



POSGRADOS

MAESTRÍA EN _____ ELECTRICIDAD

RPC-SO-22-No.325-2018

OPCIÓN DE
TITULACIÓN:

PROYECTO DE DESARROLLO

TEMA:

ANÁLISIS DE FALLAS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA
DE CENTRALES DE GENERACIÓN ELÉCTRICA

AUTOR:

ANDRÉS ALEXANDER DE LA TORRE MACÍAS

DIRECTOR:

GABRIEL RENATO ORQUERA NOBOA

GUAYAQUIL - ECUADOR
2021

Autor:



Andrés Alexander De La Torre Macías

Ingeniero Eléctrico

Candidato a Magister en Electricidad, Mención Sistemas Eléctricos de Potencia.

Universidad Politécnica Salesiana, Sede Guayaquil

adel14@est.ups.edu.ec

andres.delatorrem@gmail.com

Director:

Gabriel Renato Orquera Noboa

Ingeniero en Electricidad

Master en ingeniería de confiabilidad y gestión de activos

gorquera@ups.edu.ec

gabrielorq@gmail.com

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

©2021 Universidad Politécnica Salesiana.

GUAYAQUIL – ECUADOR – SUDAMÉRICA

ANDRÉS ALEXANDER DE LA TORRE MACÍAS

**ANÁLISIS DE FALLAS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA
DE CENTRALES DE GENERACIÓN ELÉCTRICA**

Índice general

ÍNDICE GENERAL.....	3
ÍNDICE DE FIGURAS	6
ÍNDICE DE TABLAS.....	8
ABSTRACT	12
INTRODUCCIÓN.....	13
1.1 ANTECEDENTES	14
1.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROBLEMA	15
1.3 OBJETIVOS.....	16
1.3.1 <i>Objetivo general</i>	16
1.3.2 <i>Objetivos específicos</i>	16
1.4 CONTRIBUCIONES	16
1.5 ORGANIZACIÓN DEL MANUSCRITO.....	17
MARCO TEÓRICO REFERENCIAL	18
2.1 INTRODUCCIÓN.....	18
2.2 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	18
2.2.1 <i>Transformador de Potencia</i>	18
2.2.2 <i>Vida útil del transformador</i>	18
2.2.3 <i>Aceite aislante</i>	19
2.2.4 <i>Composición química de los aceites minerales de base Nafténicos</i>	19
2.2.5 <i>Degradación del aceite dieléctrico</i>	19
2.2.6 <i>Factores básicos del deterioro del aceite aislante: El oxígeno (O₂)</i>	20
2.2.7 <i>Factores básicos del deterioro del aceite aislante: Catalizadores</i>	20
2.2.8 <i>Presencia de lodo en el aceite</i>	20
2.2.9 <i>Vida útil de un aceite aislante</i>	20
2.2.10 <i>Papel aislante</i>	21
2.2.11 <i>Degradación del aceite</i>	21
2.2.12 <i>Degradación del papel</i>	21
2.2.13 <i>Vida útil del aislamiento</i>	22
2.2.14 <i>Estados del AGD</i>	22
2.2.15 <i>Los seis tipos de fallas básicos identificados por el AGD</i>	24
2.2.16 <i>Contexto de muestro para el AGD</i>	25

2.2.17	<i>Procedimiento para obtener muestras del transformador para análisis de laboratorio</i>	26
2.2.18	<i>Datos adicionales que deben registrarse en el muestreo para AGD</i>	27
2.2.19	<i>Muestra totales de gases combustibles (TCG)</i>	27
2.2.20	<i>Análisis de Gases Disueltos AGD</i>	29
2.2.21	<i>Métodos de interpretación</i>	30
2.2.22	<i>Procedimiento de interpretación del AGD</i>	32
2.2.23	<i>Método del gas más importante (Key gas method)</i>	34
2.2.24	<i>Método de Rogers</i>	34
2.2.25	<i>Método de Dornenburg</i>	35
2.2.26	<i>Método de Duval (triángulo 1)</i>	37
2.2.27	<i>Método de Duval (triángulo 4 y 5)</i>	38
2.2.28	<i>Método de Duval (pentágono 1 y 2)</i>	41
2.2.29	<i>Uso de los triángulos y pentágonos de Duval</i>	42
2.2.30	<i>Métodos basados en técnicas inteligentes</i>	42
2.2.31	<i>Redes neuronales artificiales (RNA)</i>	43
2.2.32	<i>RNA para clasificación</i>	44
2.2.33	<i>Redes neuronales de base Radial</i>	44
2.2.34	<i>Herramienta de desarrollo</i>	45
2.2.35	<i>MatLab</i>	45
METODOLOGÍA PROPUESTA		46
3.1	INTRODUCCIÓN	46
3.1.1	<i>Tipo de metodología</i>	46
3.1.2	<i>Métodos utilizados</i>	47
3.1.3	<i>Método de aprendizaje</i>	47
3.1.4	<i>Técnica inteligente utilizada para detectar fallas incipientes</i>	48
3.1.5	<i>Etapa uno: ingreso de datos</i>	50
3.1.6	<i>Selección de datos</i>	50
3.1.7	<i>Adecuación de datos</i>	50
3.1.8	<i>Selección de parámetros</i>	51
3.1.9	<i>Etapa dos: Entrenamiento</i>	52
3.1.10	<i>Validación cruzada</i>	54
3.1.11	<i>Etapa tres: Pruebas</i>	54
3.1.12	<i>Preparar la técnica para nuevos datos</i>	54
3.1.13	<i>Pruebas con datos nuevos</i>	54
ANÁLISIS DE RESULTADOS		55
4.1	INTRODUCCIÓN	55
4.2	PRUEBA Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	55
4.2.1	<i>Selección de datos</i>	55
4.2.2	<i>Normalización de datos</i>	60
4.2.3	<i>Resultados obtenidos del entrenamiento de la RNA</i>	63
4.2.4	<i>Comparación entre diferentes metodologías</i>	68
4.2.5	<i>Discusión</i>	71
CONCLUSIONES		73

GLOSARIO.....	75
BIBLIOGRAFIA.....	84
ANEXOS.....	84

Índice de figuras

FIGURA 2.1: AGENTES QUE INFLUYEN EN LA VIDA ÚTIL DEL AISLANTE. FUENTE: AUTOR.....	22
FIGURA 2.2: PORCENTAJE RELATIVO DE CONCENTRACIONES DE GAS DISUELTO EN ACEITE MINERAL EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA Y EL TIPO DE FALLA. FUENTE: [1].....	23
FIGURA 2.3: PROCESO DE TOMA DE DECISIONES DURANTE UN AGD. FUENTE: [1]	33
FIGURA 2.4: DIAGRAMA DE FLUJO DEL MÉTODO DE RELACIÓN DE DORNENBURG. FUENTE: [1]	36
FIGURA 2.5: TRIÁNGULO DE DUVAL 1. FUENTE: [1].....	37
FIGURA 2.6: MÉTODO DEL TRIÁNGULO DE DUVAL 4. FUENTE: [1].....	39
FIGURA 2.7: MÉTODO DEL TRIÁNGULO DE DUVAL 5. FUENTE: [1].....	40
FIGURA 2.8. MÉTODO DEL PENTÁGONO DE DUVAL 1. FUENTE: [1].....	41
FIGURA 2.9. MÉTODO DEL PENTÁGONO DE DUVAL 2. FUENTE: [1].....	42
FIGURA 2.10. MODELO DE RED NEURONAL ARTIFICIAL. FUENTE: [27]	43
FIGURA 2.11. ARQUITECTURA DE UNA RED DE BASE RADIAL. FUENTE: [27]	44
FIGURA 3.1: ESTRUCTURA GENERAL: SISTEMA DE APRENDIZAJE FUENTE:	47
FIGURA 3.2: CLASIFICACIÓN DEL APRENDIZAJE AUTOMÁTICO. FUENTE: [31]	47
FIGURA 3.3 METODOLOGÍA PROPUESTA. FUENTE: [2].....	49
FIGURA 3.4. DISEÑO DE RNA EN MATLAB. FUENTE: [36].....	53
FIGURA 4.1. PARAMETRIZACIÓN DE LA RED NEURONAL EN MATLAB. FUENTE: AUTOR.....	64
TABLA 4.9. PRUEBAS CON DISTINTAS REDES NEURONALES. FUENTE: EL AUTOR	64
FIGURA 4.2: RED NEURONAL PERSONALIZADA. FUENTE: AUTOR	65
FIGURA 4.3. MEJOR VALIDACIÓN DE RENDIMIENTO	65

FIGURA 4.4. ESTADO DE ENTRENAMIENTO	65
FIGURA 4.5. ESTADO DE REGRESIÓN	66
FIGURA 4.6: GRÁFICA DEL NÚMERO DE CASOS ACERTADOS ENTRE MÉTODOS ESTUDIADOS	72
FIGURA 4.7: GRÁFICA PORCENTUAL DE ACIERTOS ENTRE MÉTODOS ESTUDIADOS	72
FIGURA C.1. MEJOR VALIDACIÓN DE RENDIMIENTO (ENTRENAMIENTO #5)	109
FIGURA C.2: ESTADO DE ENTRENAMIENTO (ENTRENAMIENTO #5).....	109

Índice de tablas

TABLA 2.1: GASES DE FALLAS PRESENTES EN UN TRANSFORMADOR. FUENTE: [13]	25
TABLA 2.2: COEFICIENTES DE OSTWALD. FUENTE: [1]	28
TABLA 2.3: PROCEDIMIENTOS DE OPERACIÓN BASADAS EN TCG Y TASA DE TCG. FUENTE: [1]	28
TABLA 2.4: MÉTODOS DE INTERPRETACIÓN APLICADOS EN EL TIEMPO. FUENTE: EL AUTOR	30
TABLA 2.5: RESUMEN DEL MÉTODO GAS MÁS IMPORTANTE. FUENTE: [25]	34
TABLA 2.6: RELACIONES Y RANGOS DE VALORES UTILIZADOS EN EL MÉTODO DE ROGERS. FUENTE: EL AUTOR	35
TABLA 2.7: DIAGNOSTICO SEGÚN EL MÉTODO DE ROGERS. FUENTE: EL AUTOR	35
TABLA 2.8: RELACIONES PARA GASES CLAVES SEGÚN DORNENBURG. FUENTE: [1]	36
TABLA 2.9: ÁREAS DE FALLAS DEL TRIÁNGULO 1 DE DUVAL. FUENTE: [1]	38
TABLA 2.10: LÍMITES DE LA ZONA DE FALLA PARA EL TRIÁNGULO 4. FUENTE: [1]	39
TABLA 2.11. LÍMITES DE LA ZONA DE FALLA PARA EL TRIÁNGULO 5. FUENTE: [1]	40
TABLA 4.1: DATOS OBTENIDOS DE [5] PARA ENTRENAMIENTO. FUENTE: [5]	56
TABLA 4.2: DATOS OBTENIDOS DE [34] PARA ENTRENAMIENTO. FUENTE: [34]	57
TABLA 4.3: DATOS RECOPIADOS DE [29] PARA ENTRENAMIENTO. FUENTE: [29]	58
TABLA 4.4: DATOS OBTENIDOS DE [30] PARA ENTRENAMIENTO. FUENTE: [30]	58
TABLA 4.5: DATOS TOMADOS DE [23] PARA PRUEBAS. FUENTE: [23]	59
TABLA 4.6: DATOS TOMADOS DE [5] PARA PRUEBAS. FUENTE: [5]	60
TABLA 4.7: DATOS NORMALIZADOS TOMADOS DE [5]. FUENTE: EL AUTOR	61

TABLA 4.8: DATOS NORMALIZADOS OBTENIDOS DE [23]. FUENTE: EL AUTOR ..	62
TABLA 4.10. CLASES PRONOSTICADAS MEDIANTE RNA	67
TABLA 4.11. COMPARACIÓN DE METODOLOGÍAS PARA DIAGNÓSTICO DE FALLOS. FUENTE: EL AUTOR	68
TABLA A.1: DATOS DE ENTRENAMIENTOS PARA LA BASE DE DATOS #1	84
TABLA A.2: DATOS DE ENTRENAMIENTOS PARA LA BASE DE DATOS #12	85
TABLA A.3: DATOS DE ENTRENAMIENTOS PARA LA BASE DE DATOS #3	86
TABLA A.4: DATOS DE ENTRENAMIENTOS PARA LA BASE DE DATOS #4	87
TABLA A.5: DATOS INGRESADOS PARA PRUEBA #1	88
TABLA A.6: DATOS INGRESADOS PARA PRUEBA #2.....	89
TABLA A.7: DATOS DE ENTRENAMIENTO NORMALIZADOS #1	89
TABLA A.8: DATOS DE ENTRENAMIENTO NORMALIZADOS #2	90
TABLA A.9: DATOS DE ENTRENAMIENTO NORMALIZADOS #3	91
TABLA A.10: DATOS DE ENTRENAMIENTO NORMALIZADOS #4	92
TABLA A.11: DATOS DE PRUEBA NORMALIZADOS #1.....	93
TABLA A.12: DATOS DE PRUEBA NORMALIZADOS #2.....	94
TABLA A.13: BASE DE DATOS PARA EL ENTRENAMIENTO DE LAS RNA	94
TABLA A.14: BASE DE DATOS NORMALIZADOS PARA EL ENTRENAMIENTO DE LAS RNA	97
TABLA A.15: BASE DE DATOS PARA PROBAR LOS MÉTODOS DE ROGERS, DORNENBURG Y RNA	100
TABLA A.16: BASE DE DATOS NORMALIZADOS PARA PROBAR LOS MÉTODOS DE ROGERS, DORNENBURG Y RNA	101
TABLA B.1: RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE EL MÉTODO DE ROGERS	104
TABLA B.2: RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE EL MÉTODO DE DORNENBURG	105
TABLA B.3: RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE RNA	106
TABLA D.1: CANTIDAD DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA DISTRIBUIDOS POR EMPRESA UBICADOS EN SUBESTACIONES DE LAS CENTRALES DE GENERACIÓN. FUENTE: AUTOR.	111
TABLA D.2: CANTIDAD DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA DISTRIBUIDOS POR EMPRESAS UBICADOS EN CASA DE MÁQUINAS DE LAS CENTRALES DE GENERACIÓN. FUENTE: AUTOR	111

TABLA D.3: CANTIDAD DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA DISTRIBUIDOS
POR EMPRESAS UBICADOS EN CASA DE MÁQUINAS Y SUBESTACIONES DE LAS
CENTRALES DE AUTOGENERACIÓN. FUENTE: AUTOR 112

TABLA D.4: NÚMERO DE TRASFOMADORES DE POTENCIA LIGADOS A LA
GENERACIÓN EN ECUADOR. FUENTE: AUTOR..... 113

Resumen

Los transformadores de potencia tienen condiciones particulares de diseño que están en función de muchos factores, a continuación, se citan los más relevantes: factores de condiciones ambientales en el lugar de instalación, régimen de carga, factores de desclasificación, factor de derrateo a diferentes alturas, grado de salinidad, etc. Con respecto a su uso, se mencionan los siguientes factores determinantes: transformadores ligados a los generadores para centrales hídricas, térmicas o eólicas, transformadores para subestaciones elevadoras de transmisión, subestaciones de reducción de empresas distribuidoras o transformadores de auto generadores (hídricos, térmicos, biomasa, etc.). Consecuentemente, se hace necesario aplicar distintas técnicas de mantenimiento dependiendo de las condiciones expuestas. Bajo este contexto, el propósito de este proyecto de desarrollo es aplicar una técnica no estándar basada en Redes Neuronales Artificiales (RNA) para la interpretación de los diferentes niveles de gases que contiene el aceite dieléctrico (solo de origen mineral), obtenidos de Análisis de Gases Disueltos (AGD) en transformadores de potencia de centrales de generación (a excepción de las centrales eólicas), de tal forma que sirva para verificación y comparación respecto a los métodos estandarizados, contribuyendo en las decisiones que se tomen en los programas de mantenimiento que se implementen a los transformador de potencia.

