



**ESTRATEGIA PARA LA DETECCIÓN DE FALLAS EN  
EL DEVANADO ESTATÓRICO DE LA MÁQUINA  
SINCRÓNICA UTILIZANDO LA TRANSFORMADA DE  
WAVELET**

**AUTOR: LEDY LAURA GUERRA**

**Valencia, julio 2019**

**UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
ÁREA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**ESTRATEGIA PARA LA DETECCIÓN DE FALLAS EN EL DEVANADO  
ESTATÓRICO DE LA MÁQUINA SINCRÓNICA UTILIZANDO LA  
TRANSFORMADA DE WAVELET**

**AUTOR: LEDY LAURA GUERRA**

**TUTOR: PROF. CARLOS JIMÉNEZ**

**Valencia, julio 2019**

**UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
ÁREA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**ESTRATEGIA PARA LA DETECCIÓN DE FALLAS EN EL DEVANADO  
ESTATÓRICO DE LA MÁQUINA SINCRÓNICA UTILIZANDO LA  
TRANSFORMADA DE WAVELET**

**AUTOR: LEDY LAURA GUERRA**

**Trabajo presentado ante el Área de Estudios  
de Postgrado de la Universidad de Carabobo  
para optar al Título de Magister en Ingeniería  
Eléctrica**

**Valencia, julio 2019**



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERIA  
DIRECCIÓN DE ESTUDIOS PARA GRADUADOS  
SECCIÓN DE GRADO



## ACTA DE DISCUSIÓN DE TRABAJO DE GRADO

*En atención a lo dispuesto en los Artículos 137, 138 y 139 del Reglamento de Estudios de Postgrado de la Universidad de Carabobo, quienes suscribimos como Jurado designado por el Consejo de Postgrado de la Facultad de Ingeniería, de acuerdo a lo previsto en el Artículo 135 del citado Reglamento, para estudiar el Trabajo de Grado titulado:*

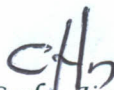
**“ESTRATEGIA PARA LA DETECCIÓN DE FALLAS EN EL  
DEVANADO ESTATÓRICO DE LA MÁQUINA SINCRÓNICA  
UTILIZANDO LA TRANSFORMADA DE WAVELET”**

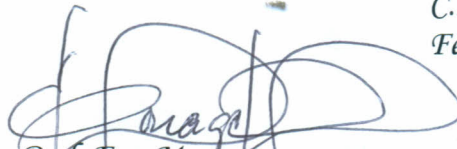
*Presentado para optar al grado de **MAGÍSTER EN INGENIERÍA ELÉCTRICA** por el (la) aspirante:*

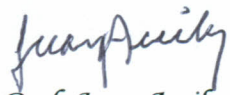
**LEDY GUERRA**  
**V.- 13.442.503**

*Habiendo examinado el Trabajo presentado, decidimos que el mismo está **APROBADO.***

*En Valencia, al primer (01) día del mes de Julio del año dos mil diecinueve.*

  
Prof. Carlos Jiménez  
C.I.: 7523966  
Fecha: 01/07/2019

  
Prof. Eva Monagas  
C.I.: 6122081  
Fecha: 01/07/2019  
FE: 03/07/2019 /D6.-

  
Prof. Juan Arcila  
C.I.: 3.947.614  
Fecha: 01/07/2019

## INDICE GENERAL

### **CAPÍTULO I**

1.1.- Planteamiento del Problema	1
1.2.- Formulación del Problema	2
1.3.- Objetivos	3
1.3.1.- General	3
1.3.2.- Específicos	3
1.4.- Justificación	4
1.5.- Alcance y Limitaciones	5

### **CAPÍTULO II**

2.1.- Antecedentes	7
2.2.- Bases Teóricas	9
2.2.1.- Generadores Eléctricos	9
2.2.2.- Fallas en Máquinas Eléctricas	20
2.2.3.- Monitoreo de Condición	22

### **CAPÍTULO III**

3.1.- Tipo de estudio y de Investigación	24
3.2.- Población y muestra	25
3.3.- Técnicas de recolección de datos	25
3.4.- Técnicas y análisis de datos	25
3.5.- Instrumentos de recolección de datos	26
3.6.- Técnicas de procesamiento de datos	27
3.7.- Fases de la investigación	27

### **CAPÍTULO IV**

4.1.- Generalidades	80
---------------------	----

4.2.- Primera etapa: discriminación de la condición de la máquina en dos estados posibles, sin falla (SF) y con falla (CF)	81
4.3.- Segunda etapa: discriminación de la condición de la máquina en cuatro estados posibles, sin falla (SF), cortocircuito de una espira (1E), cortocircuito de dos espiras de una misma bobina (2E) y cortocircuito de dos lados de bobina ubicados en una misma ranura	95
<b>CONCLUSIONES</b>	106
<b>RECOMENDACIONES</b>	110
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	111

## INDICE DE TABLAS

3.1	Características del estator y del devanado de armadura de la máquina sincrónica	28
3.2	Características de estator y del devanado de armadura de la máquina modificada	30
3.3	Especificaciones de los equipos	38
3.4	Niveles de carga	42
3.5	Resumen de las pruebas realizadas	43
3.6	Matrices de datos	59
3.7	Dimensiones de las matrices de entrenamiento y prueba para los casos del 01 al 10	72
3.8	Dimensiones de las matrices de entrenamiento y prueba para los casos 11 al 16	72
3.9	Dimensiones de las matrices de entrenamiento y prueba para los casos 17 al 34	73
3.10	Dimensiones de las matrices de entrenamiento y prueba para los casos 35 al 44	75
3.11	Dimensiones de las matrices de entrenamiento y prueba para los casos 45 al 77	77
4.1	Porcentaje de aciertos para las redes neuronales de los casos 01 al 10	84
4.2	Porcentaje total de aciertos para las redes neuronales del caso 11 al 16	87
4.3	Niveles de carga para conexión Y y dosY	89
4.4	Porcentaje total de aciertos para las redes neuronales del caso 17 al 34	90

4.5	Porcentaje total de aciertos para las redes neuronales del caso 35 al 44	96
4.6	Porcentaje total de aciertos para las redes neuronales del caso 45 al 50	101



## INDICE DE FIGURAS

2.1	Diagrama esquemático de una máquina sincrónica trifásica	11
2.2	Construcción del rotor de polos salientes	13
2.3	Construcción de un rotor cilíndrico	14
2.4	Caminos de corriente de Foucault en motor cilíndrico	14
2.5	Distribución de conductores de un rotor cilíndrico	16
2.6	Formas de onda de la Fmm producida por un rotor cilíndrico	16
2.7	Devanado estatórico de la máquina sincrónica	17
2.8	Distribución espacial de la Fmmar con sus respectivas componentes armónicas (hasta quinto armónico)	17
2.9	Fmm de estator y rotor	20
2.10	Fallas asociadas al estator	22
3.1	Esquema del circuito desarrollado	26
3.2	Ubicación de las bobinas donde se desarrolló la falla	29
3.3	Modificación del devanado	31
3.4	Esquema desarrollado del devanado	33
3.5	Características de las bobinas para realizar las fallas de cortocircuito una espira y dos espiras	34
3.6	Bobina de exploración	35
3.7	Conexión de la bobina de exploración	35
3.8	Bornera de la máquina	36
3.9	Esquema del circuito para las pruebas	37
3.10	Conexión de la tarjeta USB – 1208FS	40
3.11	Archivo de datos de una de las señales adquiridas	41

3.12	Voltaje de la fase a para la condición de máxima carga en conexión Y	44
3.13	Voltaje de la fase b para la condición de máxima carga en conexión Y	45
3.14	Voltaje de la fase b para la condición de máxima carga en conexión Y	46
3.15	Tensión de fase para la condición de máxima carga y conexión Y	47
3.16	Wavelet Haar	51
3.17	Wavelet Morlet	51
3.18	Wavelet Sombrero Mexicano	52
3.19	Wavelet Daubichies	53
3.20	Wavelet Coiflets	54
3.21	Wavelet Symmlet	54
3.22	Segundo nivel de descomposición de la TWD	56
3.23	Árbol de descomposición, con TWD, utilizado en la investigación	57
3.24	Varianza de los coeficientes de aproximación en el nivel cinco, de la corriente de la fase a en conexión Y y máxima carga	64
3.25	Varianza de los coeficientes de aproximación en el nivel cinco, de la corriente de la fase a en conexión dosY para carga máxima, media y mínima	65
3.26	Varianza de los coeficientes de aproximación en el nivel cinco, de la corriente de la fase a, b y c, en conexión dosY para máxima carga	66
3.27	Estructura de la red neuronal	69

3.28	Nomenclatura asociada a los nombres de las matrices de la tabla 3.7	71
3.29	Nomenclatura asociada a los nombres de las matrices de la tabla 3.9	72
3.30	Matrices de Salidas de la Red Neuronal de los casos 01 al 16	73
3.31	Matrices de Salidas de la Red Neuronal de los casos 17 al 34	74
3.32	Matrices de Salidas de la Red Neuronal de los casos 35 al 44	76
3.33	Algoritmo para entrenamiento, validación y prueba de la Red Neuronal	78
4.1	Matriz de Confusión Total para Y_a (caso 01)	83
4.2	Porcentaje de aciertos Y y dosY (casos 01 al 10)	84
4.3	Matriz de Confusión Total para conexión Y (casos 01 al 05)	85
4.4	Matriz de Confusión Total para conexión dosY (casos 06 al 10)	86
4.5	Porcentaje de Aciertos Y y dosY (casos 11 al 16)	88
4.6	Matriz de Confusión Total para conexión dosY (casos 11 al 16)	89
4.7	Porcentaje de Aciertos Y y dosY (casos 17 al 34) separados por tipo de señal	91
4.8	Porcentaje de Aciertos Y y dosY (casos 17 al 34)	92
4.9	Matriz de Confusión Total para conexión Y (casos 17 al 25)	93
4.10	Matriz de Confusión Total para conexión dosY (casos 26 al 34)	94

4.11	Porcentaje de Aciertos Y y dosY (casos 35 al 44)	96
4.12	Matriz de Confusión Total para Y_a (caso 35)	98
4.13	Matriz de Confusión Total para conexión Y (casos 35 al 39)	99
4.14	Matriz de Confusión Total para conexión dosY (casos 39 al 44)	100
4.15	Porcentaje de Aciertos Y y dosY (casos 45 al 50)	102
4.16	Matriz de Confusión Total para conexión Y y dosY (casos 45 al 50)	103
4.17	ROC para conexión Y considerando las tres corrientes de armadura simultáneamente (ia, ib e ic) (caso 45)	104
4.18	ROC para conexión Y y dosY para los casos 45 al 50	105

## **RESUMEN**

### **ESTRATEGIA PARA LA DETECCIÓN DE FALLAS EN EL DEVANADO ESTATÓRICO DE LA MÁQUINA SINCRÓNICA UTILIZANDO LA TRANSFORMADA DE WAVELET**

**AUTOR: Ledy Laura Guerra**  
**TUTOR: Prof. Carlos Jiménez**

**Valencia, julio 2019**

Considerando que las máquinas sincrónicas pueden estar sometidas a fallas que pueden llegar a ser catastróficas, la presente investigación plantea una estrategia para la detección de fallas en el devanado estático de dicha máquina desde su inicio. La detección de fallas en estado incipiente permite la aplicación de planes de mantenimiento predictivo antes de que su presencia pueda desencadenar en fallas más severas que afecten tanto a la máquina como a los equipos conectados a ella. En este sentido se acondiciona una máquina para realizar tres tipos de falla de devanado: cortocircuito de una espira (1E), cortocircuito de dos espiras de una misma bobina (2E) y cortocircuito de dos lados de bobina ubicados en una misma ranura (2B). Una vez acondicionada la máquina se adquieren las señales de corriente de armadura en cada fase y las tensiones de bobina acortada y de bobina diametral para las condiciones de falla antes descritas y sin falla, en tres niveles de carga definidos (máxima, media y mínima). Una vez adquiridas las señales se procede a la aplicación de la Transformada de Wavelet Discreta (TWD) hasta el quinto nivel de descomposición con una wavelet madre "Daubichies 10" (db10). Obtenidos los coeficientes de aproximación y detalle se les calcula la media, varianza, curtosis y asimetría a fin de establecer las matrices de entrenamiento, validación y prueba de las Redes Neuronales Artificiales (RNA). Se trabajó con 50 casos de estudio utilizando redes de tipo "feedforward". Se concluye que es posible la detección de fallas incipientes del devanado con la aplicación de la TWD y las RNA, sin embargo, de acuerdo a la clasificación de si la máquina presenta o no falla de aislamiento o cuál es el nivel de la falla, tanto el análisis de las corrientes de armadura como el de las tensiones de bobina acortada y diametral permiten la clasificación; resultando más conveniente el análisis de las corrientes de las tres fases simultáneamente ya que, al ocurrir una falla en aislamiento, ésta inicialmente afecta en forma directa a una sola de las fases y sólo cuando evoluciona es que afecta en forma directa a alguna de las otras y adicionalmente, la medición de las tensiones de bobina no es típica en máquinas convencionales. Por otro lado se obtuvo que independiente del nivel de carga es posible detectar las fallas de aislamiento con la metodología planteada.

## ABSTRACT

### STRATEGY FOR THE FAULTS DETECTION IN THE SYNCHRONOUS MACHINE STATOR WINDINGS USING THE WAVELET TRANSFORM.

**AUTHOR:** Ledy Laura Guerra

**TUTOR:** Prof. Carlos Jiménez

**Valencia, July 2019**

Considering that synchronous machines can be subject to failures that could be catastrophic, this investigation proposes a strategy for the detection of faults in the stator windings of machines since its inception. The detection of failures in its incipient state allows the application of predictive maintenance plans before their presence can trigger more severe faults that affect both the machine and the equipment connected to it. In this regard, a machine is conditioned to perform three types of winding failure: short circuit of a turn (1E), short circuit of two turns of the same coil (2E), and short circuit of two coil sides located in the same slot (2B). Once the machine has been conditioned, the armature current signals are acquired in each phase, and the pitch coils and full coils voltages for the fault conditions, as described above, and without failure, in three defined load levels (maximum, average and minimum). When the signals are acquired, the Discrete Wavelet Transform (DWT) is applied to the fifth level of decomposition with a mother wavelet "Daubichies 10" (db10). Once obtained the approximation and detail coefficients, it is calculated its average, variance, kurtosis and skewness in order to establish the training matrices, validation and Artificial Neural Networks tests (ANN). It was worked with fifty case studies using *feedforward* networks. It is concluded that it is possible to detect incipient failures of the winding with the application of the DWT and the ANN, however, according to the classification of whether the machine has insulation failure or not, or what is the level of the fault, both the analysis of armature currents such as the pitch coil and full coil voltages allow classification; proving that it is more convenient to analyze the currents of the three phases simultaneously, because, when an insulation fault occurs, in the beginning, it directly affects only one of the phases and only when it evolves is that it directly affects the other phases, and additionally, the measurement of the coil voltages is not typical in conventional machines. On the other hand, also it was proved that despite the load level, it is possible to detect the insulation faults with the proposed methodology.

## **CAPÍTULO I**

### **EL PROBLEMA**

#### **1.1.- Planteamiento del Problema**

El sistema de potencia es un conjunto de elementos que constituyen una red eléctrica de potencia siendo su función generar, transmitir y distribuir la energía eléctrica hasta los usuarios, bajo ciertas condiciones y requerimientos. Uno de los elementos más importantes de un sistema de potencia son las unidades de generación, ya que en estas es donde se realiza el proceso de conversión de energía mecánica en energía eléctrica, para que a través del sistema de transmisión y distribución pueda llegar dicha energía hasta los usuarios finales.

En este sentido, se tiene que de presentarse una falla en las unidades generadoras resulta en grandes pérdidas económicas, pérdidas en la capacidad de producción y grandes costos de reparación, por lo que el mantenimiento de dichas unidades es de gran importancia para garantizar la confiabilidad del sistema.

Por esta razón, las centrales de generación aplican diversos planes de mantenimiento para garantizar el correcto funcionamiento de las unidades de generación. Entre los mantenimientos que se pueden aplicar se tienen: correctivo, el cual consiste en reparar la parte dañada una vez que la falla se presenta y se produce la parada repentina del proceso productivo; preventivo, el cual consiste en el reemplazo de las partes que pueden presentar falla en

función a las especificaciones de los fabricantes; y predictivo, el cual se basa en un monitoreo continuo de las variables de estado del sistema a fin de detectar fallas en su estado incipiente, para así hacer el reemplazo de la parte dañada en el momento óptimo.

En este sentido se tiene que, para realizar el mantenimiento predictivo es necesario monitorear las variables características de la máquina que sean afectadas por la incidencia de una falla. Entre las fallas que se pueden presentar en las unidades de generación de los sistemas de potencia se tiene la falla en el devanado del estator, la cual representa una de las principales causas de daños en máquinas sincrónicas, ya que al existir cortocircuitos en dicho devanado, la corriente de falla persiste aún después de la apertura del interruptor, causando daños severos en la máquina. Los cortocircuitos en devanados del estator producen desbalances del sistema, los cuales afectan las señales de corriente de la máquina, por lo que se plantea elaborar una estrategia integrada para la detección de fallas en el devanado estatórico de máquinas sincrónicas mediante el análisis de la corriente de armadura utilizando la Transformada de Wavelet.

## **1.2.- Formulación del Problema**

Como se indicó anteriormente, las fallas en devanados de la máquina sincrónica traen consigo la circulación de altas corrientes de armadura que pueden causar daños severos a la máquina, por lo que es de suma importancia detectar dichas fallas a fin de que se puedan tomar las acciones pertinentes antes de que se produzcan los daños severos.



En este sentido se plantea la siguiente hipótesis: ¿Será posible la detección de fallas en el devanado estatórico de máquinas sincrónicas mediante el análisis de la corriente de armadura utilizando la Transformada de Wavelet?

### **1.3.- Objetivos**

#### **1.3.1.- General**

- Establecer una estrategia para la detección de fallas en el devanado estatórico de la máquina sincrónica utilizando la Transformada de Wavelet.

#### **1.3.2.- Específicos**

- Desarrollar el sistema experimental para el establecimiento de las condiciones de falla de la máquina sincrónica.
- Implementar el sistema de adquisición de la corriente de armadura de la máquina sincrónica para diferentes niveles de falla.
- Analizar la Transformada de Wavelet para su aplicación en la detección de fallas en el devanado estatórico de máquinas sincrónicas.
- Acondicionar los datos de la corriente estatórica bajo distintos niveles de falla para su aplicación al algoritmo de detección de fallas.
- Desarrollar el algoritmo para la detección de fallas en el devanado estatórico de la máquina sincrónica utilizando la Transformada de Wavelet.

#### **1.4.- Justificación**

El análisis espectral de señales eléctricas de motores de inducción, el cual es una de las máquinas que se utiliza mayormente en los procesos de producción, permite detectar fallas incipientes, tales como: fallas en cojinetes, desequilibrios rotóricos, fallas en el devanado del estator, entre otras. Esta característica del análisis espectral permite tomar decisiones anticipadas a la parada del sistema de producción y seleccionar el momento óptimo para realizar la intervención correctiva de forma tal que se aprovecha al máximo la vida útil de operación del elemento que presenta la falla.

En este sentido, al establecer una estrategia para la detección de fallas incipientes en el devanado estático de la máquina sincrónica, se puede determinar el momento óptimo para la intervención de mantenimiento a fin de aprovechar al máximo la vida útil del devanado. Asimismo, al determinar el momento óptimo para realizar la intervención de mantenimiento se evita tener una parada brusca del sistema, la cual puede ocasionar el daño de otros equipos acoplados y/o conectados a la máquina.

En otro orden de ideas, al aprovechar al máximo la vida útil del devanado se contribuye con la conservación del ambiente, debido a que se generan menos desechos que al realizar técnicas de mantenimiento preventivo, ya que estas técnicas de mantenimiento consisten en realizar el reemplazo de las partes que pueden presentar fallas en función a un estimado de la vida útil de dichas partes pudiendo llevar al reemplazo de equipos que tendrían un tiempo mayor de funcionamiento.

Adicionalmente, el presente trabajo aporta grandes beneficios tanto al sector industrial venezolano como a la Línea de Investigación Mantenimiento Predictivo de Equipos y Sistemas de la Facultad de Universidad de Carabobo, ya que es una base para establecer planes de mantenimiento predictivo de máquinas sincrónicas, que lleven a detectar fallas y corregirlas de forma óptima, afianzando los lazos entre la institución educativa y el ámbito industrial.

Asimismo, el desarrollo de planes de mantenimiento predictivo, permitirá a la Universidad de Carabobo ofrecer servicios a empresas nacionales, de forma tal de autogestionar recursos los cuales contribuirán al desarrollo y a la aplicación del conocimiento en pro del bienestar de la comunidad universitaria.

### **1.5.- Alcance y limitaciones**

En la investigación se utilizará la máquina sincrónica construida a partir de un alternador. El alternador tiene las siguientes características en su devanado estático:

- Devanado doble capa
- Numero de polos (N) = 14 polos
- Ranuras estáticas (r) = 42
- Paso de bobina: 3 ranuras
- Paso polar ( $\gamma_p$ ) = 3 ranuras
- Numero de espiras por bobina: 3
- Numero de bobinas por grupo: 1
- Numero de bobinas por fase: 14
- Conductor de cobre esmaltado de devanado estático N°: 15

- Ángulos mecánicos entre cada ranura ( $\gamma_{mec}$ ):

$$\gamma_{mec} = \frac{360^\circ}{N^\circ \text{ ranuras}} = \frac{360}{42} = 8,57^\circ_{mec}$$

- Ángulos eléctricos espaciales ( $\gamma_{ee}$ ):

$$\gamma_{mec} = \frac{P \times \gamma_{mec}}{2} = \frac{14 \times 8,57}{2} = 60^\circ_{ee}$$

Este devanado estático se modificará a fin de construir un devanado con el cual se puedan realizar las fallas incipientes que se establecerán en esta investigación.

Por otra parte, el rotor de dicha máquina es de polos salientes de 14 polos. En dicho rotor se colocará una bobina exploratoria y para la adquisición de la señal de tensión inducida en la bobina exploratoria se adaptará un colector de dos anillos rozantes y portaescobillas de forma externa para no alterar la estructura original del rotor.

Por otro lado, las pruebas que se realizarán a la máquina será operando como generador sincrónico con carga resistiva de tres niveles diferentes de corriente de armadura.

Cabe destacar que el presente trabajo de investigación es parte inicial de un proyecto de investigación que busca establecer criterios para planes de mantenimiento predictivo en máquinas sincrónicas.

Por lo que, al ser un trabajo inicial, no se busca realizar el desarrollo de análisis de campo para el análisis de las ecuaciones que describen el comportamiento de la máquina en condiciones de falla, sino establecer una relación, mediante

trabajo de laboratorio, entre la falla de devanado estático de la máquina sincrónica y la señal de corriente de armadura.

Pero se espera que, una vez establecida dicha relación, se puedan realizar futuros trabajos de investigación a fin de obtener las ecuaciones que describen el comportamiento de la máquina en condiciones de falla.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

A continuación se desarrollan los conceptos que dan pie al presente trabajo de investigación, en este sentido se describirán los antecedentes utilizados para la elaboración del mismo, se define y describe los generadores eléctricos, las fallas típicas que se pueden presentar en estas máquinas y el monitoreo de las condiciones de operación de los generadores sincrónicos.

#### 2.1.- Antecedentes

Khan M y Okan O (2007) presentan una aplicación de las Transformadas de Wavelet para el diagnóstico y protección de las fallas en devanados de la máquina sincrónica; concentrándose en la determinación de las potencias de la señal eléctrica adquirida. Este trabajo muestra la utilidad de las Transformadas de Wavelet para detectar las distintas posibles fallas en el devanado del estator de la máquina sincrónica, tales como: fallas internas del devanado, desbalances de fases y línea a tierra. El criterio para la detección de fallas se basa en la comparación de la potencia instantánea de la máquina operando bajo las distintas fallas estudiadas y bajo condiciones normales, obteniéndose que para las diferentes condiciones de operación se presentan cambios en la potencia instantánea. Asimismo se establecieron técnicas de protección las cuales se validaron con simulaciones y pruebas de laboratorio con un generador sincrónico de 1,6 kW.

Ozgonenel O y otros (2006) muestran un nuevo algoritmo de protección para el generador sincrónico. El algoritmo se basa la obtención de coeficientes de

Wavelet de voltaje y corriente en los terminales del generador y permite detectar tanto fallas internas como externas del generador. A las fallas en la región de protección del generador se les considera interna y fuera de la región de protección del generador se les considera externa. Se muestra la técnica de la Transformada de Wavelet Discreta TWD y muestran su habilidad para detectar fallas en dos generadores sincrónicos probados en un laboratorio y con simulaciones realizadas en el ATP – EMTP.

Nengling, T y otros (2006) presentan una protección diferencial de fase partida, para un generador de gran tamaño, basada en las Transformadas de Wavelet. Las investigaciones realizadas indican que en condiciones normales la corriente no presenta contenido armónico significativo, pero que al existir fallas internas se presentan componentes de alta frecuencia en la señal de corriente, la cual se puede utilizar para detectar la falla. En base a esto se plantea un esquema de protección, presentando las características y el software a utilizar por el relé de protección. En este trabajo se demuestra que con este esquema de protección se tiene una mayor sensibilidad y selectividad que los esquemas tradicionales. Para demostrar que el esquema de protección planteado tiene éxito en la detección de fallas internas del generador, realizaron pruebas de campo, las cuales resultaron ser satisfactorias.

Mozina, C. (2005) indica los cambios que han ocurrido en los esquemas de protección de los generadores en los últimos diez años y el riesgo de no actualizar los esquemas actuales. Adicionalmente muestra los riesgos que se presentan al no considerar dichos cambios. En este sentido, el autor se enfoca en dos áreas donde la protección de generadores de más de 20 años de edad

es inadecuada: la primera es la protección del estator ante fallas del devanado 100% a tierra y la segunda es una activación accidental de las protecciones. Por otro lado señala que uno de los principales problemas que se presenta es la energización accidental o inadvertida de los generadores, ocasionando daños en la máquina y en algunos casos la destrucción total de las mismas, por lo que destaca la importancia de la medición de los 3<sup>eros</sup> armónicos de la corriente y las ventajas de utilizar sistemas digitales sobre los relés electromecánicos.

Pope J (2005) describe tres métodos para detectar fallas del devanado 100% a tierra. Adicionalmente, suministra la información teórica, ejemplos y mediciones de campo, para cada esquema.

Zielichowski M y Fulczyk M (2005) analizan la influencia de la carga en las condiciones de operación de la protección contra falla del devanado a tierra, la cual es excitada por el tercer armónico de voltaje. Se concluye que es vital que se considere el efecto del nivel de la carga en la resolución del tercer armónico de voltaje.

## **2.2.- Bases Teóricas**

### **2.2.1.- Generadores eléctricos**

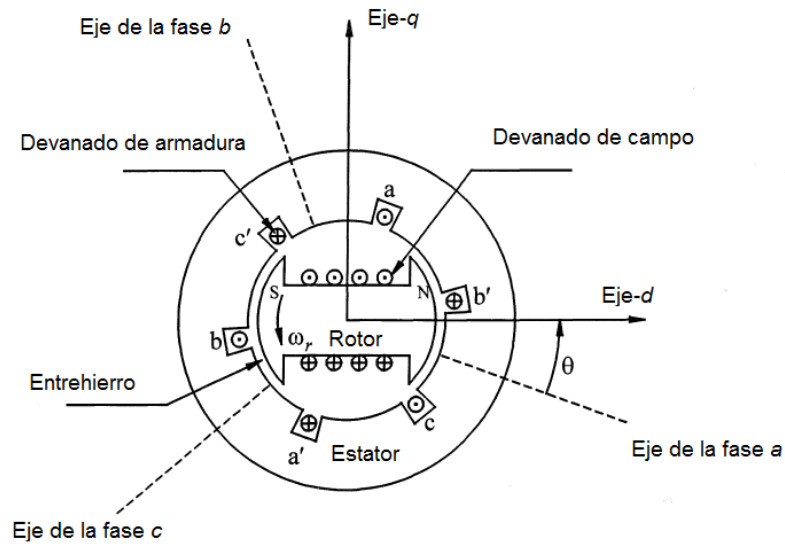
De acuerdo a lo que establece Fraile, J (2003) las máquinas eléctricas son dispositivos que se caracterizan por tener circuitos eléctricos y magnéticos entrelazados de forma tal que se realice un proceso de conversión de energía de una forma a otra, donde por lo menos una de las energías asociadas es



eléctrica. De acuerdo a la conversión de energía la máquina puede ser: generador, que convierte energía mecánica en eléctrica; motor, que convierte energía eléctrica en mecánica y transformador, que convierte energía eléctrica en eléctrica.

Estas máquinas contienen una o más bobinas rodeando un campo magnético, típicamente suministrado a través de imanes permanentes o un electroimán. En un generador de corriente alterna (AC), en el rotor se establece dicho campo magnético por medio de imán permanente o electroimán y se hace girar con una turbina o dispositivo mecánico, induciendo tensiones en las bobinas o el devanado del estator. En la actualidad la mayoría de las estaciones o centrales de generación están constituidas por generadores sincrónicos funcionando en paralelo y a su vez, dichas centrales se interconectan en sincronismo constituyendo así los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP). A continuación se describe el principio de funcionamiento de los generadores sincrónicos ya que es la máquina objeto de estudio en el presente trabajo.

La figura 2.1 muestra un esquema de la sección transversal de una máquina sincrónica trifásica elemental donde se observa que la máquina está constituida por dos partes esenciales: el rotor y el estator. Dicha máquina elemental tiene un par de polos en el rotor y tres bobinas en el estator. Por el devanado de campo ubicado en el rotor se hace circular una corriente continua que produce un campo magnético. Al hacer girar al rotor por medio de un dispositivo mecánico, el campo producido por la corriente que circula en el rotor induce un voltaje alterno en el devanado de armadura ubicado en el estator.



**Figura 2.1.: Diagrama esquemático de una máquina síncrona trifásica**  
**Fuente: Valdez M. (2014)**

- **Características de los circuitos de armadura y del circuito rotórico:**

De acuerdo a lo que establece Valdez, M. (2014), los devanados de armadura usualmente operan a un voltaje considerablemente alto comparado con el de campo y por ello requiere un mayor espacio para su aislamiento. Estos devanados también están sujetos a altas corrientes transitorias por lo que deben tener una adecuada resistencia mecánica.

