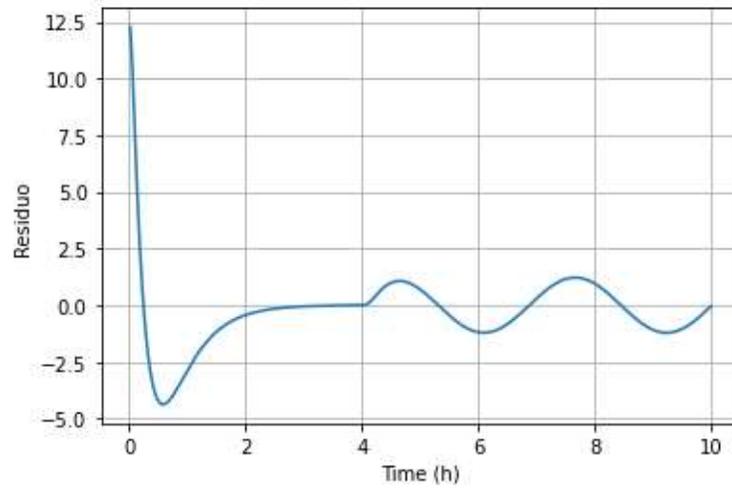


Fig. 3.9: Residuo 2 con falla f_1 del 30%

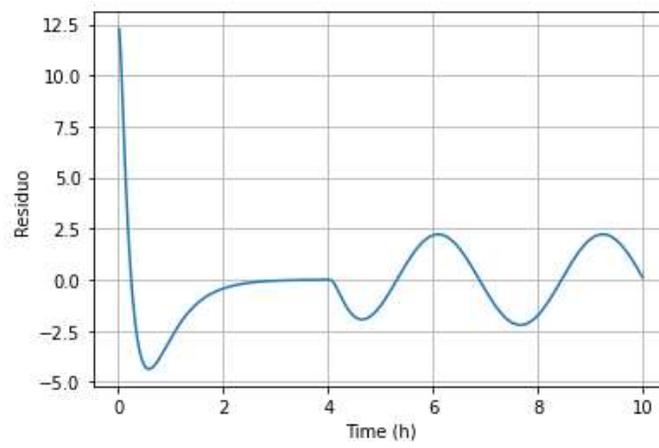


Fig. 3.10: Residuo 2 con falla f_2 del 5%

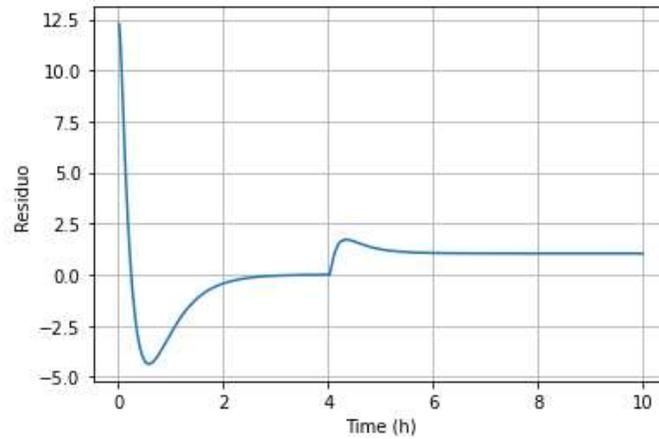


Fig. 3.11: Residuo 2 con falla f_3 del 0.5 %

Se observa que en el residuo se activa ante la presencia de fallas de manera muy similar que en el residuo 1 cuanto $t > 4$, aunque en este caso los niveles de falla suministrados pertenecían a un rango distinto.

3.4.3.3. Resultados del Residuo 3

De igual forma como en el residuo 1 y 2 ahora se prueba el tercer residuo creado, ahora con niveles de falla del 1.5 % en f_1 , 0.15 % en f_2 y 0.02 % en f_3 los resultados de este residuo se pueden ver en las Fig. (3.12-3.15).

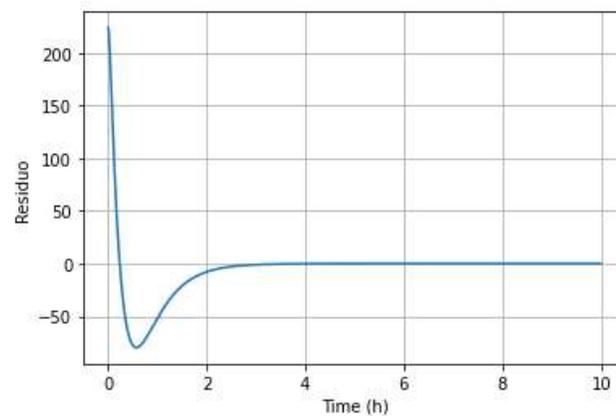


Fig. 3.12: Residuo 3 sin la presencia de fallas.

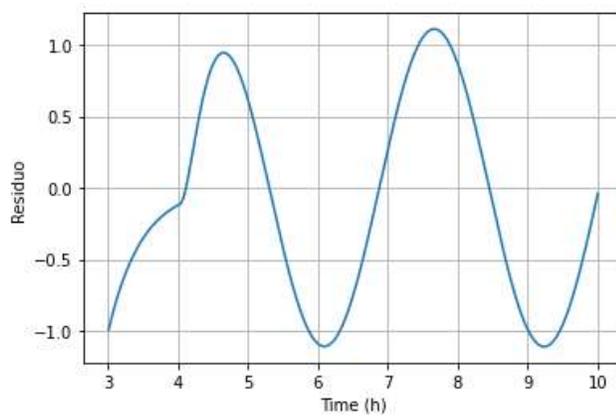


Fig. 3.13: Residuo 3 con falla f_1 del 1.5 %

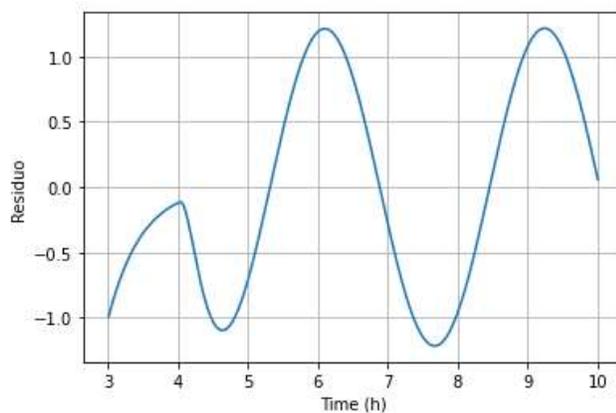


Fig. 3.14: Residuo 3 con falla f_2 del 0.15 %

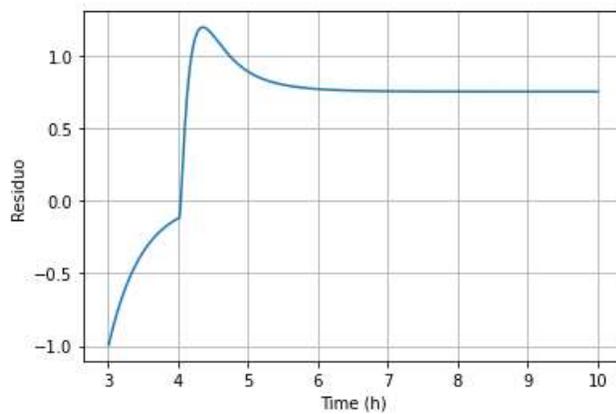


Fig. 3.15: Residuo 3 con falla f_3 del 0.02 %

Se observa que en el residuo se activa la presencia de fallas de manera muy similar que en el residuo 1 y 2 cuanto $t > 4$, aunque en este caso los niveles de falla suministrados pertenecían a un rango distinto a los anteriores.

3.4.3.4. Resultados del Residuo 4

Por último, en el cuarto residuo generado, se prueba su detección ante fallas del 0.3% en f_1 , 0.03% en f_2 y 0.015% en f_3 donde los resultados se reportan en las Fig. (3.16-3.19).

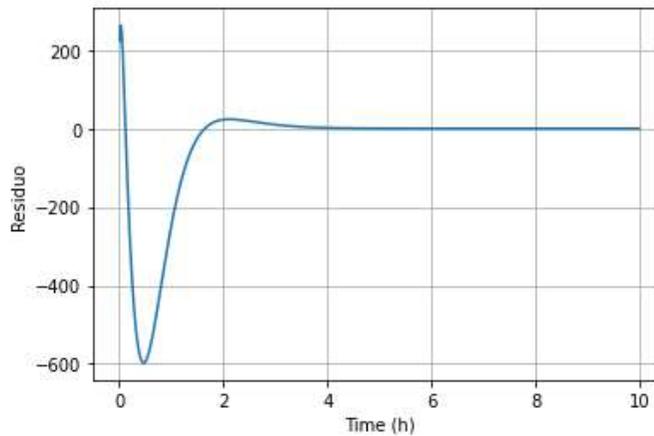


Fig. 3.16: Residuo 4 sin la presencia de fallas.