Palabras clave – Transformadores de potencia, Análisis de gases disueltos; Redes Neuronales Artificiales.

Abstract

Power transformers have particular design conditions that are a function of many factors, from their location and use we can cite the following: factors of environmental conditions at the place of installation, load regime, derating factors due to altitude, degree of salinity, etc. and regarding their use such as: Transformers linked to generators for hydro, thermal or wind power plants, transformers for step-up transmission substations, step-down distribution substations or transformers for auto generators (hydro, thermal, biomass, etc.). Consequently, it is necessary to apply different maintenance techniques depending on the previously mentioned conditions. In this context, the purpose of this project is to apply a non-standard technique based on Artificial Neural Networks (ANN) for the interpretation of the different levels of gases contained in the dielectric oil (only of mineral origin) obtained from Dissolved Gas Analysis (DGA) in power transformers of generation plants (with the exception of wind power plants) in such a way that it serves for verification and comparison with respect to standardized methods, and enhances decision making for the maintenance plans to be implemented for a power transformer.

Keywords - Power transformers, Dissolved gas analysis; Artificial neural networks.

Capítulo 1

Introducción

El transformador eléctrico de potencia es la segunda máquina más importante en una central de generación y es el principal elemento de una subestación eléctrica, tanto por su funcionalidad como por su operación permanente. Las condiciones de este equipo deben ser las mejores para ofrecerle al sistema la confiabilidad y continuidad máxima que el usuario final requiere. Un estado defectuoso no detectado a tiempo podría ocasionar pérdidas significativas al sistema eléctrico. Considerando además que, por sus altos costos, generalmente no es económicamente factible contar con un equipo de respaldo. Por esta razón, es importante implementar técnicas para monitorear la condición o estado de los transformadores de potencia de centrales de generación con el fin de tomar decisiones oportunas para evitar posibles averías que afecten a la continuidad del servicio. Sin embargo, la efectividad de las decisiones a tomar, dependerán de la precisión y confiabilidad de los resultados de las técnicas de monitoreo aplicadas y de la experiencia del personal técnico de la organización de mantenimiento.

Por lo general, todos los transformadores sumergidos en aceite mineral son generadores de gases tipo hidrocarburos, hidrógenos, u óxidos de carbono. Pero hasta cierto punto, evaluar esas concentraciones de gases en ppm (partes por millón) requiere un proceso confiable para determinar las cantidades inmersas en el mineral, y continuar al siguiente paso correspondiente a la interpretación de esas cantidades.

La IEEE [1] a lo largo de muchos años ha implementado una guía para la interpretación de gases generados en transformadores sumergidos en aceite mineral en operación normal o con fallas. Esto ha permitido definir una base empírica para evaluar a determinados transformadores. Se podría decir que al igual que un médico evalúa cierta condición de una persona a través de un examen de sangre, el cual ofrece información para su diagnóstico, un equipo de mantenimiento en una central de generación puede evaluar la condición de un equipo transformador a través de los resultados del AGD que se le realice.

Seguramente para realizar este diagnóstico se deberán aplicar los métodos convencionales descritos en la guía IEEE C57.104:2019. No obstante, surge la interrogante sobre ¿Los resultados de interpretación que ofrecen estas recomendaciones son totalmente confiables, o no?

En este trabajo se presenta una alternativa no estandarizada que es un aporte a la solución de la interpretación de los resultados del AGD aplicado a transformadores de potencia sumergidos en aceite mineral, presentando una comparativa entre las técnicas establecidas por la IEEE y una nueva técnica aplicando redes neuronales artificiales RNA.

1.1 Antecedentes

Diagnosticar el estado de un transformador de potencia es una tarea compleja por dos razones importantes:

1. No puede ser abierto para revisar el estado de sus componentes.
2. Su operación es permanente.

La primera de las razones es producto de varios factores que dificultan la realización de inspecciones visuales: se requiere de alta indisponibilidad, el proceso de vaciado, el traslado del aceite a otros contenedores, la exposición de la parte activa a la humedad atmosférica y otros contaminantes, el proceso de termo-vacío necesario para evitar el ingreso de humedad a través del aceite retirado temporalmente, etc.

La segunda razón es debida a que en los sistemas de generación y transmisión se requiere de una operación continua (24/7), lo que dificulta encontrar periodos en los que sea posible declarar su indisponibilidad para ser intervenidos.

Como alternativa, están disponibles varias herramientas basadas en la lectura de las concentraciones de gases que se generan y mezclan en el aceite. Existen equipos capaces de realizar monitoreos en línea de los gases disueltos en el aceite, desde aquellos de bajo costo que, solo pueden leer pocos gases (instalados en algunas centrales de generación del país), hasta aquellos que pueden monitorear en línea 5 o más gases. La ventaja de estas herramientas es que no requieren interrumpir el funcionamiento de los transformadores, además no se corre el riesgo de ingreso de aire cuando se extraen muestras por las válvulas para muestreo de aceite.

Por los altos costos que conlleva instalar un equipo monitor de gases en línea, el personal de mantenimiento suele optar por realizar análisis de gases disueltos en laboratorios o a su vez mediante equipos portátiles que cumplan con las respectivas normas y estándares. La IEEE C57.104 2019 recomienda

que las frecuencias de análisis de gases disueltos se realicen de manera mensual, trimestral o anual, para obtener la mayor base de datos posible que permita calcular la tasa de cambio por gas en función del tiempo.

Por otra parte, una vez obtenido los datos del AGD, se comienza con la etapa de interpretación de los resultados obtenidos para evaluar la condición del transformador. Bajo este contexto, la IEEE recomienda varios métodos de interpretación como: el método de Rogers, el triángulo de Duval (1, 4 y 5), el método de Dornenburg, el gas clave y el pentágono de Duval (1 y 2). Estos métodos se denominan convencionales, y basan sus resultados utilizando gráficos y relaciones numéricas, lo cual puede ocasionar un margen de error elevado y en ocasiones resultados indeterminados. En consecuencia, estos métodos pueden inducir interpretaciones erróneas o con gran incertidumbre.

Existen muchas investigaciones relacionadas con el AGD y la interpretación de estados o fallas incipientes en los transformadores de potencia que obtienen sus resultados aplicando algoritmos de aprendizaje supervisado, tales como las redes neuronales o las máquinas de soporte vectorial, donde se expresan resultados con un error relativo menor al de los métodos tradicionales que recomienda la IEEE para la interpretación del AGD. Se puede encontrar más información en los documentos [2], [3], [4], [5] y [6].

1.2 Descripción general del problema

En los planes de mantenimientos de los transformadores de potencia de centrales de generación (subestaciones y cuartos), se deben tomar decisiones que conlleven siempre al buen funcionamiento del equipo, evitando daños futuros y por tanto paradas de larga duración, para evitar así pérdidas económicas significativas. La toma de acciones que requieran la parada o no del transformador dependerá de su estado, el mismo que puede ser interpretado a través de análisis visuales o eléctricos (termografías, medida de parámetros eléctricos y mecánicos). Sin embargo, es posible realizar un diagnóstico más preciso a través del estado de su papel aislante y de la parte activa del equipo, mediante análisis físico-químicos y de gases disueltos en el aceite.

El AGD entrega información valiosa del contenido de gases de falla clave, que luego es ingresada a un ordenador o software, utilizando las técnicas estándares para su interpretación. Si el AGD es realizado en un laboratorio o a través de un equipo portátil, las muestras del aceite son tomadas por personal capacitado. No todas las centrales de generación tienen monitores de gases en línea, debido a sus altos costos. El análisis de todas estas muestras, ya sea a través de equipos de monitoreo en línea, como a través de laboratorios pueden resultar en criterios distintos que crean incertidumbre en la interpretación, lo cual podría ocasionar la toma de decisiones inefectivas de mantenimiento

preventivos o correctivos. Ante esta problemática, puede surgir la necesidad de realizar otro análisis para interpretar los resultados del AGD, que permita confirmar el del transformador. Resulta muy conveniente aplicar este método mediante redes neuronales artificiales RNA, porque ofrece un sistema de entrenamiento basado en resultados sometido a comprobaciones reales, con esto aumenta el grado de certidumbre en la toma de decisiones para los planes de mantenimiento de las empresas generadoras.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Mejorar la toma de decisiones para la definición de planes de mantenimiento eficaces y eficientes para los transformadores de potencia sumergidos en aceite mineral en centrales de generación de electricidad mediante la interpretación del AGD utilizando RNA.

1.3.2 Objetivos específicos

- Implementar una base de datos de AGD realizados en transformadores de potencia de centrales de generación sometidos a comprobaciones de estados.
- Emplear Redes Neuronales Artificiales para el entrenamiento y simulación con la base datos implementada para interpretar la condición en transformadores de potencia de centrales de generación de electricidad.
- Realizar un análisis con datos de AGD de transformadores de potencia de centrales de generación de electricidad para establecer un diagnóstico en base a comparaciones entre los métodos convencionales y redes neuronales.

1.4 Contribuciones

A partir de este trabajo se promueve una mejora en la toma de decisiones de la planificación de los planes de mantenimiento de transformadores de potencia de centrales de generación, por medio del análisis y posterior interpretación de los resultados históricos del contenido de gases en el aceite.

1.5 Organización del manuscrito

El manuscrito de este trabajo ha sido organizado como sigue:

El capítulo 1 presenta la descripción del problema y objetivos de este trabajo.

En el capítulo 2 se discuten las características de los aceites minerales de los transformadores de potencia en conjunto con la técnica de muestreo para AGD y sus interpretaciones estándar.

El capítulo 3 describe y formula el problema y la posible solución a través de las RNA, aplicada al proceso de interpretación de gases disueltos en el aceite.

En el capítulo 4 se plantean y discuten los indicadores y se realiza el análisis de los resultados, mediante comparativa entre los métodos expuestos.

En el capítulo 5 se desarrollan las conclusiones obtenidas a partir de la investigación realizada.

Capítulo 2

Marco teórico referencial

2.1 Introducción

En este capítulo se describe el estado del arte de los mecanismos que influyen en la degradación del aceite aislante en transformadores de potencia, así como los métodos que permiten interpretar el contenido de gases en el aceite.

2.2 Fundamentación teórica

2.2.1 Transformador de Potencia

El uso de las unidades de transformación de potencia se incrementa en el tiempo con el incremento de la demanda de energía eléctrica, y el número de centrales de generación de electricidad. Los transformadores de potencia constituyen un equipo de gran importancia para los sistemas eléctricos. La norma ecuatoriana NTE INEN 2110-1 (2013) define a los transformadores de potencia como el equipo intermediario encargado de transferir energía eléctrica desde las centrales de generación hasta los puntos de distribución. Por lo general son considerados transformadores de potencia aquellos equipos fabricados con una potencia aparente superior a 500 kVA (0,5 MVA) y más de 34,5 kV [7]. En caso de que un transformador falle y requiera ser intervenido, ocasionaría grandes pérdidas económicas.

2.2.2 Vida útil del transformador

Tomando como referencia la vida útil de un transformador señalada por el fabricante, ésta puede prolongarse varios años más, dependiendo de varios

factores eléctricos, mecánicos y ambientales a los que esté sometido el transformador.

Generalmente los transformadores son equipos eléctricos confiables y robustos, llegando a alcanzar una vida útil superior a 35 años, con un promedio mínimo de 20,5 años.

2.2.3 Aceite aislante

El aceite mineral utilizado en los transformadores es un derivado del petróleo que resulta de un proceso de destilación. Su estructura básicamente es de hidrocarburos, los cuales se pueden clasificar en: los nafténicos, los parafínicos y los aromáticos o hidrocarbonatos insaturados de cadena cerrada [8].

No existen aceites de una sola clasificación nafténicos; por lo contrario, todos resultan de una mezcla de los tres, pero por estudios se clasifican por la predominancia de uno de ellos.

Se puede mencionar que hay tres funciones principales que el aceite mineral aislante realiza en un transformador y estas son: aislar, refrigerar y proteger el papel Kraft. Adicionalmente, el aceite es uno de los medios que puede utilizarse para evaluar las condiciones internas del mismo.