Por lo tanto, una práctica normal es tener la armadura en el estator. Los tres devanados de armadura se construyen de forma tal que los ejes magnéticos de cada fase queden espaciados entre sí 120 grados eléctricos espaciales, y así, con una rotación uniforme del campo magnético, se obtienen voltajes desfasados 120 grados eléctricos. Debido a que la armadura está sujeta a variaciones de flujo magnético, el núcleo del estator es construido de delgadas láminas para reducir las pérdidas por corrientes de Foucault.

En la máquina sincrónica se tiene que la frecuencia de las tensiones inducidas en el circuito de armadura está relacionada con la velocidad de giro del rotor, tal como se indica en la ecuación 2.1. Donde la velocidad de giro del rotor es la velocidad sincrónica ( $n_s$ ).

$$n_s = \frac{120}{p} f \quad (2.1)$$

donde:

$n_s$  es la velocidad sincrónica en rpm,

$f$  es la frecuencia en Hz,

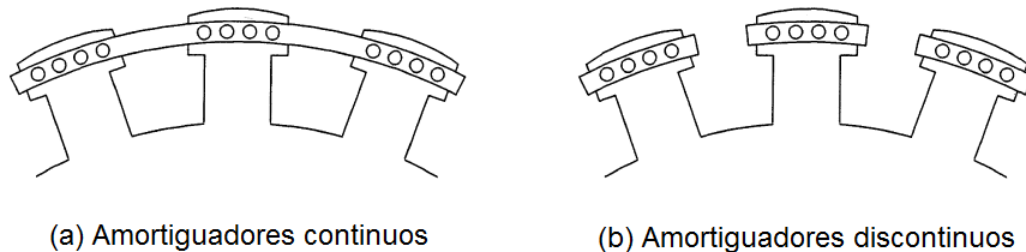
$p$  es el número de polos.

Adicionalmente, de acuerdo a lo que establece el Teorema de Ferraris, si se tienen corrientes trifásicas balanceadas circulando por el circuito de armadura, estas corrientes inducen un campo magnético de armadura ( $B_{ar}$ ) en el entrehierro que gira a velocidad sincrónica. La corriente que circula por el circuito rotórico induce el campo rotórico ( $B_r$ ) que gira con el rotor a la velocidad sincrónica, por consiguiente como los dos campos se mueven a la misma velocidad se produce un torque estable.

Valdez, M. (2014) establece que las turbinas hidráulicas operan a bajas velocidades acopladas a máquinas con gran número de polos, por lo que un rotor con polos salientes y devanados concentrados es el más adecuado mecánicamente para esta condición. Algunos rotores a menudo tienen devanados amortiguadores en forma de varillas de cobre o plata en las caras polares los cuales están conectados a anillos finales (end rings) para formar devanados cortocircuitados similares a la jaula de ardilla de la máquina de

inducción. Los devanados amortiguadores pueden ser continuos o no continuos, como se muestra en la figura 2.2. Como las componentes armónicas de la Fuerza Magnetomotriz de Armadura ( $F_{mm_{ar}}$ ) contribuyen a las pérdidas por corrientes de Foucault las caras polares de las máquinas de polos salientes son laminadas.

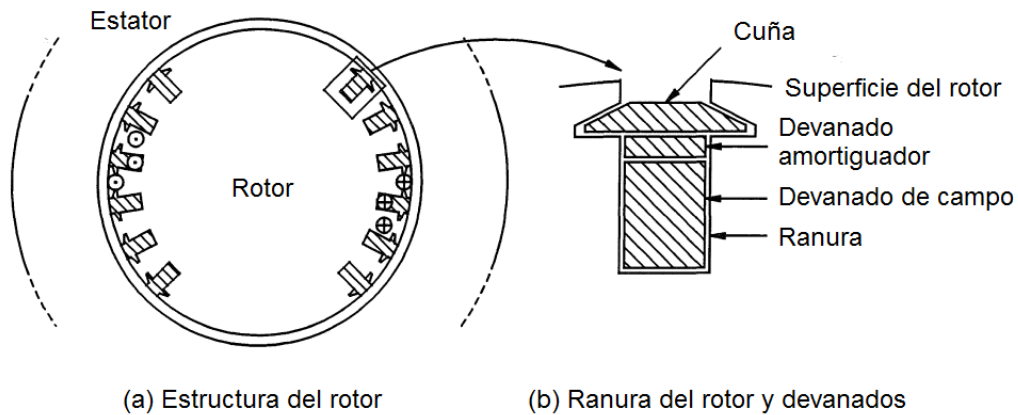
Igualmente indica que las turbinas a vapor o gas, por otra parte, operan a altas velocidades, por lo que sus generadores tienen rotores cilíndricos contruidos de hierro forjado. Por lo general, estos rotores cilíndricos tienen dos o cuatro polos, formados por devanados distribuidos en ranuras dentro del rotor sólido, compuestas por cuñas de acero. Estos usualmente no tienen devanados amortiguadores, pero el acero sólido ofrece camino para las corrientes de Foucault que tienen un efecto equivalente a las corrientes amortiguadoras.



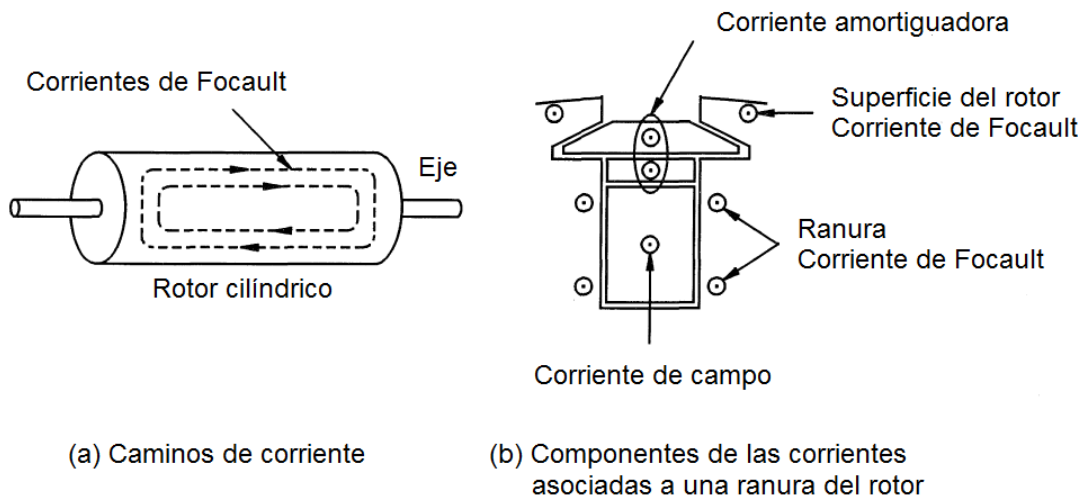
**Figura 2.2.: Construcción del rotor de polos salientes**  
**Fuente: Valdez M. (2014)**

Según Valdez, M. (2014), algunos fabricantes proveen devanados amortiguadores adicionales y capacidad para corrientes de secuencias negativas a través de cuñas en las ranuras de los devanados de campo como barras amortiguadoras, interconectadas entre ellas con el fin de proveer una caja amortiguadora. En la figura 2.3 se muestra la estructura de este rotor.

Bajo condiciones estables, la única corriente de rotor existente es la corriente continua de campo, sin embargo, bajo condiciones dinámicas se inducen corrientes de Foucault en la superficie del rotor, en las ranuras y en los devanados amortiguadores (si se está considerando amortiguación adicional). La figura 2.4 muestra los caminos de corriente de un generador de rotor cilíndrico.



**Figura 2.3.: Construcción de un Rotor Cilíndrico**  
**Fuente: Valdez M. (2014)**



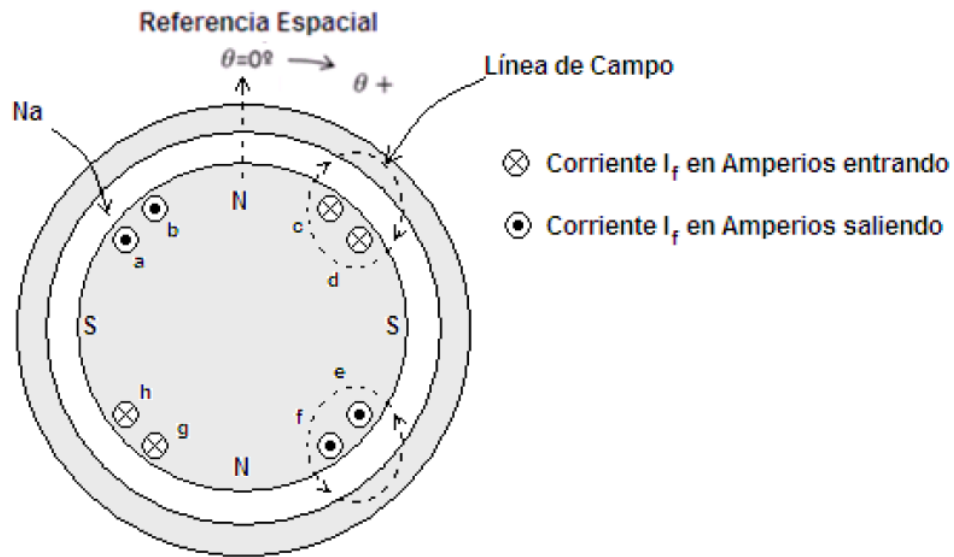
**Figura 2.4.: Caminos de Corriente de Foucault en un Rotor Cilíndrico**  
**Fuente: Valdez M. (2014)**

- **Formas de onda de las Fuerzas Magnetomotrices (Fmm)**

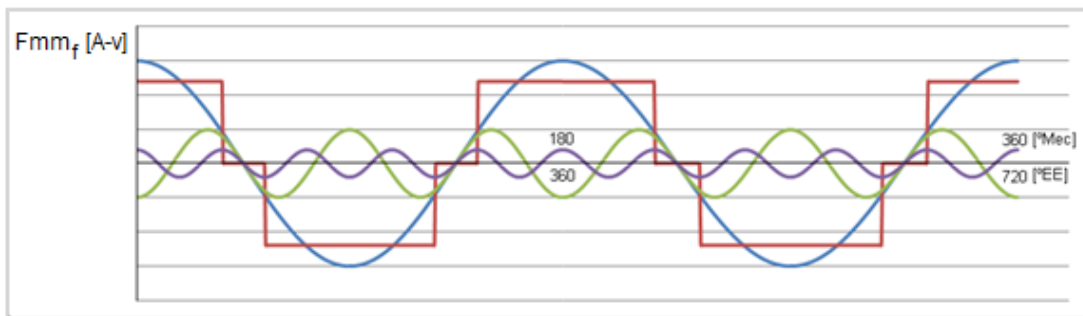
De acuerdo a lo que establece Fitzgerald, A. (1992), en la práctica los devanados de armadura y los devanados de campo de un rotor cilíndrico están distribuidos en varias ranuras, es por eso que para su estudio se considera que la Fmm resultante y las formas de onda de las densidades de campo magnético tienen distribución espacial sinusoidal. En el caso de un rotor de polos salientes, que tiene devanados de campo concentrados en los polos, las caras de los polos se construyen de forma tal que se minimice los armónicos en la densidad de campo magnético.

Primero, se considera la forma de onda de la Fmm asociada al devanado rotórico y seguidamente la forma de onda de la Fmm asociada solo al devanado de armadura. La Fmm producida por la corriente que circula en el rotor cilíndrico de la figura 2.5 es la que se muestra en la figura 2.6. En dicha figura se observa que al colocar pocos conductores en el rotor cilíndrico, la distribución espacial de la fuerza magnetomotriz del rotor ( $F_{mmr}$ ) es menos senoidal y por consiguiente tiene el contenido armónico mostrado en la figura 2.6.

Si el rotor cilíndrico se construye con mayor número de conductores distribuidos uniformemente en la periferia del mismo, se obtiene una distribución espacial de la Fmm triangular cuyo contenido armónico es menor por lo que se asemeja más a una señal senoidal. En este sentido se tiene que es conveniente que los rotores cilíndricos se construyan con un elevado número de conductores a fin de minimizar los armónicos de campo.



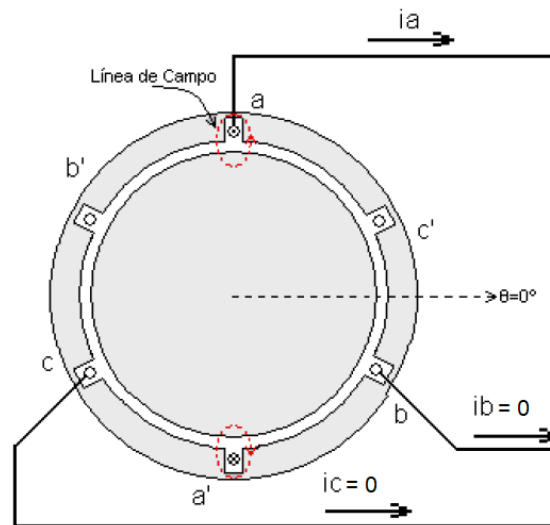
**Figura 2.5: Distribución de conductores de un rotor cilíndrico**  
**Fuente: Guerra, L. (2015)**



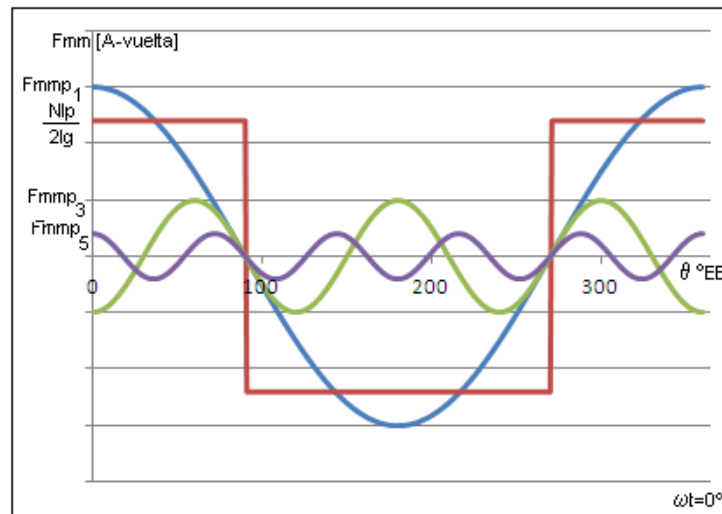
**Figura 2.6: Formas de onda de la Fmm producida por un rotor cilíndrico**  
**Fuente: Guerra, L. (2015)**

Para determinar la Fuerza Magnetomotriz de Armadura ( $F_{mm_{ar}}$ ) relacionada con los devanados de las tres fases, primero se debe tener en cuenta la forma de onda de la Fuerza Magnetomotriz producida por la corriente de cada una de las fases en forma independiente ( $F_{mm_a}$ ,  $F_{mm_b}$  y  $F_{mm_c}$ ). En la figura 2.7 se muestra la configuración de una máquina elemental por la que circula

corriente solamente en la fase a y en la figura 2.8 se muestra la distribución espacial de la fuerza magnetomotriz debida a dicha corriente. Con  $\theta$  representando el ángulo a lo largo de la periferia del estator con respecto al eje magnético de la fase a, la onda de la FMM relacionada con las tres fases se puede escribir como la ecuación 2.2.



**Figura 2.7: Devanado estatórico de la máquina síncrona**  
**Fuente: Guerra, L. (2015)**



**Figura 2.8: Distribución espacial de la  $F_{mm_a}$  con sus respectivas componentes armónicas (hasta quinto armónico)**  
**Fuente: Guerra, L. (2015)**



$$\begin{aligned}
Fmm_a &= K \cdot i_a \cdot \cos(\theta) \\
Fmm_b &= K \cdot i_b \cdot \cos(\theta - 120) \\
Fmm_c &= K \cdot i_c \cdot \cos(\theta + 120)
\end{aligned} \tag{2.2}$$

donde:

$i_a$ ,  $i_b$  e  $i_c$  son los valores instantáneos de las corrientes de fase y  $K$  es una constante.

Cada devanado produce una onda de Fmm estacionaria cuya magnitud cambia en el tiempo de acuerdo con su respectiva corriente. Considerando solo las componentes fundamentales, las tres ondas de Fmm relacionadas con las tres fases están espaciadas entre si 120 grados eléctricos espaciales ya que el devanado es trifásico equilibrado. Con corrientes equilibradas y tomando como referencia temporal cuando  $i_a$  es máxima positiva con secuencia abc, se tienen las corrientes por fase indicadas en la ecuación 2.3.

$$\begin{aligned}
i_a &= I_p \cdot \cos(\omega \cdot t) \\
i_b &= I_p \cdot \cos(\omega \cdot t - 120) \\
i_c &= I_p \cdot \cos(\omega \cdot t + 120)
\end{aligned} \tag{2.3}$$

donde  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$  es la frecuencia angular de las corrientes de estator en rad/s eléctricos.

Por consiguiente de acuerdo a lo que establece el Teorema de Ferraris, la Fuerza Magnetomotriz de Armadura ( $Fmm_{ar}$ ) relacionada con las tres fases, está dada por la ecuación 2.4.

$$\begin{aligned}
Fmm_a &= K' \cdot \cos(\omega \cdot t) \cdot \cos(\theta) \\
Fmm_b &= K' \cdot \cos(\omega \cdot t - 120) \cdot \cos(\theta - 120)
\end{aligned}$$

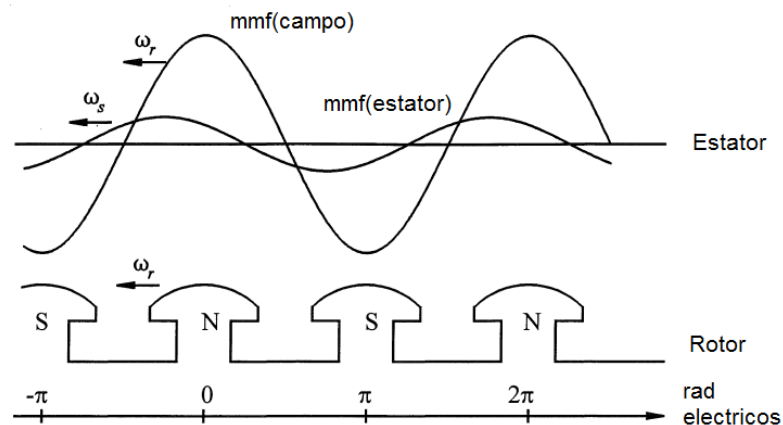
$$Fmm_c = K' \cdot \cos(\omega \cdot t + 120) \cdot \cos(\theta + 120)$$

$$Fmm_{ar} = Fmm_a + Fmm_b + Fmm_c = (\frac{3}{2}) \cdot K' \cdot \cos(\omega \cdot t - \theta) \quad (2.4)$$

Como se observa en la ecuación 2.4 la  $Fmm_{ar}$  representa una onda viajera y en cualquier instante, la  $Fmm_{ar}$  tiene una distribución espacial sinusoidal. Ésta tiene una amplitud constante y un ángulo espacial por fase de  $\omega \cdot t$ , función del tiempo, así la  $Fmm_{ar}$  se mueve a velocidad angular constante correspondiente a la velocidad sincrónica dada por la ecuación 2.1. Por consiguiente, para una operación balanceada, la onda de la  $Fmm_{ar}$  es estacionaria con respecto a la  $Fmm_f$ .

Las ondas de la  $Fmm$  del estator y campo se muestran en la figura 2.9 relativas con la estructura del rotor, tal como lo indica Valdez, M. (2014). La magnitud de la  $Fmm_{ar}$  y su posición angular relativa con respecto a la  $Fmm_f$  depende de la carga de la máquina sincrónica y el torque electromagnético en el rotor actúa en una dirección tal que se alinea con el campo magnético.

Si el campo del rotor adelanta al de armadura, el torque actúa en oposición a la rotación con la máquina actuando como un generador. Por otra parte, si el campo del rotor atrasa al de armadura, el torque actúa en la dirección de rotación de la máquina actuando ésta como motor. En otras palabras, para generación, el campo del rotor adelanta al de armadura gracias al torque del primer instante; y para funcionamiento como motor, el campo del rotor retrasa al de armadura lo que produce un retraso en el torque mecánico.



**Figura 2.9.: Fmm de estator y rotor**  
**Fuente: Valdez M. (2014)**

Por otro lado, para modelar la máquina síncrona se definen los ejes directo (d) y cuadratura (q) que se muestran en la figura 2.1. Donde el eje directo se coloca en alineación con el rotor centrado en un polo norte y el eje en cuadratura a  $90^\circ$  eléctricos espaciales de este.

La posición relativa del rotor con respecto al estator es medida por el ángulo  $\gamma$  formado entre el eje directo y el eje magnético del devanado de la fase a. La elección para el eje en cuadratura es arbitraria y puede ser adelantando o retrasando al eje directo en 90 grados eléctricos espaciales.

### 2.2.2.- Fallas en Máquinas Eléctricas

Las máquinas eléctricas están sujetas a fallas tanto internas como externas, siendo objeto de este estudio las fallas internas, las cuales se pueden iniciar como una pequeña anomalía y con el transcurrir del tiempo de operación de la máquina pueden redundar en fallas más severas sino se toman las acciones correspondientes para solventar la condición de falla. Las fallas internas

pueden ocurrir tanto en el rotor como en el estator de la máquina, en este sentido de acuerdo a Neti, P. (2007), las principales fallas que pueden ocurrir en la máquina son:

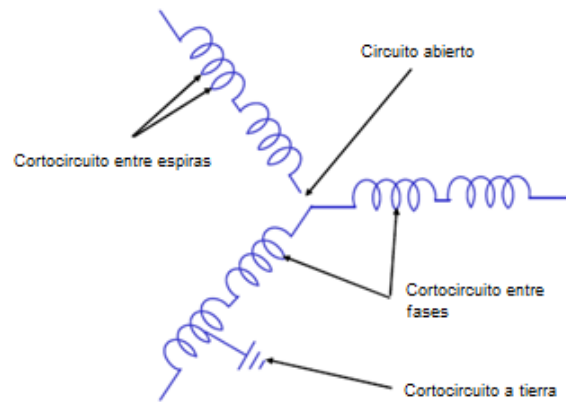
- Fallas en rodamientos. (40 – 50%)
- Fallas en aislamiento del estator. (30 – 40%)
- Fallas en el devanado de amortiguamiento. (5 – 10%)
- Excentricidad y otras.

Para el presente trabajo de investigación es de interés las fallas asociadas al aislamiento del devanado estatórico de la máquina sincrónica en su estado incipiente. En este sentido, de acuerdo a lo que establece P. Reichmeider y otros (2000) citado por Valdez, M. (2014) se distinguen las siguientes fallas internas de devanado:

- Falla de circuito abierto.
- Cortocircuito entre espiras de la misma fase.
- Cortocircuito entre devanados de distintas fases.
- Cortocircuito entre una o más fases y tierra

En la figura 2.10 se muestran estas fallas asociadas al estator. Al ocurrir una falla interna en la máquina la  $F_{mm}$  cercana a los devanados de la falla disminuye. Si se opera la máquina con la condición de falla, esta causará una distorsión en la distribución de la  $F_{m_{ar}}$  en el entrehierro debida a la circulación de grandes corrientes en el lugar de la falla, donde dicha alteración es asimétrica ya que sólo afecta a una parte del devanado. Esta  $F_{m_{ar}}$  modificada interactúa con la  $F_{m_r}$  y produce una Fuerza Magnetomotriz

Resultante ( $F_{mmR}$ ) modificada por la presencia de la falla, lo que trae ventajas, ya que siendo así es posible detectarla y tomar acción al respecto.



**Figura 2.10.: Fallas asociadas al estator**  
**Fuente: Valdez M. (2014)**

### 2.2.3. Monitoreo de condición

Neti, P. (2007) indica que con la medición de parámetros relacionados con la condición de operación de una máquina o sistema (por ejemplo corriente eléctrica, vibraciones, temperatura de rodamientos, presión de aceite, rendimiento), es posible determinar el estado actual de la máquina, así, si el estado de ésta es malo, entonces el monitoreo de condición permite diagnosticar la causa del problema y/o tomar acción a causa de ello.

Para llevar a cabo el mantenimiento predictivo es necesario realizar el monitoreo de condición, ya que este tipo de mantenimiento se basa en indicadores que informan si un problema está a punto de ocurrir.

Según lo que establece A. Piersol y T. Paez (2009), citado por Valdez, M. (2014) entre las cualidades del mantenimiento predictivo destacan:

- Evita averías catastróficas inesperadas con consecuencias costosas o peligrosas.
- Reduce el número de reparaciones en la máquina al mínimo, reduciendo así los costos de mantenimiento.
- Elimina intervenciones innecesarias con el consiguiente riesgo de introducir errores en las máquinas que funcionan sin problemas.
- Permite que las piezas que serán utilizadas como repuestos sean pedidas con anticipación, eliminando costos por inventarios.
- Reduce el tiempo de intervención, minimizando así las pérdidas de producción debido a que se conoce específicamente lo que se debe reparar. De esta forma se pueden programar las intervenciones en los tiempos que más convenga.

Tal como establece Neti, P. (2007), una de las técnicas de mantenimiento predictivo utilizada en la actualidad para detección de fallas de aislamiento en generadores sincrónicos de alto voltaje es la medición de la actividad de descargas parciales, la cual puede ser mayor casi en un 30% cuando existe falla de aislamiento en comparación con la condición normal de operación. En este sentido el instrumento llamado TGA – B puede medir las descargas parciales de un generador sincrónico de alto voltaje tanto en operación como fuera de línea.

## **CAPÍTULO III**

### **MARCO METODOLÓGICO**

Este capítulo está orientado a definir el tipo de investigación y describir el procedimiento realizado para el desarrollo de este trabajo, definiendo el orden de los pasos que se siguieron para cumplir con los objetivos previamente planteados. Asimismo se indica la técnica de recolección y análisis de datos que se realizarán para llevar a cabo la presente investigación.

#### **3.1.- Tipo de estudio y de investigación**

El tipo de estudio es de laboratorio, ya que los datos se obtendrán de unas pruebas que se realizarán en el Laboratorio de Mantenimiento Predictivo de la Universidad de Carabobo. Adicionalmente, es de tipo contemporáneo transeccional ya que los datos se obtendrán en el año 2015 y es de tipo multivariable porque se realizarán distintos tipos y niveles de falla en devanado.

La investigación es de tipo interactiva, definida por Hurtado de Barrera, J. (2010) como la investigación que “va dirigida a modificar situaciones concretas a través de la aplicación de proyectos previamente diseñados. Puede considerarse también investigación interactiva todo proceso de intervención que procede y está sustentado por una indagación sistemática” ya que en esta investigación se va utilizar la Transformada de Wavelet a fin de desarrollar un algoritmo para la detección de fallas en devanados de la máquina sincrónica.

### **3.2.- Población y muestra**

Las pruebas de laboratorio se realizaron sobre una máquina sincrónica que se reconstruyó a partir de un alternador de carro. A esta máquina sincrónica se le estableció un devanado estatórico de realizar fallas incipientes en el devanado y adicionalmente se colocó en el rotor una bobina de exploración a fin de adquirir la señal de tensión en dicha bobina para las distintas condiciones de operación de la máquina.

### **3.3.- Técnicas de recolección de datos**

Los datos se obtuvieron a partir de la medición directa de corrientes de armadura y tensiones en terminales de las bobinas preestablecidas, en la máquina sincrónica, para cada una de las fallas que se realizaron en el devanado estatórico de dicha máquina. Los instrumentos para la recolección de los datos se diseñaron en LABVIEW para adquirir, procesar y almacenar los datos en el computador en archivos tipo texto.

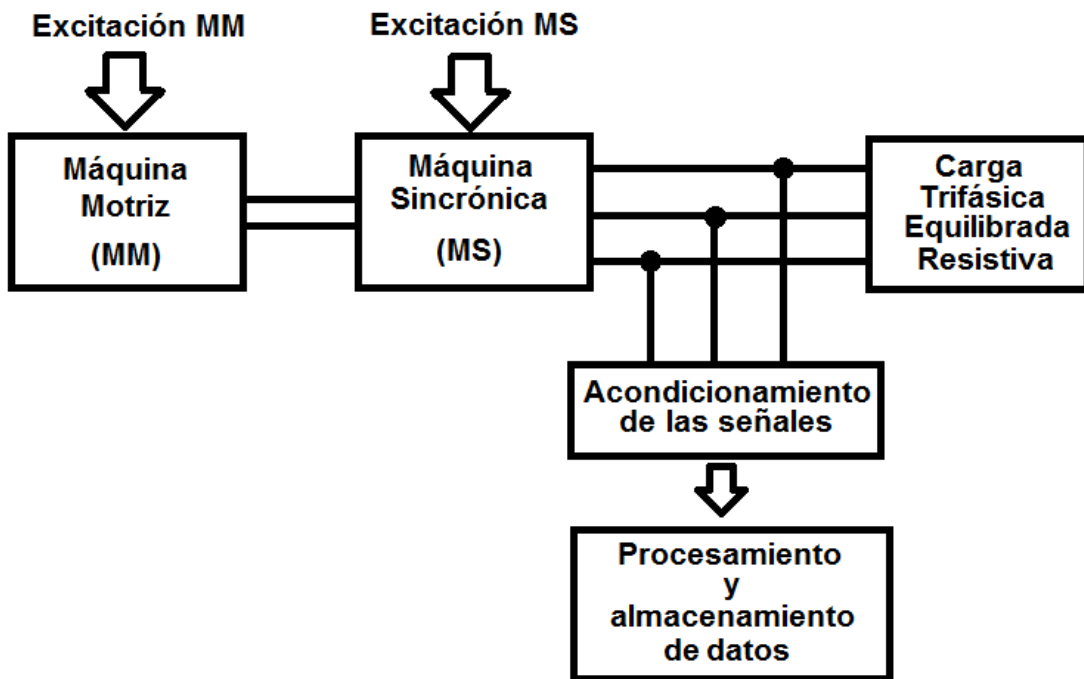
### **3.4.- Técnicas de análisis de datos**

Para el análisis de los datos se elaboró un software en MATLAB en el cual se cargaron los datos de los archivos tipo texto almacenados de la adquisición, se les aplicó la Transformada de Wavelet y se procesaron para realizar el entrenamiento, validación y prueba de redes neuronales a fin de establecer un criterio para la detección de fallas de aislamiento de la máquina sincrónica.