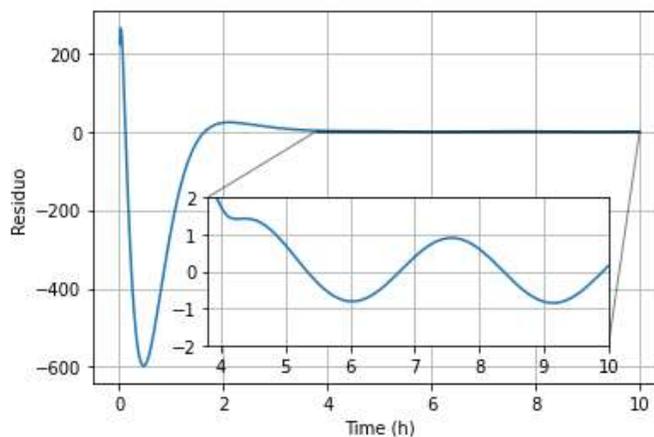


Fig. 3.17: Residuo 4 con falla f_1 del 0.3%

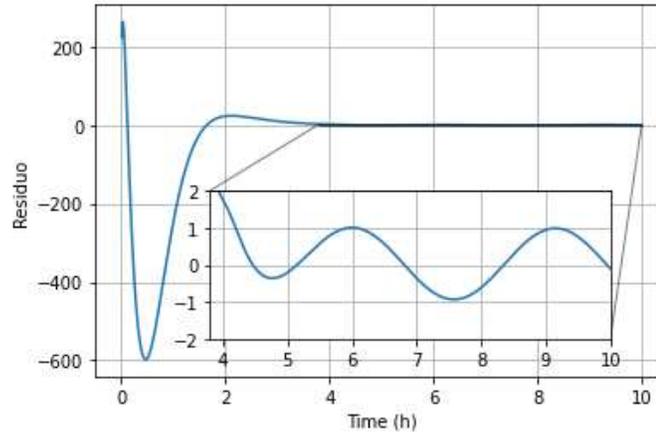


Fig. 3.18: Residuo 4 con falla f_2 del 0.03 %

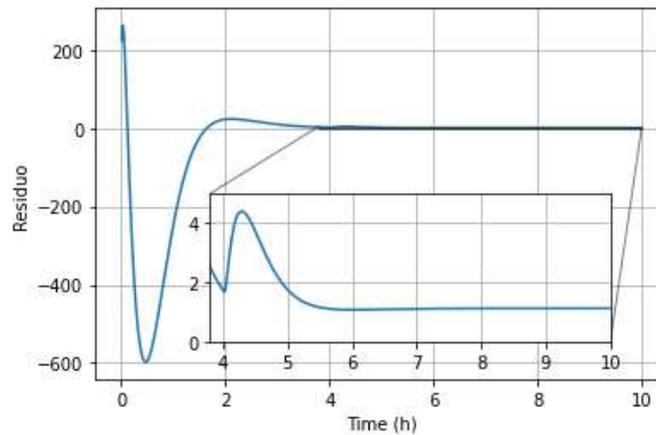


Fig. 3.19: Residuo 4 con falla f_3 del 0.015 %

En el residuo 4 las fallas se comportan parecido que en los demás residuos, con la diferencia de que no se ve el comportamiento de la falla a simple vista, esto debido al sobre impulso elevado que presenta dicho residuo, para acceder a la información del residuo con la falla se realiza un recorte en la gráfica de salida del residuo para de esta forma ver únicamente la sección de cuando se activa la falla.

3.4.3.5. Residuo Propuesto en la literatura.

De igual forma, en [21] se propone un residuo donde se prueba aplicando las fallas f_1 y f_3 en un 20 % y 2 %, respectivamente, dichos resultados se muestran en la Fig. 3.20.

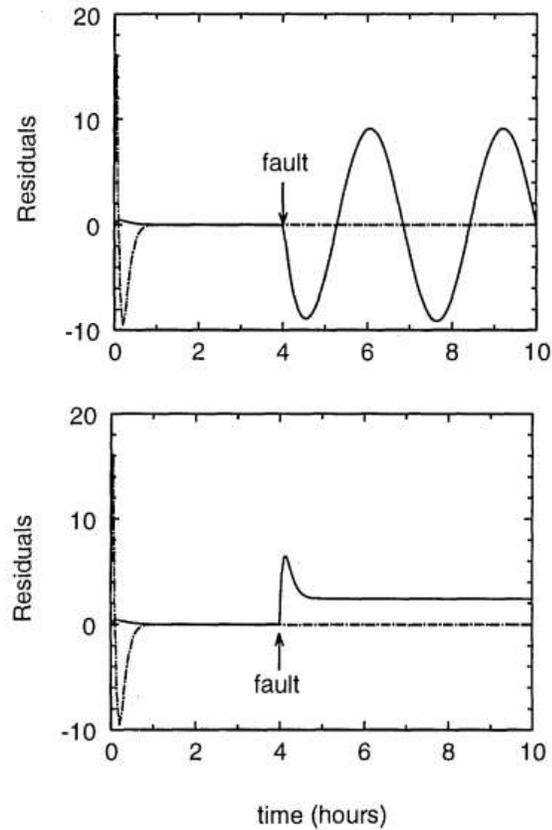


Fig. 3.20: Residuo propuesto en la literatura

En la parte superior de la Fig 3.20 se observa el comportamiento ante la presencia de la falla f_1 y en la parte inferior cuando está presente f_2 se ve la activación de la falla en el residuo de igual forma en $t > 4$ horas.

3.4.4. Comparación de la sensibilidad entre los residuos

En esta sección se comparan los 4 residuos propuestos además con el residuo tomado de [21] con la finalidad de comprobar que fue posible generar residuos más o menos sensibles entre sí, además de ver si son competitivamente aceptables con otro publicado en la literatura para el mismo sistema. Como resultado, se nota que el Residuo número 4 es el mejor residuo al momento de detectar fallas más pequeñas, por lo tanto, se puede asegurar que es el residuo con mejor sensibilidad ante la detección de fallas en este sistema, después seguiría el residuo 3, residuo 1 y residuo 2, respectivamente. se ve que el residuo propuesto en la literatura se sitúa entre 1 y 2 ante la detección de fallas más pequeñas, así que además de ser capaces de generar

residuos más sensibles que otros, variando los parámetros de diseño, se logra generar 3 residuos con mejor sensibilidad que el propuesto por la literatura. Estos resultados se pueden apreciar de mejor manera en la Tabla (3.2).

Tabla 3.2: Sensibilidad de residuos del reactor químico.

Residuos	Tamaño de falla detectable		
	f_1	f_2	f_3
r_1	10 %	1 %	0.1 %
r_2	30 %	5 %	0.5 %
r_3	1.5 %	0.015 %	0.02 %
r_4	0.3 %	0.03 %	0.015 %
$r_{[21]}$	20 %	x	2 %

Capítulo 4

Algoritmo de detección de fallas aplicado en el transformador eléctrico

En este capítulo se aborda todo lo referente al transformador eléctrico, desde cómo se comporta matemáticamente realizando el modelo magnético del mismo, el cual permite obtener señales con y sin fallas, abordando específicamente la falla de corto circuito entre espiras, así como la construcción del generador de residuos que permita detectar fallas en el transformador eléctrico, de igual forma como en el capítulo anterior se realizan diferentes residuos con el fin de comprobar que es posible generar residuos más o menos sensibles al momento de diagnosticar fallas. Por último, se aborda una metodología para evaluar los residuos generados y así tener un entendimiento más amplio de cómo está afectando la falla en el transformador.

4.1. El transformador eléctrico

Con la finalidad de poder acceder a señales que permitan generar un residuo con base en sus mediciones de entrada y salida, se acude al modelo magnético del transformador trifásico, presentado en [22], donde fue posible obtener señales cuando el transformador tiene un comportamiento nominal y cuando apenas se le empiezan a incidir fallas. En esta sección se aborda de manera superficial como funciona dicho modelo y la aplicación de las fallas entre espiras.

4.1.1. Modelo magnético del transformador eléctrico

El modelo del transformador eléctrico se basa en sus propiedades primitivas, o mejor dicho sus reluctancias. En la Fig. 4.1 se observa un transformador trifásico de 3 columnas, el cual es utilizado como base para explicar el desarrollo del modelo magnético del transformador eléctrico.