2.2.4 Composición química de los aceites minerales de base Nafténicos

El aceite aislante de bases naturales del petróleo es resultante de mezclas entre moléculas de 16 y 22 átomos de carbono, de hidrocarburos isoparafínicos, hidrocarburos nafténicos e hidrocarburos aromáticos. Su principio es la destilación y se puede distinguir del resto de aceites (sintéticos o ésteres) por su gran nivel de rigidez dieléctrica y su bajo costo. Todos los aceites ofrecen aislar los componentes de su parte activa, refrigerar sus componentes internos, proteger sus componentes, excelente viscosidad, fluidez a temperatura baja y buena estabilidad de oxidación.

Cuando en algún momento el aceite pierda una o varias de sus características, la unidad deberá ser parada e intervenirla inmediatamente previa planificación.

2.2.5 Degradación del aceite dieléctrico

Cuando el transformador funciona en condiciones normales y temperaturas nominales, su aceite aislante entra en proceso de degradación

debido a la oxidación. Este efecto puede ser causado por agentes tales como: radiación solar, sobrecargas, sobretensiones transitorias o permanentes, temperatura, humedad, deterioro de los barnices, celulosa, partículas de cobre y materiales metálicos de la cuba.

2.2.6 Factores básicos del deterioro del aceite aislante: El oxígeno (O₂)

El O₂ está inmerso en el aceite del transformador en operación porque:

- Basta tener un 0,25% de O₂ para entrar en oxidación
- Este gas es soluble en el aceite dieléctrico
- El papel emite O₂ cuando empieza a degradarse

2.2.7 Factores básicos del deterioro del aceite aislante: Catalizadores

Los catalizadores más representativos en el aceite son:

- Cobre
- Hierro

2.2.8 Presencia de lodo en el aceite

Se puede decir que la presencia de lodo en el transformador es un indicador relativamente significativo de que hay una alta degradación que origina:

- Pérdidas en el aislamiento
- Pérdida en la capacidad de sobrecarga
- Aumentos de temperatura en la operación.

2.2.9 Vida útil de un aceite aislante

Las experiencias de mantenimientos en campo de los transformadores de potencia sumergidos en aceite demuestran que la vida útil del material se puede evaluar mediante la prueba estándar del número de neutralización e indicador de color según la norma ASTM D-974 [9], como también a través de la medida de la tensión interfacial según la prueba ASTM D-971 [10].

2.2.10 Papel aislante

Este elemento que se utiliza en los transformadores eléctricos es resultante del proceso Kraft aplicado a la madera. Su componente mayoritario es la celulosa (cerca del 90%), en menor proporción están la lignina (7%) y la hemicelulosa (3%) [11].

Cuatro son las funciones básicas que cumple el papel aislante en un transformador y estas son:

1. Resistencia dieléctrica
2. Resistencia mecánica
3. Resistencia térmica
4. Capacidad de mantener sus características por largo tiempo

2.2.11 Degradación del aceite

El aceite de los transformadores eléctricos está sometido a constantes esfuerzos y calentamiento. Incluso cuando el transformador opera a sus valores nominales, sus propiedades químicas, físicas y eléctricas se verán alteradas por cambios de temperatura, niveles de oxígeno, degradación en partes metálicas (cuba) y por los esfuerzos eléctricos. Esto ocasiona el deterioro del papel y la formación de lodos [11].

2.2.12 Degradación del papel

El papel contenido en los arrollamientos del transformador es afectado por el envejecimiento del mismo. Existe un parámetro que mide la resistencia mecánica del aislamiento (papel) denominado grado de polimerización (GP) o (DP) el cual constituye un indicador clave para la toma de decisiones de mantenimiento.

Por otra parte, la relación dióxido – monóxido de carbono CO_2/CO es un indicador útil para determinar la degradación del papel. Se usa como un índice de descomposición de la celulosa y su relación normal oscila entre 3 y 10. Un valor fuera de este rango es un indicador de problemas en el papel aislante. La literatura recomienda un análisis de furanos cuando crece la relación CO_2/CO debido a que estos son los principales productos que degradan al papel.

2.2.13 Vida útil del aislamiento

Para aumentar los años de vida de un transformador en función del cuidado de su aislamiento se deberá considerar la disminución de los agentes mostrados en la Fig. 2.1.

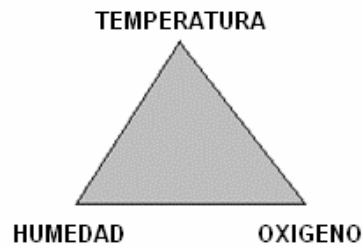


Figura 2.1: Agentes que influyen en la vida útil del aislante. Fuente: Autor

Al tomar las acciones preventivas necesarias para cuidar el aislamiento del transformador, se disminuye los requerimientos de mantenimiento correctivo y se extiende la vida útil del transformador, generando ahorros para la empresa a través de: el incremento de la disponibilidad y confiabilidad, la disminución de los costos de mantenimiento y el diferimiento de la necesidad de nuevas inversiones de capital (compra de un nuevo transformador).

Los tres fenómenos ligados fuertemente a la degradación del líquido aislante y el papel en un transformador son:

- Hidrólisis
- Oxidación
- Pirólisis

2.2.14 Estados del AGD

Los estados del análisis de gases disueltos en el aceite están categorizados según [1] en tres:

- Estado 1: Normal. Niveles de gases bajos por tanto no se recomiendan acciones.
- Estado 2: Posiblemente sospechoso. Niveles de gases intermedios indicando posibles fallas de descargas parciales, fallas térmicas menores a 300 °C. Se recomienda aumentar la frecuencia de muestreo y/o monitorearse en línea.

- Estado 3: Posiblemente sospechoso. Niveles de gases altos indicando posibles fallas. Se recomienda mayor seguimiento y pruebas adicionales en paralelo consultar con el fabricante el resultado.

En la gráfica 2.2 se muestra la relación que existe entre las distintas tasas de concentración de gases en porcentaje, en función del aumento de temperatura determinada por su tipo de falla. Esta gráfica es proporcionada por la IEEE en su guía para la interpretación de fallas del año 2019 [1], desarrollada sobre la base de una recopilación histórica de cientos de miles de transformadores de distintas partes del mundo con un diagnóstico comprobado.

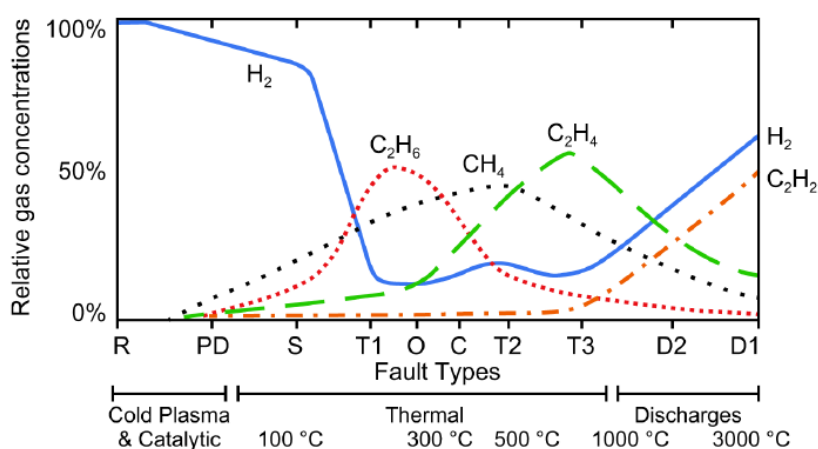


Figura 2.2: Porcentaje relativo de concentraciones de gas disuelto en aceite mineral en función de la temperatura y el tipo de falla. Fuente: [1]

Donde cada sigla corresponde a un diferente tipo de estado:

R: Reacciones catalíticas

PD: Descargas parciales

S: Gasificación perdida

T1, T2 y T3: Fallas térmicas

O: Sobrecalentamiento del papel o aceite mineral

C: Posible carbonización del papel

D1: Descargas de baja energía

D2: Descargas de alta energía

2.2.15 Los seis tipos de fallas básicos identificados por el AGD

En base a la Fig. 2.2 se mencionan 6 tipos de fallas:

1. Descargas parciales (PD) por efecto corona, provocado por la descomposición del papel.

2. Descargas de baja energía (D1), presentes en el aceite y papel, la literatura menciona la perforación y carbonización del papel como un indicador de este tipo de falla. Se producen descargas parciales tipo chisporroteo, que producen partículas de carbón que se impregnan en el aceite.

3. Descargas de alta energía (D2), presentes en el aceite y papel, resultando en la destrucción y carbonización del papel. Esto puede ocasionar paradas involuntarias.

4. Fallas térmicas, presentes en el aceite y papel a temperaturas $<300^{\circ}\text{C}$, si el papel se ha vuelto marrón (**T1**).

5. Fallas térmicas $>300^{\circ}\text{C}$ siempre que se haya carbonizado el papel (**T2**).

6. Fallas térmicas de temperatura $>700^{\circ}\text{C}$ (**T3**) aceite mineral en carbonización, decoloración del metal (800°C) o fusión del metal ($>1000^{\circ}\text{C}$).

En el contexto anterior, se pueden citar cinco tipos de fallas adicionales, denominadas sub-fallas, las cuales son más específicas y se pueden obtener mediante el pentágono 2 de Duval como se muestra en el apartado 2.1.7.7:

7. Stray Gases (gases primarios) se forman a temperaturas $<200^{\circ}\text{C}$, presuntamente por la incompatibilidad entre los materiales.

8. Sobre calentamiento (O) a temperaturas $<250^{\circ}\text{C}$ resultando afectados el aceite y papel.

9. Posible carbonización del papel (C).

10. Fallas térmicas (T3) Solamente se refleja en el aceite y no en el papel.

Relaciones catalíticas (R) entre agua y acero galvanizado en válvulas de muestreo de aceite de transformadores o con acero del tanque (óxido), las fallas R son poco frecuentes.

Los gases primarios se producen por calentamiento a temperaturas oscilantes de entre 90°C y 200°C .

Los aceites inhibidos típicamente producen menos “Stray gases” que los no inhibidos (IEC 60296 nota A).

El gas más relevante en un mantenimiento es usualmente el H₂ [12].

A continuación, se describen los gases de falla que pueden ser detectados en un transformador [13]:

- a) Por parte de los hidrocarburos
 - CH₄: Metano
 - C₂H₆: Etano
 - C₂H₄: Etileno
 - C₂H₂: Acetileno
 - H₂: Hidrogeno
- b) Por parte de los óxidos de carbono
 - CO
 - (CO₂)
- c) Gases que no son de falla
 - (N₂)
 - (O₂)

La Tabla 2.1 muestra los materiales asociados al tipo de falla diagnosticado y sus gases representativos.

Tabla 2.1: Gases de fallas presentes en un transformador. Fuente: [13]

Material asociado	Tipo de Falla	Gases presentes
Aceite	Descargas parciales	H ₂
	Calentamiento térmico a Baja temperaturas	CH ₄ C ₂ H ₆
	Calentamiento térmico a altas temperaturas	C ₂ H ₄ C ₂ H ₆
Celulosa	Descargas parciales	H ₂ CO CO ₂
	Calentamiento térmico a baja temperaturas	CO ₂ (CO)
	Calentamiento térmico a altas temperaturas	CO (CO ₂)
N.A.	Arco Eléctrico	H ₂ C ₂ H ₂ (CH ₄ C ₂ H ₆ C ₂ H ₄)

2.2.16 Contexto de muestro para el AGD

La interpretación de los datos del AGD debe realizarse teniendo en cuenta el propósito del muestreo, siendo así se pueden citar los más comunes:

- Muestra de inicio: Se utiliza en transformadores nuevos, reparados o sometidos a modificaciones o en un transformador que no se ha realizado antes un AGD. Los resultados de estas muestras sirven de referencia para compararlos con datos posteriores.
- Muestra periódica: Se recopila a intervalos de tiempos regulares, como, por ejemplo: semestrales o anuales. Sirve para monitorear el estado de un transformador, y tomar acciones oportunamente en caso de encontrarse novedades.
- Muestreo de vigilancia: Recopilación de datos a intervalos más cortos. Permite seccionar una falla sospechosa en un transformador sometido a circunstancias de alto riesgo.
- Muestreo de monitoreo constante: Se aplica a transformadores críticos y de mayores costos a través de un monitor en línea, tomando una o más muestras diarias.
- Muestra de investigación de incidentes: es aquella que se toma después de un incidente, como por ejemplo el disparo de un relé de gas, falla cercana, etc. Esto se realiza para investigar si el transformador ha sido averiado.
- Muestra de garantía de calidad: Es una muestra con el propósito de evaluar la precisión, repetibilidad o reproducibilidad.
- Muestra de verificación: Se extrae de un transformador y se envía para análisis y comparación con los resultados del AGD anómalos de una muestra reciente del mismo transformador.

2.2.17 Procedimiento para obtener muestras del transformador para análisis de laboratorio

El proceso para la detección de gases de falla comienza por la extracción de una muestra de aceite siguiendo las recomendaciones de ASTM D923, donde se indica que el procedimiento de muestreo debe garantizar siempre que las muestras se obtengan de forma segura, sin comprometer el nivel de aceite, evitando contaminar la muestra con aire e impidiendo que ingrese aire en el transformador.

En ciertas condiciones de fallas, algunas fracciones del aceite pueden contener gases disueltos en concentraciones más altas durante un periodo de tiempo en el día, antes de que se produzca la mezcla completa con la mayor parte del líquido aislante. Por esta razón, las muestras deben obtenerse en varios puntos del transformador y para asegurarse se debe también obtener una muestra al día siguiente.

El personal de mantenimiento encargado de la extracción de la muestra de aceite debe estar capacitado y debe ser una política del AGD. Por otra parte, el personal deberá llenar un formulario que se adjunta con las muestras para

evitar confusiones y errores, especialmente cuando se disponen muestras de varios transformadores de la misma central de generación.

Una nota muy importante que la IEEE señala es que no se debe extraer ninguna muestra si se sospecha de presión negativa en el transformador [10].