### 3.5.- Instrumentos de recolección de datos

Para la adquisición de los datos se desarrolló un circuito en el laboratorio cuyo esquema genérico se indica en la figura 3.1.



**Figura 3.1: Esquema del circuito desarrollado**

En el esquema de la figura 3.1 se observa una etapa de acondicionamiento de las señales, en la cual se utilizan los equipos que se requieran a fin de ajustar los valores de dichas señales a valores que puedan ser manejados por la tarjeta de adquisición de datos (TAD); y una etapa de procesamiento y almacenamiento de datos, la cual está constituida por una TAD y un computador portátil.

En este sentido, la etapa de acondicionamiento es para adaptar las señales de tensión y corriente a valores que puedan ser manejados por la TAD la cual

se encarga de digitalizar los datos para que puedan ser procesados en un computador portátil. En el computador se desarrollaron los instrumentos virtuales en LABVIEW, en los cuales se realizaron los cálculos y procesamientos para obtener las señales de tensión y corriente en el tiempo, las cuales son almacenadas en archivos tipo texto.

### **3.6.- Técnicas de procesamiento de datos**

La técnica de procesamiento de datos utilizada en el software desarrollado en MATLAB es la Transformada de Wavelet, con la cual se extraen las características de las señales a fin de establecer un criterio para la detección de fallas en devanados de la máquina sincrónica.

### **3.7.- Fases de la Investigación**

A continuación se indica el procedimiento metodológico para realizar la presente investigación

Fase 1: Desarrollo e implementación del sistema experimental para el establecimiento de las condiciones de falla de la máquina sincrónica y la adquisición de la corriente de armadura para distintos niveles de falla.

- Establecer las características de la máquina sincrónica a ensayar para generar las fallas de devanado.

En esta etapa de la investigación se dispone de una máquina con un estator y devanado de armadura, con las características que se indican en la tabla 3.1.

**Tabla 3.1: Características del estator y del devanado de armadura de la máquina disponible**

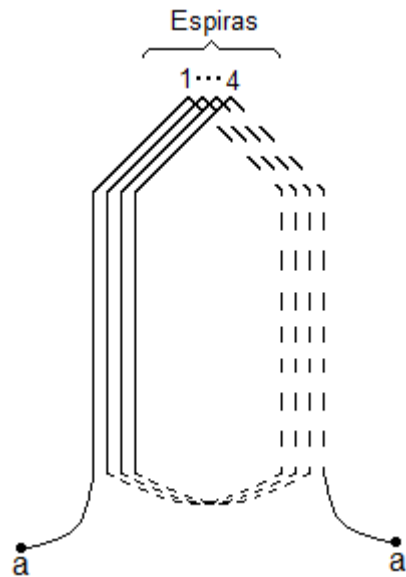
<b>Característica</b>	<b>Unidades</b>
Ranuras	42
Número de polos	14
Devanado	Imbricado doble capa
Paso de bobina	3 ranuras
Paso polar	3 ranuras
Número de espiras	3
Número de bobinas por grupo	1
Número de bobinas por fase	14
Conductor de cobre esmaltado	N° 15
Ángulos de ranuras	8.57 °mec, 60 °EE

Adicionalmente se tiene que el rotor de esta máquina es de polos salientes con 14 polos.

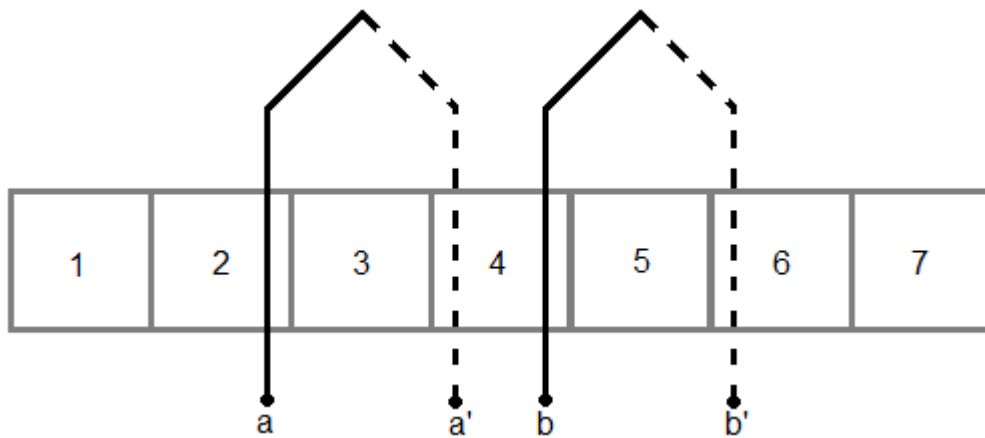
En otro orden de ideas, el estudio se centra en las fallas incipientes de aislamiento del devanado de armadura. Considerando que este tipo de falla es una reacción en cadena, se realizarán tres tipos de fallas como las que se listan a continuación y se muestran en las figuras 3.2a y 3.2b, esto con la finalidad de representar el progreso de una falla de aislamiento.

- Cortocircuito de una espira de una bobina a – a’.
- Cortocircuito de dos espiras de la misma bobina a – a’.

- Cortocircuito de dos lados de bobina que se encuentren en la misma ranura. Es decir de la bobina  $a - a'$  y de la bobina  $b - b'$  que tiene un lado en la misma ranura.



(a): Bobina  $a - a'$



(b): Bobinas  $a - a'$  y  $b - b'$

Figura 3.2: Ubicación de las bobinas donde se desarrolló la falla

A partir de esta máquina disponible y de las características de las fallas que se desean realizar se procede a modificar el devanado estático.

- Construir la máquina objeto de estudio con las características establecidas para producir las fallas en devanado.

A continuación se describe las modificaciones que se efectuaron a la máquina disponible a fin de poder realizar las fallas y la adquisición de los datos.

### **Construcción del devanado estático:**

Considerando el número de polos del rotor y las ranuras del estator de la máquina disponible, se decidió realizar un devanado estático con las características que se indican en la tabla 3.2.

**Tabla 3.2: Características del estator y del devanado de armadura de la máquina modificada**

<b>Característica</b>	<b>Unidades</b>
Ranuras	42
Número de polos	14
Devanado	Imbricado doble capa
Paso de bobina	2 ranuras
Paso polar	3 ranuras
Número de espiras	3
Número de bobinas por grupo	1
Número de bobinas por fase	14
Conductor de cobre esmaltado	N° 17
Ángulos de ranuras	8.57 °mec, 60 °EE

Una vez establecidas las características del devanado se procedió a retirar el devanado anterior, a acondicionar el estator y a colocar el nuevo devanado, tal como se muestra en las figuras 3.3a, 3.3b y 3.3c.



**(a): Estator una vez retirado el devanado anterior.**



**(b): Acondicionamiento del estator para colocar el nuevo devanado**



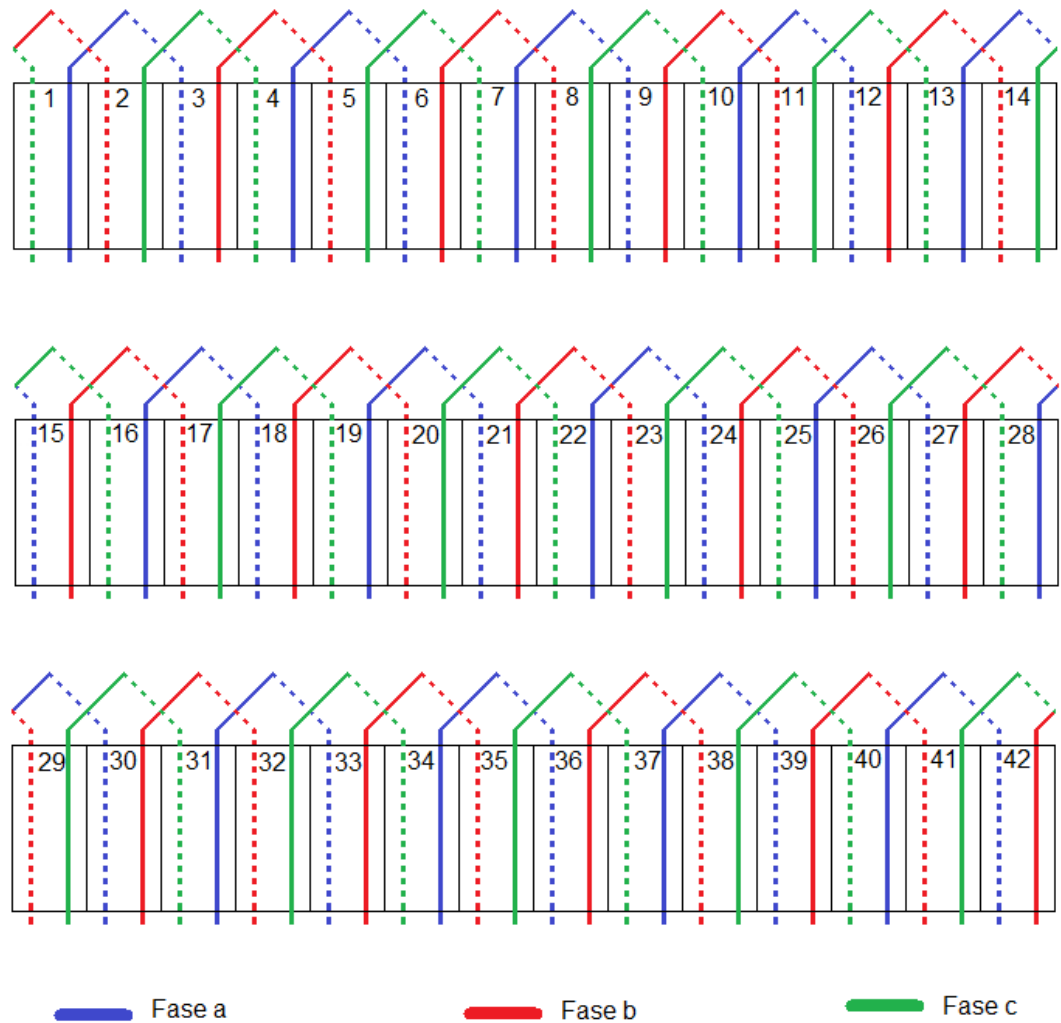
**(c): Construcción de las bobinas**

**Figura 3.3.: Modificación del devanado**

En la figura 3.4 se muestra el esquema desarrollado del devanado construido en el estator de la máquina. Adicionalmente, como se requiere poder realizar las fallas de cortocircuito de una espira y de dos espiras de una misma bobina, a dicha bobina se le colocaron las terminaciones correspondientes al momento de su construcción. En este sentido se tiene que las bobinas seleccionadas son la 4 – 4', que inicia en la ranura 4 y la 5 – 5', que inicia en la ranura 5, por lo tanto dichas bobinas tienen dos terminales adicionales cada una, indicados como 4cc, 4'cc, 5cc y 5'cc en la bornera de la máquina.

En la figura 3.5 se muestra las características de las bobinas 4 – 4' y 5 – 5', a fin de establecer el esquema de conexiones para realizar los cortocircuitos de una espira y de dos espiras respectivamente.

Por otro lado, a la máquina se le colocó una bobina diametral, indicada con los terminales D y D' en la bornera, a fin de poder obtener la tensión en una bobina con estas características y compararla con la obtenida en una bobina acortada una ranura.



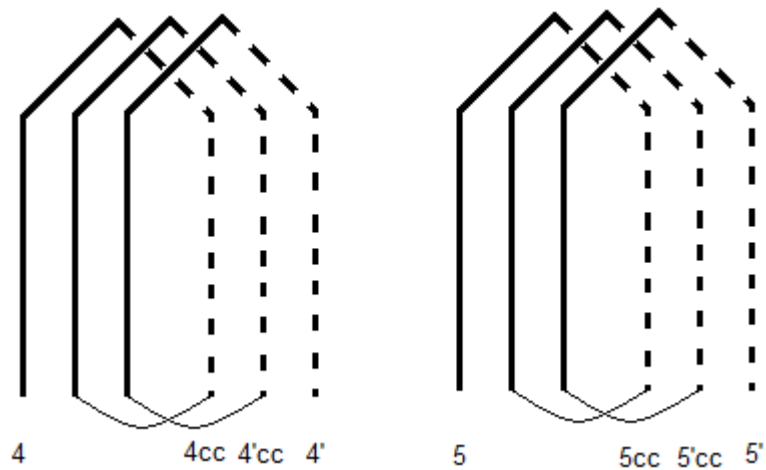
**Figura 3.4: Esquema desarrollado del devanado**

En conclusión, provenientes del estator de la máquina, se tienen disponibles los siguientes terminales:

- 84 terminales correspondientes al inicio y el fin de cada una de las bobinas.



- 4 terminales adicionales correspondientes a los terminales para realizar cortocircuito de una espira y de dos espiras en las bobinas 4 – 4' y 5 – 5'.
- 2 terminales correspondientes a la bobina diametral D – D'.

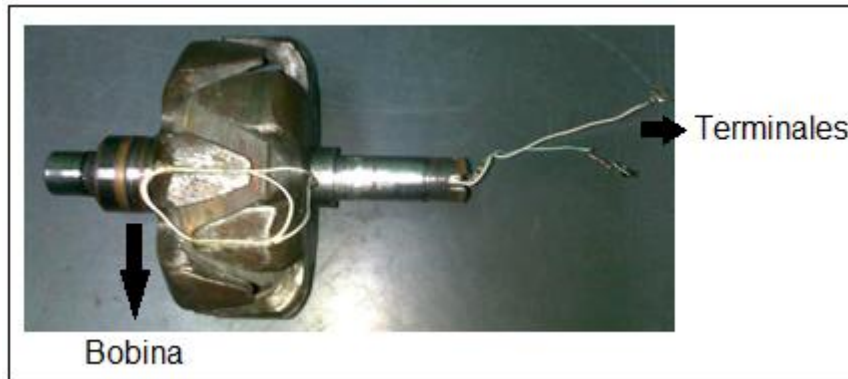


**Figura 3.5: Características de las bobinas para realizar las fallas de cortocircuito de una espira y de dos espiras**

#### **Modificación del rotor:**

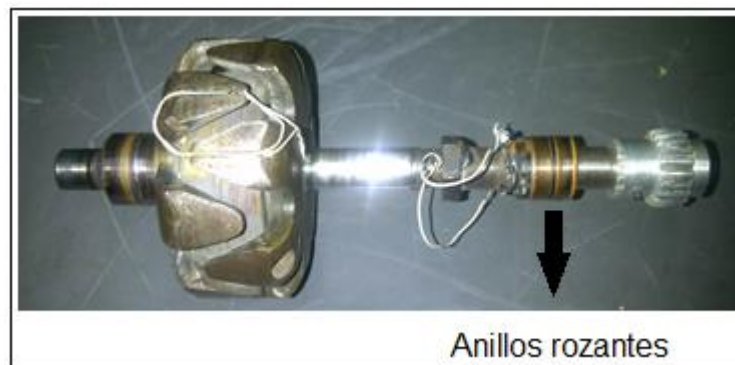
Con la finalidad de observar, desde el rotor, modificaciones que puedan presentarse en el campo resultante, se colocó en el mismo una bobina diametral de exploración.

Para la colocación de dicha bobina se realizaron ranuras en dos polos consecutivos del rotor, en las cuales se arrolló una bobina de cable número 24. Adicionalmente, se perforó el eje del rotor para darle salida a los terminales de la bobina, tal como se muestra en la figura 3.6.



**Figura 3.6: Bobina de exploración**

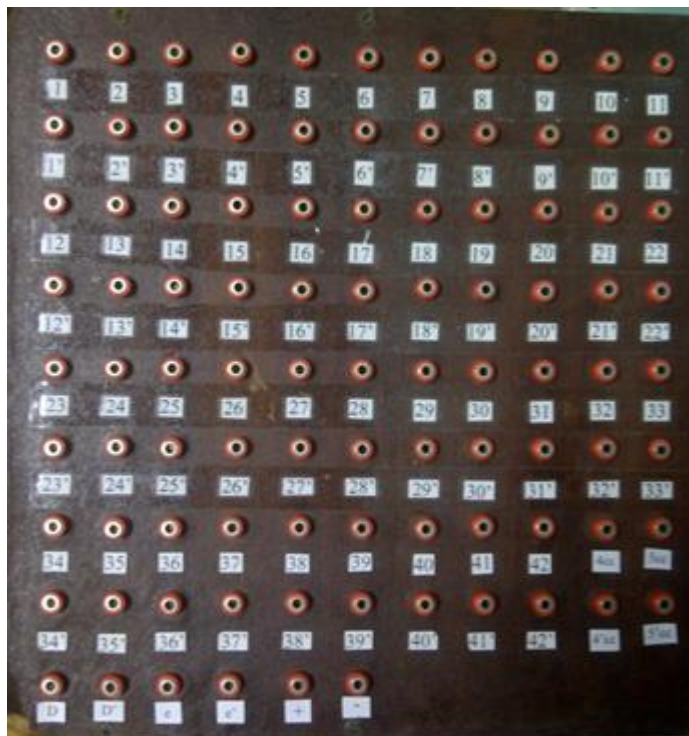
Para tener acceso desde el exterior a la bobina de exploración fue necesario adaptar dos anillos rozantes al eje del rotor, tal como se muestra en la figura 3.7.



**Figura 3.7: Conexión de la bobina de exploración**

En este sentido, se dispone en la bornera de cuatro terminales provenientes del rotor, dos terminales para el circuito de excitación indicados como '+' y '-', y dos terminales provenientes de la bobina de exploración indicados como e – e'.

Una vez realizadas tanto las modificaciones al estator como al rotor de la máquina se tiene la bornera que se muestra en la figura 3.8, constituida por 94 terminales.



**Figura 3.8: Bornera de la máquina**

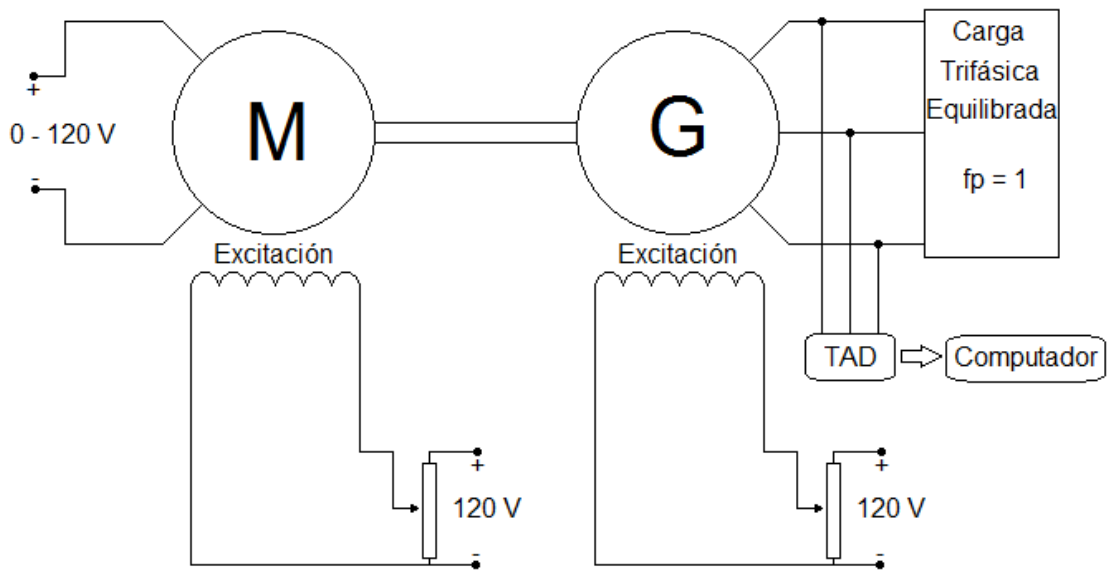
- Establecer las características del sistema de adquisición de datos para obtener las variables de tensión y corriente de la máquina para diferentes niveles de falla en devanado.

Al disponer de la máquina objeto de estudio, con la que se podrán realizar las fallas necesarias, se procede a establecer los esquemas

tanto de circuito como de software para realizar la adquisición de los datos.

### Características del Circuito:

En la figura 3.9 se muestra el esquema del circuito con el que se realizaron las pruebas necesarias para el estudio.



**Figura 3.9: Esquema del circuito para las pruebas**

En la tabla 3.3 se indican las especificaciones de cada uno de los elementos con los cuales se construyó el circuito.

**Tabla 3.3: Especificaciones de los Equipos**

<b>Motor DC</b>			
Fabricado por	Electrónica Veneta	Modelo	M-12/EV
Tipo	EXC. SEP.	Potencia (W)	450
Voltaje (V)	220	Corriente (A)	2,1
Voltaje de excitación (V)	220	Corriente de excitación (A)	0,33
Velocidad (RPM)	3600	Torque (Nm)	1,5
<b>Fuente de Alimentación</b>			
Marca		Terco	
Selector		Tensión (V)	Corriente (A)
DC fijo		220	3,5
DC variable		0 – 220	16
AC fijo		220	10
AC variable		0 – 220	10
<b>Reóstatos para la Carga Trifásica</b>			
Voltaje (V)			220
Corriente máxima (A)			16
Resistencia ( $\Omega$ )			1,2
<b>Reóstatos Shunt</b>			
Marca			Terco
Voltaje (V)			220
Corriente Máxima (A)			2
Resistencia ( $\Omega$ )			440
<b>Tarjeta de Adquisición de Datos (TAD)</b>			
Modelo			USB - 1208FS
Voltaje de alimentación (V)			120
Frecuencia de alimentación (Hz)			60
Nº de canales externos			8

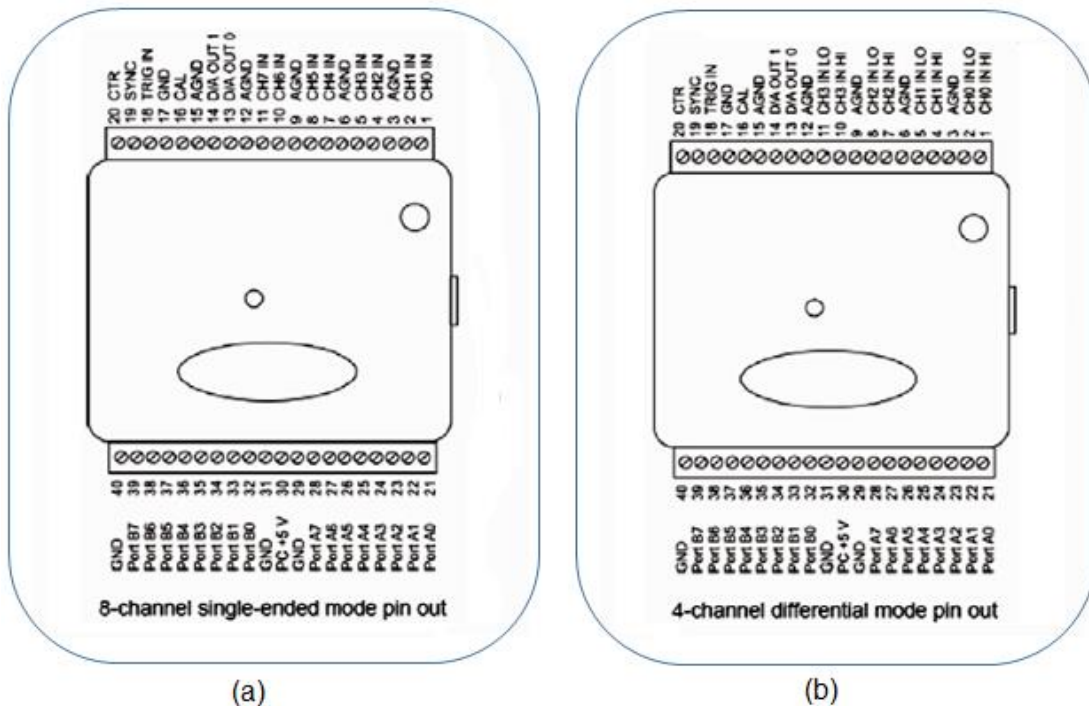
Adicionalmente se utilizó tres (3) amperímetros DC, tres (3) amperímetros AC, un (1) voltímetro DC, un (1) voltímetro AC y un (1) tacómetro digital a fin de monitorear las condiciones de funcionamiento del circuito. Por otro lado, no fue necesario realizar el condicionamiento de las señales debido a que se obtienen niveles de tensión que se pueden manejar directamente con la Tarjeta de adquisición de Datos (TAD).

### **Características del Software:**

Para la adquisición de datos se utilizó la tarjeta USB – 1208FS, la cual consta de 8 entradas de 11 bits en modo de operación común o 4 entradas de 12 bits en modo de operación diferencial. La tasa máxima de muestreo es de 50 kmuestras/s.

Adicionalmente, posee 2 canales para salidas analógicas; un terminal para sincronización externa; terminal de calibración; una conexión a tierra; conector USB que proporciona la alimentación de +5V y establece la comunicación entre la tarjeta y el computador; led que indica el estado de la comunicación; entre otros.

En la figura 3.10a y 3.10b se muestra el esquema de conexión de la tarjeta USB – 1208FS en modo común y modo diferencial respectivamente.

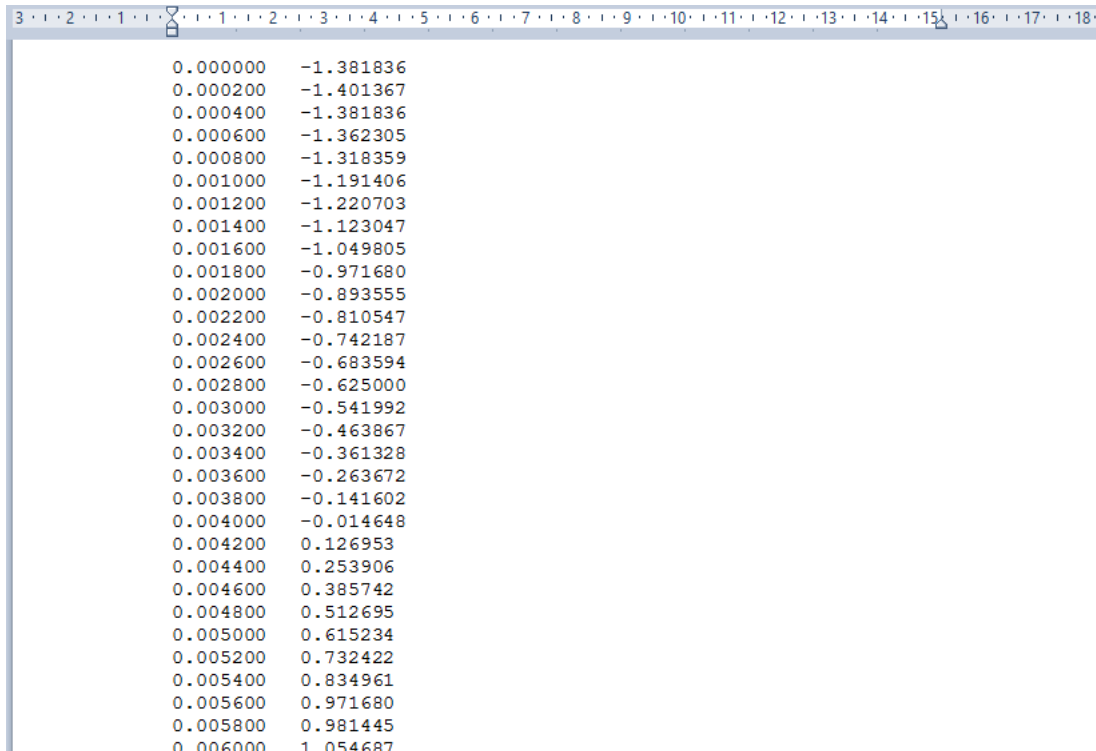


**Figura 3.10: Conexión de la tarjeta USB – 1208FS**

Por otro lado, se desarrolló un software en Labview 7.1, donde el diagrama de bloques diseñado para la adquisición de las señales, está compuesto por cinco (5) entradas analógicas: tres (3) tensiones de fase, una (1) tensión de una bobina acortada y una (1) tensión de la bobina de exploración.

Una vez adquiridas las tensiones de fase se obtienen las corrientes de línea y todas las señales adquiridas se guardan en archivos tipo texto (\*.txt), donde cada archivo contiene 1428 datos de la tensión y/o corriente correspondiente en el tiempo.

En la figura 3.11 se muestra parte del archivo de una de las tensiones de fase adquiridas.



**Figura 3.11: Archivo de datos de una de las señales adquiridas**

- Realizar las pruebas experimentales para construir la base de datos de corriente de la máquina bajo los diferentes niveles de falla de devanado.

A continuación se indica las características de las pruebas realizadas para la adquisición de los datos, para lo cual, considerando que se dispone de todos los terminales de las bobinas, se estableció dos tipos de conexiones al devanado de armadura: estrella (Y) y doble estrella (2Y).

Para cada una de estas conexiones se estableció tres niveles de carga, como se indica en la tabla 3.4.