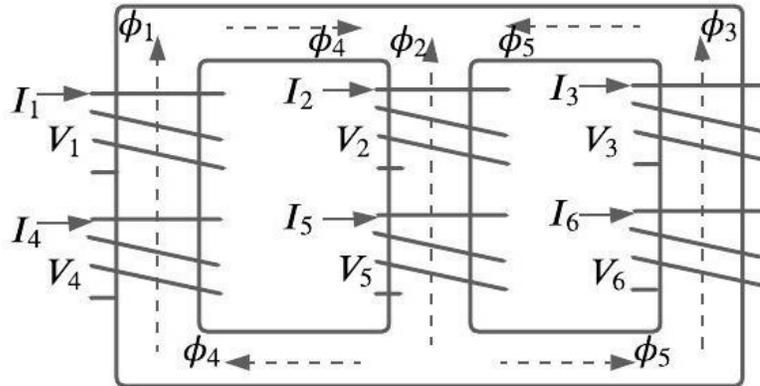


Fig. 4.1: Transformador trifásico de 3 columnas.

El primer paso en el desarrollo del modelo es la obtención de una matriz de inductancia denominada L o bien su inversa Γ , la representación física de dicha matriz se observa en la Fig. 4.2. Nótese como las alimentaciones del transformador quedan independientes de la matriz L , pero a su vez si están integradas en el modelo matemático. De esta forma, el modelo permite que la correspondiente alimentación del transformador sea aplicada como la conexión trifásica de interés.

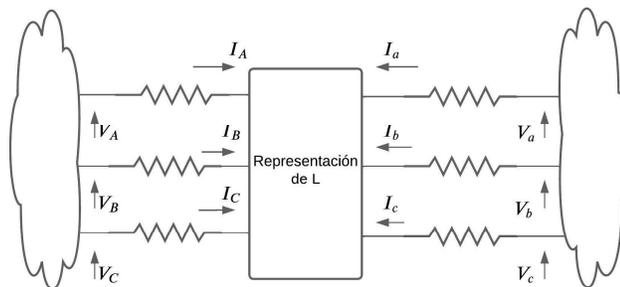


Fig. 4.2: Representación de la matriz L .

Con el fin de modelar el transformador eléctrico se utilizan los enlaces de flujo como variable de estado. Esto debido a la no linealidad del sistema en cuestión, puesto que los enlaces de flujo tienen un cambio más lento en comparación con las corrientes del transformador, es posible compensar esta no linealidad. La ecuación que representa la variación en el tiempo del transformador es la siguiente.

$$\frac{d\lambda}{dt} = v - Ri \quad (4.1)$$

Donde $\lambda \in \mathfrak{R}^{6 \times 1}$ es el vector correspondiente a los enlaces de flujo, $v \in \mathfrak{R}^{6 \times 1}$ es el vector de voltajes, $i \in \mathfrak{R}^{6 \times 1}$ es el vector de corrientes y $R \in \mathfrak{R}^{6 \times 6}$ es una matriz de forma diagonal que corresponde a la resistencia de los devanados. Es posible relacionar las corrientes y los enlaces de flujo matemáticamente apoyándose en la siguiente ecuación.

$$i = \Gamma \lambda \quad (4.2)$$

Se puede definir 4.1 y 4.2 como un sistema de ecuaciones diferencio-algebraicas. Además, se puede notar que para resolver este sistema es necesario conocer o calcular la Matriz Γ como se mencionó al principio de la sección, para esto se parte de la consideración de que en el transformador no existe un retraso significativo entre las corrientes y los flujos magnéticos del núcleo a esto se le define como una condición magneto-cuasi-estática.

Como L depende de la geometría magnética del transformador, por lo tanto, Γ también depende de la misma, de manera que apoyándose en el circuito magnético equivalente del transformador donde \mathcal{R}_1 , \mathcal{R}_2 y \mathcal{R}_3 son las reluctancias que corresponden a las piernas del transformador. \mathcal{R}_4 y \mathcal{R}_5 pertenecen a las reluctancias de los yugos inferior y superior respectivamente del transformador, estas reluctancias antes mencionadas presentan un comportamiento no lineal variante en el tiempo a causa de que dependen de las características magnéticas del transformador. Las reluctancias de dispersión del aire (\mathcal{R}_6 , \mathcal{R}_7 y \mathcal{R}_8) y la de dispersión de los devanados de cada pierna (\mathcal{R}_{l1} , \mathcal{R}_{l2} , \mathcal{R}_{l3}) tienen comportamiento constante. Por último, f_1 , f_2 y f_3 representan las fuerzas magnetomotrices provocadas por las 3 fases del devanado primario y f_4 , f_5 y f_6 son las fuerzas magnetomotrices provocadas por las 3 fases del devanado secundario.

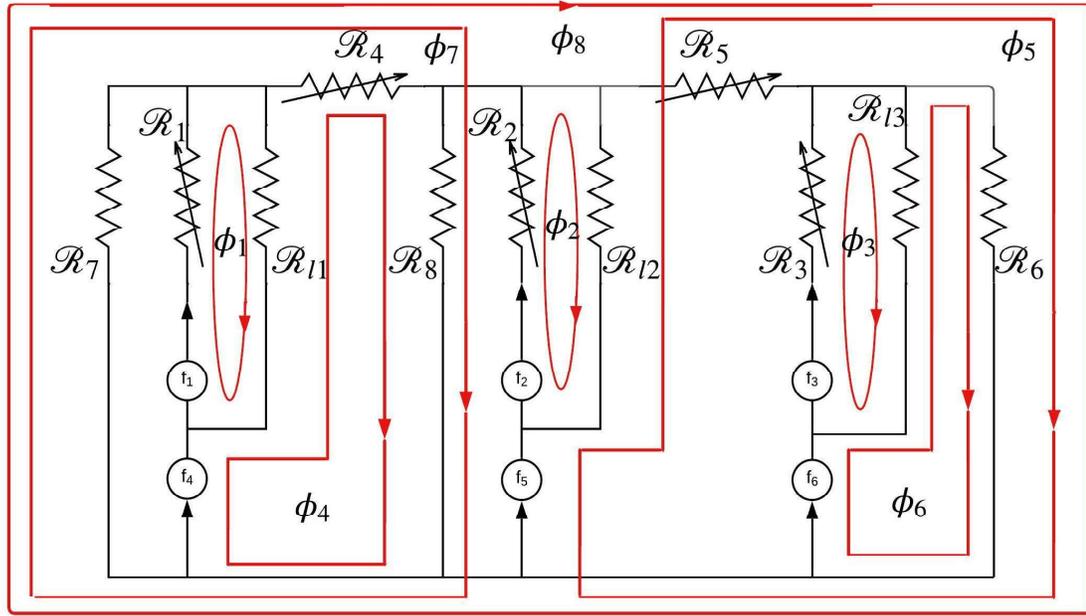


Fig. 4.3: Equivalente magnético del circuito del transformador eléctrico trifásico.

Aplicando un análisis de mallas al circuito mostrado en la Fig. 4.3 se obtiene el sistema de ecuaciones mostrado a continuación. Cabe recalcar que debido a que no existe ninguna fuerza magnetomotriz por 2 flujos del circuito antes mencionado, se introdujo al sistema dos fuerzas magnetomotrices nuevas, las que se nombrarán f_7 y f_8 con la finalidad de no excluir estos dos flujos de la matriz Γ .

$$\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ f_5 \\ f_6 \\ f_7 \\ f_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathcal{R}_{11} & & & & & & & \\ & \mathcal{R}_{22} & & & & & & \\ & & \mathcal{R}_{33} & & & & & \\ \mathcal{R}_{41} & & & \mathcal{R}_{44} & & & \mathcal{R}_{47} & \mathcal{R}_{48} \\ & \mathcal{R}_{52} & & & \mathcal{R}_{55} & \mathcal{R}_{56} & & \mathcal{R}_{58} \\ & & \mathcal{R}_{63} & & \mathcal{R}_{65} & \mathcal{R}_{66} & & \mathcal{R}_{68} \\ & & & \mathcal{R}_{74} & & & \mathcal{R}_{77} & \mathcal{R}_{78} \\ & & & \mathcal{R}_{84} & \mathcal{R}_{85} & \mathcal{R}_{86} & \mathcal{R}_{87} & \mathcal{R}_{88} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \\ \phi_4 \\ \phi_5 \\ \phi_6 \\ \phi_7 \\ \phi_8 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Donde las reluctancias mostradas en (4.3) son igual a:

$$\begin{aligned}
\mathcal{R}_{11} &= \mathcal{R}_1 + \mathcal{R}_{l1} & \mathcal{R}_{14} &= -\mathcal{R}_{l1} \\
\mathcal{R}_{22} &= \mathcal{R}_2 + \mathcal{R}_{l2} & \mathcal{R}_{25} &= -\mathcal{R}_{l2} \\
\mathcal{R}_{33} &= \mathcal{R}_3 + \mathcal{R}_{l3} & \mathcal{R}_{36} &= -\mathcal{R}_{l3} \\
\mathcal{R}_{44} &= \mathcal{R}_4 + \mathcal{R}_{l1} + \mathcal{R}_8 & \mathcal{R}_{47} &= \mathcal{R}_4 + \mathcal{R}_8 \\
\mathcal{R}_{48} &= \mathcal{R}_4 & \mathcal{R}_{55} &= \mathcal{R}_5 + \mathcal{R}_6 + \mathcal{R}_{l2} \\
\mathcal{R}_{56} &= \mathcal{R}_6 & \mathcal{R}_{58} &= \mathcal{R}_5 + \mathcal{R}_6 \\
\mathcal{R}_{66} &= \mathcal{R}_6 + \mathcal{R}_{l3} & \mathcal{R}_{66} &= \mathcal{R}_6 \\
\mathcal{R}_{77} &= \mathcal{R}_4 + \mathcal{R}_7 + \mathcal{R}_8 & \mathcal{R}_{78} &= \mathcal{R}_4 + \mathcal{R}_7 \\
\mathcal{R}_{88} &= \mathcal{R}_4 + \mathcal{R}_5 + \mathcal{R}_6 + \mathcal{R}_7
\end{aligned} \tag{4.4}$$