Se debe siempre purgar la válvula de muestreo para evitar la entrada de aire y ayudar a garantizar una muestra de calidad. Para purgar adecuadamente, el sistema de muestreo debe estar a presión atmosférica cuando la válvula del transformador se abre inicialmente, para permitir que escape el aire atrapado. La muestra debe obtenerse cuando se haya purgado todo el aire atrapado, así como del líquido aislante estancado en la válvula.

2.2.18 Datos adicionales que deben registrarse en el muestreo para AGD

Para obtener un registro de calidad a parte de la obtención de la muestra, se debe ingresar los siguientes datos:

- Número de serie del transformador
- Datos geográficos donde está instalado transformador
- Motivo por la cual se realiza la toma de muestra
- Nivel de tensión kV y potencia MVA
- Tipo de enfriamiento
- Tipo de líquido aislante
- Fabricante del transformador
- Año de fabricación
- Tipo de servicio (Generación, transmisión, etc.)

Todos estos registros sirven para una mejor gestión del mantenimiento programado en las centrales de generación.

2.2.19 Muestra totales de gases combustibles (TCG)

De acuerdo con IEEE Std C57.104-2019, quedan eliminadas las interpretaciones TCG y TDCG y sus respectivas tablas asociadas. Sin embargo, para tener una visión de su funcionalidad se muestran en la Tabla 2.2 las condiciones y sus procedimientos de estado.

El equivalente de gas disuelto del TCGe se obtiene utilizando la expresión siguiente:

$$TCG_e = \sum_{C_1}^{C_n} \left| \frac{\frac{F_C}{B_C}}{\sum_{G_1}^{G_n} \frac{F_g}{B_g}} \right| \times 100 \tag{2.1}$$

Donde:

TCG_e : es la estimación del porcentaje de gas combustible

C_n : es el número de gas combustible disuelto en el aceite

G_n : es el número de gas disuelto en el aceite (combustible y no combustible)

F_C : es la concentración expresada en $\mu\text{L/L}$ (ppm) de gas combustible disuelto en aceite

B_C : es el coeficiente de solubilidad de Ostwald del gas combustible

F_g : es la concentración de un gas particular disuelto en aceite

B_g : es el coeficiente de solubilidad de Ostwald de un gas particular

Tabla 2.2: Coeficientes de Ostwald. Fuente: [1]

Gas	Coefficiente Ostwald (B) (25°C)
H ₂	0,0429
O ₂	0,138
CO ₂	0,900
C ₂ H ₂	0,938
C ₂ H ₄	1,35
N ₂	0,0745
CO	0,102
C ₂ H ₆	1,99
CH ₄	0,337

Tabla 2.3: Procedimientos de operación basadas en TCG y tasa de TCG.

Fuente: [1]

	Niveles de TCG (%)	Tasa de TCG (% / Día)	Intervalos de muestreo y procedimientos operativos para tasas de generación de gas	
			Intervalo de muestreo	Procedimientos de operación
	<0.5	>0.03	Mensual	Tenga cuidado.

Condición 1				Analice uno a uno los gases. Determine la aparición de la carga.
		0.01 – 0.03	Trimestral	Continuar con el funcionamiento normal.
		<0.1	Anual	
Condición 2	<2 a ≥ 0.5	<0.03	Mensual	Tenga cuidado.
	>-0.5 a <2	0.03 – 0.01	Mensual	Analice los gases individuales.
	<2	<0.01	Trimestral	Determine la dependencia de la carga.
Condición 3	<5 a ≥ 2	>0.03	Semanal	Tenga mucho cuidado.
	>-2 a <5	0.01 – 0.03	Semanal	Analice los gases individuales.
	<2	<0.01	Mensual	Planificar interrupción. Informar al fabricante.
Condición 4	≥ 5	>0.03	Diario	Considere la posibilidad de retirarlo del servicio.
		0.01 – 0.03	Diario	Informar al fabricante.
		<0.01	Semanal	Tenga mucho cuidado. Analice los gases individuales. Planifique la interrupción. Informar al fabricante.

2.2.20 Análisis de Gases Disueltos AGD

El AGD es un método estándar para la detección de gases en transformadores sumergidos en aceite y, su principio es la cromatografía previa a la extracción de gases en el aceite. Para realizarlo se siguen los procedimientos del estándar ASTM D 3612 [14], donde se detallan los tres métodos de laboratorio aplicables.

Este método se ha venido utilizando desde los años 60 – 70. Gracias al avance tecnológico esta técnica se ha mejorado y en la actualidad se cuentan con dispositivos portátiles y monitores en líneas para detectar gases de fallas en los dispositivos de potencia y en especial en los transformadores. Más

específicamente, el AGD tiene como objetivo proporcionar un método confiable y económico para detectar fallas, los cuales pueden representar daños a corto plazo.

Al igual que con cualquier método de decisión basado en datos sujetos a interferencias, se debe desarrollar un método para minimizar el número de falsos positivos y al mismo tiempo minimizar el número de falsos negativos, es decir fallas en la detección de anomalías reales [1].

El AGD es la herramienta de diagnóstico más utilizada en el proceso de detectar estados de un transformador o equipo de potencia sumergido en aceite. La experiencia ha demostrado que es una herramienta eficaz. Existen consideraciones a seguir previo a un AGD, tales como:

- La recolección de muestra debe realizarse antes de un mantenimiento correctivo al transformador.
- Las muestras pueden procesarse de forma incorrecta por un mal etiquetado.
- Se pueden presentar formaciones de gases inusuales que influyen en el diagnóstico y la toma de una decisión incorrecta.
- Se deben tener una base de datos de AGD que permita evaluar las tasas de cambio por cada gas generado.
- Se debe contar con un historial del equipo que revele los casos relevantes que interfieran en el correcto funcionamiento.
- Contar con un historial de otras pruebas realizadas al aceite del equipo puede servir para evaluar las condiciones y tomar una decisión posterior.

2.2.21 Métodos de interpretación

A partir de la década de los 70, se han aplicados varios métodos que evolucionaron con el pasar de los años. Algunos han sido perfeccionados sobre la base de relaciones numéricas y gráficas. En otros casos aplicando métodos estadísticos, y a partir del siglo XXI, con el desarrollo de la inteligencia artificial, se cuenta con algoritmos que se pueden aplicar en ingeniería eléctrica y del mantenimiento. En la Tabla 2.4 se presenta el historial de métodos desarrollados y aplicados hasta la actualidad:

Tabla 2.4: Métodos de interpretación aplicados en el tiempo. Fuente: El autor

Año	Autor	Aspectos relevantes
2002	Michael Duval	Presenta sus resultados con análisis en laboratorio y expone de forma gráfica su contenido [15].

2003	Sayed A. Ward	El AGD es implementado para la determinación de gases en los transformadores energizados y en servicio [16].
2005	Michael Duval, James Dukarm	Proponen mejoras en el diagnóstico que determina un estado del transformador [17].
2006	Jl. Ganesha	Se registran datos sobre fallas de alta y baja energía [18].
2008	Michael Duval	Implementa el triángulo 1, 2, 3, 4 y 5 para aceites de origen mineral, LTC, aceites sintéticos y averías de baja temperatura respectivamente [19].
2009	A. Akbari, A. Setayeshmenhr, H. Borsi, E. Gockenbach	Implementan un software diseñado bajo las técnicas de Duval que sirve de herramienta para el diagnóstico de forma gráfica para empresas e investigadores [20].
2010	E. A. Mackenzie, J. Crossey, A. de Pablo, W. Ferguson	Realizan demostraciones sobre el uso del AGD en monitores de gases en línea los cuales pueden detectar hasta un 70% de averías más frecuentes en los transformadores [21].
2011	Mohammad Golkhah, Sahar Shamshirgar Saffar y Mohammad Ali Vahidi	Se registra la implementación de una red neuronal para la interpretación de los datos del AGD [6].
2012	Huo-Ching Sun, Yann-Chang Huang, Chao-Ming Huang	Realizan las comparaciones de forma analítica de las técnicas utilizadas para la interpretación de los gases obtenidos en un AGD con los métodos de Gas clave, Dornenburg, Roger [22].
2015	Sherif Ghoneim, Ibrahim B M Taha	Implementan redes neuronales artificiales para el diagnóstico de datos del AGD y lo comparan con el método IEC, demostrando resultados iguales a la técnica estándar [23].

2.2.22 Procedimiento de interpretación del AGD

Una vez que se hayan abordado los problemas de calidad y confirmación de los datos, se puede realizar la interpretación de los datos DGA. Los resultados de DGA anteriores deben utilizarse para caracterizar incrementos y tasas. Si se encuentran resultados anormales de DGA, se debe consultar cualquier información adicional disponible, como registros de prueba y mantenimiento, datos de carga, condiciones ambientales, etc., para obtener posibles pistas sobre el origen y la naturaleza de las anomalías. La comparación de datos DGA de unidades hermana; es decir, transformadores contruidos con especificaciones similares, es útil para detectar resultados inusuales y revelar patrones comunes, que pueden proporcionar una mejor comprensión de los datos. En la Fig. 2.3. se muestra el proceso de revisión de resultados obtenidos en un AGD.

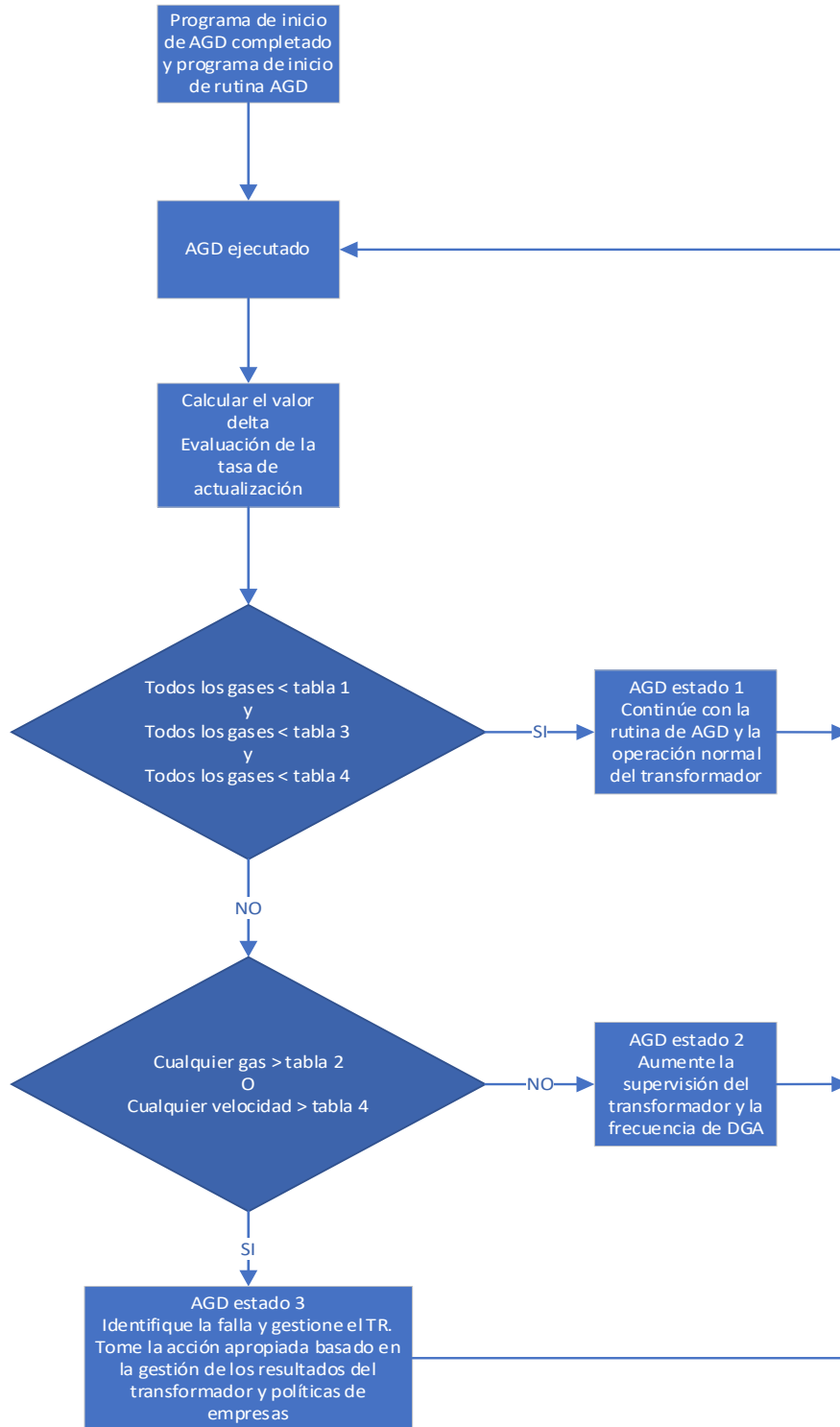


Figura 2.3: Proceso de toma de decisiones durante un AGD. Fuente: [1]

2.2.23 Método del gas más importante (Key gas method)

Este método empezó a estudiarse en el año de 1973, luego para el año de 1974 fue presentado de forma oficial por D. Pugh. [24] El *key gas method* se basa en identificar el gas presente en mayor proporción en el aceite, para luego obtener una relación porcentual e identificar una posible falla para esa cantidad contenida. Por ejemplo, un evento de descarga parcial contiene como gas más importante al hidrógeno (H_2) con bajas concentraciones de gases hidrocarburos, en la Tabla 2.5 se indica el resumen del método:

Tabla 2.5: Resumen del método gas más importante. Fuente: [25]

Gas más importante	Tipo de avería / Material	Proporciones típicas de gases combustibles generados
Etileno (C_2H_4)	Aceite mineral térmico	Predominantemente etileno con proporciones más pequeñas de etano, metano e hidrógeno. Rastros de acetileno a temperaturas de falla muy altas.
Monóxido de carbono (CO)	Aceite mineral térmico y celulosa	Predominantemente monóxido de carbono con cantidades mucho más pequeñas de gases de hidrocarburos predominantemente etileno con proporciones más pequeñas de etano, metano e hidrógeno
Hidrógeno (H_2)	Descarga parcial (DP) de baja energía	Predominantemente hidrógeno con pequeñas cantidades de metano y trazas de etileno y etano
Hidrógeno y acetileno (H_2 , C_2H_2)	Alta energía eléctrica (Arco)	Predominantemente hidrógeno y acetileno con trazas menores de metano, etileno y etano. Además, monóxido de carbono si está involucrada la celulosa.