**Tabla 3.4: Niveles de Carga**

<b>Conexión</b>					
<b>Estrella (Y)</b>			<b>Doble Estrella (2Y)</b>		
<b>Mínima</b>	<b>Media</b>	<b>Máxima</b>	<b>Mínima</b>	<b>Media</b>	<b>Máxima</b>
0,55 A	0,82 A	1,09 A	1,1 A	1,64 A	2,18 A

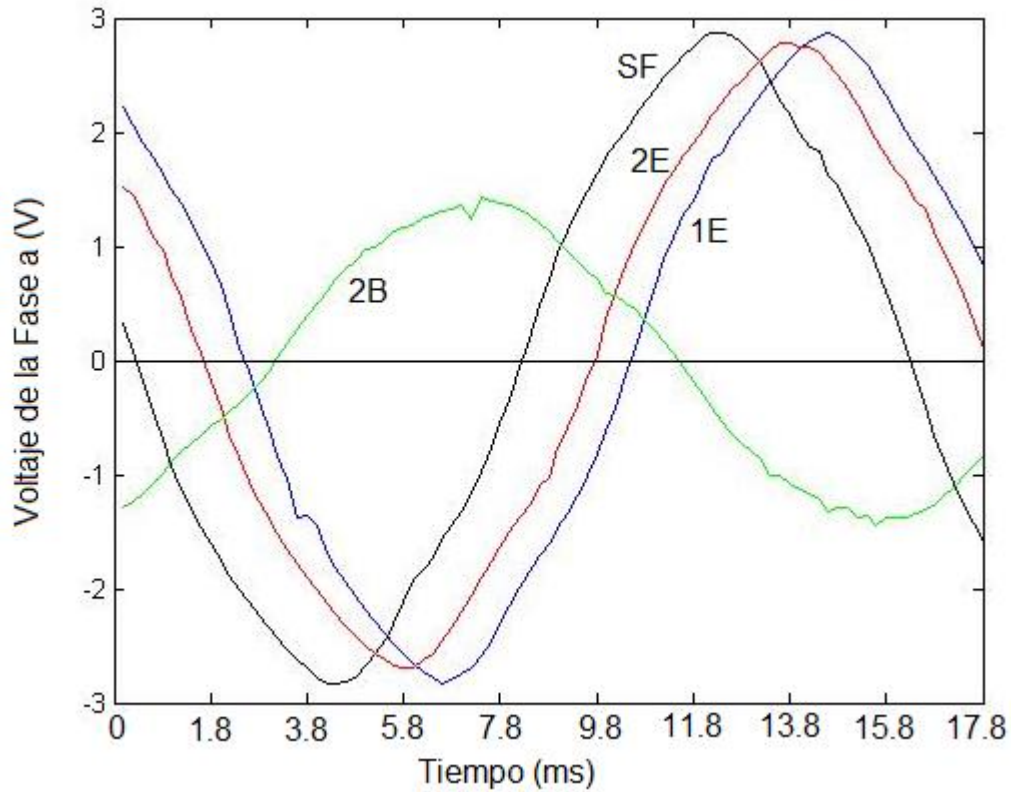
El proceso de adquisición se hizo con la máquina sin falla y, como se indicó anteriormente con tres niveles de falla: cortocircuito de una espira de una bobina (se conectó 5' con 5'cc), cortocircuito de dos espiras de la misma bobina (se conectó 5' con 5'cc y con 5cc) y cortocircuito de dos lados de bobina ubicados en la misma ranura (se conectó 5' con 5'cc, con 5cc y con 7). En este sentido, en la tabla 3.5 se muestra un resumen de las pruebas realizadas.

Para cada una de las pruebas con falla, en cada una de las condiciones de carga se obtuvieron 60 archivos de cada una de las señales correspondientes, es decir, corrientes de línea, tensión de bobina acortada (ba) y tensión de bobina diametral (bd). Por otro lado, para la condición sin falla, en cada uno de los niveles de carga, se obtuvo 180 archivos de cada una de las señales de corriente y tensión establecidas en las pruebas.

En la figura 3.12 se muestra la tensión de la fase a de la máquina en cada una de las condiciones de tipo de prueba: sin falla (SF), con cortocircuito de una espira (1E), con cortocircuito de dos espiras (2E) y con cortocircuito de dos lados de bobina (2B); todas estas señales con la condición de máxima carga en conexión Y.

**Tabla 3.5: Resumen de las pruebas realizadas**

Tipo de Prueba	Condición de Operación		Nivel de Carga (A)
	Tipo de Prueba	Sin Falla (SF)	Y
0,82			
1,09			
2Y			1,1
			1,64
			2,18
Cortocircuito de Una Espira (1E)		Y	0,55
			0,82
			1,09
		2Y	1,1
			1,64
			2,18
Cortocircuito de Dos Espiras (2E)		Y	0,55
			0,82
			1,09
		2Y	1,1
			1,64
			2,18
Cortocircuito de Dos Lados de Bobina (2B)	Y	0,55	
		0,82	
		1,09	
	2Y	1,1	
		1,64	
		2,18	

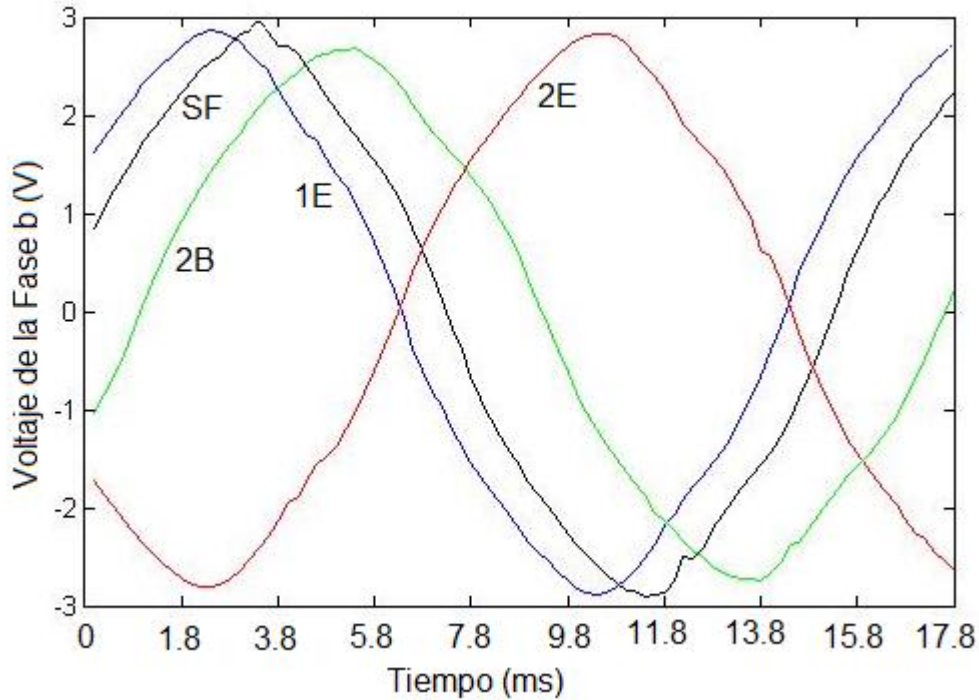


**Figura 3.12: Voltaje de la fase a para la condición de máxima carga en conexión Y.**

En la figura 3.12 se observa que la presencia de la falla de cortocircuito de una espira (1E) y de dos espiras (2E) no altera el valor máximo de la tensión, mientras que la falla de cortocircuito de dos lados de bobina (2B), al ser más significativa, produce una disminución de 50% en el valor máximo de la tensión de la fase a.

Por otro lado, en la figura 3.13 se muestra la tensión de la fase b de la máquina en cada una de las condiciones de tipo de prueba: sin falla (SF), con cortocircuito de una espira (1E), con cortocircuito de dos

espiras (2E) y con cortocircuito de dos lados de bobina (2B); todas estas señales con la condición de máxima carga en conexión Y.

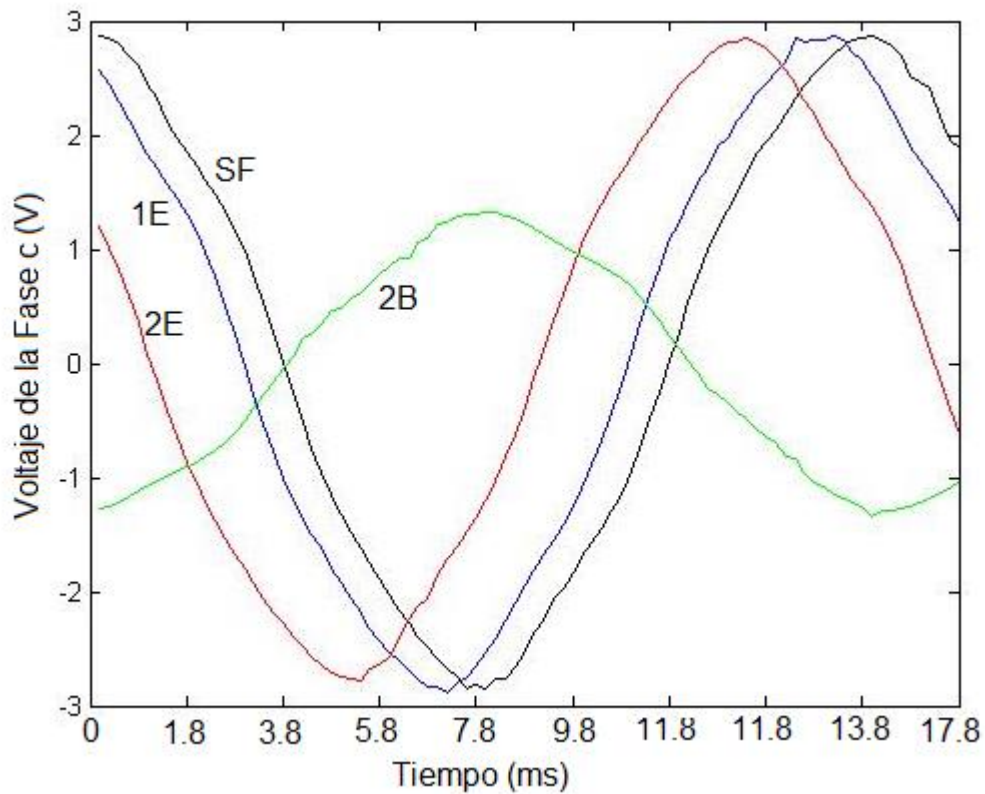


**Figura 3.13: Voltaje de la fase b para la condición de máxima carga en conexión Y.**

Como se observa en la figura 3.13, no existe una variación significativa en los valores máximos del voltaje de la fase b al ocurrir cada una de las fallas, esto debido a que la falla de cortocircuito de dos lados de bobina se realizó entre dos lados correspondientes uno a la fase a y el otro a la fase c.

Finalmente, en la figura 3.14 se muestran las tensiones de la fase c, igualmente para la condición de máxima carga y conexión en Y, donde se observa que para la condición SF, 1E y 2E no hay cambios significativos en los valores máximos, sin embargo, para la condición

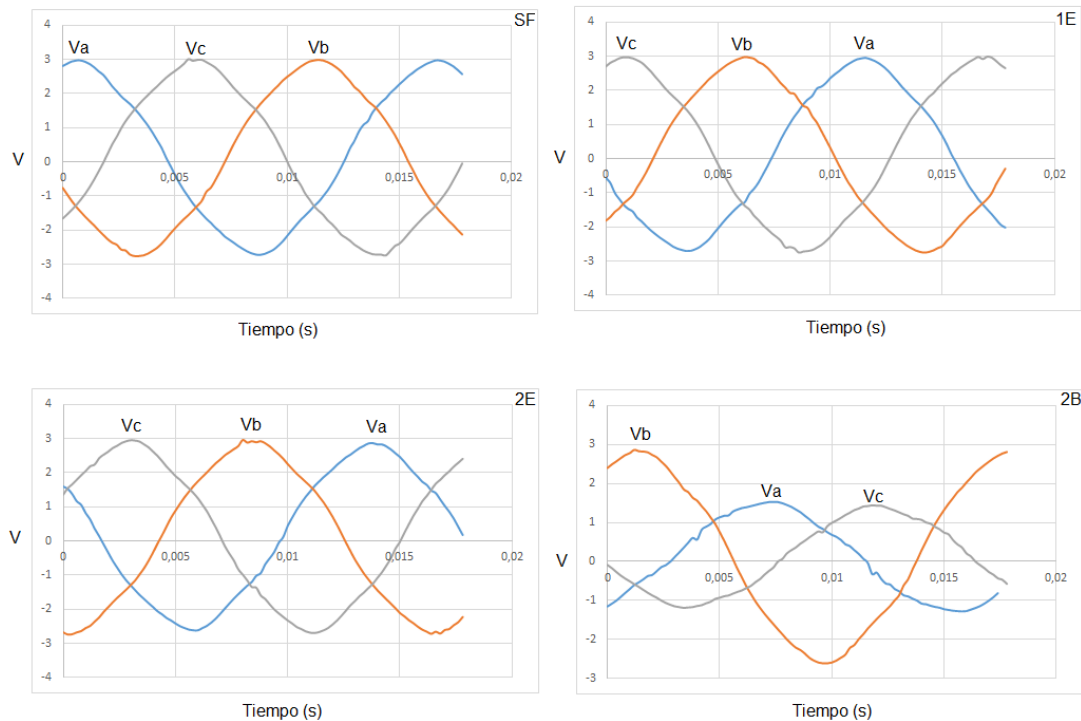
2B hay una disminución de 50% en el valor máximo de la tensión de la fase c.



**Figura 3.14: Voltaje de la fase c para la condición de máxima carga en conexión Y.**

En ese mismo orden de ideas, en la figura 3.15 se muestran las tensiones de fase en las condiciones: sin falla (SF), cortocircuito de una espira (1E), cortocircuito de dos espiras de una misma bobina (2E) y cortocircuito de dos lados de bobina (2B), para la condición de máxima carga y conexión en Y, en la cual se observa que las tensiones de fase se mantienen para la condición sin falla, cortocircuito de una espira y cortocircuito de dos espiras, es decir, que la presencia de estas fallas no producen cambios visibles en las tensiones

de fase. Mientras que, en la condición de cortocircuito de dos lados de bobina, la tensión de la fase b se mantiene mientras que las tensiones de la fase a y c disminuyen aproximadamente un 50%, lo que equivale a un índice de desbalance de 44.83% de acuerdo a la fórmula alternativa según IEEE 1159, donde el índice de desbalance equivale a la desviación máxima entre el voltaje de cada fase y el promedio de los voltajes de fase, dividida entre el promedio de los voltajes de fase, es decir, que la presencia de esta falla produce una variación evidente en el equilibrio de las tensiones de fase.



**Figura 3.15: Tensiones de fase para condición de máxima carga y conexión Y.**

Fase 2: Análisis de la Transformada de Wavelet para su aplicación en la detección de fallas en el devanado estático de máquinas sincrónicas.

- Realizar la revisión bibliográfica de la Transformada de Wavelet a fin de establecer las características de dicho método para la caracterización de las señales.

En relación a lo que establece Chui, Charles (1992) la transformada de wavelet de una función  $s(t)$  es la descomposición de  $s(t)$  en un conjunto de funciones  $\psi_{a,\tau}(t)$ , que forman una base y son llamadas las Wavelets.

En este sentido, se define la Transformada de Wavelet Continua (WTC, por sus siglas en inglés) de una función  $s(t)$  como la ecuación 3.1.

$$S(\tau, a) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right) dt \quad (3.1)$$

Donde, la función  $\psi$  se escala ( $a$ ) y desplaza ( $\tau$ ) en el eje del tiempo.

Dada una función  $g(t)$ , considere que el escalamiento de ( $g$ ) es ( $a$ ), por consiguiente:

$$g_a(t) = g(t/a)$$

y que la traslación de ( $g$ ) es ( $b$ ), entonces:

$$g^b = g(t - b)$$

si se aplica simultáneamente escalamiento y traslación, la función quedará:

$$g_a^b = g\left(\frac{t-b}{a}\right)$$

si la función  $f(t)$  cumple con las propiedades básicas:

1.  $\int_{-\infty}^{\infty} g(t) dt = 0$
2.  $\int_{-\infty}^{\infty} g^2(t) dt = 1$

se puede considerar  $g(t) = \psi(t)$  donde  $\psi(t)$  será la Wavelet madre, donde aplicándole el escalamiento y traslación simultáneos queda como:

$$\psi_a^b(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$$

y la Transformada de Wavelet Continua queda definida como la ecuación 3.2.

$$CWT(b, a) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \psi\left(\frac{1}{a}(t-b)\right) dt \quad (3.2)$$

En relación a lo que establece Jiménez C. y Jiménez, J. (2010), El parámetro de escalamiento ( $a$ ) permite comprimir o expandir la función wavelet  $\psi$ , y en la transformada es utilizada en el denominador ( $\psi(t/a)$ ). Este parámetro indica el grado de resolución con que se analiza la señal. Un valor alto de este factor ( $|a| > 1$ ) corresponde a una vista global de la señal (expansión de la wavelet) mientras que un factor de escala



bajo ( $|a| < 1$ ) corresponde a ver detalles de la señal (se comprime la wavelet). El factor de posición ( $b$ ) permite desplazar la función wavelet en el eje del tiempo ( $(1/a)(t - b)$ ), hasta el intervalo de tiempo que se encuentre definida la función  $f(t)$ .

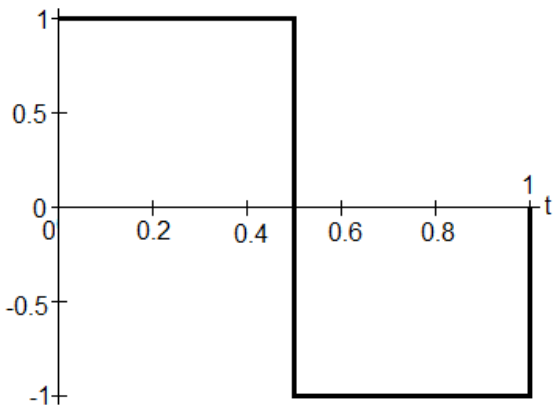
Existen varias wavelets madre agrupadas en familias de acuerdo a su utilidad. Entre las familias de wavelets madre se encuentra: Daubechies, que es un conjunto de wavelets ortonormales apropiadas para aplicarse en análisis de señales discretas; Coiflets y la Symmlet, que siendo similares a las Daubechies tienden a ser casi simétricas. Las biortonormales es una familia que presenta la propiedad de fase lineal, lo que es muy útil para la reconstrucción de imágenes.

Algunas wavelets están definidas por una función explícita como la Haar, dada por la ecuación 3.3, y cuya gráfica se muestra en la figura 3.16.

$$s(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < 0.5 \\ -1, & 0.5 < t < 1 \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (3.3)$$

La Morlet viene dada por la ecuación 3.4, y su representación se muestra en la figura 3.17.

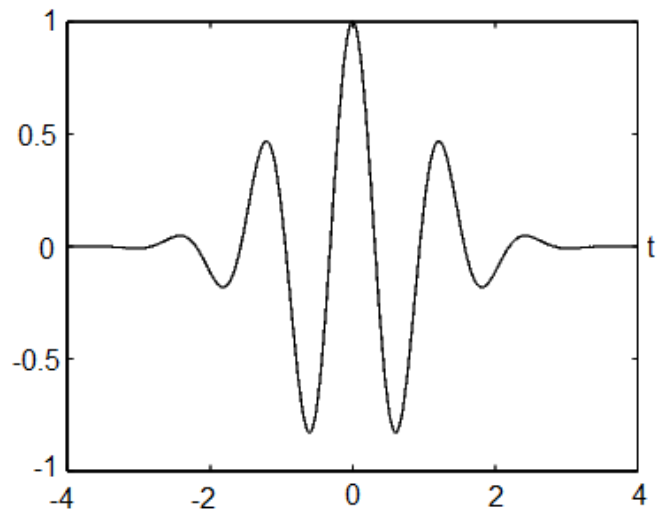
$$s(t) = \exp\left(\frac{-t^2}{2}\right) \cos(5t) \quad (3.4)$$



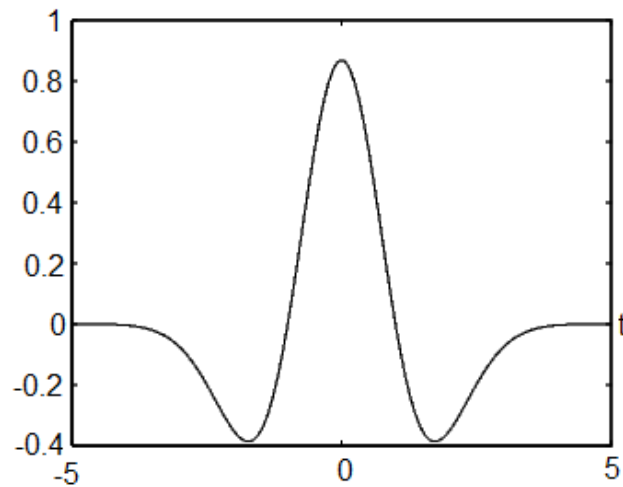
**Figura 3.16: Wavelet Haar**

La wavelet sombrero mexicano, dada por la ecuación 3.5 y mostrada en la figura 3.18.

$$s(t) = \frac{2}{\sqrt{3}\pi^{1/4}} \exp\left(\frac{-t^2}{2}\right) (1 - t^2) \quad (3.15)$$



**Figura 3.17: Wavelet Morlet**



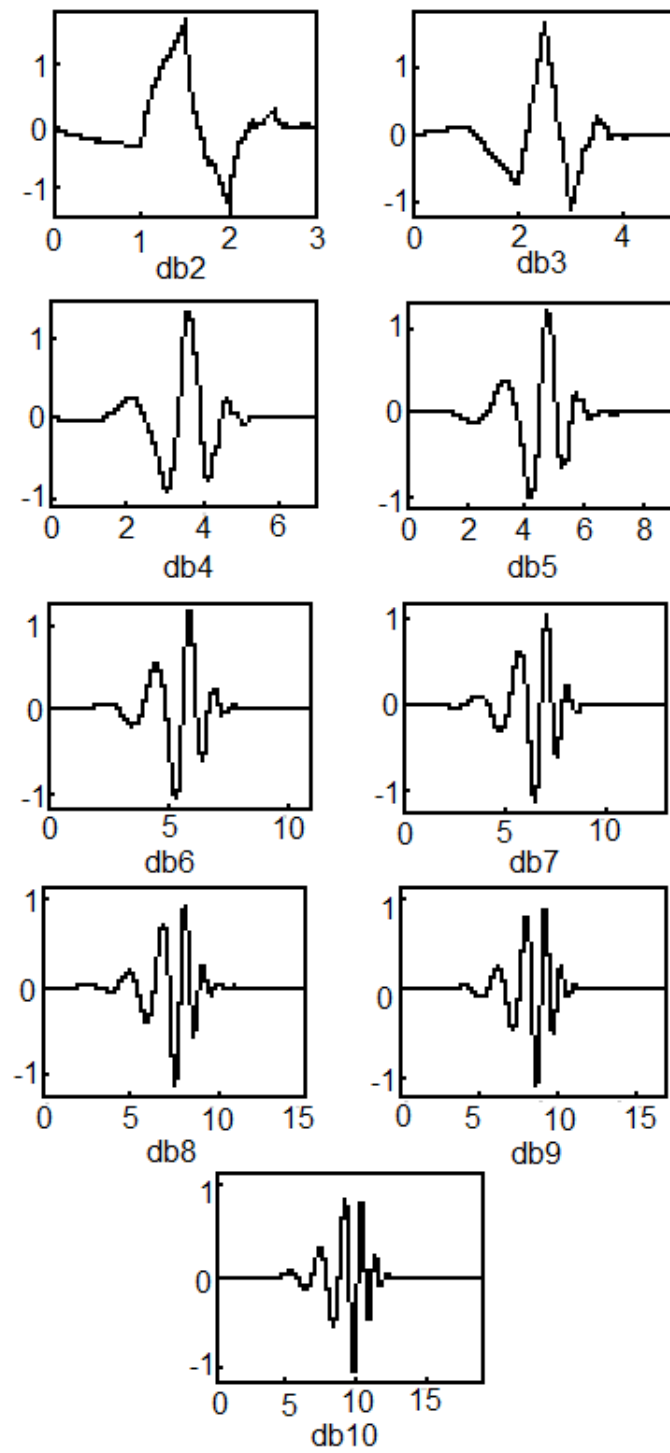
**Figura 3.18: Wavelet sombrero mexicano**

En la figura 3.19, 3.20 y 3.21 se muestran algunas de las funciones pertenecientes a la familia Daubechies, Coiflet y Symmlet respectivamente.

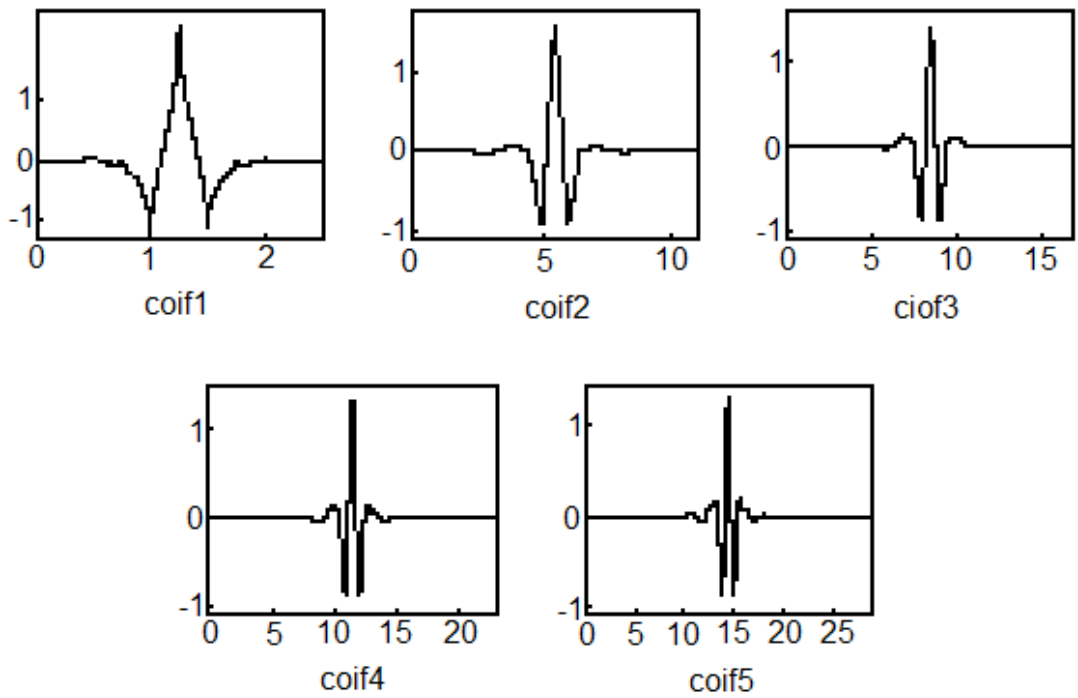
Generalmente la señal está constituida por valores discretos, lo que lleva a la discretización de la wavelet madre, quedando como la ecuación 3.16.

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{-\frac{j}{2}}\psi(2^{-j}t - k) \quad (3.16)$$

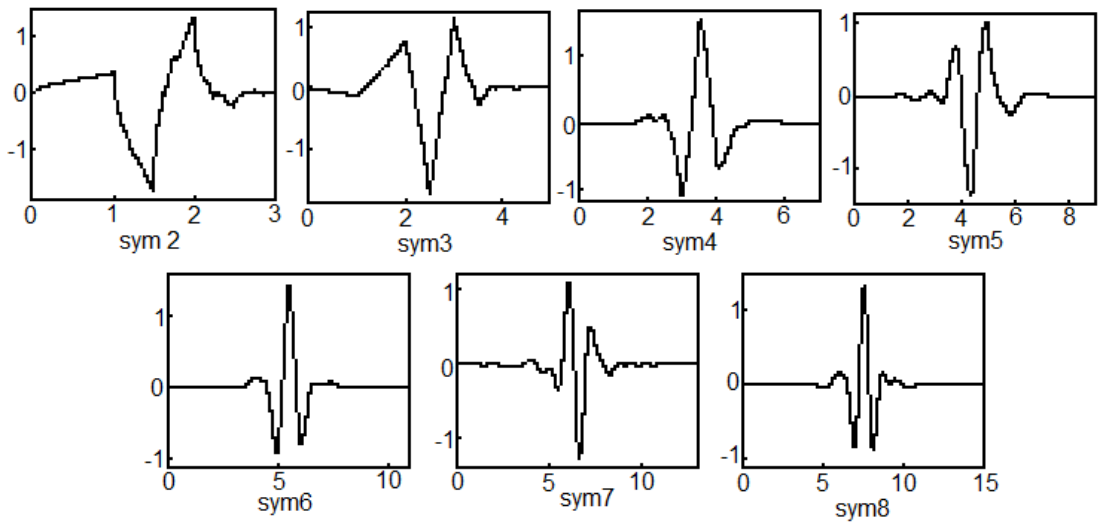
Al igual que la WTC, la Transformada de Wavelet Discreta (WTD, por sus siglas en inglés) viene dada por el producto interno entre la señal y la wavelet, dando como resultado una serie de coeficientes, como se indica en la ecuación 3.17.



**Figura 3.19: Wavelets Daubechies**



**Figura 3.20: Wavelets Coiflets**



**Figura 3.21: Wavelets Symmlet**

$$d_x(j, k) = \langle x, \psi_{j,k} \rangle \quad (3.17)$$

$j$  y  $k$  son números enteros que indican el factor de escala y traslación de la wavelet.

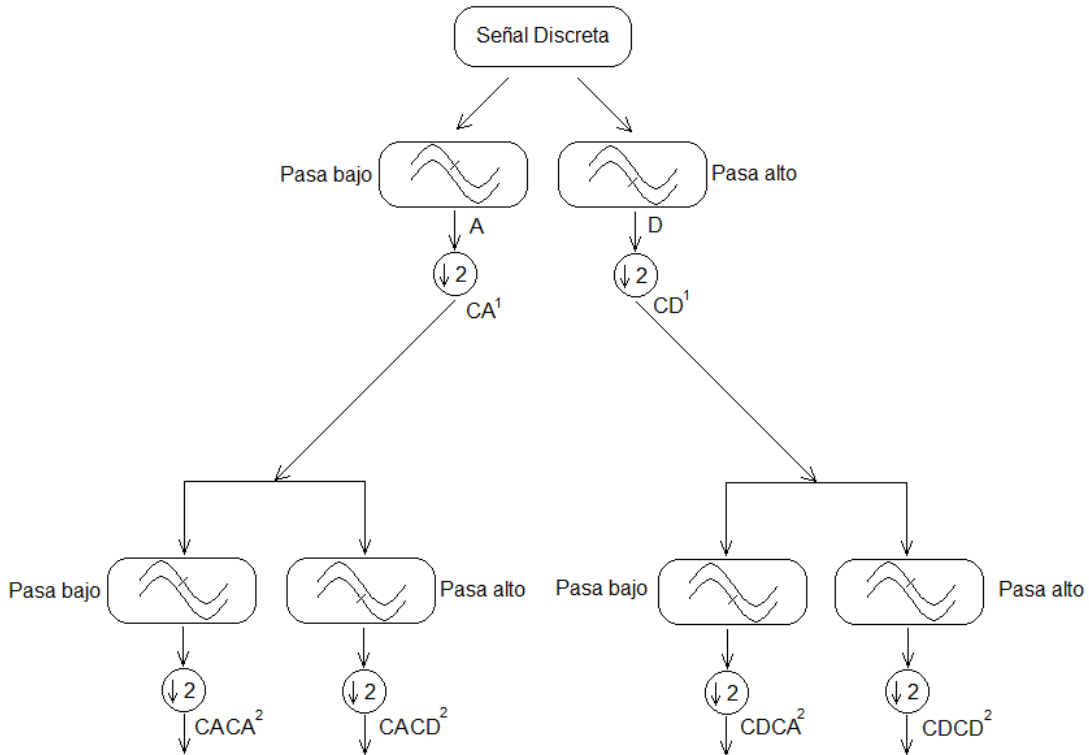
De acuerdo a lo que establece Jiménez, C. y Jiménez, J. (2010), el análisis de las señales con la transformada de wavelet es equivalente a un proceso de filtrado, donde se realiza una división de los coeficientes, obteniéndose los coeficientes de aproximación (A) y detalle (D).