El sistema de ecuaciones mostrado en 4.3 tiene la siguiente forma reducida:

$$\begin{bmatrix} f_{1-6} \\ f_{7-8} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \in \mathfrak{R}^{6 \times 6} & B \in \mathfrak{R}^{6 \times 2} \\ B^T \in \mathfrak{R}^{2 \times 6} & C \in \mathfrak{R}^{2 \times 2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{1-6} \\ \phi_{7-8} \end{bmatrix} \tag{4.5}$$

Realizando una selección de mallas adecuadas y además considerando que las fuerzas magnetomotrices aplicadas a las mallas 7 y 8 son de magnitud cero, será posible aplicar una reducción de Kron ($A^m = A - BC^{-1}B^T$), por lo tanto, la matriz (4.3) podrá ser reescrita como.

$$\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ f_5 \\ f_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathcal{R}_{11}^m & & & & & \\ & \mathcal{R}_{22}^m & & & & \\ & & \mathcal{R}_{33}^m & & & \\ \mathcal{R}_{41}^m & & & \mathcal{R}_{44}^m & \mathcal{R}_{45}^m & \mathcal{R}_{46}^m \\ & \mathcal{R}_{52}^m & & \mathcal{R}_{54}^m & \mathcal{R}_{55}^m & \mathcal{R}_{56}^m \\ & & \mathcal{R}_{63}^m & \mathcal{R}_{64}^m & \mathcal{R}_{65}^m & \mathcal{R}_{66}^m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \\ \phi_4 \\ \phi_5 \\ \phi_6 \end{bmatrix} \tag{4.6}$$

Ahora partiendo de que:

$$\begin{aligned}
N_k \phi_k &= \lambda_k \\
N_k i_k &= f_k
\end{aligned} \tag{4.7}$$

Donde:

N_k Representa el número de espiras en cada uno de los devanados del transformador.

ϕ_k Corresponde a los flujos desarrollados en el circuito magnético.

λ Corresponde a los enlaces de flujo en cada sección del transformador.

i_k Corresponde a las corrientes presentes en cada devanado del transformador.

f_k Corresponde a las fuerzas magnetomotrices presentes en el transformador.

Una vez conociendo el valor de la intensidad del campo magnético (H) para cada una de las secciones del transformador, se puede proceder a realizar el cálculo del valor de los flujos magnéticos para cada segmento, para esto se utiliza la siguiente ecuación:

$$B(H) = B_n \tan^{-1}(mH) + dBH \quad (4.14)$$

Por último, ya es posible calcular la permeabilidad de cada segmento del transformador apoyándonos de la siguiente relación:

$$\mu_k = \frac{B_k}{H_k} \quad (4.15)$$

Se resume el modelo matemático del transformador a través del siguiente diagrama de flujo mostrado en la Fig. 4.4.

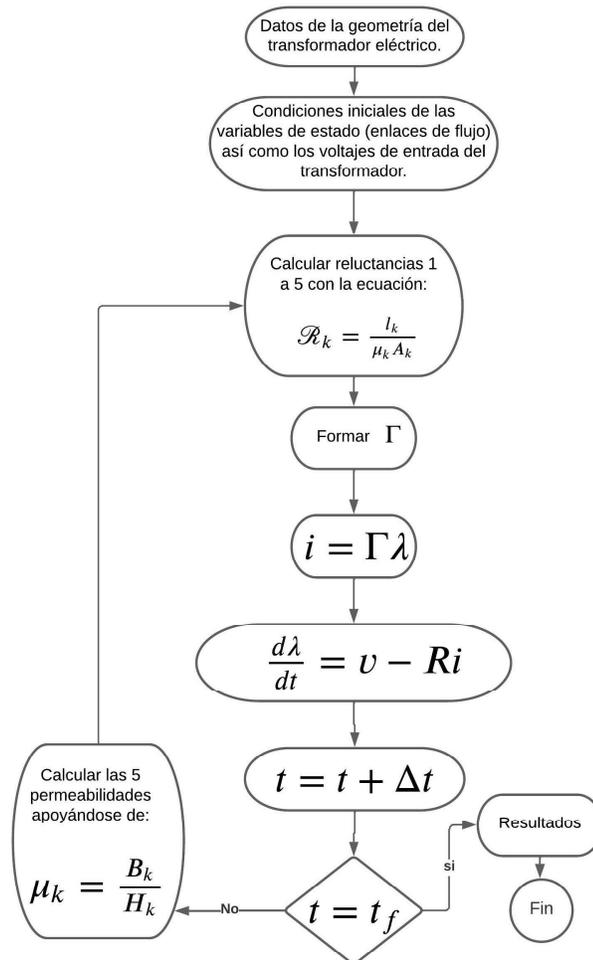


Fig. 4.4: Diagrama de flujo para modelar el transformador eléctrico.

Como resultado del modelo es posible obtener las señales de corriente de fase para los devanados primario (Fig. 4.5) y secundario (Fig. 4.6). Tomando en cuenta que se tiene una conexión Delta-Estrella se obtienen de igual forma la señal que corresponde a las corrientes de línea de la delta o los devanados primarios (Fig. 4.7) al tener este esquema de conexión las corrientes de línea en la estrella o los devanados secundarios serán igual a las de fase. Los datos utilizados para generar estos resultados se encuentran en el Apéndice A.

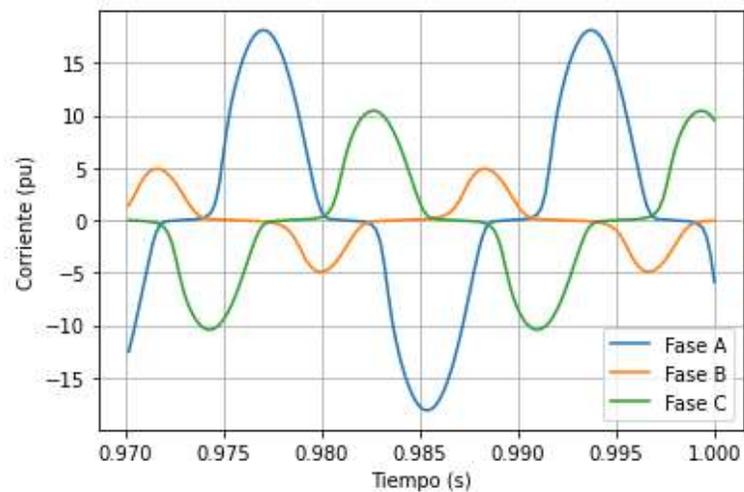


Fig. 4.5: Corrientes de fase en los devanados primarios.

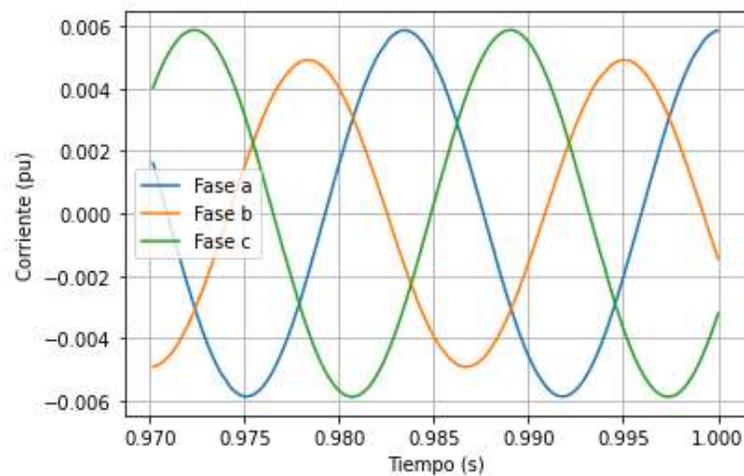


Fig. 4.6: Corrientes de fase y línea en los devanados secundarios.