Este método fue eliminado del estándar IEEE C57.104 2019 ya que se introdujeron nuevas tablas las cuales se elaboraron con una gran base de datos y métodos estadísticos para evaluar las condiciones de transformadores, este punto se lo explica a más detalle en secciones posteriores.

2.2.24 Método de Rogers

Rogers fundamentalmente usa las relaciones $R1 = CH_4/H_2$, $R2 = C_2H_6/CH_4$, $R3 = C_2H_4/C_2H_6$, $R4 = C_2H_2/C_2H_4$.

Tabla 2.6: Relaciones y rangos de valores utilizados en el método de Rogers.

Fuente: El autor

Relaciones	Rangos		Casos
$R1 = \frac{CH_4}{H_2}$	-	<0.1	5
	0,1<	<1	0
	1≤	<3	1
	-	≥1	2
$R2 = \frac{C_2H_6}{CH_4}$	-	<1	0
	-	≥1	1
$R3 = \frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	-	<1	0
	1≤	<3	1
	-	≥3	2
$R4 = \frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	-	<0,5	0
	0,5≤	<3	1
	-	≥3	2

Tabla 2.7: Diagnostico según el método de Rogers. Fuente: El autor

Códigos				Estados /diagnósticos
R1	R2	R3	R4	
0	0	0	0	Estado normal
5	0	0	0	Descargas parciales
5	0	0	1 y 2	Descargas parciales
0	0	2	2	Chisporroteo continuo
0	0	1 y 2	1 y 2	Arco
0	0	0	1	Descarga disruptiva
1 y 2	0	0	0	Ligero sobrecalentamiento a < 150°C
1 y 2	1	0	0	Ligero sobrecalentamiento a 150 – 200°C
0	1	0	0	Ligero sobrecalentamiento a 200 – 300°C
0	0	1	0	Sobrecalentamiento general de los conductores
1	0	1	0	Corrientes circulantes en los devanados
1	0	2	0	Sobrecalentamiento por circulación de corriente en núcleo y tanque

2.2.25 Método de Dornenburg

El método de Dornenburg utiliza la aparición de tres estados distintos, a través de los niveles de gases se calculan las relaciones 1, 2, 3 y 4, tal como se muestra en la Fig. 2.4

Figura 2.4: Diagrama de flujo del método de relación de Dornenburg. Fuente: [1]

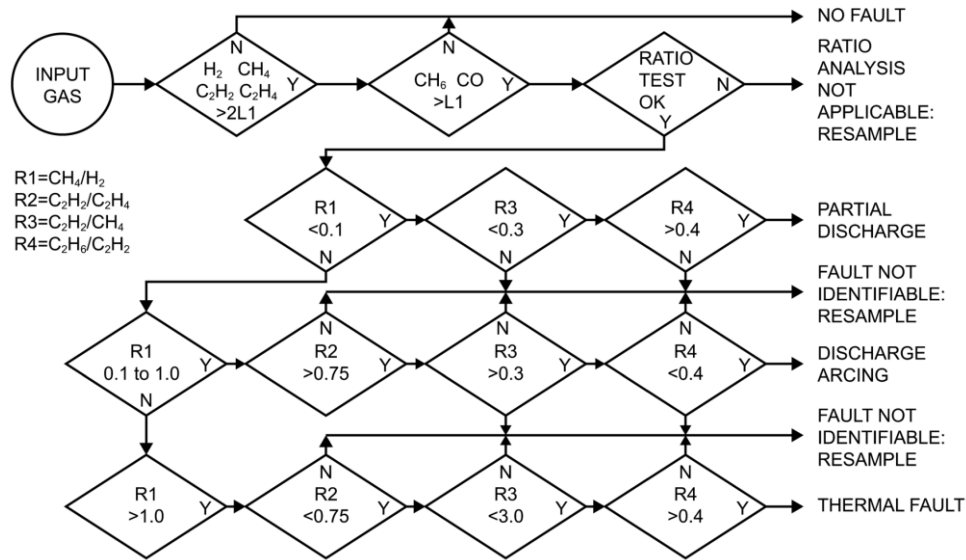


Tabla 2.8: Relaciones para gases claves según Dornenburg. Fuente: [1]

Tipo de falla (Diagnóstico)	Relación							
	$R1 = \frac{CH_4}{H_2}$		$R2 = \frac{C_2H_2}{C_2H_4}$		$R3 = \frac{C_2H_2}{CH_4}$		$R4 = \frac{C_2H_6}{C_2H_2}$	
	Aceite / Gas		Aceite / Gas		Aceite / Gas		Aceite / Gas	
1.- Descomposición térmica (punto caliente)	> 1,0	>0,1	< 0,75	<1,0	< 0,3	<0,1	>0,4	>0,2
2.- Corona (Descarga parcial baja)	<0,1	< 0,01	No relevante		<0,3	<0,1	>0,4	>0,2
3.- Arco (Descarga parcial alta)	>0,1	<1,0	>0,75	>0,1	>0,3	>0,1	<0,4	<0,2

2.2.26 Método de Duval (triángulo 1)

En la década de los 80, Michael Duval [15] implementó su teoría a través de la presencia de seis gases para clasificar estados o averías en los transformadores, donde resalta que el H₂ se mezcla más rápido que un metal.

Luego de varios años, en 2002, Duval muestra los resultados obtenidos en laboratorio del AGD de forma gráfica mediante un triángulo.

El método desarrollado por Duval propone la utilización de tres gases que representan en base a sus concentraciones un aumento del contenido de energía o temperatura tales que: Metano (CH₄) para fallas de baja energía o temperatura, etileno (C₂H₄) para fallas de alta temperatura y el acetileno (C₂H₂) para fallas de temperatura / energías muy altas / arco eléctrico. En cada lado del triángulo equilátero se grafican los porcentajes relativos de estos tres gases. En las ecuaciones 2.2, 2.3 y 2.4 se expresan las relaciones de contenido de gases en porcentaje para la obtención de los puntos que se deberán graficar en el triángulo 1 que se muestra en la Fig. 2.5.

Ecuaciones de los valores porcentuales de los gases para el triángulo 1 de Duval:

$$\%CH_4 = 100 \frac{X}{X+Y+Z} \quad (2.2)$$

$$\%C_2H_4 = 100 \frac{Y}{X+Y+Z} \quad (2.3)$$

$$\%C_2H_2 = 100 \frac{Z}{X+Y+Z} \quad (2.4)$$

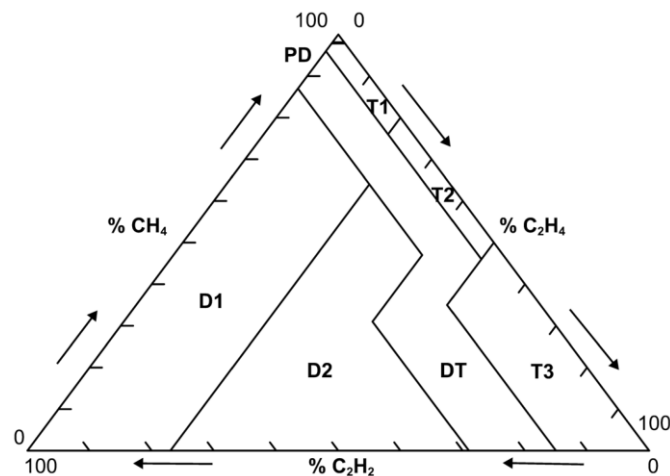


Figura 2.5: Triángulo de Duval 1. Fuente: [1]

Tabla 2.9: Áreas de fallas del triángulo 1 de Duval. Fuente: [1]

Falla	Gas (%)			
	Identificación	% CH ₄	% C ₂ H ₄	% C ₂ H ₂
PD	Descarga parcial	≥ 98	-	-
T1	Falla térmica <300°	< 98	< 20	< 4
T2	Falla térmica >300° <700°C	-	≥ 20 y < 50	< 4
T3	Falla térmica >700°C	-	≥ 50	< 15
D1	Descarga de B.E.	-	< 23	≥ 13
D2	Descarga de A.E.		≥ 23	≥ 29
			≥ 23 y < 40	≥ 13 y < 29
DT	Averías térmicas y eléctricas	-	< 50	≥ 4 y < 13
		-	≥ 40 y < 50	≥ 13 y < 29
		-	≥ 50	≥ 15 y < 29

2.2.27 Método de Duval (triángulo 4 y 5)

Los triángulos de Duval 4 y 5 se construyen y utilizan de la misma forma que el triángulo 1 pero empleando diferentes gases y zonas. El método del triángulo de Duval 4 usa H₂, CH₄ y C₂H₆ y el triángulo de Duval 5 usa CH₄, C₂H₄ y C₂H₆.

Los triángulos de Duval 4 y 5 se pueden aplicar para obtener más información sobre los subtipos de fallas térmicas descritas en 2.1.4.

Cuando se identifican fallas de baja energía o baja temperatura utilizando el triángulo de Duval 1 con PD, T1 o T2 como fallas se puede obtener más información con el triángulo de Duval 4.

Cuando se han identificado fallas de temperatura muy alta con el triángulo de Duval 1 (T1 o T3), se puede obtener más información utilizando el triángulo de Duval 5.

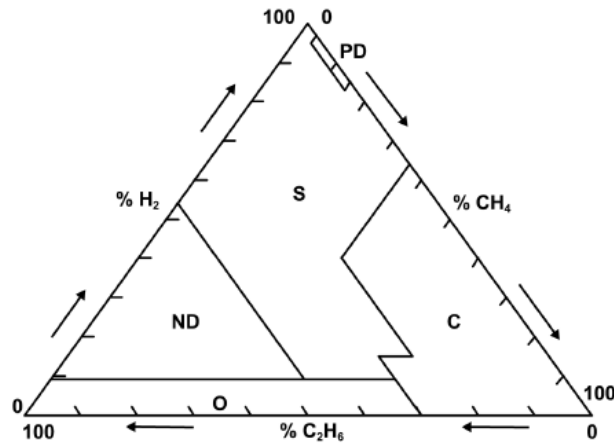


Figura 2.6: Método del triángulo de Duval 4. Fuente: [1]

Los valores numéricos para los límites de la zona de falla del método del triángulo de Duval 4 son los siguientes, expresados en %H₂, %CH₄ y %C₂H₆:

Tabla 2.10: Límites de la zona de falla para el triángulo 4. Fuente: [1]

Gas % / Falla	%H ₂	%CH ₄	%C ₂ H ₆
PD	-	≥2 y <15	<1
S	≥9	-	≥30 y <46
	≥15	-	≥24 y <30
	-	<36	≥1 y <24
	-	<36 y ≥15	<1
	-	<2	<1
O	<9	-	≥30
C	-	≥36	≥24
	<15	-	≥24 y <30
ND	≥9	-	≥46

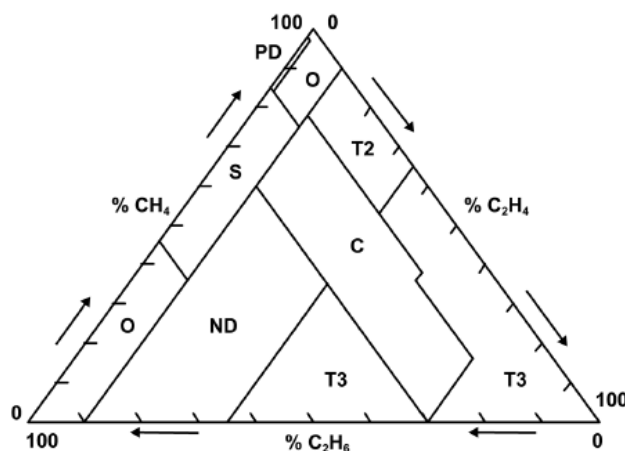


Figura 2.7: Método del triángulo de Duval 5. Fuente: [1]

El triángulo 5 proporciona más información sobre las fallas, tal como se muestra en la Tabla 2.11.

Los valores numéricos para los límites de las áreas con fallas del método del triángulo 5 de Duval son los siguientes, expresados en %CH₄, %C₂H₄ y %C₂H₆:

Tabla 2.11. Límites de la zona de falla para el triángulo 5. Fuente: [1]

Gas % / Falla	%H ₂	%CH ₄	%C ₂ H ₆
PD	-	<1	≥2 y <14
O	-	≥1 y <10	≥2 y <14
	-	<1	<2
S	-	<10	≥54
	-	<10	≥14 y <54
T2	-	≥10 y <35	<12
T3	-	≥35	<12
	-	≥50	≥12 y <14
	-	≥70	≥14
	-	≥35	≥30
C	-	≥10 y <50	≥12 y <14
	-	≥10 y <70	≥14 y <30
ND	-	≥10 y 35	≥30

- Los triángulos 4 y 5 nunca deben aplicarse para fallas identificadas primero con el triángulo 1 como fallas eléctricas D1 de baja energía o D2 de alta energía.
- El triángulo 4 debe utilizarse solo en caso de fallas identificadas primero como fallas PD descargas parciales, T1 o T2 fallas térmicas en el triángulo 1.
- El triángulo 5 solo debe emplearse en caso de fallas identificadas primero como fallas térmicas T2 y T3 para el triángulo 1.
- Los puntos AGD que aparecen en las zonas C indican una posibilidad de carbonización del papel, no una certeza del 100%, y se deben realizar más investigación con óxidos de carbono y furanos.

El procedimiento para calcular y mostrar puntos AGD en los triángulos de Duval 4 y 5 es el mismo que para el triángulo 1 en 2.1.6 Los valores numéricos de los límites de zona se indican en la Tabla 2.10 / Fig. 2.6 y Tabla 2.11 / Fig. 2.7.