La aproximación son los valores altos de la escala, correspondiente a las componentes de baja frecuencia de la señal, por lo tanto está asociada a la función de escalamiento que se determina con un filtro pasa bajo. Los detalles son los valores bajos de la escala, correspondientes a las componentes de alta frecuencia, y está asociada a la función wavelet que se determina como un filtro pasa alto.

Como las señales que se producen en el proceso de filtrado son de la misma longitud ( $n$ ) que la señal a analizar, se aplica un proceso de submuestreo (también llamado decimación) a la salida de cada uno de los filtros; produciendo los coeficientes de salida con una longitud menor ( $n/2$ ) (se toma cada dos muestras). El proceso de filtrado o descomposición se itera, para descomponer la señal en  $N$  niveles, cada una con una resolución más baja.

En la figura 3.22 se muestra un esquema del proceso de filtrado, donde la señal a procesar es pasada por los filtros paso bajo y pasa alto, los cuales son filtros complementarios y se producen dos señales, las

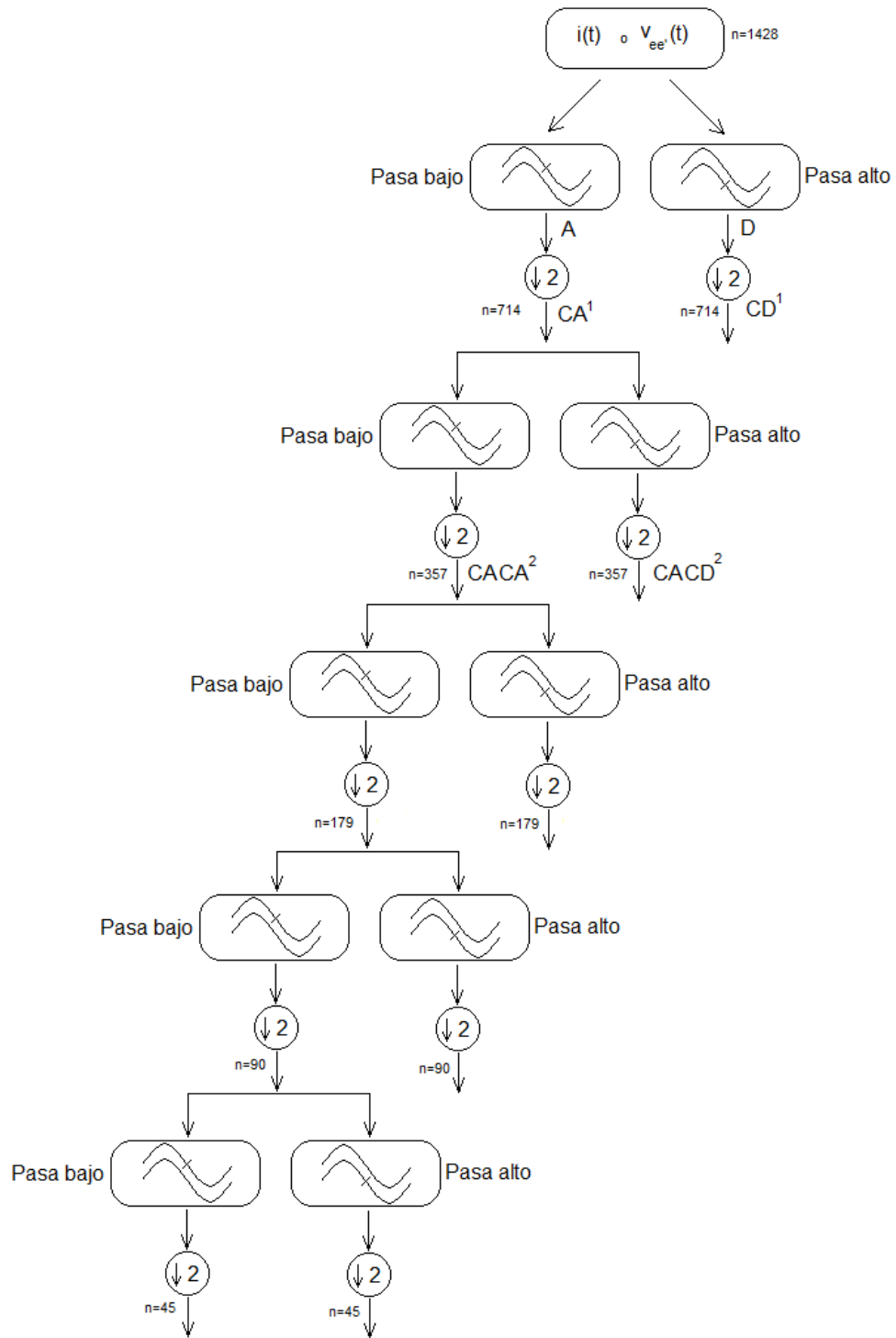
cuales, luego del proceso de decimación, dan los coeficientes de aproximación (CA) y de detalle (CD). Adicionalmente, se observa el proceso iterativo hasta el segundo nivel de descomposición.



**Figura 3.22: Segundo nivel de descomposición de la TWD**

- Analizar la aplicación de la Transformada de Wavelet para la clasificación de las condiciones de falla de la máquina.

Cada una de las señales temporales de corriente y tensión a analizar está constituida por 1428 datos, a la cual se le realiza la descomposición hasta el quinto nivel, utilizando la TWD, obteniendo los coeficientes de aproximación y detalle en cada uno de estos niveles, tal como se indica en la figura 3.23.



**Figura 3.23: Árbol de descomposición, con TWD, utilizado en la investigación**



Una vez obtenidos los coeficientes de aproximación y detalle se realiza su análisis para la detección de la falla en aislamiento de la máquina sincrónica.

Fase 3: Acondicionamiento de los datos de la corriente estática bajo distintos niveles de falla para su aplicación al algoritmo de detección de fallas.

- Aplicar la Transformada de Wavelet a las señales de tensión y corriente para la extracción de las características de dichas señales.

Para el procesamiento y análisis de los datos se desarrolló un software en Matlab, razón por la cual fue necesario realizar el ordenamiento de los datos.

Considerando los niveles de desbalance de tensiones que se obtuvo para la condición de falla de cortocircuito entre dos lados de bobina, se escogió realizar entre los análisis, el de las corrientes de cada una de las fases por separado.

En este sentido, para realizar el análisis se utilizó la totalidad de los archivos obtenidos (60 para las condiciones con falla y 180 para las condiciones sin falla) de cada una de las señales de corriente y voltaje, en cada una de las condiciones indicadas en la tabla 3.5, obteniéndose las matrices de datos que se indican en la tabla 3.6, donde cada una de estas matrices es de 1428x60 para las condiciones con falla y 1428x180 para la condición sin falla.

**Tabla 3.6: Matrices de Datos**

	Condición de Operación		Nivel de Carga (A)	Matriz de datos
Tipo de Prueba	Sin Falla (SF)	Y	0,55	YSFmin_a
				YSFmin_b
				YSFmin_c
				YSFmin_ba
				YSFmin_bd
			0,82	YSFmed_a
				YSFmed_b
				YSFmed_c
				YSFmed_ba
				YSFmed_bd
			1,09	YSFmax_a
				YSFmax_b
				YSFmax_c
				YSFmax_ba
				YSFmax_bd
		2Y	1,1	dosYSFmin_a
				dosYSFmin_b
				dosYSFmin_c
				dosYSFmin_ba
				dosYSFmin_bd
1,64	dosYSFmed_a			
	dosYSFmed_b			
	dosYSFmed_c			
	dosYSFmed_ba			
	dosYSFmed_bd			
2,18	dosYSFmax_a			
	dosYSFmax_b			
	dosYSFmax_c			
	dosYSFmax_ba			
	dosYSFmax_bd			

Continuación de la tabla 3.6

	Condición de Operación		Nivel de Carga (A)	Matriz de datos
Tipo de Prueba	Cortocircuito de Una Espira (1E)	Y	0,55	Y1Emin_a
				Y1Emin_b
				Y1Emin_c
				Y1Emin_ba
				Y1Emin_bd
			0,82	Y1Emed_a
				Y1Emed_b
				Y1Emed_c
				Y1Emed_ba
				Y1Emed_bd
			1,09	Y1Emax_a
				Y1Emax_b
				Y1Emax_c
				Y1Emax_ba
				Y1Emax_bd
		2Y	1,1	dosY1Emin_a
				dosY1Emin_b
				dosY1Emin_c
				dosY1Emin_ba
				dosY1Emin_bd
1,64	dosY1Emed_a			
	dosY1Emed_b			
	dosY1Emed_c			
	dosY1Emed_ba			
	dosY1Emed_bd			
2,18	dosY1Emax_a			
	dosY1Emax_b			
	dosY1Emax_c			
	dosY1Emax_ba			
	dosY1Emax_bd			

Continuación de la tabla 3.6

	Condición de Operación		Nivel de Carga (A)	Matriz de datos
Tipo de Prueba	Cortocircuito de Dos Espiras (2E)	Y	0,55	Y2Emin_a
				Y2Emin_b
				Y2Emin_c
				Y2Emin_ba
				Y2Emin_bd
			0,82	Y2Emed_a
				Y2Emed_b
				Y2Emed_c
				Y2Emed_ba
				Y2Emed_bd
			1,09	Y2Emax_a
				Y2Emax_b
				Y2Emax_c
				Y2Emax_ba
				Y2Emax_bd
		2Y	1,1	dosY2Emin_a
				dosY2Emin_b
				dosY2Emin_c
				dosY2Emin_ba
				dosY2Emin_bd
1,64	dosY2Emed_a			
	dosY2Emed_b			
	dosY2Emed_c			
	dosY2Emed_ba			
	dosY2Emed_bd			
2,18	dosY2Emax_a			
	dosY2Emax_b			
	dosY2Emax_c			
	dosY2Emax_ba			
	dosY2Emax_bd			

Continuación de la tabla 3.6

	Condición de Operación		Nivel de Carga (A)	Matriz de datos
Tipo de Prueba	Cortocircuito de Dos Lados de Bobina (2B)	Y	0,55	Y2Bmin_a
				Y2Bmin_b
				Y2Bmin_c
				Y2Bmin_ba
				Y2Bmin_bd
			0,82	Y2Bmed_a
				Y2Bmed_b
				Y2Bmed_c
				Y2Bmed_ba
				Y2Bmed_bd
			1,09	Y2Bmax_a
				Y2Bmax_b
		Y2Bmax_c		
		Y2Bmax_ba		
		Y2Bmax_bd		
		2Y	1,1	dosY2Bmin_a
				dosY2Bmin_b
				dosY2Bmin_c
				dosY2Bmin_ba
				dosY2Bmin_bd
1,64	dosY2Bmed_a			
	dosY2Bmed_b			
	dosY2Bmed_c			
2,18	dosY2Bmed_ba			
	dosY2Bmed_bd			
	dosY2Bmax_a			
	dosY2Bmax_b			
	dosY2Bmax_c			
dosY2Bmax_ba				
dosY2Bmax_bd				

A cada una de las matrices indicadas en la tabla 3.6 se le realizó la descomposición con la TWD hasta el quinto nivel, con “db 10” tal como se indica en la figura 3.23, obteniéndose los coeficientes de aproximación y detalle en cada uno de estos niveles.

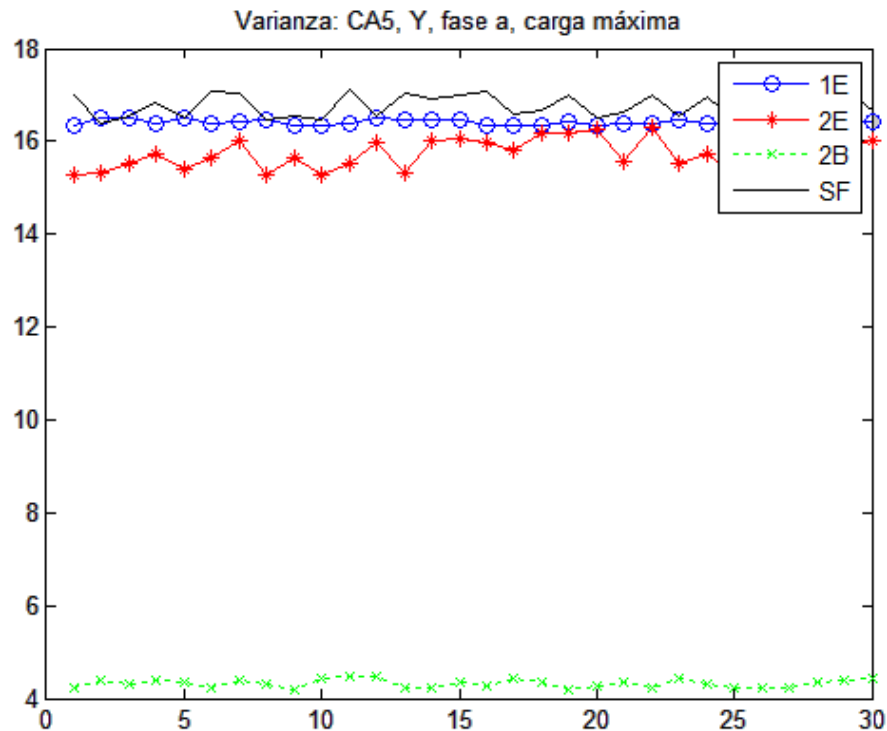
Una vez obtenidas las matrices de coeficientes en cada nivel de descomposición se realiza su análisis para la selección de los parámetros a utilizar para la detección de fallas en aislamiento.

- Realizar las pruebas para la selección de los parámetros a ser utilizados por el algoritmo para la detección de fallas en devanado de la máquina.

A partir de las matrices de coeficientes de aproximación y de detalle se realiza el análisis estadístico de dichos coeficientes, a fin de establecer las características para la detección de fallas en el aislamiento de la máquina.

En este sentido, se realizó el cálculo del valor medio, varianza, curtosis y asimetría de los coeficientes de aproximación y detalle.

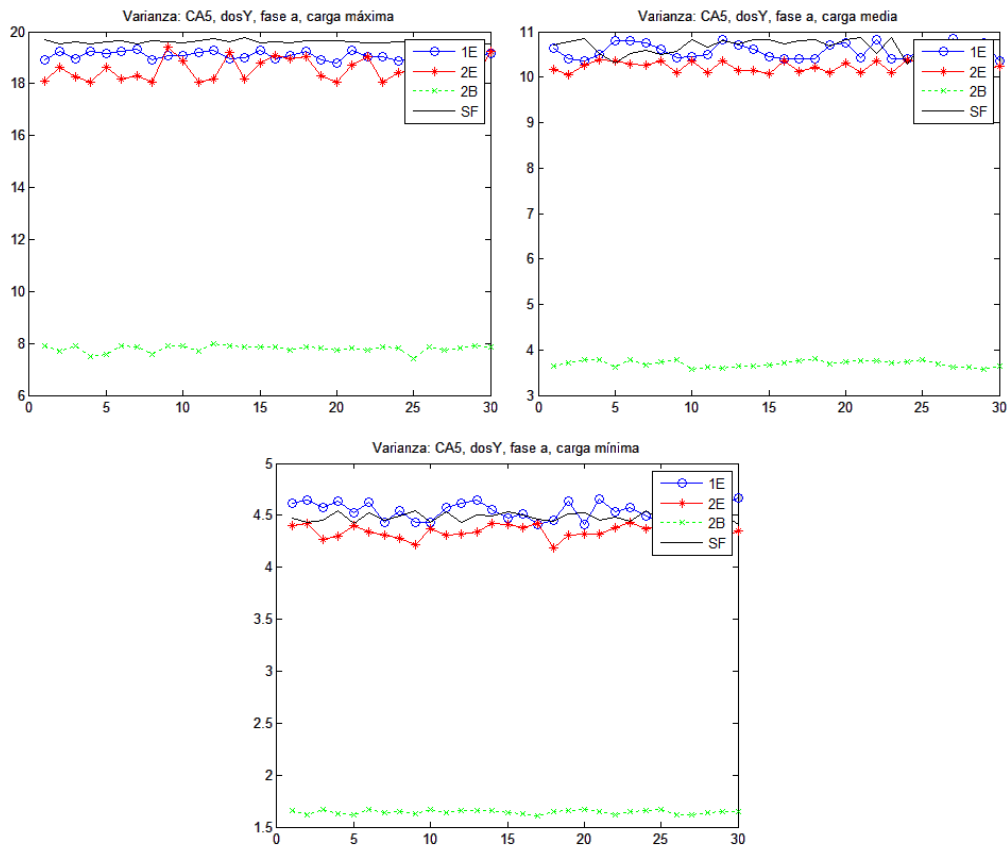
En la figura 3.24 se muestra la varianza para los coeficientes de aproximación en el nivel cinco de la corriente de la fase a, máxima carga, en conexión Y, para las cuatro condiciones de falla.



**Figura 3.24: Varianza de los coeficientes de aproximación en el nivel cinco, de la corriente de la fase a en conexión Y y máxima carga.**

Como se observa en la figura 3.24, a medida que se incrementa el nivel de falla la varianza de los coeficientes de aproximación en el nivel cinco se hace más pequeña, es decir, para cortocircuito de una espira la varianza tiene un valor de 16,5 pu aproximadamente, mientras que para cortocircuito de dos lados de bobina el valor es de 4,2 pu aproximadamente.

Por otro lado, en la figura 3.25 se muestra la varianza de los coeficientes de aproximación en el nivel cinco de la corriente de la fase a, conexión dos Y para los tres niveles de carga establecidos.



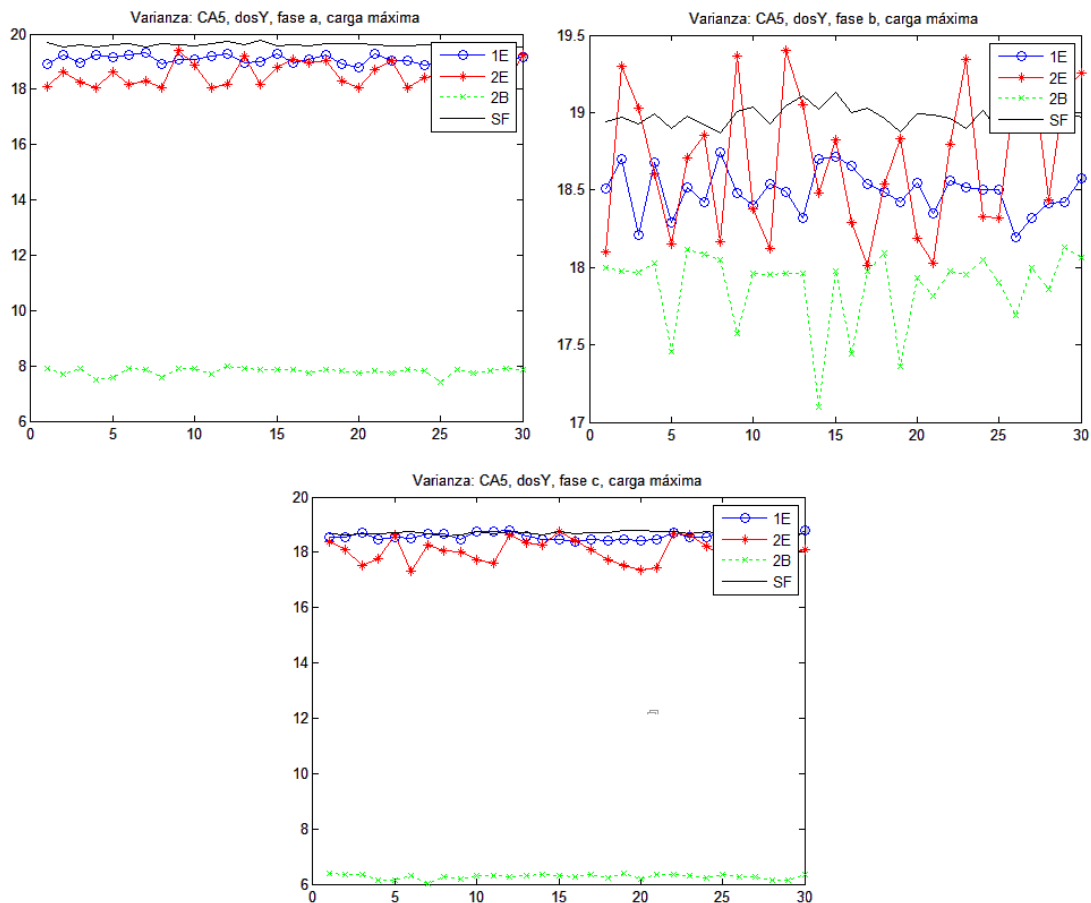
**Figura 3.25: Varianza de los coeficientes de aproximación en el nivel cinco, de la corriente de la fase a en conexión dos Y para carga máxima, media y mínima**

Como se observa en la figura 3.25, a medida que se incrementa el nivel de carga la varianza se incrementa, por lo que, para cortocircuito de dos lados de bobina (2B) y mínima carga se tiene una varianza de 1,7 pu aproximadamente, mientras que para la misma falla con carga media y máxima, la varianza es de aproximadamente 3,5 pu y 8 pu. Adicionalmente se tiene que mientras mayor es el índice de carga mayor es la diferencia de la varianza para los diferentes niveles de falla,



es decir, para el mínimo nivel de carga, la varianza entre la condición sin falla (SF) y cortocircuito de dos lados de bobina (2B) es de 2,8 pu aproximadamente, mientras que para máxima carga dicha diferencia es de 12pu aproximadamente.

En la figura 3.26 se muestra la varianza de los coeficientes de aproximación en el nivel cinco de la corriente de la fase a, b y c para conexión dos Y para máxima carga.



**Figura 3.26: Varianza de los coeficientes de aproximación en el nivel cinco, de la corriente de la fase a, b y c, en conexión dos Y para carga máxima**

Como se observa en la figura 3.26, la varianza de los coeficientes de aproximación en el nivel cinco de la corriente de la fase b están más solapados que los correspondientes a la corriente de la fase a y c, debido a que la falla de cortocircuito se ocasionó en bobinas correspondientes a la fase a y c.

Lo anteriormente expuesto indica que, a partir del análisis de la media, varianza, curtosis y asimetría de los coeficientes de aproximación y detalle calculados para cada una de las condiciones definidas en el trabajo de investigación se puede seleccionar los parámetros a utilizar para la detección de falla de aislamiento en la máquina síncrona.

Fase 4: Desarrollo del algoritmo para la detección de fallas en el devanado estático de la máquina síncrona utilizando la Transformada de Wavelet.

- Establecer las características y parámetros que requiere el algoritmo de detección de fallas de devanado.

Una vez obtenidos los coeficientes de aproximación y detalle, de cada una de las señales objeto de estudio, en cada uno de los niveles de descomposición, aplicando la TWD, se realiza el cálculo de la media, varianza, curtosis y asimetría de dichos coeficientes.

A partir de estos valores estadísticos, obtenidos de los coeficientes de aproximación y detalle en cada uno de los niveles de descomposición,

se obtienen las matrices de entrenamiento, validación y prueba a utilizar por el algoritmo de clasificación.

Considerando que en una parte del estudio, se desea realizar la clasificación de los datos en cuatro grupos a saber: sin falla (SF), cortocircuito de una espira de una misma bobina (1E), cortocircuito de dos espiras de una misma bobina (2E) y cortocircuito de dos lados de bobinas adyacentes ubicadas en la misma ranura (2B), se utilizará como algoritmo de clasificación una red neuronal de tipo “feedforward”.

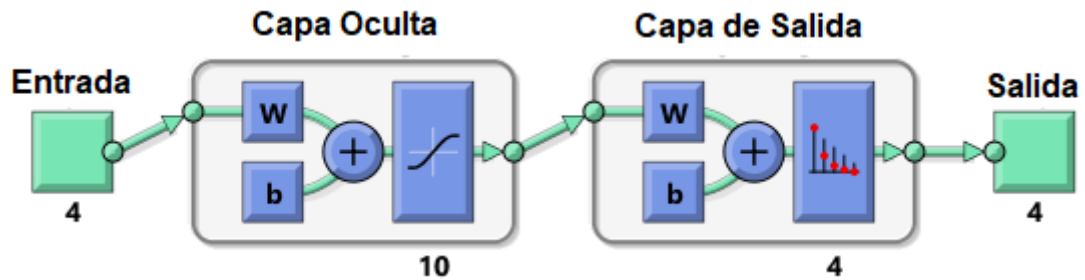
De acuerdo a Gutiérrez, H. (2013) esta red neuronal consiste de una serie de capas, donde la primera capa tiene una conexión con la entrada de la red y cada capa subsiguiente tiene una conexión con la capa anterior. Por último la capa final produce la salida de la red.

Este tipo de red se puede utilizar para cualquier tipo de entradas o salidas asignadas y con el ajuste de la cantidad de neuronas en las capas ocultas, se puede resolver cualquier tipo de problema de clasificación de datos.

Considerando el propósito del presente trabajo de investigación, el cual se centra en establecer una estrategia para la detección de fallas en aislamiento de la máquina sincrónica, se considerarán casos de estudio con diferentes datos de entrada y diferentes salidas; y para cada caso se obtendrá una red neuronal diferente.

Cabe destacar que la estructura base de cada red neuronal es similar y se muestra en la figura 3.27. Donde las redes son de tipo “feedforward”

con una capa oculta de diez (10) neuronas y una capa de salida de cuatro (04) neuronas.



**Figura 3.27: Estructura de la Red Neuronal**  
**Fuente: Matlab 2014**

Considerando la naturaleza de los datos obtenidos, el análisis de los mismos se realizará en dos etapas.

La primera etapa consiste en el análisis de las señales a fin de establecer un criterio para la clasificación de la condición de la máquina entre dos grupos, sin falla (SF) y con falla (CF) y la segunda etapa consiste en el análisis de la condición de la máquina entre cuatro grupos posibles, sin falla (SF), con cortocircuito de una espira (1E), con cortocircuito de dos espiras (2E) y con cortocircuito de dos lados de bobina ubicados en una misma ranura (2B).

En cada uno de los casos objeto de estudio se utilizó la interfaz de aplicación de Matlab con el comando “nnstart” para reconocimiento de patrones “nprtool”, donde se establece las características de las matrices para entrenamiento, validación y prueba en 70%, 15% y 15% respectivamente además de la cantidad de capas y de las neuronas en

la capa oculta tal como se indicó anteriormente. Finalmente se realiza el entrenamiento y se obtiene, entre otras cosas, la matriz de confusión.

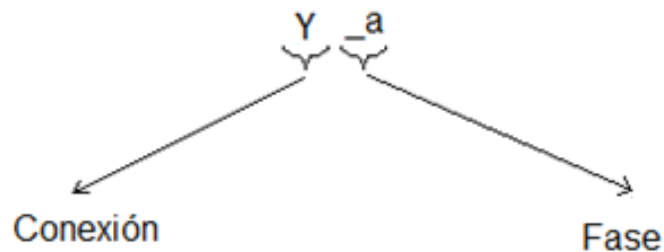
### **Primera etapa:**

Esta etapa consta de 34 casos de estudio divididos en tres grupos, tal como se describe a continuación.

**Grupo 1 (caso 1 al 10):** para cada una de las conexiones (Y o dosY) se estudiará cada señal de corriente (fase a, fase b o fase c) y de voltaje (bobina acortada o bobina diametral) por separado, considerando todos los niveles de carga.

Como en cada nivel de carga para la condición sin falla (SF) se dispone de 180 archivos se tendrá un total de 540 archivos para esta condición; por otro lado, para la condición con cortocircuito de una espira (1E) se dispone de 60 archivos para cada nivel de carga, para la condición de cortocircuito de dos espiras (2E) igualmente se dispone de 60 archivos en cada nivel de carga y para la condición de cortocircuito de dos lados de bobina ubicados en una misma ranura se dispone de 60 archivos con cada nivel de carga, se tiene que para la condición con falla (CF) se dispone de un total de 540 archivos; por lo que se obtienen las dimensiones de las matrices mostradas en la tabla 3.7.

En este sentido se obtienen las matrices de datos que se indican en la tabla 3.7, donde la nomenclatura asociada a los nombres de las matrices se describe en la figura 3.28.



**Figura 3.28: Nomenclatura asociada a los nombres de las matrices de la tabla 3.7.**

**Grupo 2 (caso 11 al 16):** para cada una de las conexiones (Y o dosY) se estudiará, por un lado las tres corrientes simultáneamente (fase a, fase b y fase c), por otro lado los voltajes simultáneamente (bobina acortada y bobina diametral) y por último las señales de corriente y voltaje simultáneamente (fase a, fase b, fase c, bobina acortada y bobina diametral), obteniéndose las matrices de datos de la tabla 3.8.

**Grupo 3 (caso 17 al 34):** para determinar si el nivel de carga influye en la capacidad de discriminación de la falla se considerará, igual que en el grupo 2, por un lado las tres corrientes simultáneamente (fase a, fase b y fase c), por otro lado los voltajes simultáneamente (bobina acortada y bobina diametral) y por último las señales de corriente y voltaje simultáneamente (fase a, fase b, fase c, bobina acortada y bobina diametral), pero para cada nivel de carga (máxima, media y mínima),

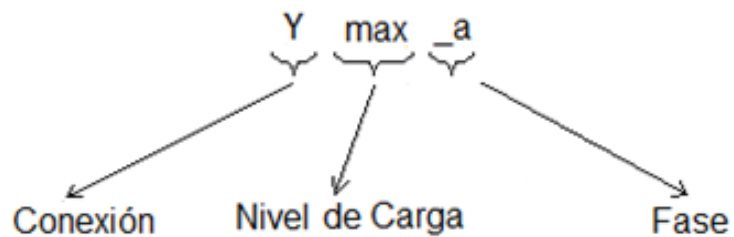
obteniéndose las matrices de datos de la tabla 3.9, siguiendo la nomenclatura indicada en la figura 3.29.