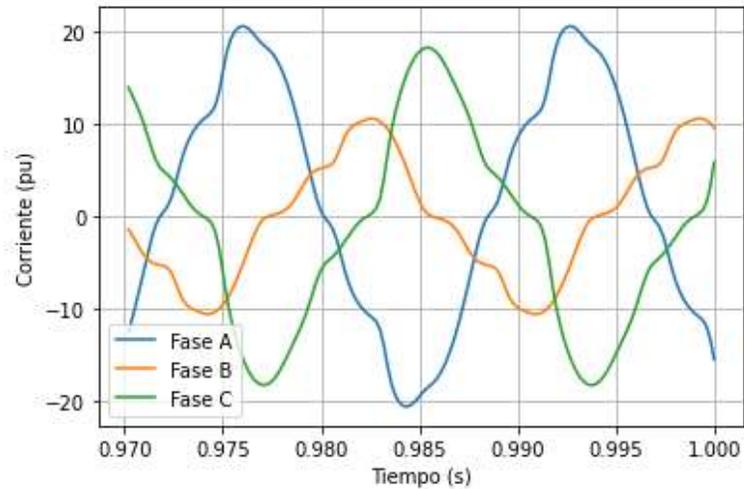


Fig. 4.7: Corrientes de línea en los devanados primarios.

4.1.2. Modelo de falla entre espiras del transformador eléctrico

En el presente trabajo se prueba el algoritmo de detección de fallas en forma de residuos en un transformador eléctrico, específicamente se prueba la falla interna del transformador de cuando se genera un corto-circuito entre las espiras de uno solo de los devanados del transformador. Considerando que las espiras que se cortocircuitan entre sí, es un número pequeño comparado con las espiras totales del devanado, se puede considerar la falla como una falla incipiente en el transformador.

El primer paso para ver como se modifica el modelo cuando se presenta la falla de corto circuito entre espiras es rediseñar el circuito magnético del transformado (Fig. 4.3). Ahora, bajo la consideración de que el devanado afectado por la falla para este caso en particular es la fase, *A* del lado primario, se secciona en 3 partes diferentes, unidas para representar la falla de corto circuito, esto se puede notar de mejor manera en la Fig. 4.8 donde se representa el corto circuito de una espira del transformador. El circuito magnético del transformador ahora con la falla de cortocircuito lo se puede ver en la Fig. 4.9.

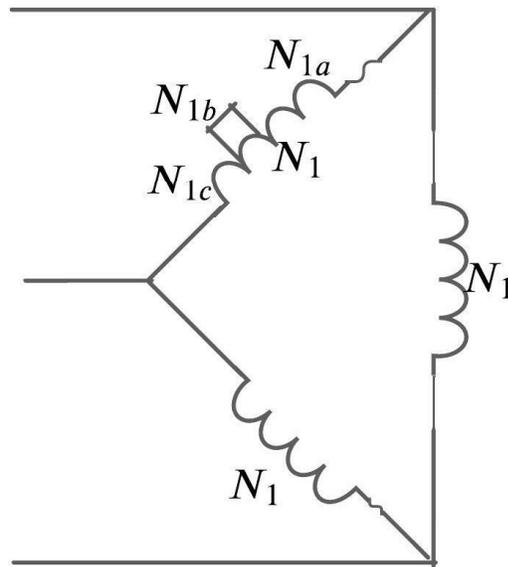


Fig. 4.8: Esquema de falla de cortocircuito entre espiras en los devanados primario del transformador, siendo un solo devanado el que presenta falla.

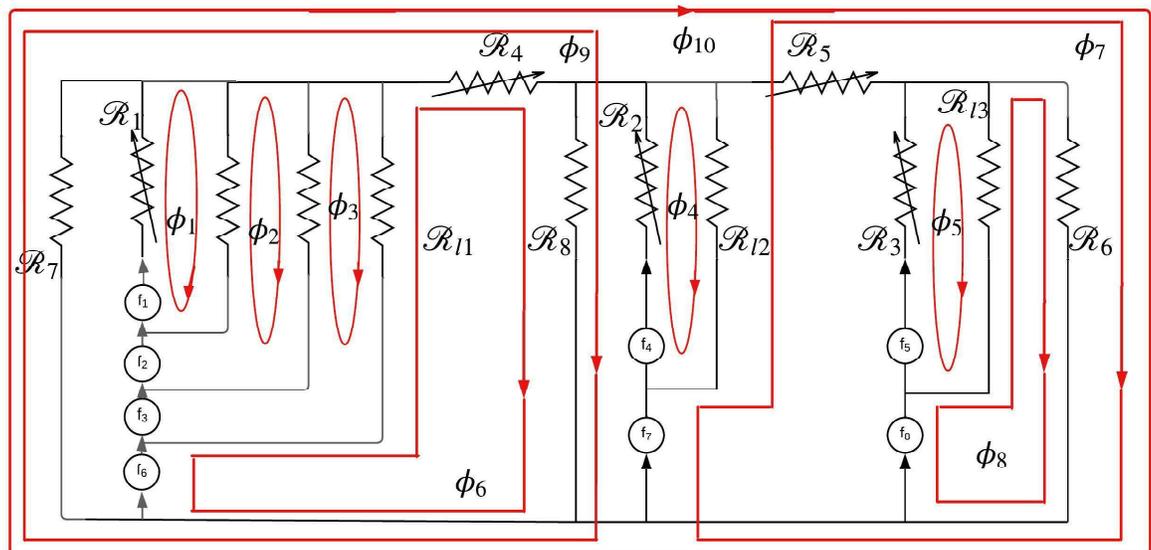


Fig. 4.9: Equivalente magnético del circuito del transformador eléctrico trifásico cuando se presenta una falla de corto circuito entre espiras.

en las siguientes ecuaciones.

$$\begin{aligned} R_{1a} &= R_1 \frac{N_{1a}}{N_1} \\ R_{1b} &= R_1 \frac{N_{1b}}{N_1} \\ R_{1c} &= R_1 \frac{N_{1c}}{N_1} \end{aligned} \quad (4.18)$$

En este punto será posible desarrollar el modelo del transformador eléctrico ahora con la presencia de falla del tipo corto circuito entre espiras, partiendo de la misma lógica mostrada en el diagrama de flujo de la Fig. 4.4 para resolver el modelo matemático del transformador. Obteniendo los siguientes resultados donde se muestra únicamente el comportamiento de la Fase A, tanto del lado primario (Fig. 4.10) como secundario (Fig. 4.11) a diferentes niveles de falla, cuando el corto se presenta en 2, 4, 6, 8, 10 y 12 espiras sucesivamente.

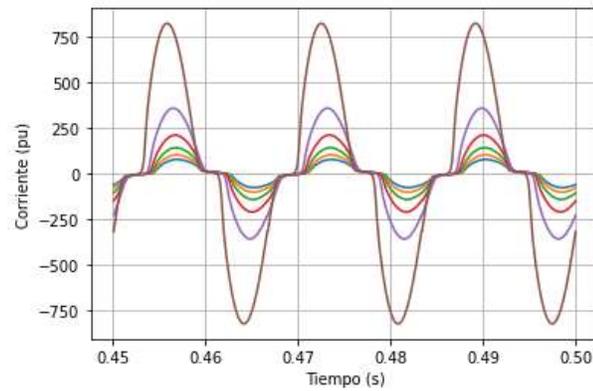


Fig. 4.10: Falla del tipo corto circuito entre espiras en la fase A del devanado primario.

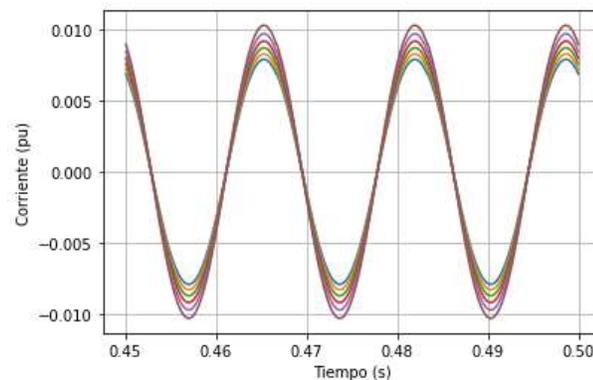


Fig. 4.11: Falla del tipo corto circuito entre espiras en la fase a del devanado secundario.