2.2.28 Método de Duval (pentágono 1 y 2)

Si se identifican fallas térmicas (T1, T2 y T3) con el método del pentágono 1, se puede obtener más información sobre estas fallas con pentágono 2, como en el caso de los triángulos Duval 4 y 5. El método del pentágono 1 y 2 de Duval se ilustra en la Fig. 6 y Fig. 7 respectivamente.

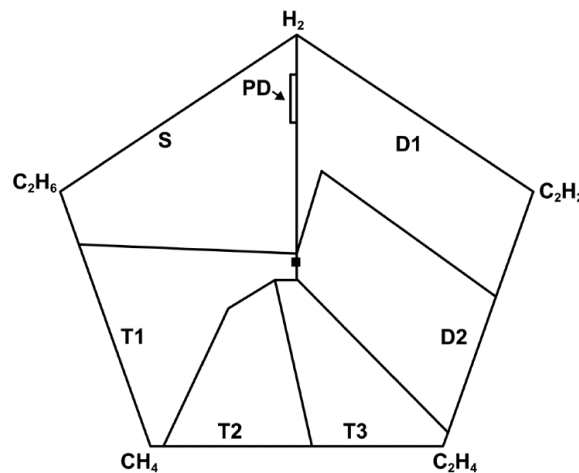


Figura 2.8. Método del pentágono de Duval 1. Fuente: [1]

El método del pentágono 1 permite la detección de los 3 tipos básicos de fallas eléctricas: descargas parciales PD, descarga de baja energía D1 y de alta energía D2.

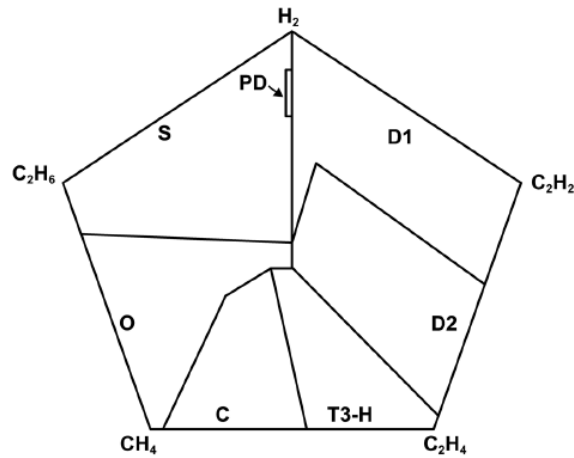


Figura 2.9. Método del pentágono de Duval 2. Fuente: [1]

2.2.29 Uso de los triángulos y pentágonos de Duval

Si se desea conocer los seis tipos de fallas descritos en el apartado 2.1.4, se utilizan el triángulo 1 o el pentágono 1 debido a que estos dos métodos emiten información de los seis tipos de fallas. Si también hay interés en los subtipos de fallas adicionales, es necesario aplicar la información presentada en la sección 2.1.4.; para esto es necesario utilizar el pentágono 2. Si se desea una detección de fallas mezcladas, se pueden comparar los diagnósticos de los triángulos y pentágonos. Si no hay concordancia entre los métodos, esto puede ser un indicador de múltiples fallas, para lo cual se sugiere que utilice los valores delta que indica el estándar IEEE C57.104 2019 [1].

2.2.30 Métodos basados en técnicas inteligentes

Según Bhalla en [26], los gases disueltos en aceites minerales derivados del petróleo, se pueden incorporar a sistemas inteligentes para facilitar la toma de decisiones, puesto que existe mucha incertidumbre con los datos obtenidos en el AGD debido a las diferentes aplicaciones que presentan los transformadores, tales como: de generación, de subestaciones de elevación, de subestaciones de reducción (ambos ligadas a la transmisión), y además al simple hecho de que la muestra puede estar sometida a contaminantes. Por lo tanto, existe una variación que puede resultar significativa por parte de las diferentes empresas públicas (generación, transmisión, distribución y/o auto generadores).

Debido al contenido diverso de gases disueltos, se han presentado varias técnicas de inteligencia artificial. Las técnicas estudiadas por Bhalla en [26] para su respectiva aplicación en la interpretación de resultados obtenidos en el AGD son:

- Sistemas expertos
- Lógica difusa
- Redes neuronales artificiales
- Algoritmos genéticos

Bajo este contexto, donde se han revisado estudios de diferentes métodos de inteligencia artificial desde el año 2010, aplicados al diagnóstico del AGD presentando buenos resultados durante su aplicación.

2.2.31 Redes neuronales artificiales (RNA)

A partir de los aspectos prácticos de la neurona biológica, se puede obtener un modelo donde se detalle su estructura de forma artificial como se muestra a continuación:

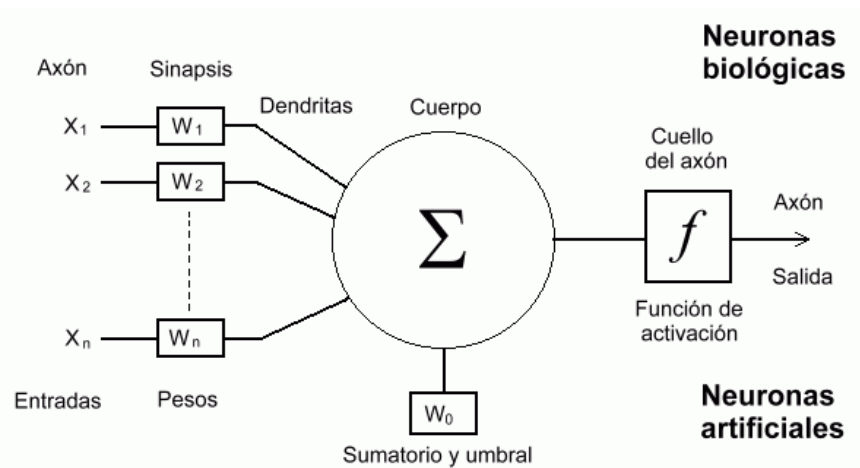


Figura 2.10. Modelo de red neuronal artificial. Fuente: [27]

El modelo de la neurona artificial se basa en el modelo biológico; recibe unas entradas de estímulo definidas con el vector de entrada $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$.

La información recibida por la neurona es tratada por un vector w de pesos sinápticos. Estos valores pueden amplificarse o atenuarse para propagarse hacia la neurona. El parámetro b se conoce como *bias* o umbral de una neurona.

Los diferentes valores que recibe la neurona, modificados por los pesos sinápticos, son sumados para producir la entrada neta. Esta entrada neta es la que determinará si la neurona se activa o no.

La activación o no de una neurona depende de una función de activación. El uso de la función de activación es un artificio para poder aplicar las RNA a una gran diversidad de problemas reales.

En consecuencia, la RNA es un modelo matemático que recibe entradas externas de otras neuronas, las combina y produce una salida, creado con el fin de llevar a cabo tareas.

2.2.32 RNA para clasificación

2.2.33 Redes neuronales de base Radial

Es una red multicapa unidireccional con aprendizaje híbrido. En la primera capa se utiliza un algoritmo no supervisado y en la salida un aprendizaje supervisado. Este tipo de red por su simplicidad es muy aplicado en situación que ameriten reconocer objetos y clasificación de patrones, la identificación y modelado de sistemas no lineales.

En la Fig. 2.11 se aprecia una red neuronal artificial de base radial, la cual contiene neuronas en su capa oculta que se activan con funciones de base no lineal y su capa de salida se activa con funciones lineales.

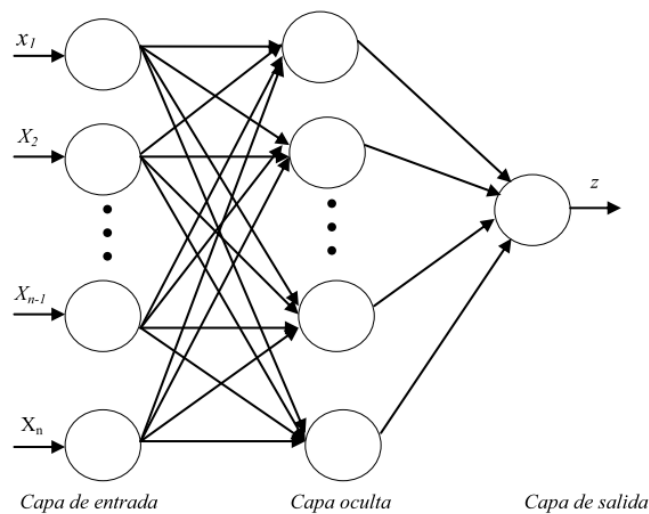


Figura 2.11. Arquitectura de una red de base radial. Fuente: [27]

El cálculo consiste en hallar en un punto de la capa oculta la distancia radial o denominada euclidiana (d) según [28].

$$d = |x - c| = \sqrt{(x_1 - c_1)^2 + (x_2 - c_2)^2 + \dots + (x_n - c_n)^2} \quad (2.5)$$

El valor d , es la clave fundamental para activar la función radial $G(\bullet)$. Con ese valor se denotan diferencias con redes tipo MLP y back-propagation,

las cuales mezclan el resultado de multiplicar las capas que se encuentran ocultas con los pesos respectivos.

2.2.34 Herramienta de desarrollo

Las simulaciones de Redes Neuronales Artificiales se desarrollaron en la herramienta computacional MATLAB R2018a.

2.2.35 MatLab.

MatLab sirve como base para todos los productos de *Math WorksTM*. Incluye un lenguaje de programación y herramientas para la creación de algoritmos, análisis de datos, visualización de datos y calculo numérico.

Matlab trae diferente *Toolboxes*, para el desarrollo de las RNA, en este proyecto de desarrollo se utilizó la herramienta Neural Network Toolbox NNA.

Capítulo 3

Metodología propuesta

3.1 Introducción

En este capítulo se describe la metodología aplicada para el desarrollo de este trabajo.

3.1.1 Tipo de metodología

Este trabajo de investigación se fundamenta inicialmente en investigación de tipo bibliográfica, que consiste en la recopilación de informes de análisis de gases disueltos realizados a varios transformadores de distintas partes del planeta, validando el estado en el que se encuentran luego de obtener sus respectivas interpretaciones. Estos datos fueron aplicados en las siguientes publicaciones: Universidad de Shanghái China [5], del National Chin-Yi Institute of Technology de Taiwán [29], Taif University de Arabia Saudí [23] y del Jabalpur Engineering College de la India [30]. Para los datos de prueba se utilizaron resultados del AGD del College of Engineering Taif University [23].

Gracias a la recopilación de información para alimentar la base de datos que sirvió de entrenamiento para las redes neuronales, se logró obtener resultados satisfactorios. El aporte inicial para la toma de decisiones en los planes de mantenimiento en las centrales de generación, se puede consagrar y validar por medio de la metodología propuesta en este trabajo, gracias a la aplicación de datos obtenidos de varios transformadores de las centrales de generación del País.

3.1.2 Métodos utilizados

3.1.3 Método de aprendizaje

El método de aprendizaje o de entrenamiento también denominado aprendizaje automático se utilizó en este trabajo, debido a que las técnicas inteligentes desarrolladas consisten en un sistema organizado que aprende cuando recibe una señal de entrada y la transforma en una de salida de acuerdo con algún principio de organización. En la Fig. 3.1 se ilustra la estructura general de un sistema de aprendizaje.

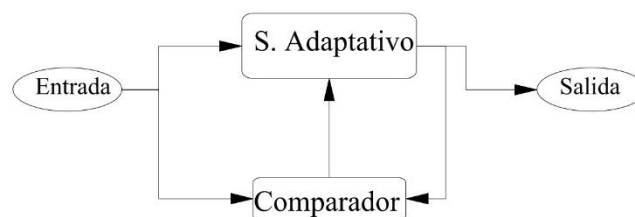


Figura 3.1: Estructura general: Sistema de aprendizaje Fuente: [31]

El aprendizaje automático se subdivide en: supervisado y no supervisado y estos a su vez están compuestos por varios métodos específicos, los cuales se resumen en el siguiente diagrama de la Fig. 3.2:

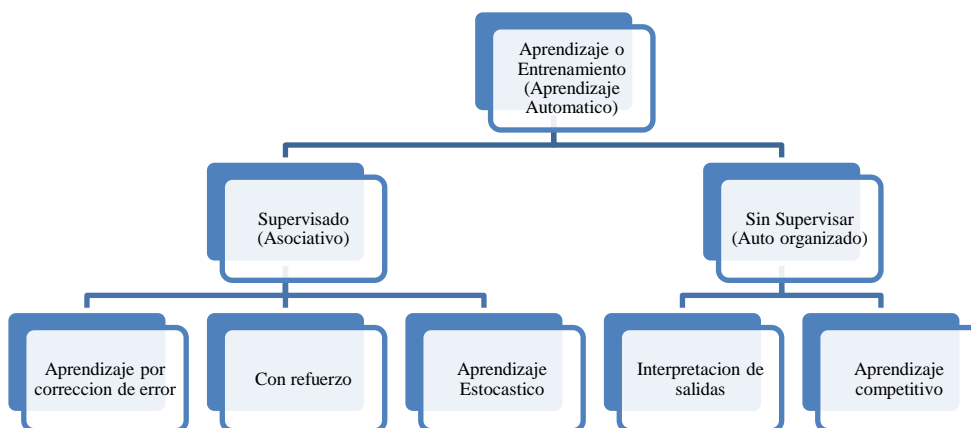


Figura 3.2: Claificación del aprendizaje automático. Fuente: [31]

En este trabajo de investigación se utilizó específicamente la metodología de **Aprendizaje supervisado por corrección de error**, con el cual se obtuvo la solución al problema de interpretación de los resultados obtenidos en el AGD en los transformadores de potencia de centrales de generación a través del entrenamiento que se le suministró a las RNA.

3.1.4 Técnica inteligente utilizada para detectar fallas incipientes

El desarrollo metodológico que se elaboró en esta propuesta para dar solución al problema sobre la interpretación de los estados o fallas tempranas en los equipos de transformación constó de tres etapas principales, tal como se muestra es la Fig. 3.3, siendo así:

1. Etapa de ingreso de datos (obtenidos del AGD en el aceite)
2. Etapa de entrenamiento (de acuerdo a históricos obtenido de diagnóstico de fallas en transformadores)
3. Etapa de pruebas.