**Tabla 3.7: Dimensiones de las matrices de entrenamiento y prueba para los casos del 1 al 10**

Caso	Nombre	Dimensión	Caso	Nombre	Dimensión
1	Y_a	24x1080	6	dosY_a	24x1080
2	Y_b	24x1080	7	dosY_b	24x1080
3	Y_c	24x1080	8	dosY_c	24x1080
4	Y_ba	24x1080	9	dosY_ba	24x1080
5	Y_bd	24x1080	10	dosY_bd	24x1080

**Tabla 3.8: Dimensiones de las matrices de entrenamiento y prueba para los casos del 11 al 16**

Caso	Nombre	Dimensión	Caso	Nombre	Dimensión
11	Y_abc	72x1080	14	dosY_abc	72x1080
12	Y_ba_bd	48x1080	15	dosY_ba_bd	48x1080
13	Y_abc_ba_bd	120x1080	16	dosY_abc_ba_bd	120x1080



**Figura 3.29: Nomenclatura asociada a los nombres de las matrices de la tabla 3.9**

**Tabla 3.9: Dimensiones de las matrices de entrenamiento y prueba para los casos del 17 al 34**

Caso	Nombre	Dimensión	Caso	Nombre	Dimensión
17	Ymax_abc	72x360	26	dosYmax_abc	72x360
18	Ymed_abc	72x360	27	dosYmed_abc	72x360
19	Ymin_abc	72x360	28	dosYmin_abc	72x360
20	Ymax_ba_bd	48x360	29	dosYmax_ba_bd	48x360
21	Ymed_ba_bd	48x360	30	dosYmed_ba_bd	48x360
22	Ymin_ba_bd	48x360	31	dosYmin_ba_bd	48x360
23	Ymax_abc_ba_bd	120x360	32	dosYmax_abc_ba_bd	120x360
24	Ymed_abc_ba_bd	120x360	33	dosYmed_abc_ba_bd	120x360
25	Ymin_abc_ba_bd	120x360	34	dosYmin_abc_ba_bd	120x360

Para realizar el entrenamiento de las redes neuronales desde el caso 01 al 16 se establece la matriz de salida de dimensión 2x1080, mostrada en la figura 3.30, donde; los elementos del 1 al 540 son el vector columna [1 0], correspondientes a la condición sin falla (SF); y del 541 al 1080 son el vector columna [0 1], correspondientes a la condición con falla.

$$\begin{array}{c}
 \underbrace{1 \cdots 540} \quad \underbrace{541 \cdots 1080} \\
 \text{Salidas} = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix}
 \end{array}$$

**Figura 3.30: Matriz de Salidas de la Red Neuronal de los casos 01 al 16**

Por tal motivo, las matrices para entrenamiento, validación y prueba de las redes neuronales tienen la misma cantidad de columnas que el vector de salidas, tal como se muestra en las tablas 3.7 y 3.8,



arreglados los datos en el mismo orden, es decir, sin falla (SF) de 1 a 540 y con falla (CF) del 541 al 1080.

Por otro lado, para realizar el entrenamiento de las redes neuronales desde el caso 17 al 34 se establece la matriz de salida de dimensión 2x360, mostrada en la figura 3.31, donde; los elementos del 1 al 180 son el vector columna [1 0], correspondientes a la condición sin falla (SF); y del 181 al 360 son el vector columna [0 1], correspondientes a la condición con falla.

$$\text{Salidas} = \begin{matrix} \underbrace{1 \cdots 180} & \underbrace{541 \cdots 360} \\ \begin{bmatrix} 1 & \cdots & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

**Figura 3.31: Matriz de Salidas de la Red Neuronal de los casos 17 al 34**

Por tal motivo, las matrices para entrenamiento, validación y prueba de estas redes neuronales tienen la misma cantidad de columnas que el vector de salidas, tal como se muestra en las tabla 3.9, arreglados los datos en el mismo orden, es decir, sin falla (SF) de 1 a 180 y con falla (CF) del 541 al 360.

**Segunda etapa:**

Esta etapa consta de 16 casos de estudio, numerados del 35 al 50, divididos en dos grupos, tal como se describe a continuación.

**Grupo 1 (caso 35 al 44):** al igual que para el grupo 1 de la primera etapa se trabajará con cada una de las conexiones (Y o dosY), se estudiará cada señal de corriente (fase a, fase b o fase c) y de voltaje (bobina acortada o bobina diametral) por separado y se consideran todos los niveles de carga; pero como se desea realizar la discriminación entre cuatro estados (SF, 1E, 2E y 2B) las dimensiones de las matrices cambian.

En este caso, en cada nivel de carga para la condición sin falla (SF) se dispone de 60 archivos, por lo que se tendrá un total de 180 archivos para esta condición; por otro lado, para la condición con cortocircuito de una espira (1E) se dispone de 60 archivos para cada nivel de carga, para la condición de cortocircuito de dos espiras (2E) igualmente se dispone de 60 archivos en cada nivel de carga y para la condición de cortocircuito de dos lados de bobina ubicados en una misma ranura se dispone de 60 archivos con cada nivel de carga, lo que equivale a la dimensión de matrices que se indican en la tabla 3.10.

**Tabla 3.10: Dimensiones de las matrices de entrenamiento y prueba para los casos del 35 al 44**

Caso	Nombre	Dimensión	Caso	Nombre	Dimensión
35	Y_a	24x720	40	dosY_a	24x720
36	Y_b	24x720	41	dosY_b	24x720
37	Y_c	24x720	42	dosY_c	24x720
38	Y_ba	24x720	43	dosY_ba	24x720
39	Y_bd	24x720	44	dosY_bd	24x720

Para esta etapa la matriz de salida es de 4x720, como se muestra en la figura 3.32, donde; los elementos del 1 al 180 son el vector columna [1 0 0 0], correspondientes a la condición sin falla (SF), del 181 al 360 son el vector columna [0 1 0 0] correspondiente a la condición de cortocircuito de una espira (1E), del 361 al 540 son el vector columna [0 0 1 0] correspondiente a la condición de cortocircuito de dos espiras (2E) y del 541 al 720 son el vector columna [0 0 0 1], correspondientes a la condición de cortocircuito de dos lados de bobina ubicados en una misma ranura (2B).

$$\text{Salidas} = \begin{matrix} & \underbrace{1 \dots 180} & \underbrace{181 \dots 360} & \underbrace{361 \dots 540} & \underbrace{541 \dots 720} & \\ \begin{bmatrix} 1 & & & & & & & & & \\ 0 & & & & & & & & & \\ 0 & & & & & & & & & \\ 0 & & & & & & & & & \end{bmatrix} \end{matrix}$$

**Figura 3.32: Matriz de Salidas de la Red Neuronal de los casos 35 al 50**

Considerando la matriz de salida de la figura 3.32, las matrices de datos indicadas en la tabla 3.10 y 3.11 tendrán los datos ordenados de la misma forma, es decir, de la columna 01 a la columna 180 correspondientes a la condición sin falla (SF), de la columna 181 a la columna 360 correspondientes a cortocircuito de una espira (1E), de la columna 361 a la columna 540 correspondientes a cortocircuito de dos espiras (2E) y de la columna 541 a y de la columna 720 los datos correspondientes a la condición de cortocircuito de dos lados de bobina ubicados en una misma ranura (2B).

**Grupo 2 (caso 45 al 50):** para cada una de las conexiones (Y o dosY) se estudiará, por un lado las tres corrientes simultáneamente (fase a, fase b y fase c), por otro lado los voltajes simultáneamente (bobina acortada y bobina diametral) y por último las señales de corriente y voltaje simultáneamente (fase a, fase b, fase c, bobina acortada y bobina diametral), obteniéndose las matrices de datos de la tabla 3.11.

**Tabla 3.11: Dimensiones de las matrices de entrenamiento y prueba para los casos del 45 al 50**

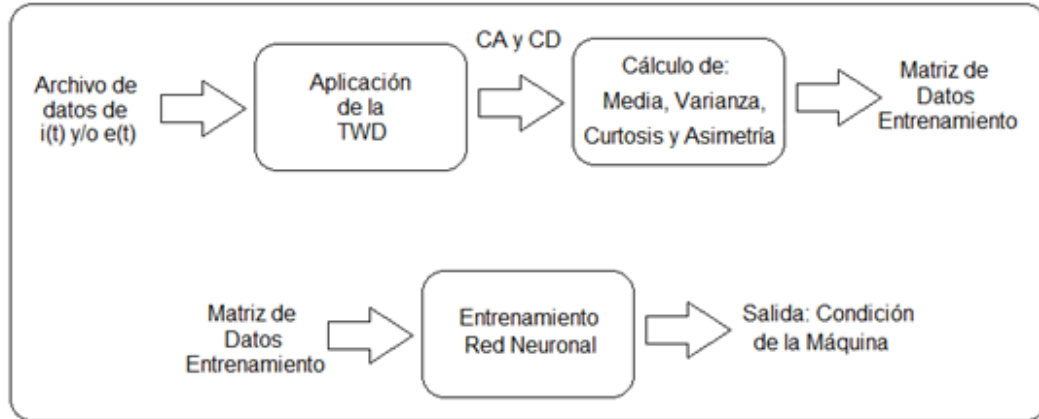
Caso	Nombre	Dimensión	Caso	Nombre	Dimensión
45	Y_abc	72x720	48	dosY_abc	72x720
46	Y_ba_bd	48x720	49	dosY_ba_bd	48x720
47	Y_abc_ba_bd	120x720	50	dosY_abc_ba_bd	120x720

Como se indicó anteriormente, para cada uno de los 50 casos considerados se obtuvo una red neuronal, a fin de establecer en cuál de estas condiciones se discrimina el estado de la máquina.

- Implementar el algoritmo de detección de fallas en devanado con los datos previamente seleccionados.

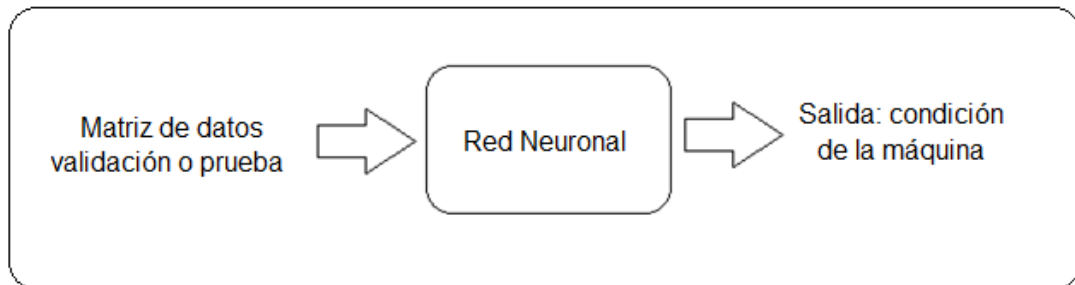
En la figura 3.33a y 3.33b se muestra el algoritmo para el entrenamiento y prueba de la Red Neuronal. A partir de este algoritmo se hará la selección de los parámetros con los cuales se pueda realizar una mejor clasificación de la condición de la máquina.

Algoritmo para el entrenamiento de la RED Neuronal



(a): Algoritmo para el entrenamiento de la Red Neuronal

Algoritmo para validación o prueba de la Red Neuronal



(b): Algoritmo para la validación o prueba de la Red Neuronal.

**Figura 3.33.: Algoritmo para entrenamiento, validación y prueba de la Red Neuronal**

Una vez seleccionados dichos parámetros se verificará, a partir del algoritmo para la validación y prueba de la Red Neuronal, el porcentaje de aciertos obtenidos durante el proceso de clasificación de la condición de la máquina.

- Verificar la clasificación de fallas de devanado de la máquina sincrónica a partir del algoritmo desarrollado, con datos para la validación y prueba.

Una vez obtenidas las redes neuronales de cada uno de los 50 casos descritos anteriormente, se realiza la comparación de estas, a fin de seleccionar aquellos donde se obtiene una mejor discriminación en relación a la condición de falla de la máquina sincrónica.

Esta selección se realiza de acuerdo al mayor porcentaje de aciertos obtenidos tanto para el entrenamiento como para validación y prueba. Para ello se utiliza la interfaz de aplicación de Matlab con el comando “nnstart” tal como se indicó anteriormente y se analiza la matriz de confusión obtenida en cada caso.

A continuación se muestran los resultados obtenidos y se realiza el análisis correspondiente para establecer las conclusiones pertinentes.

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS**

En el presente capítulo se desarrolla y analiza los resultados obtenidos con la implementación del algoritmo, para establecer los parámetros y características con los cuales se puede realizar la discriminación sobre la condición de falla de la máquina.

El análisis de los datos se realizará en orden secuencial de acuerdo a las dos etapas descritas en el Capítulo III de esta investigación.

#### **4.1. Generalidades**

Para el análisis de los datos se utilizó el desempeño de las redes neuronales descritas en el Capítulo III. Para el entrenamiento validación y prueba de dichas redes neuronales se utilizó el comando “nnstart” de Matlab y se fijó como parámetros para reconocimiento de patrones redes neuronales de 10 neuronas en la capa oculta y como proporciones para las matrices de entrenamiento, validación y prueba 70%, 15% y 15% respectivamente.

A continuación se detalla los resultados obtenidos en cada una de las etapas establecidas en las fases metodológicas.

## **4.2. Primera etapa: discriminación de la condición de la máquina en dos estados posibles, sin falla (SF) y con falla (CF)**

Como se indicó anteriormente esta etapa consta de 44 casos divididos en dos grupos y a continuación se detallan los resultados obtenidos para cada uno de estos grupos.

- **Grupo 1 (caso 1 al 10)**

La finalidad del estudio de los casos 1 al 10 es establecer si es posible la discriminación en relación a si la máquina sincrónica presenta o no falla de aislamiento, a partir de los coeficientes de aproximación y detalle hasta el quinto nivel de descomposición, obtenidos aplicando la Transformada de Wavelet Discreta a las señales de corriente en las tres fases y de tensión de bobina acorta y de bobina diametral.

Como se indicó anteriormente, en este grupo se estudian los casos del 01 al 10, considerando la conexión de la máquina, las señales de corriente en cada fase y tensión de bobina acortada y tensión de bobina diametral por separado.

En este sentido, en la figura 4.1 se muestra la matriz de confusión obtenida en Matlab, para entrenamiento, validación, prueba y total, del caso 1, que de acuerdo a la tabla 3.7 se considera solamente la corriente de la fase a en conexión estrella (Y<sub>a</sub>).

Como se observa en la figura 4.1, de los 1080 archivos totales con los que cuenta la matriz, indicada en la tabla 3.7, se seleccionó de forma aleatoria 756 para entrenamiento, 162 para validación y 162 para prueba; obteniéndose que



para el entrenamiento son 378 casos sin falla y 378 casos con falla, para la validación 82 casos sin falla y 80 casos con falla y para la prueba 80 casos sin falla y 82 casos con falla.

En este sentido durante el entrenamiento, de los 378 casos sin falla fueron clasificados correctamente 376 lo que equivale a un porcentaje de 99,5 % de verdaderos positivos y 0,5% de falsos negativos. Por otro lado de los 378 casos con falla 2 fueron clasificados como sin falla, lo que equivale a un 0,5% de falsos positivos y 376 fueron clasificados como con falla lo que equivale a un 99,5% de verdaderos negativos. En total se tiene que, durante el entrenamiento, 752 de los casos fueron clasificados correctamente y 4 fueron clasificados en forma incorrecta lo que equivale a un porcentaje de aciertos de 99,5% y 0,5% de porcentaje de error.

Con un análisis similar en la validación y prueba se tiene que durante la validación hubo 94,4% de clasificaciones correctas y 5,6% de error, mientras que en la prueba hubo 94,4% de clasificaciones correctas y 5,6% de error.

En base a lo anterior se obtiene un total de 98,0% de clasificaciones correctas y 2,0% de error para la red neuronal de la figura 4.1

En resumen, para los casos del grupo 1, se muestra en la tabla 4.1 el porcentaje de aciertos y error para las redes neuronales correspondientes y en la figura 4.2 se muestra dicho porcentaje de aciertos en relación a la señal objeto de estudio, tanto para conexión Y como para conexión dosY. Como se observa tanto en la tabla 4.1 como en la figura 4.2, el porcentaje de aciertos para cada caso es superior a 90% por lo que dichas redes neuronales discriminan satisfactoriamente en relación a si la máquina sincrónica tiene falla en aislamiento o no, y el mayor porcentaje tanto para conexión Y como para

dosY es cuando se considera la corriente de la fase a y el menor porcentaje para la corriente de la fase b.

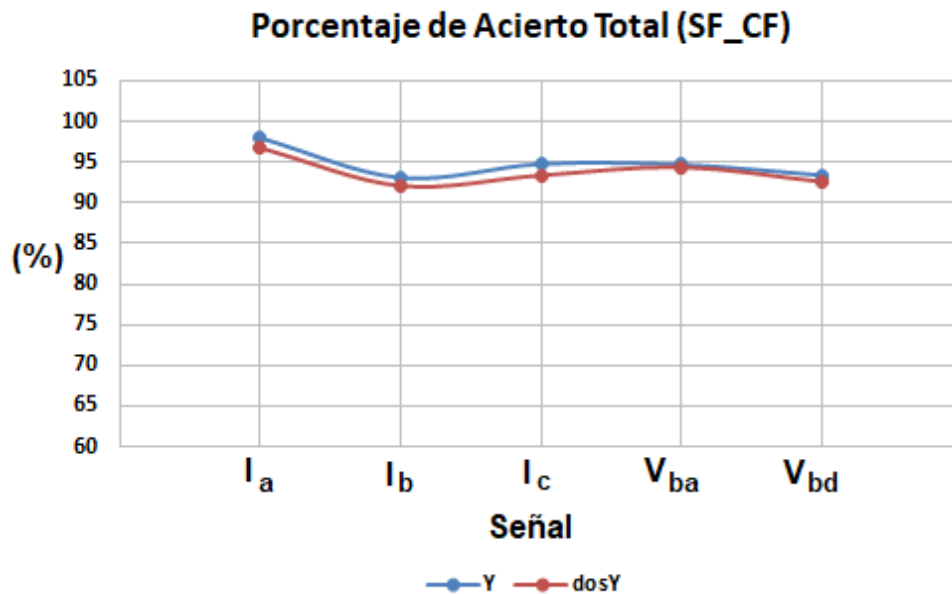


Figura 4.1: Matriz de Confusión Total para Y\_a (caso 01)

donde:  
Y: conexión en estrella.  
a: corriente de la fase a.  
1: Sin falla. (SF)  
2: Con falla. (CF)

**Tabla 4.1: Porcentaje total de aciertos para las redes neuronales de los casos 01 al 10**

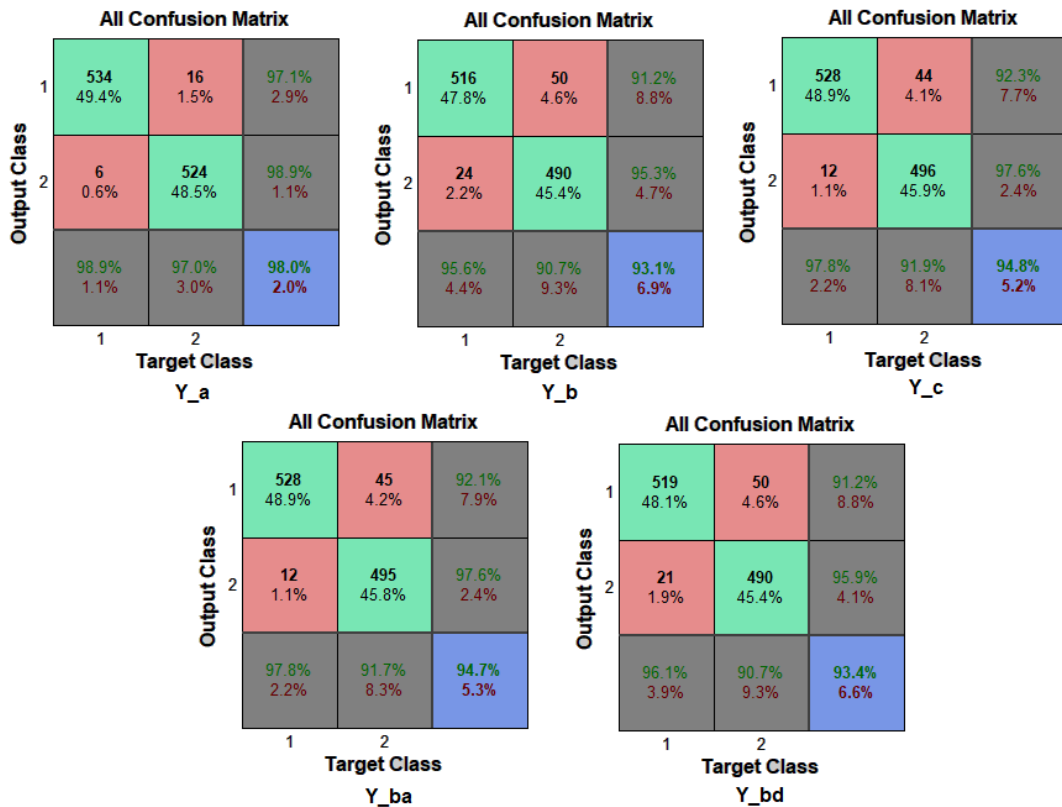
Caso	Nombre	Porcentaje de Aciertos Total (%)	Porcentaje de Error Total (%)
1	Y_a	98,0	2,0
2	Y_b	93,1	6,9
3	Y_c	94,8	5,2
4	Y_ba	94,7	5,3
5	Y_bd	93,4	6,6
6	dosY_a	96,8	3,2
7	dosY_b	92,1	7,8
8	dosY_c	93,4	6,6
9	dosY_ba	94,4	5,6
10	dosY_bd	92,6	7,4



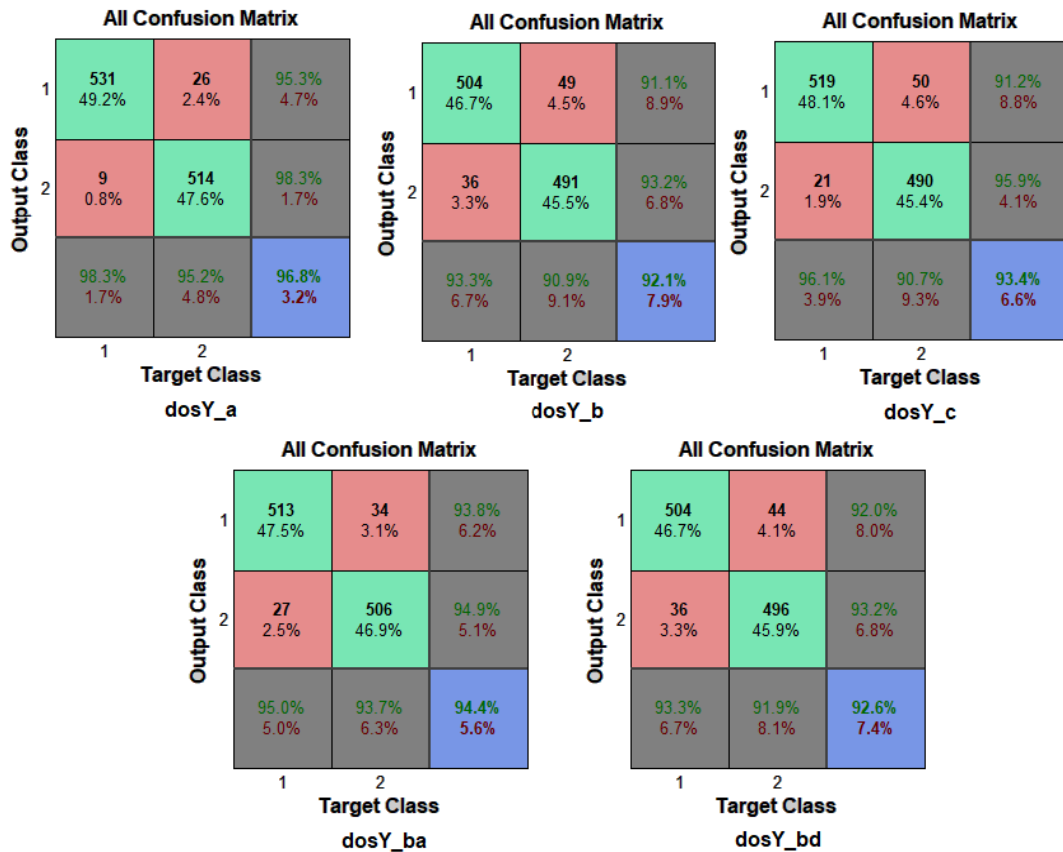
**Figura 4.2: Porcentaje de Aciertos Y y dosY (casos 01 al 10)**

Esto debido a que al momento de realizar las fallas de cortocircuito de una espira, de dos espiras y de dos lados de bobina ubicados en una misma ranura, estas fallas no afectan de forma directa a la fase b sino a la fase a, el cortocircuito de una y dos espiras, y a las fases a y c el cortocircuito de dos lados de bobina.

En este mismo orden de ideas, en las figuras 4.3 y 4.4 se muestra la matriz de confusión total de los casos 1 al 5 y 6 al 10 respectivamente. Como se observa los resultados obtenidos en cada una de estas figuras corresponden con los valores indicados en la tabla 4.1 y en la figura 4.2.



**Figura 4.3: Matriz de Confusión Total para conexión Y (casos 01 al 05)**



**Figura 4.4: Matriz de Confusión Total para conexión dosY (casos 06 al 10)**

- **Grupo 2 (caso 11 al 16)**

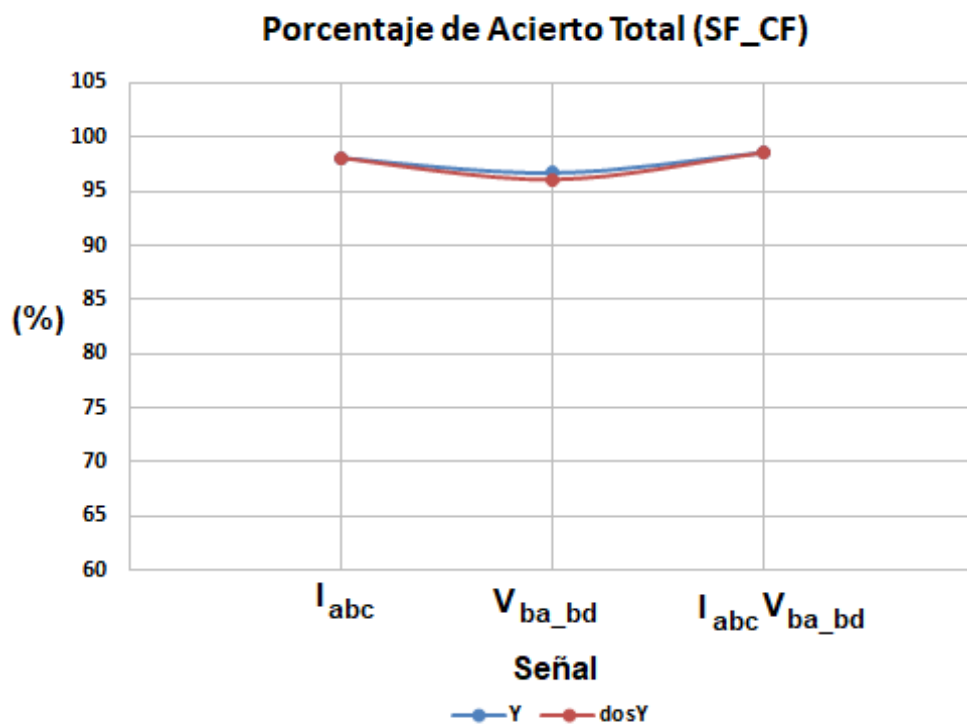
La finalidad del estudio de los casos 11 al 16 es considerar las señales de corriente de armadura, tensión de bobina diametral y tensión de bobina acortada combinadas ya que, como se indicó anteriormente, al momento de ocurrir la falla de aislamiento, que inicialmente se manifiesta como cortocircuito de una espira y puede evolucionar hasta cortocircuito de lados de bobina ubicados en una misma ranura, no se ven afectadas todas las fases directamente ni de igual forma, por lo que las señales de corriente y tensión

consideradas no son afectadas en la misma proporción, lo que influye en la discriminación de acuerdo a si la máquina presenta falla o no.

En este sentido, en la tabla 4.2 se muestra el porcentaje total de aciertos para las redes neuronales correspondientes y en la figura 4.5 se muestra la relación de dichos porcentajes respecto a la señal considerada tanto en conexión Y como en conexión dosY. Como se observa, para estos casos (11 al 16) se obtienen porcentajes de acierto superiores al 96% obteniéndose que tanto para conexión Y como para conexión dosY el mayor porcentaje es cuando se consideran las señales de corriente de las tres fases y las señales de tensión de bobina acortada y la tensión de bobina diametral en forma simultánea; siendo este porcentaje de 98,6% en ambas conexiones.

**Tabla 4.2: Porcentaje total de aciertos para las redes neuronales del caso 11 al 16**

<b>Caso</b>	<b>Nombre</b>	<b>Porcentaje de Aciertos Total (%)</b>	<b>Porcentaje de Error Total (%)</b>
11	Y_abc	98,1	1,9
12	Y_ba_bd	96,7	3,3
13	Y_abc_ba_bd	98,6	1,4
14	dosY_abc	98,1	1,9
15	dosY_ba_bd	96,1	3,9
16	dosY_abc_ba_bd	98,6	1,4



**Figura 4.5: Porcentaje de Aciertos Y y dosY (casos 11 al 16)**

Adicionalmente, en la figura 4,6 se muestra la matriz de confusión total obtenida en cada uno de los casos 11 al 16, lo que corresponde con los valores indicados en la tabla 4.2.