4.2. Construcción del generador de residuos para el transformador eléctrico

Se procede a realizar la simulación del algoritmo de detección de fallas aplicado en este caso al transformador eléctrico, de la sección anterior es posible notar que entre el modelo del transformador sin falla y del modelo con falla del tipo corto circuito entre espiras hay una diferencia en el número de estados en el modelo debido a que el devanado que presenta la falla del tipo corto-circuito fue dividido en 3 partes y estas partes se agregaron como estados al sistema. Para lidiar con esta problemática en primera instancia, para la realización de este trabajo se consideró trabajar únicamente con el modelo del transformador con falla, bajo la consideración de que utiliza una falla muy pequeña para construir el generador de residuos, bajo el supuesto de que se considera como si no hubiera una falla en el sistema y las demás señales con fallas más grandes se utilizan para probar la confiabilidad de los residuos para detectar fallas así como su sensibilidad ante la presencia de éstas.

4.2.1. Ajuste en la sensibilidad de los residuos del transformador eléctrico

Utilizando una $\tau = 0,5$ se proponen parámetros arbitrariamente de α y g para la generación de 4 residuos diferentes para su posterior comparación con la finalidad de comprobar la posibilidad de generar residuos más o menos sensibles ante la presencia de fallas en el transformador eléctrico, evaluando particularmente en este caso una falla de corto circuito entre espiras. Los parámetros propuestos para cada uno de estos residuos se observan en la Tabla (4.1).

Tabla 4.1: Parámetros para diseño de residuos aplicado en el transformador eléctrico.

Residuos	Parámetros		
	τ	α	g
r_1	0.5	[1,1,1,1]	{-375000000,-11125000,-121250,-575}
r_2	0.5	[1,1,1,1]	{-600000,-89000,-4850,-115}
r_3	0.5	[0,0,1,1]	{375000000,-11125000,-121250,-575}
r_4	0.5	[0,0,1,1]	{-600000,-89000,-4850,-115}

Ahora es posible poder generar las matrices y vectores necesarios para construir los residuos correspondientes en forma de observador.

4.2.1.1. Residuo número 1 para el transformador eléctrico.

Al formar la matriz Hankel W_N y posterior a la descomposición VSD de dicha matriz y utilizando los parámetros propuestos para la generación del residuo 1, se obtienen las siguientes matrices y vectores como resultado del generador de residuos para su aplicación en el transformador eléctrico.

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -375000000 \\ 1 & 0 & 0 & -11125000 \\ 0 & 1 & 0 & -121250 \\ 0 & 0 & 1 & -575 \end{bmatrix}$$

$$J = \begin{bmatrix} -44,4957 \\ -1,3039 \\ 0,282264 \\ -7,78585e^{-5} \end{bmatrix} \quad L = \begin{bmatrix} -723897 \\ -21476,2 \\ -234,06 \\ -1,24345 \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

$$w = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}; p = \begin{bmatrix} 1,1723736584513499e^{-7} \end{bmatrix}$$

$$v = \begin{bmatrix} -0,0019303932535744417 \end{bmatrix}$$

4.2.1.2. Residuo número 2 para el transformador eléctrico.

Como resultado de la generación de residuos bajo los primeros parámetros propuestos para su aplicación en el transformador eléctrico, se obtienen las siguientes

matrices y vectores.

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -600000 \\ 1 & 0 & 0 & -89000 \\ 0 & 1 & 0 & -4850 \\ 0 & 0 & 1 & -115 \end{bmatrix}$$

$$J = \begin{bmatrix} -0,602069 \\ -0,0100696 \\ 0,29591 \\ -2,39293e^{-5} \end{bmatrix} \quad L = \begin{bmatrix} -1158,24 \\ -172,346 \\ -9,36253 \\ -0,355465 \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

$$w = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}; p = \begin{bmatrix} 1,1723736584513499e^{-7} \end{bmatrix}$$

$$v = \begin{bmatrix} -0,0019303932535744417 \end{bmatrix}$$

4.2.1.3. Residuo número 3 para el transformador eléctrico.

Como resultado de la generación de residuos bajo los primeros parámetros propuestos para su aplicación en el transformador eléctrico, se obtienen las siguientes matrices y vectores.

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -375000000 \\ 1 & 0 & 0 & -11125000 \\ 0 & 1 & 0 & -121250 \\ 0 & 0 & 1 & -575 \end{bmatrix}$$

$$J = \begin{bmatrix} -1,93045 \\ -0,0434772 \\ 0,0721165 \\ -2,25916e^{-6} \end{bmatrix} \quad L = \begin{bmatrix} -12845,3 \\ -381,728 \\ -4,15329 \\ -0,0195118 \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

$$w = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}; p = \begin{bmatrix} 3,9083478939416045e^{-9} \end{bmatrix}$$

$$v = \begin{bmatrix} -3,425400927366588e^{-5} \end{bmatrix}$$

4.2.1.4. Residuo número 4 para el transformador eléctrico.

Como resultado de la generación de residuos bajo los primeros parámetros propuestos para su aplicación en el transformador eléctrico, se obtienen las siguientes matrices y vectores.

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -600000 \\ 1 & 0 & 0 & -89000 \\ 0 & 1 & 0 & -4850 \\ 0 & 0 & 1 & -115 \end{bmatrix}$$

$$J = \begin{bmatrix} -0,467164 \\ -0,000344709 \\ 0,0725715 \\ -4,61319e^{-7} \end{bmatrix} \quad L = \begin{bmatrix} -20,5531 \\ -3,70046 \\ -0,166124 \\ -0,00375493 \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

$$w = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}; p = \begin{bmatrix} 3,9083478939416045e^{-9} \end{bmatrix}$$

$$v = \begin{bmatrix} -3,425400927366588e^{-5} \end{bmatrix}$$

4.2.2. Comparación de los resultados de los residuos del transformador eléctrico

En esta sección se exponen los resultados que arrojan los diferentes residuos bajo la presencia de las señales mostradas en la Fig. 4.10 y Fig. 4.11 donde como se mencionó corresponde a fallas de corto circuito entre espiras específicamente el devanado de la fase A del lado primario del transformador, estas señales corresponden a cuando se cortocircuitan 2, 4, 6, 8, 10 y 12 espiras sucesivamente. Los resultados correspondientes al residuo 1 se observan en la Fig. 4.12, residuo 2 en la Fig. 4.13, residuo 3 en la Fig. 4.14 y por último los resultados del residuo 4 pueden verse en la Fig.4.15.

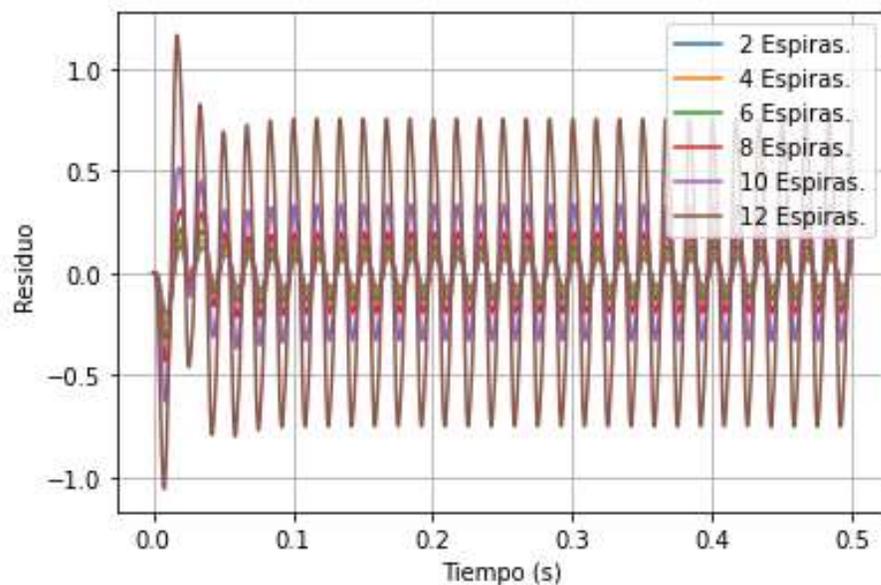


Fig. 4.12: Residuo 1 cuando el transformador presenta un corto circuito entre espiras a diferentes niveles de falla.

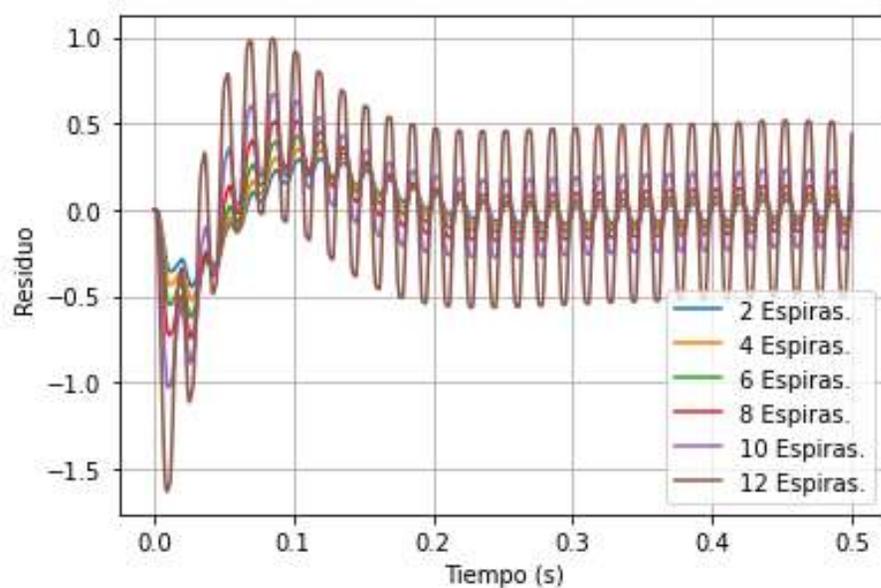


Fig. 4.13: Residuo 2 cuando el transformador presenta un corto circuito entre espiras a diferentes niveles de falla.