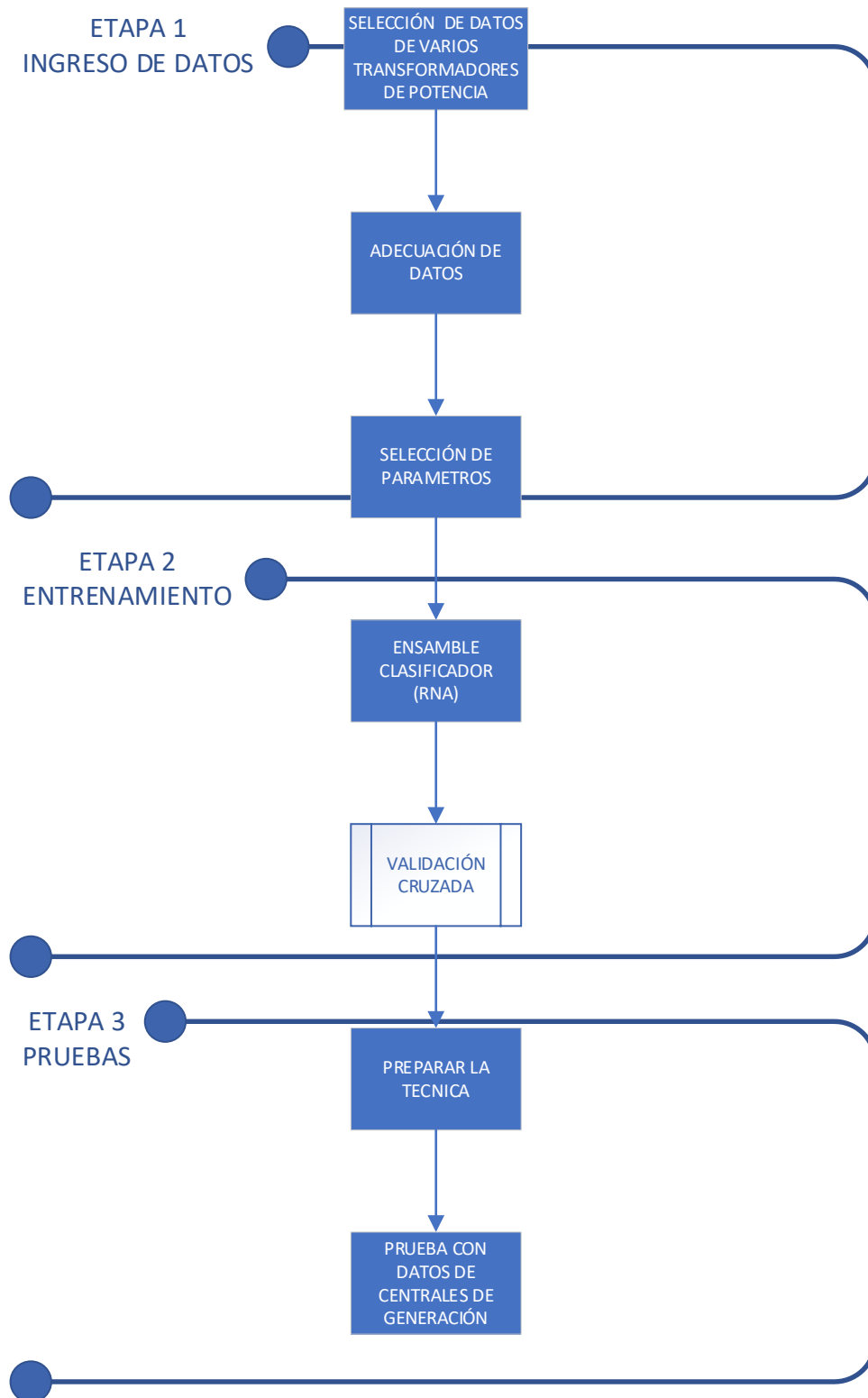


Figura 3.3 Metodología propuesta. Fuente: [2]

3.1.5 Etapa uno: ingreso de datos

En esta primera parte de la metodología propuesta, los datos fueron seleccionados y normalizados.

3.1.6 Selección de datos

La selección de datos se realizó mediante una búsqueda de artículos y publicaciones con validez científica que tratan el tema en estudio tales como [5], [6], [29], [30], [32], [33].

Los datos son concentraciones de gases obtenidos por medio de un AGD como: H₂, CH₄, C₂H₄, C₂H₆ y C₂H₂. Estos gases son los descriptores del problema y son los datos de entrada al clasificador de fallas incipientes en transformadores. Las salidas de este clasificador son cuatro estados o clases, así:

1. Descargas de alta energía (arco eléctrico).
2. Descarga de baja energía (descargas parciales).
3. Estado normal.
4. Sobrecalentamiento.

En total se contó con 192 casos para este trabajo, 128 para la etapa de y 64 en la parte de pruebas.

3.1.7 Adecuación de datos

A la base de datos se le implementó un proceso de normalización, en donde para cada descriptor se halla el máximo y el mínimo, para luego efectuar dicha normalización utilizando la siguiente ecuación:

$$Dato_{Norm} = \left(Dato - \frac{M_{min}}{M_{max} - M_{min}} \right) \quad (3.1)$$

Donde:

$Dato_{Norm}$: es el dato normalizado que ingresa como base de datos

Dato : es el dato seleccionado de concentraciones de gases en ppm

M_{min} : es el valor mínimo de la muestra

M_{max} : es el valor máximo de la muestra

Inicialmente los casos de entrenamiento se muestran en el capítulo 4 en tablas conformadas por una recopilación de varios artículos científicos, donde

estudian distintos métodos para detectar fallas en transformadores de potencia mediante el AGD.

- **Tabla 4.1:** Cincuenta datos obtenidos de “Fault Diagnosis of Power Transformer Based on multi-layer SVM Classifier” (2005) [5].
- **Tabla 4.2:** Treinta datos recopilados de “ANN Approach for Condition Monitoring of Power Transformers Using DGA” (2007) [34].
- **Tabla 4.3:** Veinte datos extraídos de “Diagnosis of Incipient Faults in Power Transformers Using CMAC Neural Network Approach” (2004) [29].
- **Tabla 4.4:** Treinta y dos datos compilados de “A Novel Association Rule Mining with IEC Ratio Based Dissolved Gas Analysis for Fault Diagnosis of Power Transformers” (2012) [30].

Respectivamente se muestran los datos utilizados en varios artículos y publicaciones científicas, con datos sometidos a pruebas y verificaciones para probar la red:

- **Tabla 4.5:** Treinta y nueve datos recopilados de “Artificial Neural Networks for Power Transformers Fault Diagnosis Base don IEC Code Using Dissolved Gas Analysis” (2015) [23].
- **Tabla 4.6:** Datos obtenidos de “Fault Diagnosis of Power Transformer Based on multi-layer SVM Classifier” (2005) [5].

Por último, se realiza una combinación binaria con los cinco descriptores, obteniendo un total de $2^n - 1$ combinaciones (donde n es el número de descriptores), las cuales son las entradas al clasificador. Esta combinación binaria se hace con el fin de encontrar relaciones ocultas entre las entradas y salidas del clasificador, además de buscar la combinación de descriptores con las cuales se obtiene una mejor respuesta.

Así, con los pasos anteriormente mencionados, los datos se encuentran preparados para ser utilizados por el clasificador.

3.1.8 Selección de parámetros

Durante la selección de parámetros se utilizó la búsqueda en malla, la cual radica en la construcción de la red de vectores que contienen todas las combinaciones para que se pueda luego seleccionar de forma acotada mediante un proceso de discriminación. La técnica utilizada requiere solamente dos parámetros, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$(P_1, P_2) = (P_{1min} + i\Delta P_1, P_{2min} + j\Delta P_2) \text{ Para } 0 \leq i \leq n \text{ y } 0 \leq j \leq m \quad (3.2)$$

Donde

$$n = \frac{P_{1max}-P_{1min}}{\Delta P_1}, m = \frac{P_{2max}-P_{2min}}{\Delta P_2} \text{ y}$$

(P_{1i}, P_{2j}) : Conforman una matriz de tamaño $n \times m$.

De acuerdo a la técnica utilizada, los parámetros (P_1, P_2) a seleccionar según [2] es RNA: El número de neuronas [Nmin=5, Nmax=25] y el radio de la función de base radial [$\sigma_{min}=0.1, \sigma_{max}=1$], con los pasos de discretización $\Delta N=1$ y $\Delta \sigma=0.001$.

3.1.9 Etapa dos: Entrenamiento

Para esta etapa, luego de que los datos son seleccionados, se realiza el entrenamiento con el clasificador propuesto (RNA).

Ensamble clasificador

En esta etapa se propone una sola técnica:

RNA

Se implementó una RNA para clasificar las fallas incipientes en un transformador de potencia por medio del AGD, para lo cual se seleccionó una RNP, debido a que durante el estudio previo acerca del tema se observó que este tipo de red era el más adecuado debido al vector de datos que se obtuvo y se evidencia en [35]. Esta clase de red tiene como característica principal que la función de activación de cada neurona es una función de base radial. Además, el aprendizaje es más rápido con respecto a una MLP, porque el cambio de peso solo afecta a la neurona oculta asociada a dicho peso (solo a un grupo de patrones, pertenecientes a la clase que representa dicha neurona oculta).

Para crear una RNA se utilizó la herramienta nntool de Matlab como se muestra en la Fig. 3.4, la cual requiere de los casos de entrenamiento (input data), sus respectivas clases (target data) y el tipo de función a utilizar (LogSig), la matriz de clases debe ser una matriz de dimensión $m \times n$, donde m representa el número de clases y n representa el número de casos de entrenamiento. Esta red solo debe tener valores numéricos de clases 1, 2, 3 y 4 en la matriz objetivo (target).

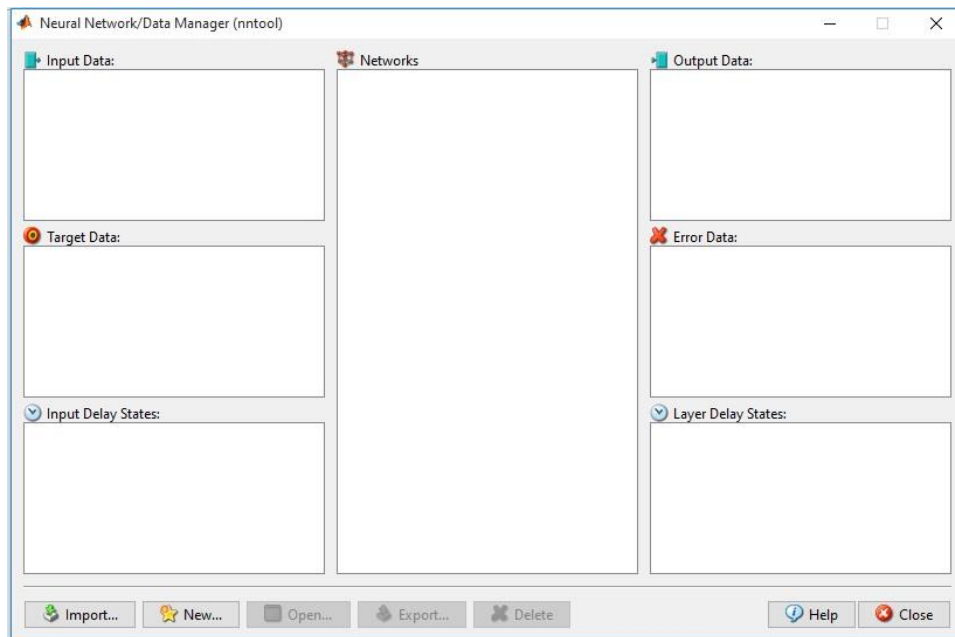


Figura 3.4. Diseño de RNA en Matlab. Fuente: [36]

Luego se simuló la red, y se comprobó qué tan precisa es ésta al momento de clasificar los casos de entrenamiento.

A través de diversos editores, permite importar grandes cantidades de datos y seleccionar las diferentes características que determinarán el comportamiento. Los pesos se ajustan al entrenar la red hasta que se desempeñe correctamente. En el editor se seleccionó una red del tipo feed-forward backprop. Se indicó que el rango de las entradas se adquiriera a partir de la variable input, siguiendo la regla de la pirámide geométrica [37], la cual permite seleccionar el número de neuronas en las capas ocultas siguiendo la expresión $\sqrt{n * m}$, donde n es el número de entradas y m el número de salidas que tiene la red, efectuando la aproximación $\sqrt{5 * 4} = 4,47$, se eligieron dos capas con cinco neuronas cada una y con la función de activación LogSig (Logarítmica Sigmoides), porque los datos normalizados se encuentran dentro del rango continuo entre 0 y 1.

3.1.10 Validación cruzada

La etapa de validación cruzada se aplicó en la parte de entrenamiento, y consiste en dividir en n grupos los casos de entrenamiento (cuatro para el problema en estudio), en los cuales debe haber representaciones en las diferentes clases, para luego utilizar $n - l$ grupos para entrenar, y el grupo restante para hallar el error de validación. Este proceso se realiza para todas las n divisiones de los datos. Al final, se promedian los n errores para obtener un solo error de validación. Por último, se seleccionaron los parámetros con los que se presentan menores errores de validación.

3.1.11 Etapa tres: Pruebas

En esta última etapa con los parámetros obtenidos de la etapa de entrenamiento, se procedió a realizar las diferentes pruebas como se explica a continuación.

3.1.12 Preparar la técnica para nuevos datos

Luego de terminar el proceso de validación cruzada, se entrenó de nuevo, pero esta vez con los mejores parámetros. De esta forma el clasificador está preparado para recibir y clasificar nuevos datos.