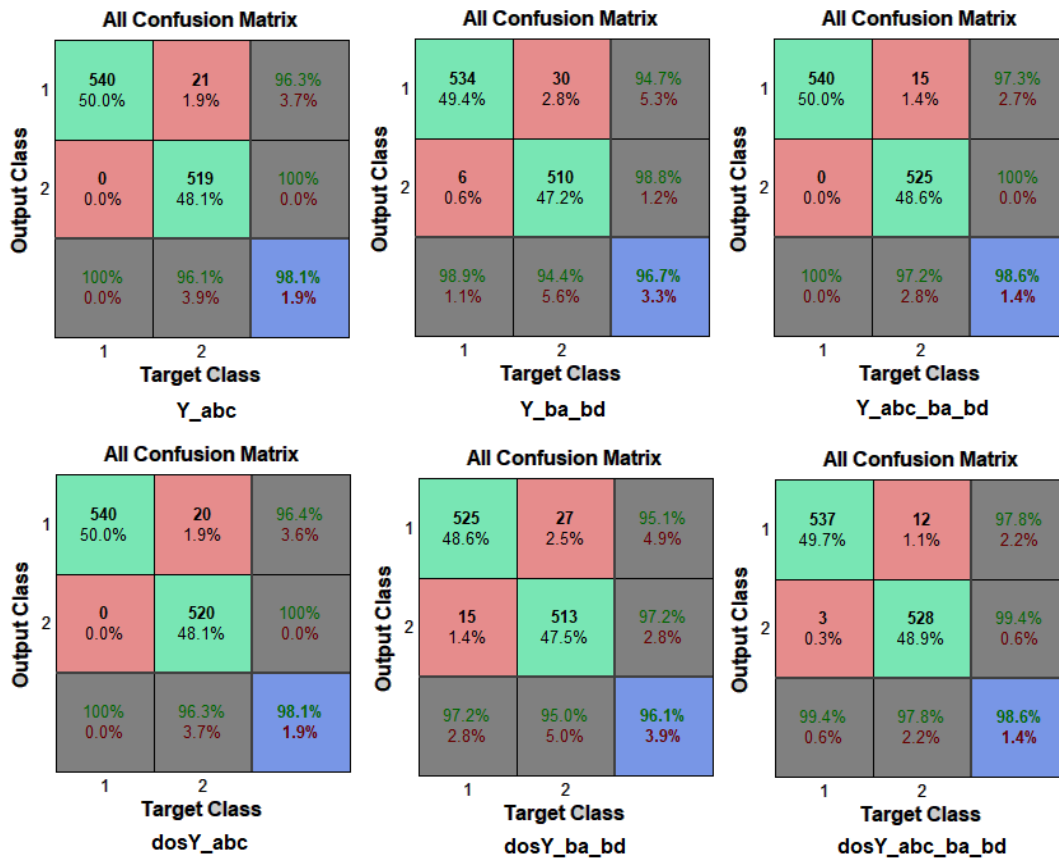
- **Grupo 3 (caso 17 al 34)**

En este grupo se estudian las señales de corriente en las tres fases, tensión de bobina acortada y tensión de bobina diametral en forma combinada pero a tres niveles de carga distintos indicados en la tabla 4.3.

**Tabla 4.3: Niveles de Carga para conexión Y y dosY**

Nivel de Carga	Y (A)	dosY (A)
Máxima (max)	1,09	2,18
Media (med)	0,82	1,64
Mínima (min)	0,55	1,1

Esto con la finalidad de establecer si existe relación entre el nivel de carga al que opera la máquina con la posibilidad de la clasificación en relación a si dicha máquina presenta o no falla de aislamiento.



**Figura 4.6: Matriz de Confusión Total para conexión dosY (casos 11 al 16)**



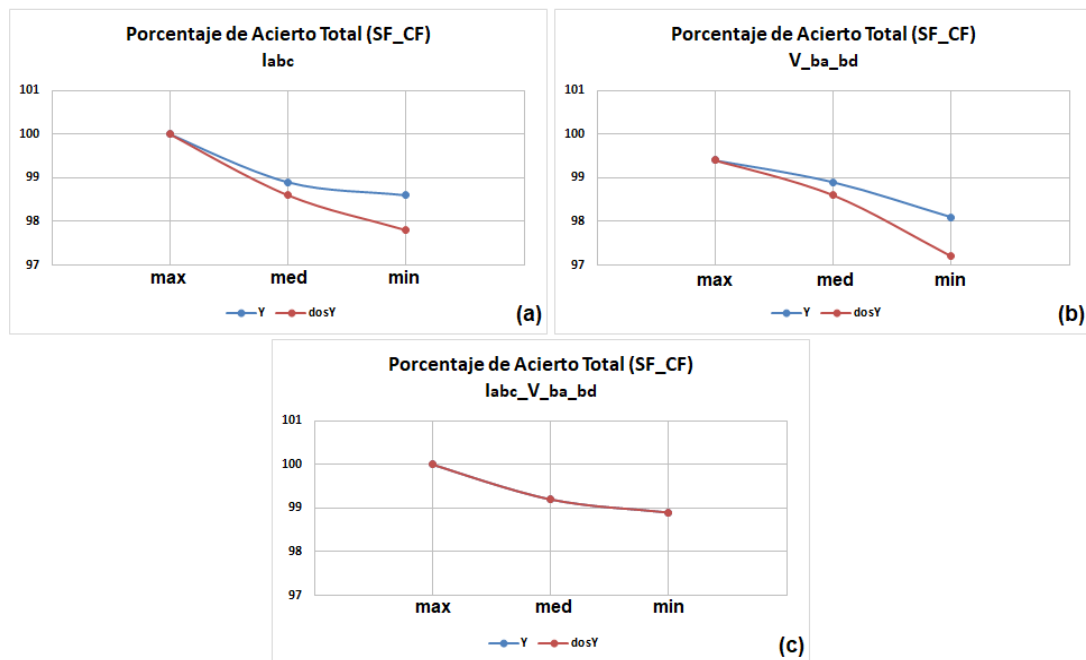
En este sentido, en la tabla 4.4 se muestra el porcentaje de acierto obtenido para cada uno de los casos, donde el porcentaje más alto (100%) tanto para conexión Y como para conexión dos Y se obtuvo a máxima carga, con las señales de corriente de fase simultáneamente y las señales de corriente de cada fase, tensión de bobina acortada y tensión de bobina diametral simultáneamente.

**Tabla 4.4: Porcentaje total de aciertos para las redes neuronales del caso 17 al 34**

<b>Caso</b>	<b>Nombre</b>	<b>Porcentaje de Aciertos Total (%)</b>	<b>Porcentaje de Error Total (%)</b>
17	Ymax_abc	100	0
18	Ymed_abc	98,9	1,1
19	Ymin_abc	98,6	1,4
20	Ymax_ba_bd	99,4	0,6
21	Ymed_ba_bd	98,9	1,1
22	Ymin_ba_bd	98,1	1,9
23	Ymax_abc_ba_bd	100	0
24	Ymed_abc_ba_bd	99,2	0,8
25	Ymin_abc_ba_bd	98,9	1,1
26	dosYmax_abc	100	0
27	dosYmed_abc	98,6	1,4
28	dosYmin_abc	97,8	2,2
29	dosYmax_ba_bd	99,4	0,6
30	dosYmed_ba_bd	98,6	1,4
31	dosYmin_ba_bd	97,2	2,8
32	dosYmax_abc_ba_bd	100	0
33	dosYmed_abc_ba_bd	99,2	0,8
34	dosYmin_abc_ba_bd	98,9	1,1

Adicionalmente, en la figura 4.7 se muestra el porcentaje de acierto total correspondiente a la tabla 4.4. Donde para cada una de las figuras 4.7(a),

4.7(b) y 4.7(c) se observa que a medida que disminuye la carga, tanto para conexión Y como para conexión dosY, disminuye ligeramente (alrededor de 2%) el porcentaje de acierto de la red neuronal.



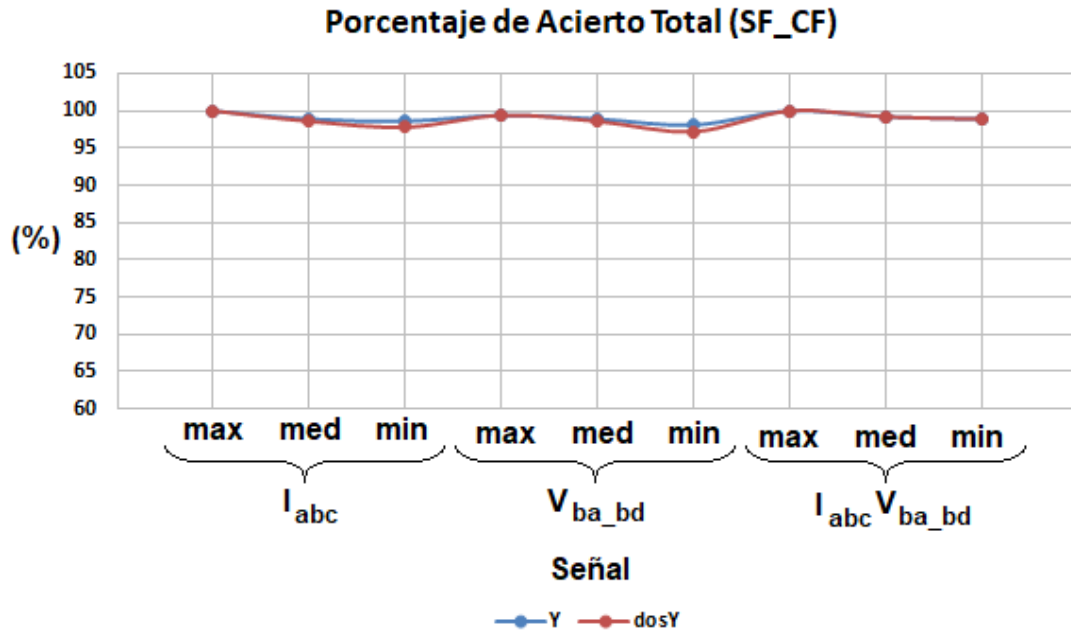
**Figura 4.7: Porcentaje de Aciertos Y y dosY (casos 17 al 34) separados por tipo de señal**

donde:

- (a): Señal de corriente de la fase a, fase b y fase c en forma simultánea.
- (b): Señal de tensión de bobina acortada y de bobina diametral simultáneamente.
- (c): Señal de corriente de la fase a, fase b y fase c, y tensión de bobina acortada y de bobina diametral simultáneamente.

Por otro lado, en la figura 4.8 igualmente se muestra el porcentaje de acierto de cada uno de los casos de la tabla 4.4 y se observa que, aunque al disminuir la carga disminuye el porcentaje de acierto de la red neuronal dicha disminución es pequeña (alrededor de 2%) por lo que puede considerarse que

la carga no influye significativamente en la discriminación de si la máquina sincrónica presenta o no falla de aislamiento para las señales consideradas.



**Figura 4.8: Porcentaje de Aciertos Y y dosY (casos 17 al 34)**

Adicionalmente, en las figuras 4.9 y 4.10 se muestran las matrices de confusión total para cada uno de los casos indicados en la tabla 4.4, donde se observa las relaciones antes indicadas tanto para conexión Y como para conexión dosY.

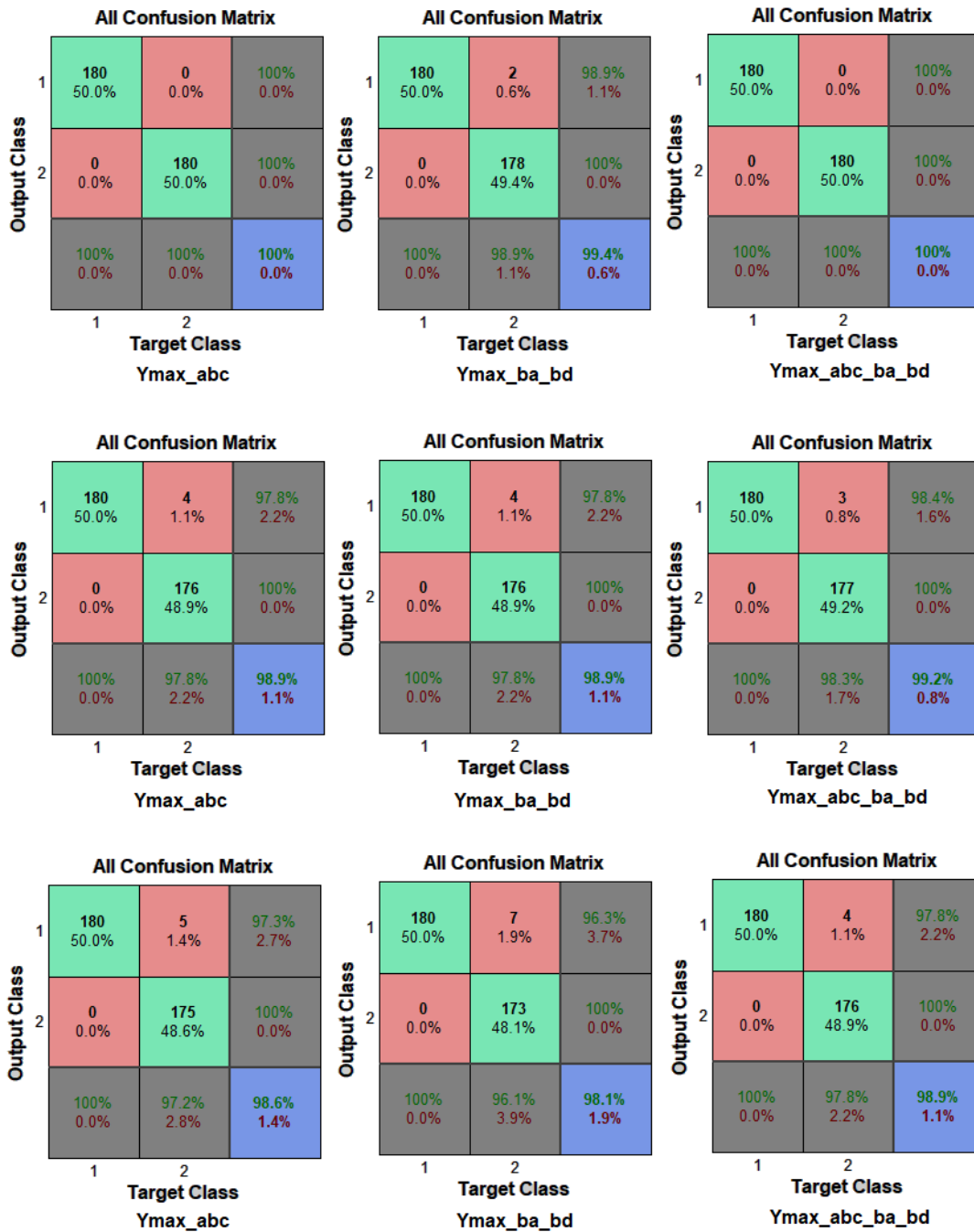


Figura 4.9: Matriz de Confusión Total para conexión Y (casos 17 al 25)

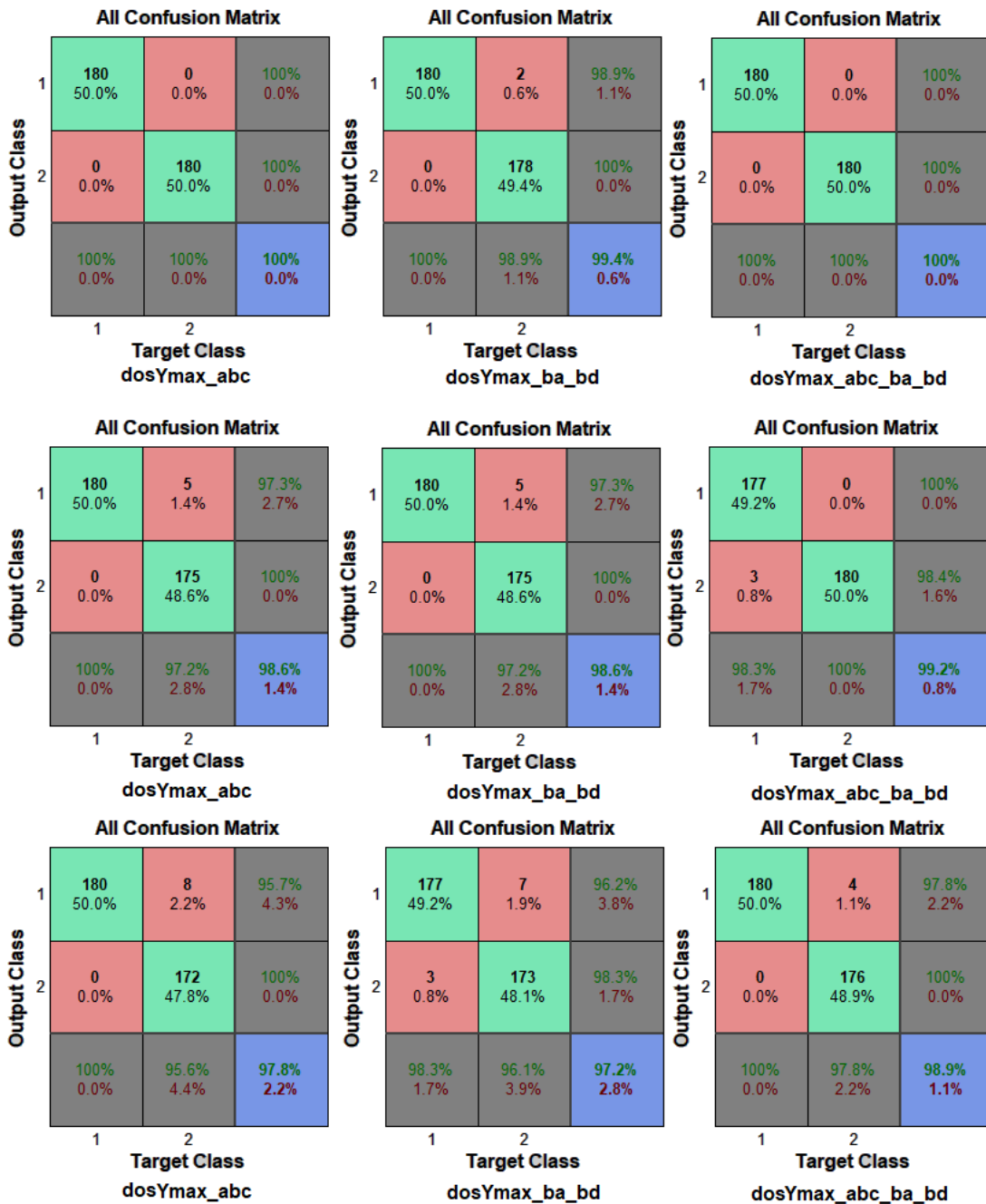


Figura 4.10: Matriz de Confusión Total para conexión dosY (casos 26 al 34)

#### **4.3. Segunda etapa: discriminación de la condición de la máquina en cuatro estados posibles, sin falla (SF), cortocircuito de una espira (1E), cortocircuito de dos espiras de una misma bobina (2E) y cortocircuito de dos lados de bobina ubicados en una misma ranura (2B)**

En esta etapa se busca discriminar el estado de la máquina entre cuatro grupos posibles a saber: sin falla (SF), cortocircuito de una espira (1E), cortocircuito de dos espiras de una misma bobina (2E) y cortocircuito de dos lados de bobina ubicados en una misma ranura (2B); para ello se trabajó con dos grupos donde, en el primero se consideró tanto para conexión Y como para conexión dosY las señales de corriente de cada fase (a, b y c), tensión de bobina acortada y de bobina diametral por separado y en el segundo grupo se consideró tanto para conexión Y como dos Y las señales de corriente y tensión combinados de tres maneras: corrientes de cada fase (abc) simultáneamente; tensiones de bobina acortada y diametral (ba\_bd) simultáneamente y por último las tres corrientes de fase y las dos tensiones de bobina simultáneamente (abc\_ba\_bd).

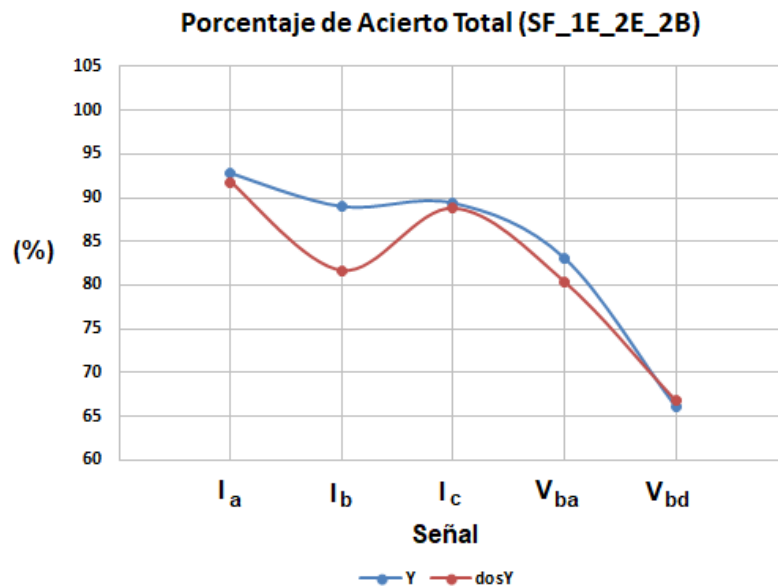
En este sentido, en la tabla 4.5 se tienen los porcentajes de acierto y error para las redes neuronales correspondientes al primer grupo, en casos numerados del 35 al 44 y en la figura 4.11 se muestra la relación de los porcentajes de acierto para cada señal y conexión de la máquina.

Se observa que el mayor porcentaje de aciertos tanto para conexión Y como para dosY se obtiene considerando la señal de corriente de la fase a y el menor

porcentaje, igual para ambas conexiones, se obtiene para la tensión de bobina diametral.

**Tabla 4.5: Porcentaje total de aciertos para las redes neuronales del casos 35 al 44**

Caso	Nombre	Porcentaje de Aciertos Total (%)	Porcentaje de Error Total (%)
35	Y_a	92,8	7,2
36	Y_b	89,0	11,0
37	Y_c	89,4	10,6
38	Y_ba	83,1	16,9
39	Y_bd	66,1	33,9
40	dosY_a	91,8	8,2
41	dosY_b	81,7	18,3
42	dosY_c	88,8	11,2
43	dosY_ba	80,4	19,6
44	dosY_bd	66,8	33,2



**Figura 4.11: Porcentaje de Aciertos Y y dosY (casos 35 al 44)**

Adicionalmente en la figura 4.11 se observa que para las señales de corriente el menor porcentaje de aciertos se obtiene considerando la corriente de la fase b ya que, como se indicó anteriormente, las fallas que se realizaron no afectan en forma directa a la fase b de la máquina sino a las fases a y/o c.

En la figura 4.12 se muestra la matriz de confusión para entrenamiento, validación, prueba y total considerando conexión Y y la corriente de la fase a (Y\_a), donde se observa que de los 720 datos totales, se tomó el 70% para entrenamiento (504 datos), 15 % (108 datos) para validación y 15% (108 datos) para prueba.

De los 504 datos para el entrenamiento, 125 corresponden a la condición sin falla (SF), 124 a la condición de cortocircuito de una espira (1E), 123 a la condición de cortocircuito de dos espiras (2E) y 132 a la condición de cortocircuito de dos lados de bobina (2B). En este sentido, de los 125 datos de la condición sin falla 111 fueron clasificados correctamente, lo que equivale a un 88,8% de aciertos, 08 fueron clasificados de forma incorrecta como cortocircuito de una espira y 06 también fueron clasificados en forma incorrecta como cortocircuito de dos espiras, lo que equivale a un error de 11,2%.

Por otro lado, de los 124 datos de cortocircuito de una espira, 115 fueron clasificados correctamente, equivalente a 92,7% de aciertos, mientras que 08 fueron clasificados como sin falla y 01 como cortocircuito de dos espiras, resultando en 7,3% de error.



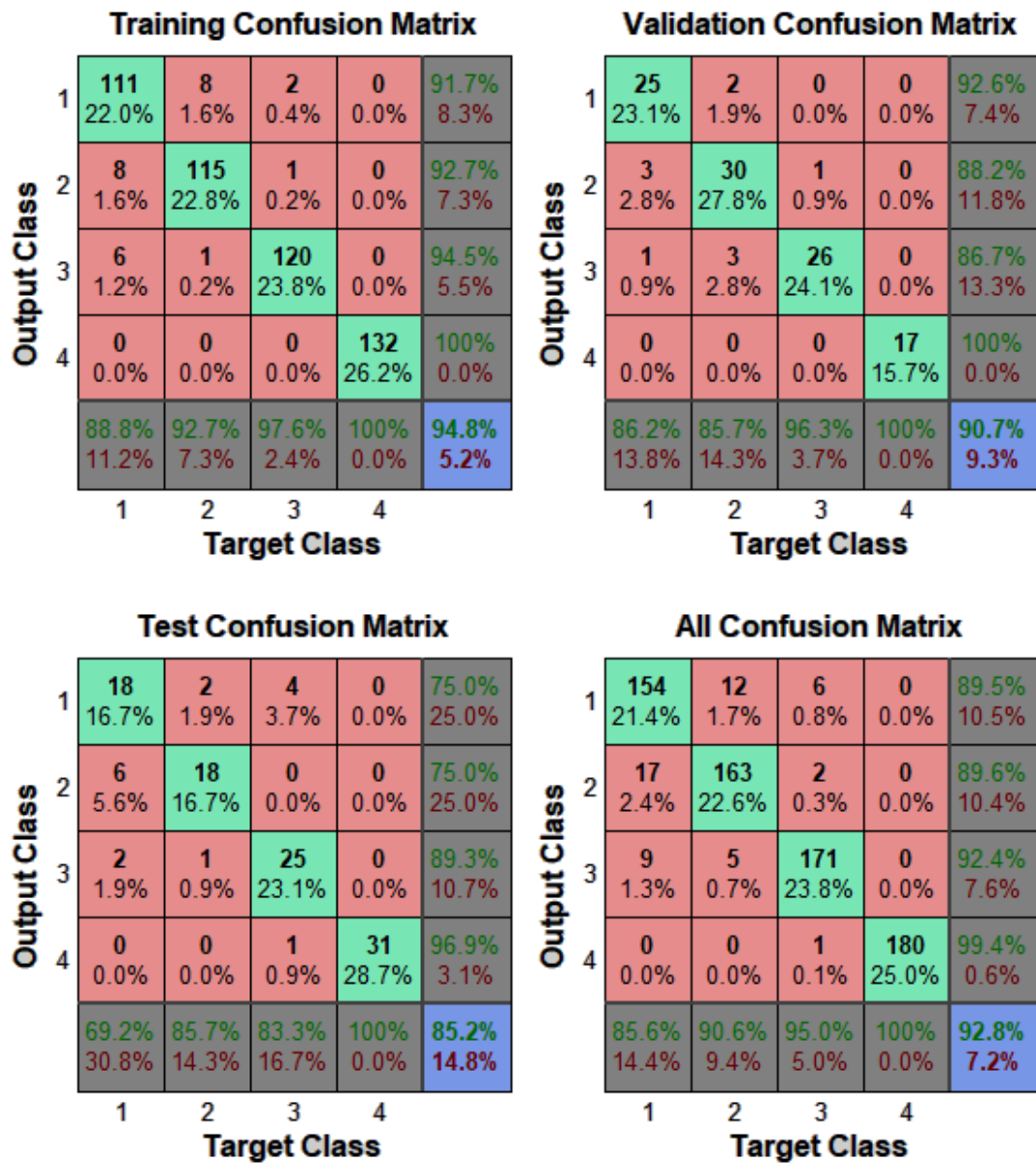


Figura 4.12: Matriz de Confusión Total para Y<sub>a</sub> (caso 35)

donde:

Y: conexión en estrella.

a: corriente de la fase a.

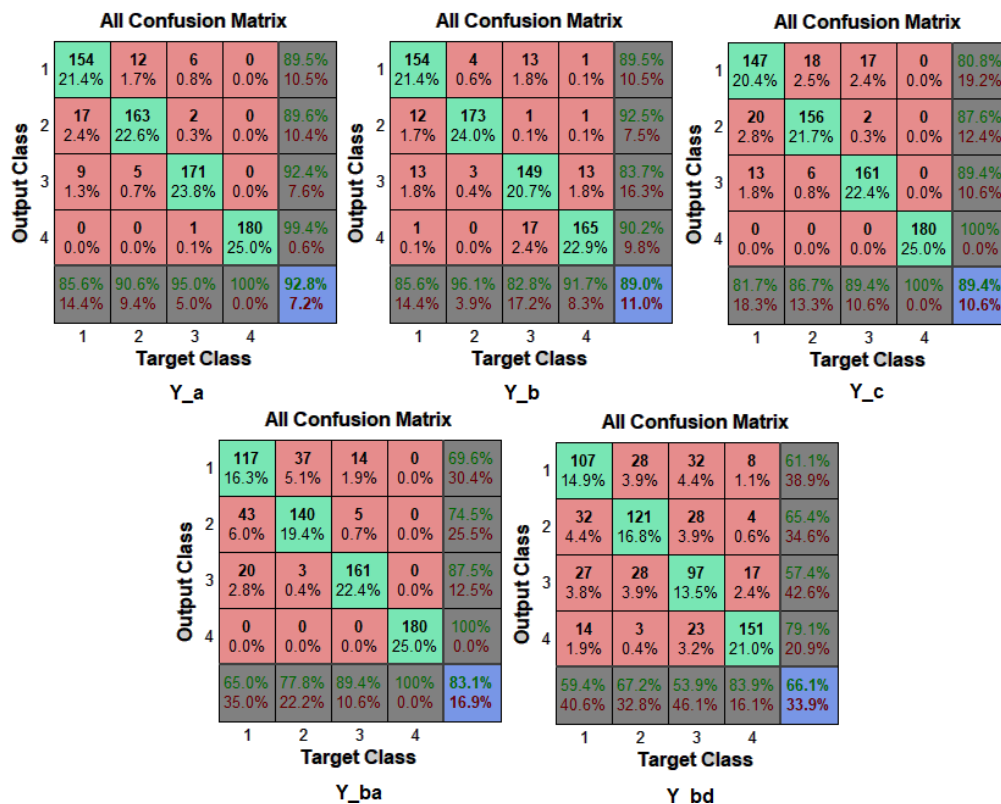
1: Sin falla. (SF)

2: Cortocircuito de una espira. (1E)

3: Cortocircuito de dos espiras de una misma bobina. (2E)

4: Cortocircuito de dos lados de bobina ubicados en una misma ranura. (2B)

En este orden de ideas, de los 123 datos de cortocircuito de dos espiras 120 fueron clasificados correctamente obteniéndose 97,6% de aciertos, mientras que 02 fueron clasificados como sin falla y uno como cortocircuito de una espira, dando un error de 2,4%. Por último, de los 132 casos de cortocircuito de dos lados de bobina todos fueron clasificados de forma correcta resultando un porcentaje de aciertos de 100%.