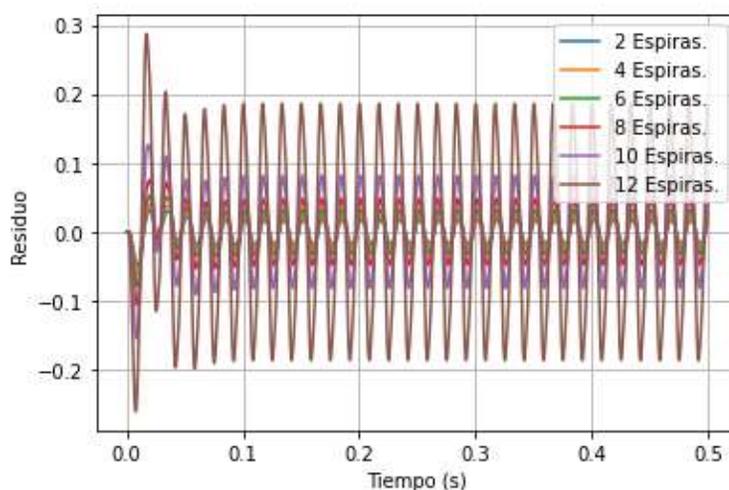


Fig. 4.14: Residuo 3 cuando el transformador presenta un corto circuito entre espiras a diferentes niveles de falla.

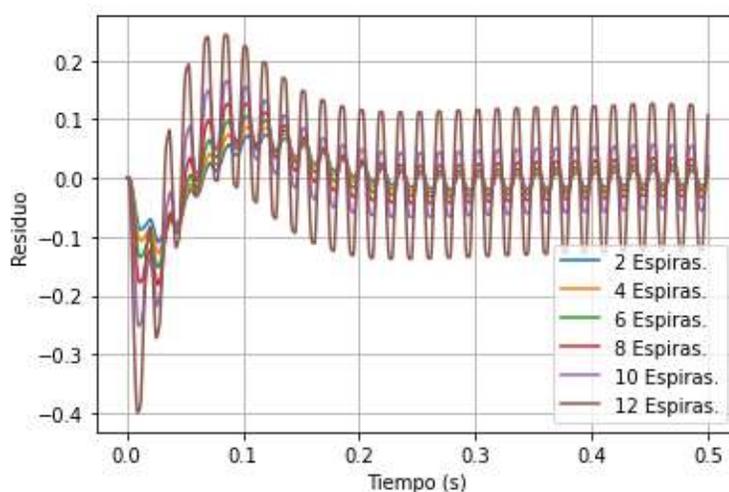


Fig. 4.15: Residuo 4 cuando el transformador presenta un corto circuito entre espiras a diferentes niveles de falla.

Se observa a través de la magnitud de la amplitud del residuo cómo los residuos presentan comportamiento senoidal al momento de verse expuesto a fallas y que a medida que la falla se vuelve más grande, es decir, hay un número mayor de espiras en corto circuito, la amplitud del seno crece, entonces se puede definir que a mayor amplitud en la señal del residuo hay un nivel mayor, de falla en este caso para la falla de corto circuito entre espiras, de igual forma se ve como los 4 residuos

presentan diferentes amplitudes para las mismas señales de falla, esto habla de que los residuos son más o menos sensibles ante las mismas señales de falla en función de los parámetros propuestos para la generación de éstos.

4.2.3. Análisis de los residuos evaluados del transformador eléctrico

Una vez que las salidas de los residuos han sido evaluados por el método propuesto en el capítulo anterior, se puede observar en las Fig. 4.16, Fig. 4.17, Fig. 4.18 y Fig. 4.19 los resultados de los residuos 1, 2, 3 y 4, respectivamente, cuando éstos son evaluados, cuando se presenta una falla de corto circuito entre espiras.

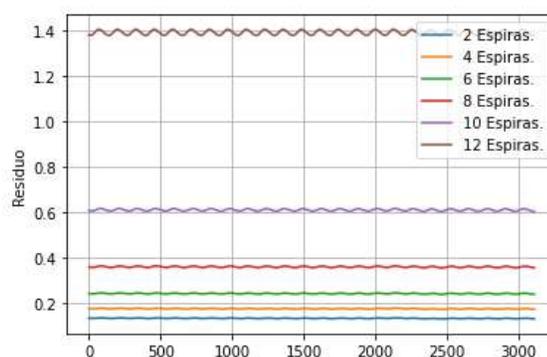


Fig. 4.16: Residuo 1 cuando el transformador presenta un corto circuito entre espiras a diferentes niveles de falla después del método de evaluación.

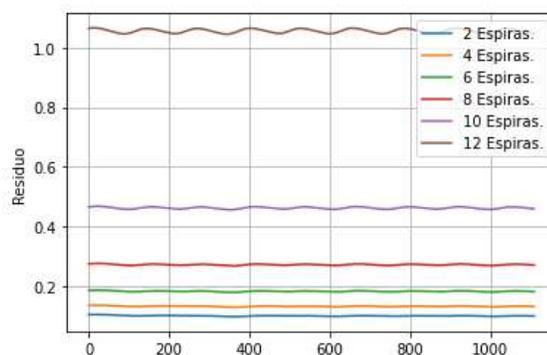


Fig. 4.17: Residuo 2 cuando el transformador presenta un corto circuito entre espiras a diferentes niveles de falla después del método de evaluación.

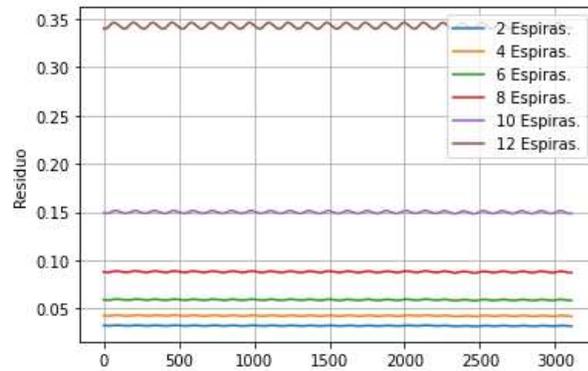


Fig. 4.18: Residuo 3 cuando el transformador presenta un corto circuito entre espiras a diferentes niveles de falla después del método de evaluación.

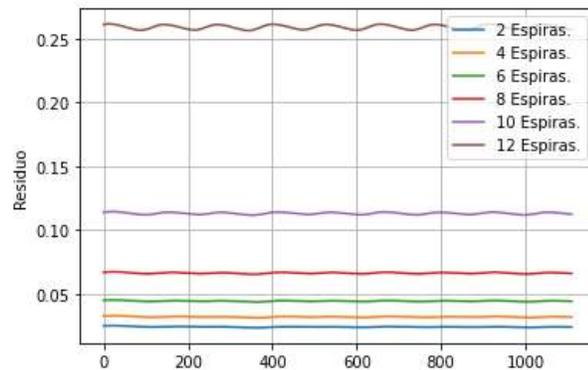


Fig. 4.19: Residuo 4 cuando el transformador presenta un corto circuito entre espiras a diferentes niveles de falla después del método de evaluación.

Es posible notar que se obtuvo una mejor señal para poder identificar una falla, entonces cuando se analiza la evaluación de un residuo se observa que a mayor magnitud hay más espiras presentes en el corto circuito. Por otro lado, los 4 residuos bajo las mismas fallas se comportan diferente. Como por ejemplo, se nota que los residuos 1 y 2 son más sensibles a fallas que el 3 y 4, ya que a una misma señal dan una magnitud mayor, entonces se comprueba que al escoger un correcto parámetro de α es posible mejorar la sensibilidad significativamente, por otra parte, la g también juega un papel importante, puesto que el residuo 1 es más sensible que 2 y el 3 es más sensible que 4, por lo tanto, para encontrar como formar el residuo más sensible se tiene que pensar en los 2 parámetros de diseño juntos y no por separado.

Capítulo 5

Conclusiones y trabajos a futuro

En cuanto a la detección de fallas, se verificó que es posible diagnosticar fallas en diversos sistemas que predisponen un comportamiento lineal a través de mediciones entrada-salida, es decir, no es necesario tener un conocimiento amplio del modelo del sistema para la detección de fallas y basta únicamente tener acceso a algunas de las salidas medibles del sistema esto se pudo comprobar en este trabajo en 2 sistemas diferentes los cuales fueron el reactor químico y un transformador eléctrico trifásico siendo este último el más importante en este trabajo.

Por otro lado, se demostró que cambiando diversos parámetros de diseño, siendo los más significativos α y los valores g fue posible alterar la sensibilidad de detección de fallas del algoritmo propuesto, esto pudo comprobarse en ambos sistemas planteados en este trabajo. Donde además, se concluye que en el diseño se requiere un enfoque donde se analicen ambos parámetros juntos y no por separado para obtener un mejor resultado.

De igual forma fue posible el generar una metodología de evaluación de los residuos, la cual permite analizar dichos residuos de una manera más sencilla cuando éstos tiendan a tener un comportamiento senoidal, lo cual es difícil analizar a simple vista y con esta metodología se puede tener un número para comparar entre fallas de menor o mayor magnitud.

Hablando específicamente del transformador eléctrico fue posible diagnosticar cuando éste presenta una falla del tipo corto circuito entre espiras de diferentes magnitudes, es decir, se veían más o menos espiras involucradas en el corto circuito, además de poder crear diferentes residuos los cuales presentan un cambio en la magnitud al momento de detectar fallas bajo las mismas señales dando pie a demostrar que fue posible modificar la sensibilidad de detección de los residuos.

Como se demostró que es posible modificar la sensibilidad de los residuos al momento de detectar falla, bajo el supuesto de la selección de los parámetros α y las g que por este momento solo han sido escogidos de manera arbitraria, da pie para en un futuro trabajo, que consiste en proponer un enfoque de optimización para que se puedan seleccionar los parámetros más adecuados en la busca de generar el residuo con la mejor sensibilidad. Dando la posibilidad de una vez resulta esta problemática de la optimización sea posible establecer una metodología para calcular estos parámetros en el diseño de cualquier residuo.

Por último, como se demostró que es posible diagnosticar fallas en transformadores eléctricos aún y cuando se desconoce el modelo interno del transformador bajo el enfoque de mediciones de datos entrada-salida, da pie a estudiar la aplicación en otras fallas del transformador, enfocándose más en las fallas incipientes, puesto que una vez resuelto el problema de optimización se tendrá la capacidad de generar residuos mucho más sensibles que permitan hacer diagnósticos más precisos en el transformador eléctrico al momento de diagnosticar fallas como el envejecimiento de los devanados en una etapa muy temprana y con la ventaja de que el diagnóstico se realiza en línea con el transformador.

Apéndice A

Datos del transformador

Tabla A.1: Longitudes de las diferentes secciones del núcleo del transformador

Columna 1	Columna 2	Columna 3	Yugo izquierdo	Yugo derecho
35 cm.	34 cm.	32 cm.	27.2 cm.	30.4 cm.

Tabla A.2: Áreas de sección transversal de las diferentes secciones del núcleo del transformador

Columna 1	Columna 2	Columna 3	Yugo izquierdo	Yugo derecho
0.0095 m^2 .	0.0119 m^2 .	0.011 m^2 .	0.0095 m^2 .	0.01 m^2 .

Tabla A.3: Número de espiras de cada devanador

	Columna 1	Columna 2	Columna 3
Primario	45	45	45
Secundario	27	27	27

Tabla A.4: Resistencias de los devanados

	Columna 1	Columna 2	Columna 3
Primario	0.21	0.21	0.21
Secundario	0.14	0.14	0.14

Tabla A.5: Constantes de la curva de saturación

B	m	ΔB_a
0.62	0.087	$4e^{-4}$

Bibliografía

- [1] P. M. Frank, “Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy,” *Automatica*, vol. 26, pp. 459–474, may 1990.
- [2] R. Vishwanath, V. A. Shetty, A. Poonam, S. Shamilli, and M. Thanuja, “A new approach to monitor condition of transformers incipient fault diagnosis based on gsm & xbee,” *International Journal of Engineering Development and Research*, vol. 3, no. 2, pp. 875–882, 2015.
- [3] Q. Liu, S. Liu, Q. Dai, X. Yu, D. Teng, and M. Wei, “Data-driven approaches for diagnosis of incipient faults in cutting arms of the roadheader,” *Shock and Vibration*, vol. 2021, pp. 1–15, feb 2021.
- [4] T. Escobet, V. Puig, J. Quevedo, and D. Garcia, “A methodology for incipient fault detection,” in *2014 IEEE Conference on Control Applications (CCA)*, IEEE, oct 2014.
- [5] X. Zhang, C. Delpha, and D. Diallo, “Incipient fault detection and estimation based on jensen–shannon divergence in a data-driven approach,” *Signal Processing*, vol. 169, p. 107410, apr 2020.
- [6] P. Cai and X. Deng, “Incipient fault detection for nonlinear processes based on dynamic multi-block probability related kernel principal component analysis,” *ISA Transactions*, vol. 105, pp. 210–220, oct 2020.
- [7] P. Zhang and S. X. Ding, “A model-free approach to fault detection of continuous-time systems based on time domain data,” *International Journal of Automation and Computing*, vol. 4, pp. 189–194, apr 2007.
- [8] H. Safaeipour, M. Forouzanfar, and A. Casavola, “A survey and classification of incipient fault diagnosis approaches,” *Journal of Process Control*, vol. 97, pp. 1–16, jan 2021.

- [9] R. Soni and B. Mehta, "Review on asset management of power transformer by diagnosing incipient faults and faults identification using various testing methodologies," *Engineering Failure Analysis*, vol. 128, p. 105634, oct 2021.
- [10] S. M. de Andrade Lopes, R. A. Flauzino, and R. A. C. Altafim, "Incipient fault diagnosis in power transformers by data-driven models with over-sampled dataset," *Electric Power Systems Research*, vol. 201, p. 107519, dec 2021.
- [11] L. Y. Sonwane and K. K. Sandeep, "Design and development of interturn fault identification system for transformer," in *2018 Second International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)*, IEEE, mar 2018.
- [12] M. Mostafaei, J. Faiz, P. A. Venikar, and M. S. Ballal, "Turn-to-turn fault monitoring methods in electrical power transformers-state of the art," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 28, p. e2644, jul 2018.
- [13] A. S. Masoum, N. Hashemnia, A. Abu-Siada, M. A. S. Masoum, and S. M. Islam, "Online transformer internal fault detection based on instantaneous voltage and current measurements considering impact of harmonics," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 32, pp. 587–598, apr 2017.
- [14] R. Dashti, A. Khoshkhou, H. R. Parish, and H. R. Shaker, "A new operational characteristic for diagnosing the healthy and faulty currents of power transformers," *Electric Power Systems Research*, vol. 203, p. 107649, feb 2022.
- [15] A. Behvandi, S. G. Seifossadat, and A. Saffarian, "A new method for discrimination of internal fault from other transient states in power transformer using clarke's transform and modified hyperbolic s-transform," *Electric Power Systems Research*, vol. 178, p. 106023, jan 2020.
- [16] D. Guillen, J. Olivares-Galvan, R. Escarela-Perez, D. Granados-Lieberman, and E. Barocio, "Diagnosis of interturn faults of single-distribution transformers under controlled conditions during energization," *Measurement*, vol. 141, pp. 24–36, jul 2019.
- [17] E. Alcorta-Garcia, C. Elizondo-Gonzalez, C. Perez-Rojas, and A. Avalos-Gonzalez, "A LMI observer-based approach to fault detection in electrical

- transformers,” in *2007 IEEE International Conference on System of Systems Engineering*, IEEE, apr 2007.
- [18] M. Jorge-Zavala and E. Alcorta-Garcia, “Detection of internal faults in transformers using nonlinear observers,” in *Proceedings of 2003 IEEE Conference on Control Applications, 2003. CCA 2003.*, IEEE.
- [19] L. A. S. Rivera, E. A. García, and I. E. L. Leal, “Enfoque para aislamiento de fallas en tiempo continuo a partir de datos muestreados,” *Memorias del Congreso Nacional de Control Automático*, 2018.
- [20] P. M. Frank and X. Ding, “Frequency domain approach to optimally robust residual generation and evaluation for model-based fault diagnosis,” *Automatica*, vol. 30, pp. 789–804, may 1994.
- [21] J. Chen, *Robust Model-Based Fault Diagnosis for Dynamic Systems*. Springer US, 1999.
- [22] J. R. Espinoza, C. Perez-Rojas, and S. Garcia-Martinez, “Validation of the transformer magnetic circuit model,” in *2012 North American Power Symposium (NAPS)*, IEEE, sep 2012.