**Figura 4.13: Matriz de Confusión Total para conexión Y (casos 35 al 39)**

Realizando un análisis similar para validación, prueba y total se tiene que los casos de cortocircuito de dos lados de bobina son clasificados de forma correcta en su totalidad debido a que esta falla es la más severa de las que se realizaron en la máquina. Adicionalmente los datos que tienen mayor cantidad de clasificaciones incorrectas son entre las condiciones sin falla y cortocircuito

de una espira o sin falla y cortocircuito de dos espiras, ya que al ser estas fallas de tipo incipiente se dificulta su detección.

En las figuras 4.13 y 4.14 se muestra la matriz de confusión total para los casos 35 a 39 para conexión Y y 40 a 44 para conexión dosY respectivamente, donde se evidencia lo expuesto anteriormente y adicionalmente se observa que las señales que permiten discriminar mejor la condición de la máquina son las corrientes de armadura, con las cuales se alcanza porcentajes superiores al 88%

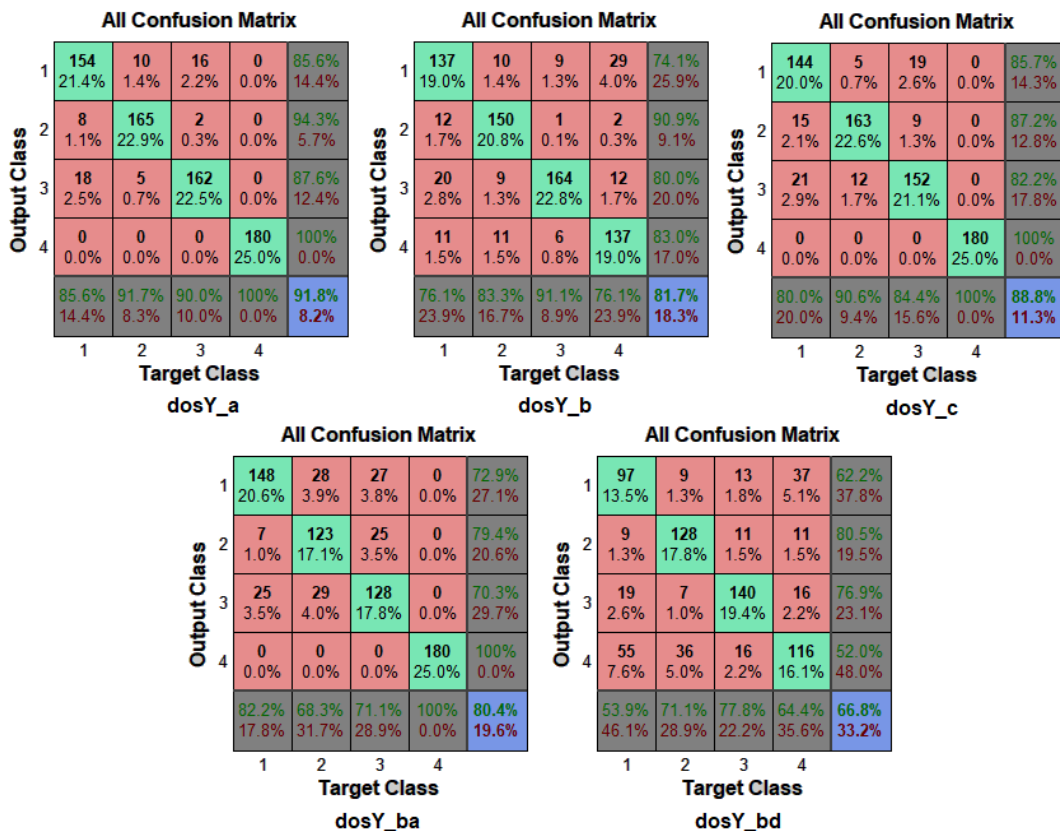


Figura 4.14: Matriz de Confusión Total para conexión dosY (casos 39 al 44)

Para el segundo grupo, tal como se explicó anteriormente, se utilizan las señales de corriente y tensión de bobina acortada y diametral en forma combinada, en la búsqueda de poder clasificar de mejor forma el estado de la máquina entre las cuatro condiciones posibles.

En la tabla 4.6 se muestra el porcentaje de aciertos obtenido para las redes neuronales en cada uno de los casos. Donde, para cada caso se utilizó matrices de datos diferentes ya que la combinación de señales en cada uno difiere de la siguiente forma: primeramente se consideran las señales de corriente de cada fase en cada conexión (Y\_abc y dosY\_abc), seguidamente se consideran las señales de tensión de bobina acortada y tensión de bobina diametral (Y\_ba\_bd y dosY\_ba\_bd) y por último se consideran todas las señales en forma simultánea (Y\_abc\_ba\_bd y dosY\_abc\_ba\_bd).

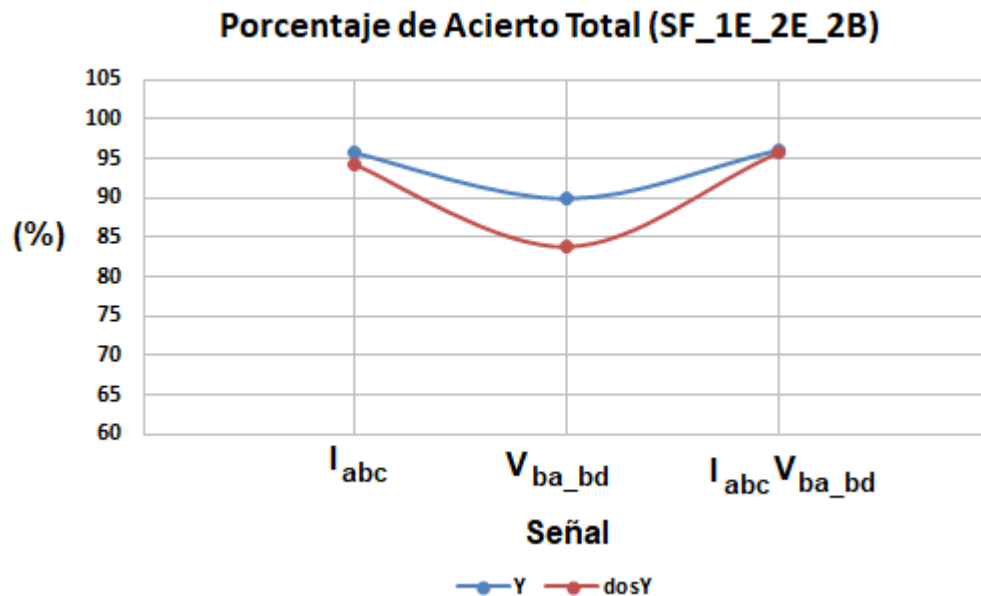
**Tabla 4.6: Porcentaje total de aciertos para las redes neuronales del caso 45 al 50**

<b>Caso</b>	<b>Nombre</b>	<b>Porcentaje de Aciertos Total (%)</b>	<b>Porcentaje de Error Total (%)</b>
45	Y_abc	95,7	4,3
46	Y_ba_bd	89,9	10,1
47	Y_abc_ba_bd	96,1	3,9
48	dosY_abc	94,2	5,8
49	dosY_ba_bd	83,8	16,2
50	dosY_abc_ba_bd	95,8	4,2

En la tabla 4.6 se observa que los porcentajes de acierto son superiores a los del grupo uno ya que estos se encuentran sobre el 80% y el porcentaje más alto tanto en conexión Y como en conexión dosY se logró con las señales de

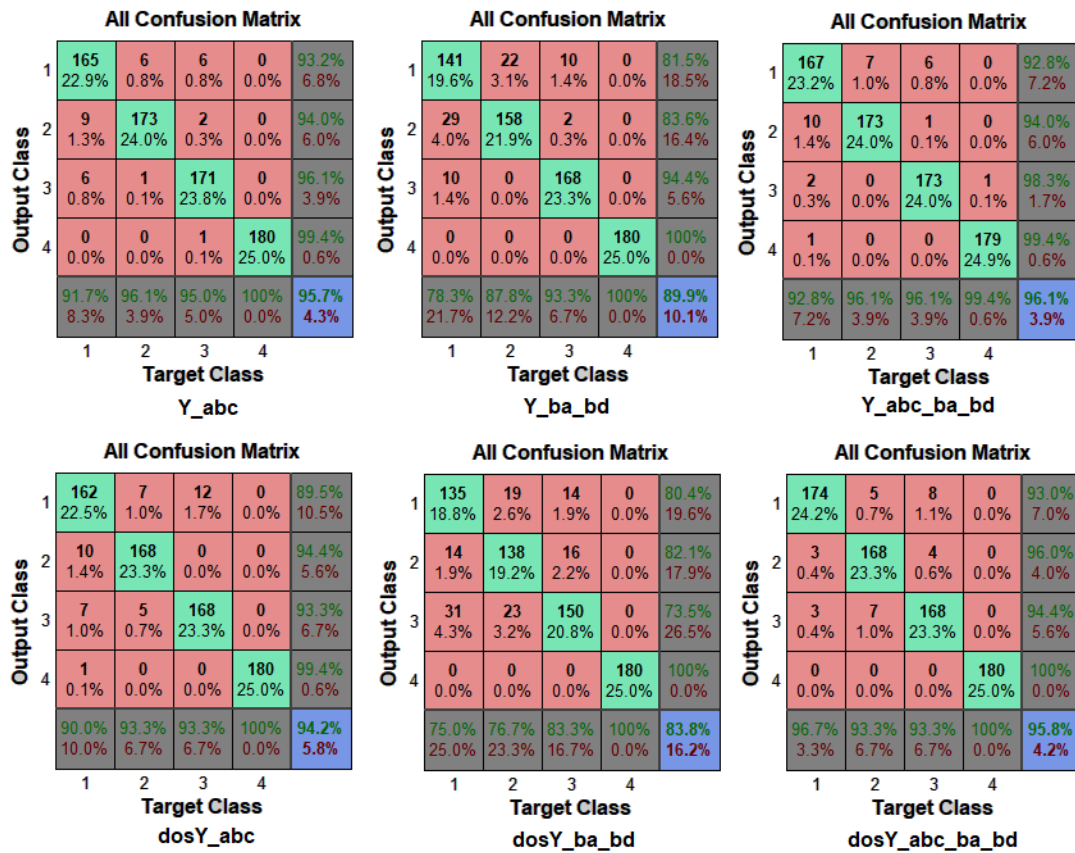
corriente y de tensión en forma simultánea, siendo estos porcentajes de 96,1 y 95,8 respectivamente, superiores ambos a 95%.

En este orden de ideas, en la figura 4.15 se muestra la relación entre el porcentaje de aciertos y las señales que se consideran, observándose de mejor manera lo expuesto anteriormente en relación a que los porcentajes se encuentran superiores al 80%.



**Figura 4.15: Porcentaje de Aciertos Y y dosY (casos 45 al 50)**

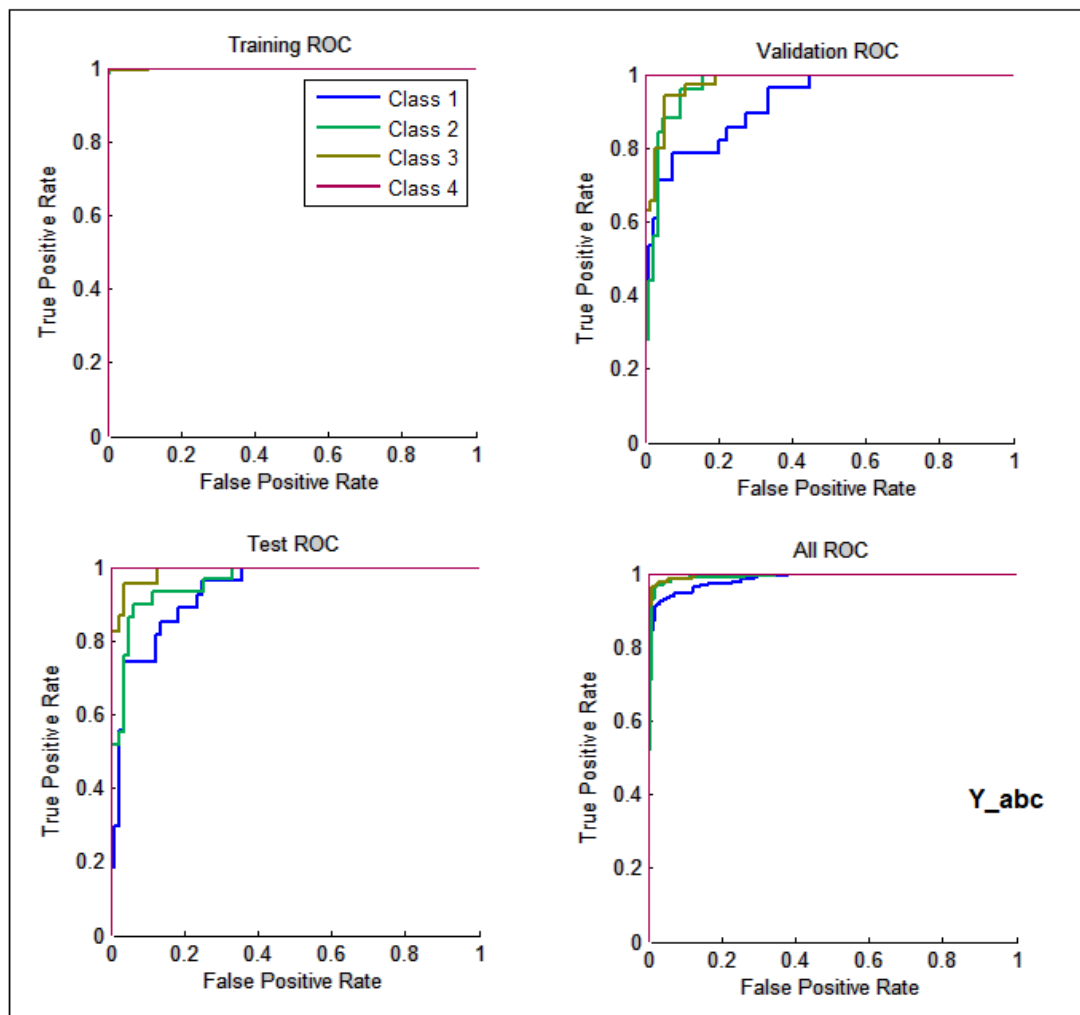
Por otro lado, en la figura 4.16 se muestra la matriz de confusión total para los casos indicados en la tabla 4.6, donde se evidencia que la falla que se discrimina mejor es la de cortocircuito de dos lados de bobina ubicados en una misma ranura, por ser la más severa de las fallas que se realizaron a la máquina.



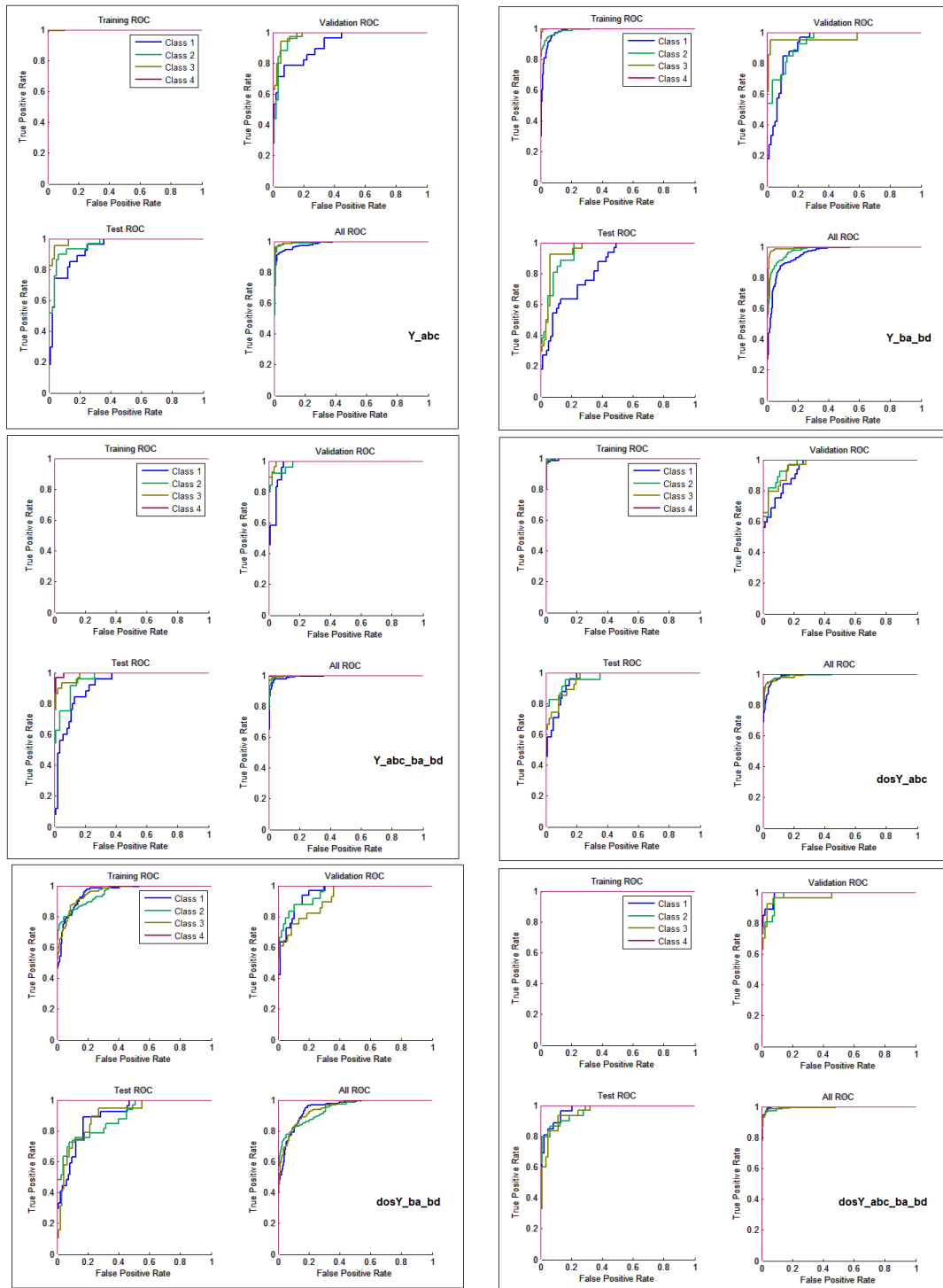
**Figura 4.16: Matriz de Confusión Total para conexión Y y dosY (casos 45 al 50)**

Finalmente, en la figura 4.17 se muestra la relación ROC (receiver operating characteristic), de los verdaderos positivos respecto de los falsos positivos para el caso 45, donde se considera las señales de corriente y voltaje en forma simultánea, resultando una condición ideal durante el entrenamiento, ya que no hay falsos positivos. En esta figura la clase 1 es la condición sin falla (SF), la clase 2 es la condición de cortocircuito de una espira (1E), la clase 3 es la condición de cortocircuito de dos espiras (2E) y la clase 4 es la condición de cortocircuito de dos lados de bobina (2B).

En este sentido, en la figura 4.18 se muestra igualmente ROC para los casos 45 a 50 donde se observa que la condición que genera más falsos positivos es la clase 1 (SF), seguida de la clase 2 (1E), a continuación la clase 3 (2E) y finalmente la clase 4 (2B).



**Figura 4.17: ROC para conexión Y considerando las tres corrientes de armadura simultáneamente ( $i_a$ ,  $i_b$  e  $i_c$ ) (caso 45)**



**Figura 4.18: ROC para conexión Y y dosY para los casos 45 a 50**



## CONCLUSIONES

Debido a que las máquinas sincrónicas comerciales no permiten el acceso a los terminales correspondientes a las espiras de las bobinas ni a los terminales de cada bobina, para la ejecución de la presente investigación se desarrolló un sistema experimental con el cual realizar fallas incipientes de devanado, tales como: cortocircuito de una espira de una misma bobina, cortocircuito de dos espiras de una misma bobina y cortocircuito de dos lados de bobina que se encuentran ubicados en una misma ranura, a fin de simular el inicio y desarrollo progresivo de una falla de aislamiento en el devanado estático de la máquina sincrónica.

Adicionalmente se desarrolló en la máquina una bobina diametral y una bobina de exploración ubicada en el rotor, para realizar la adquisición de la tensión inducida en dichas bobinas en distintas condiciones de operación de la máquina sincrónica, sin embargo a efectos de esta investigación sólo se utilizó la señal de tensión de bobina acortada y diametral ya que no se adquirió la tensión de la bobina de exploración.

Gracias al desarrollo de la máquina antes descrita, se implementó el sistema de adquisición de datos con el cual se obtuvo las corrientes de cada una de las fases y las tensiones de bobina acortada y de bobina diametral para las cuatro condiciones de falla objeto de estudio: máquina sin falla (SF), cortocircuito de una espira de una misma bobina (1E), cortocircuito de dos espiras de una misma bobina (2E) y cortocircuito de dos lados de bobina ubicados en la misma ranura (2B).

Al tener los datos de las señales de tensión y corriente deseados, se aplicó la Transformada de Wavelet Discreta a dichas señales, utilizando la función wavelet madre “Daubechies 10” hasta el quinto nivel de descomposición.

Esta Transformada de Wavelet se aplicó a las señales de corriente de las fases a, b y c y a las tensiones de bobina acortada y diametral para dos tipo de conexión en la máquina (Y y dosY), cuatro condiciones de falla (SF, 1E, 2E y 2B) y tres niveles de carga máxima, medio y mínimo, obteniéndose en cada uno de los casos los coeficientes de aproximación y de detalle hasta el quinto nivel de descomposición.

En este sentido, con el tratamiento estadístico de los coeficientes de aproximación y detalle antes descritos se obtuvo la media, varianza, curtosis y asimetría de cada uno de los coeficientes, obteniéndose que a medida que se incrementa el nivel de falla, la varianza de los coeficientes de aproximación en el nivel cinco se hace más pequeña.

Adicionalmente, a medida que se incrementa el nivel de carga la varianza se incrementa y mientras mayor es el índice de carga mayor es la diferencia de la varianza para los diferentes niveles de falla, pudiendo con ello estimar la condición de falla de la máquina.

No obstante, a partir de los parámetros estadísticos antes descritos y con el uso de las redes neuronales artificiales se determinó lo siguiente en relación a

la detección de fallas incipientes en el devanado estático de la máquina sincrónica.

- En relación a la clasificación de si la máquina presenta o no falla de aislamiento en el devanado de armadura, tanto la señal de corriente de cualquiera de las fases como la tensión de bobina acortada o diametral permiten la detección de la falla, ya que se obtuvo porcentaje de acierto superior a 90% en cada uno de los casos. Sin embargo, al utilizar las tres corrientes de fase de forma combinada se obtiene mayor porcentaje de acierto (superior a 98%) ya que, al ocurrir una falla en aislamiento, esta inicialmente afecta en forma directa a una sola de las fases y sólo cuando evoluciona es que afecta en forma directa a alguna de las otras, por lo que es conveniente monitorear en forma combinada las tres corrientes.
- Aunque las señales de tensión de bobina acortada y tensión de bobina diametral permiten la clasificación en relación a si la máquina presenta o no falla de aislamiento, ya que se obtuvieron porcentajes de acierto superior a 90%, la medición de estas señales no es típica en máquinas comerciales, debido a que los fabricantes no colocan terminales a disposición para dicha medición. Por esta característica se recomienda el uso de las señales de corrientes fase como se indicó anteriormente ya que la adquisición de este tipo de señales es convencional.
- En relación a si el nivel de carga afecta o no la detección de falla de aislamiento se tiene que, para todos los casos considerados en el estudio, mientras mayor es el nivel de carga mayor es el porcentaje de acierto. Sin embargo, en todos los casos el porcentaje de acierto fue

superior a 95% por lo que, si bien la carga influye en la detección de la falla, dicha influencia no es significativa. Es de hacer notar que la máquina sincrónica que opera en forma aislada trabaja con carga variable, por lo que se puede realizar el monitoreo de las señales en cualquier momento, sin embargo se recomienda que la adquisición se haga en el momento que la máquina opere lo más cercano a carga nominal ya que en esta condición fue donde se obtuvo el mayor porcentaje de acierto.

- En relación a la clasificación del estado de la máquina en cuatro grupos (SF, 1E, 2E y 2B) el uso de las señales de corriente en forma independiente da porcentajes de acierto superiores a 80%, sin embargo el uso de las tres corrientes de fase permite obtener un porcentaje de acierto superior a 94% y al combinar las señales de corriente con las de tensión de bobina acortada y de bobina diametral se incrementa el porcentaje de acierto a valores cercanos a 96%. Sin embargo, tal como se explicó anteriormente las máquinas comerciales no disponen de terminales para medir dichas tensiones, por lo que se recomienda el uso de las tres corrientes de fase.

Lo anterior indica que es posible determinar las fallas incipientes en el devanado estático de la máquina sincrónica mediante la aplicación de la Transformada de Wavelet a las señales de corriente de fase.

## RECOMENDACIONES

- Considerar la operación de la máquina síncrona como generador, en forma aislada, alimentando carga de tipo R – L.
- Considerar la operación de la máquina acoplada a una red de potencia infinita con el sistema de regulación de tensión (AVR) y el sistema de control de velocidad.
- Considerar otro tipo de fallas en la máquina, tales como: fallas en cojinetes, fallas en aislamiento del devanado de excitación, desalineación de ejes, entre otras.
- Realizar análisis de campo a fin de establecer ecuaciones que describan el comportamiento de la máquina bajo condiciones de falla.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A. PIERSOL y T. Paez. (2009). **Harris' Shock and Vibration Handbook**. McGraw – Hill.
- A.E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Alexander Kusiko. Teoría y Análisis de Máquinas Eléctricas. Mc Graw Hill.
- BAKIE, E. B. y otros. (2005). **Analysis of Synchronous Generator Internal Insulation Failures**. IEEE.
- BARRERA, H. (2010). **Guía para la comprensión holística de la ciencia**. Universidad Nacional Abierta. Caracas – Venezuela.
- CHUI, Charles. (1992). **An introduction to Wavelets**. Texas University.
- E.E. STAFF MIT. Circuitos Magnéticos y Transformadores. Editorial Reverte.
- Enciclopedia CEAC de Electricidad. Talleres Electro – Mecánicos, Bobinados. Cuarta edición 1983.
- FITZGERALD, A., y otros. (1992). **Máquinas Eléctricas**. McGraw – Hill.
- FRAILE, Jesús. (2003). **Máquinas Eléctricas**. McGraw – Hill.
- GUERRA, Ledy (2015). **Desarrollo de una estrategia didáctica para la comprensión de los temas: Distribución Espacial del Campo de Armadura en el Entrehierro y la Reacción de Armadura en la Máquina Síncrona, correspondientes a la asignatura Máquinas Eléctricas II de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo**. Universidad de Carabobo.
- GUTIÉRREZ, Hugo. (2013). **Introducción a las redes neuronales artificiales**. Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Cómputo. Ciudad de México D.F. México.
- H. TOLIYAT, S. y otros. (2012). **Electric machines: modeling, condition monitoring, and fault diagnosis**. Taylor & Francis.
- HAGAN, M. y DEMUTH, H. (1996). **Neural Network Design**. Vol 20. Pws Pub. Boston.

- Hernández Sampieri Roberto y otros. **Metodología de la Investigación**. Mc Graw Hill. Cuarta edición. 2006.
- IEEE std 1159, IEEE, Tech. Rep., (1995), **IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality**.
- JIMÉNEZ, C., y Jiménez, J. (2010). **Clasificación de señales de voz utilizando Transformada de Wavelet y Máquinas de Vectores de Soporte**. Universidad de Carabobo.
- KHAN, M. A. S. K., y otros. (2007). **Diagnosis and Protection of Stator Faults in Synchronous Generators Using Wavelet Transform**. IEEE.
- KRAUSE, P. y otros (1995). **Analysis of Electric Machinery**. IEEE PRESS.
- Laya Danilo. Apuntes de Máquinas Eléctricas. Universidad de Carabobo.
- Laya Nelson. **La Máquina Sincrónica Trifásica un enfoque conceptual**. Universidad de Carabobo. Octubre de 1996.
- M.ZIELICHOWSKI y M.Fulczvk Abstract. (1999) **Influence of load on operating conditions of third harmonic ground-fault protection system of unit connected generators**. IEE Proc. – Gener . Tranrm. Describ. Vol. 146, No. 3.
- Michael Liwshitz – Garik, Clyde C. Whipple. Máquinas de Corriente Alterna. C.E.C.S.A. 1981.
- MOZINA, C. (2005). **Upgrading the Protection of Generators to Meet Current IEEE Standards**. IEEE.
- Nelson Laya. Máquinas Eléctricas I por Objetivos. Universidad de Carabobo.2005.
- NENGLING, T. Y Otros. (2006). **New Generator Split-Phase Transverse Differential Protection Based On Wavelet Transform**. IEEE Transactions on Power Delivery. 1817 – 1823.
- NENGLING, T., y otros. (2002). **Wavelet-based ground fault protection scheme for generator stator Winding**. Electric Power Systems Research. 21 – 28.
- NETI, Prabhakar (2007). **Stator fault analysis of Synchronous Machines**. Universidad de Victoria.

- OSORIO A. (2006). **Algoritmo para detección de vibraciones anormales en maquinarias utilizando la transformada de Wavelet**. Universidad de Las Américas Puebla. México.
- OZGONENEL, O., y otros. (2006). **A Wavelet power based algorithm for synchronous generator protection**. IEEE.
- POPE, J. (1984). **A Comparison of 100% Stator Ground Fault Protection Schemes for Generator Stator Windings**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 4.
- Rosenberg Robert. **Electric Motor Repair**. Segunda Edición 1969.
- VALDEZ, Mauricio. (2014). **Diseño de un algoritmo de diagnóstico de fallas monofásicas en Máquinas Síncronas de polos salientes usando la máquina de Soporte vectorial**. Universidad de Chile.