3.1.13 Pruebas con datos nuevos

Dentro de esta etapa se realizó la prueba con datos nuevos de los cuales se conoce sus clases, y se observó el porcentaje de aciertos o casos correctamente clasificados. Posteriormente, se efectuó un estudio comparativo entre las técnicas utilizadas y los métodos convencionales para interpretar los gases de falla presentes en una muestra de aceite.

Capítulo 4

Análisis de resultados

4.1 Introducción

El presente capítulo contiene la información detallada de los resultados a los problemas y soluciones planteadas en el apartado 3.2 respecto al AGD y el uso de los métodos para interpretación de fallas.

4.2 Prueba y análisis de resultados

4.2.1 Selección de datos

El siguiente histórico de datos muestra las concentraciones de gases de falla combustibles con su respectivo diagnóstico recopilado de varios artículos científicos como: [5], [32], [22] y [29].

Estas muestras fueron obtenidas en varios transformadores de potencia comprendidos entre los 5 MVA y 100 MVA de potencia nominal. Por esta razón, es posible generalizar el estudio, con los transformadores que estén dentro del rango de potencia estudiada en esta investigación.

En las Tablas 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4 se muestran los datos recopilados para el entrenamiento, y en las Tablas 4.5 y 4.6 se muestran los datos obtenidos para las pruebas.

Tabla 4.1: Datos obtenidos de [5] para entrenamiento. Fuente: [5]

Casos	Concentraciones de gases en $\mu\text{L/L}$ (PPM)					Estado del transformador (Diagnostico comprobado)	Clase N.º
	H2	CH4	C2H6	C2H4	C2H2		
1	40,8	3	3,6	3,5	7,4	Des. de alta energía	1
2	23	12	12	10	61	Des. de alta energía	1
3	57	13	0,1	11	12	Des. de alta energía	1
4	31	6,6	19	4,7	67	Des. de alta energía	1
5	285	36,3	75	8,4	133	Des. de alta energía	1
6	5283	179	320	3020	2314	Des. de alta energía	1
7	335	67	18	143	170	Des. de alta energía	1
8	44	12,2	3,4	3,2	17,4	Des. de alta energía	1
9	42	62	5	63	73	Des. de alta energía	1
10	60	40	9,9	110	70	Des. de alta energía	1
11	240	28	6	26	85	Des. de alta energía	1
12	466,5	148,8	13	266	511	Des. de alta energía	1
13	260	130	29	84	92	Des. de alta energía	1
14	250	63	3,8	66	120	Des. de alta energía	1
15	59	7,1	19	4,5	71	Des. de alta energía	1
16	650	53	34	20	0	Des. de baja energía	2
17	0	5,2	5,12	9,58	14,6	Des. de baja energía	2
18	1565	93	34	47	0	Des. de baja energía	2
19	160	90	27	17	5,8	Des. de baja energía	2
20	35	25	0	23	22	Des. de baja energía	2
21	10	4	3	33	6	Estado normal	3
22	9,87	2,49	0,79	4,06	4,8	Estado normal	3
23	8,5	7,2	4,3	3,9	3,5	Estado normal	3
24	32	31	7,5	50	1,1	Estado normal	3
25	13,5	1,7	1,2	0,6	0	Estado normal	3
26	280	1500	150	1200	140	Sobrecalentamiento	4
27	228	380	82	1012	19	Sobrecalentamiento	4
28	50	90	18	260	5,9	Sobrecalentamiento	4
29	48	230	160	810	7	Sobrecalentamiento	4
30	90	160	54	330	29	Sobrecalentamiento	4
31	168	1353	581	3281	63	Sobrecalentamiento	4
32	577	3441	521	2928	7	Sobrecalentamiento	4
33	1400	3000	560	3500	4	Sobrecalentamiento	4
34	47	106	28,7	242,2	6,35	Sobrecalentamiento	4
35	220	340	42	480	14	Sobrecalentamiento	4
36	380	190	30	280	22	Sobrecalentamiento	4
37	30	62	60	460	3,4	Sobrecalentamiento	4
38	770	1420	401	1452	3	Sobrecalentamiento	4
39	17000	110000	84000	89000	16000	Sobrecalentamiento	4
40	81	130	74	230	2,9	Sobrecalentamiento	4
41	130	440	180	730	0	Sobrecalentamiento	4
42	70	69	29	241	10	Sobrecalentamiento	4
43	130	440	180	730	0	Sobrecalentamiento	4
44	3606,4	1182	328,4	1604,8	6,3	Sobrecalentamiento	4
45	249	726	278	938	0	Sobrecalentamiento	4
46	170	330	77	340	13	Sobrecalentamiento	4

47	170	320	53	520	3,2	Sobrecalentamiento	4
48	11	88	83	250	8,5	Sobrecalentamiento	4
49	1000	4300	1100	5400	24	Sobrecalentamiento	4
50	613	3240	1432	2788	0	Sobrecalentamiento	4

Tabla 4.2: Datos obtenidos de [34] para entrenamiento. Fuente: [34]

Casos	Concentraciones de gases en PPM					Estado del transformador (Diagnostico actual)	Clase N.º
	H2	CH4	C2H6	C2H4	C2H2		
1	24	13	5	43	319	Des. de alta energía	1
2	127	24	0	32	81	Des. de alta energía	1
3	127	107	11	154	224	Des. de alta energía	1
4	212	38	15	47	78	Des. de alta energía	1
5	274	27	5	33	97	Des. de alta energía	1
6	307	22	2	33	109	Des. de alta energía	1
7	416	695	74	867	0	Des. de alta energía	1
8	441	207	43	224	261	Des. de alta energía	1
9	800	1393	304	2817	3000	Des. de alta energía	1
10	858	1324	208	2793	7672	Des. de alta energía	1
11	1249	370	56	606	1371	Des. de alta energía	1
12	4906	8784	1404	9924	9671	Des. de alta energía	1
13	9474	4066	353	6552	12997	Des. de alta energía	1
14	160	10	3	1	1	Des. de baja energía	2
15	240	20	5	28	96	Des. de baja energía	2
16	1076	95	4	71	231	Des. de baja energía	2
17	16	87	75	395	30	Sobrecalentamiento	4
18	33	79	30	215	5	Sobrecalentamiento	4
19	60	144	67	449	9	Sobrecalentamiento	4
20	65	61	16	143	3	Sobrecalentamiento	4
21	80	619	326	2480	0	Sobrecalentamiento	4
22	117	167	48	481	7	Sobrecalentamiento	4
23	137	369	144	1242	16	Sobrecalentamiento	4
24	199	770	217	1508	72	Sobrecalentamiento	4
25	231	3997	1726	5584	0	Sobrecalentamiento	4
26	244	754	172	1281	27	sobrecalentamiento	4
27	266	584	328	862	1	Sobrecalentamiento	4
28	425	1742	7299	37043	158	Sobrecalentamiento	4
29	507	1053	297	1440	17	Sobrecalentamiento	4
30	2004	9739	2750	5113	0	Sobrecalentamiento	4

Tabla 4.3: Datos recopilados de [29] para entrenamiento. Fuente: [29]

Casos	Concentraciones de gases en PPM					Estado del transformador (Diagnostico actual)	Clase N.º
	H2	CH4	C2H6	C2H4	C2H2		
1	127	107	11	154	224	Des. de alta energía	1
2	60	40	6,9	110	70	Des. de alta energía	1
3	200	48	14	117	131	Des. de alta energía	1
4	32,4	5,5	1,4	12,6	13,2	Des. de alta energía	1
5	345	112,3	27,5	51,5	58,8	Des. de baja energía	2
6	565	53	34	47	0	Des. de baja energía	2
7	980	73	58	12	0	Des. de baja energía	2
8	650	53	34	20	0	Des. de baja energía	2
9	14,7	3,7	10,5	2,7	0,2	Estado normal	3
10	181	262	41	28	0	Sobrecalentamiento	4
11	173	334	172	812,5	37,7	Sobrecalentamiento	4
12	220	340	42	480	14	Sobrecalentamiento	4
13	170	320	53	520	3,2	Sobrecalentamiento	4
14	27	90	42	63	0,2	Sobrecalentamiento	4
15	56	286	96	928	7	Sobrecalentamiento	4
16	78	161	86	353	10	Sobrecalentamiento	4
17	160	53	34	20	0	Sobrecalentamiento	4
18	95	110	160	50	0	Sobrecalentamiento	4
19	300	490	180	360	95	Sobrecalentamiento	4
20	200	700	250	740	1	Sobrecalentamiento	4

Tabla 4.4: Datos obtenidos de [30] para entrenamiento. Fuente: [30]

Casos	Concentraciones de gases en PPM					Estado del transformador (Diagnostico actual)	Clase N.º
	H2	CH4	C2H6	C2H4	C2H2		
1	1,7011	1,1971	0,8177	0,117	0,1293	Des. de alta energía	1
2	1,3229	0,4296	0,04557	0,0002	0,0131	Des. de alta energía	1
3	29,9914	1,8591	0,5192	0,7374	0,0591	Des. de alta energía	1
4	2,7011	1,1871	0,7167	0,217	0,2293	Des. de alta energía	1
5	30,991	2,8591	0,6192	0,6374	0,0691	Des. de alta energía	1
6	8,6976	1,0636	2,1259	0,5134	0,5348	Des. de alta energía	1
7	1,8012	1,231	0,6167	0,113	0,2133	Des. de alta energía	1
8	5,3862	0,4166	0,28271	0,0477	0,0004	Des. de baja energía	2
9	4,3368	1,0566	0,9231	0,2002	0,0025	Des. de baja energía	2
10	5,7787	0,5458	0,07298	0,1546	0,0069	Des. de baja energía	2
11	31,9914	2,113	0,5583	0,6613	0,0513	Des. de baja energía	2
12	0,5585	0,1546	0,0041	0,0008	0,0169	Des. de baja energía	2
13	7,9165	4,3174	5,211	3,284	1,8652	Des. de baja energía	2
14	1,6427	1,4899	0,5277	7,4315	0,0045	Estado normal	3
15	6,8729	2,2421	0,17	0,4064	0,0059	Estado Normal	3
16	1,8421	0,8287	0,1761	0,618	0,0025	Estado normal	3
17	4,5925	24,797	13,8563	14,707	0,0030	Sobrecalentamiento	4
18	4,1159	0,898	2,5779	0,9623	0,0377	Sobrecalentamiento	4
19	1,8589	3,108	3,212	2,148	0,0080	Sobrecalentamiento	4

20	0,3985	5,5257	4,442	0,825	0,0027	Sobrecalentamiento	4
21	1,702	0,2414	0,2545	0,2089	0,0040	Sobrecalentamiento	4
22	6,0646	12,025	15,713	0,6513	0,0013	Sobrecalentamiento	4
23	0,7323	3,0435	1,382	0,2912	0,0019	Sobrecalentamiento	4
24	0,1487	0,9906	0,1008	0,0745	0,0096	Sobrecalentamiento	4
25	2,608	18,9712	2,74	39,848	0,0041	Sobrecalentamiento	4
26	3,1681	9,265	6,6307	2,9401	0,0221	Sobrecalentamiento	4
27	0,8573	6,3671	4,9939	5,0809	0,0001	Sobrecalentamiento	4
28	4,4798	45,47	342,5	35,39	21,562	Sobrecalentamiento	4
29	4,4171	0,3517	0,1288	0,0297	0,0050	NO ASIGNADO	-
30	0,7683	0,7255	0,00873	0,1139	0,0099	NO ASIGNADO	-
31	2,545	0,145	0,0044	0,0007	0,0135	NO ASIGNADO	-
32	7,3779	0,6711	0,9027	0,6864	0,0037	NO ASIGNADO	-

Tabla 4.5: Datos extraídos de [23] para pruebas. Fuente: [23]

Casos	Concentraciones de gases en PPM					Estado del transformador (Diagnostico actual)	Clase N.º
	H2	CH4	C2H6	C2H4	C2H2		
1	21	34	5	47	62	Des. de alta energía	1
2	1607	615	80	916	1294	Des. de alta energía	1
3	127	107	11	154	224	Des. de alta energía	1
4	60	40	6,9	110	70	Des. de alta energía	1
5	34,45	21,3	3,19	45	19,62	Des. de alta energía	1
6	86	30	10	35	29	Des. de alta energía	1
7	59,3	41	9,9	111	70	Des. de alta energía	1
8	469	147	12,5	265	520	Des. de alta energía	1
9	980	73	58	12	0,01	Des. de baja energía	2
10	980	73	58	12	0,01	Des. de baja energía	2
11	260	3	18	2	0,01	Des. de baja energía	2
12	586	19	77	6	0,01	Des. de baja energía	2
13	180,85	0,5	0,234	0,18	0,0001	Des. de baja energía	2
14	239	27,5	5,5	25,5	85	Des. de baja energía	2
15	56	5,5	92	34,5	27,5	Des. de baja energía	2
16	30	22	14	4,1	0,1	Estado normal	3
17	2,9	2	1,5	0,3	0,1	Estado normal	3
18	120	17	32	4	23	Estado Normal	3
19	14,7	3,7	10,5	2,7	0,2	Estado normal	3
20	33	26	6	53	0,2	Estado normal	3
21	12	8	40	5	0,01	Estado normal	3
22	269	1081	347	1725	25	Sobrecalentamiento	4
23	10	10	8	1	0,01	Sobrecalentamiento	4
24	4	99	82	4,2	0,1	Sobrecalentamiento	4
25	50	100	51	305	9	Sobrecalentamiento	4
26	30,8	149	47,9	146	0,1	Sobrecalentamiento	4
27	27	615	80	916	1294	Sobrecalentamiento	4
28	181	262	41	28	0,01	Sobrecalentamiento	4
29	173	334	172	812,5	37,7	Sobrecalentamiento	4
30	27	90	42	63	0,2	Sobrecalentamiento	4
31	86	187	136	363	0,01	Sobrecalentamiento	4

32	10	24	372	24	0,01	Sobrecalentamiento	4
33	30,4	117	44,2	138	0,1	Sobrecalentamiento	4
34	200	700	250	740	1	Sobrecalentamiento	4
35	16	25	19	39	0,01	Sobrecalentamiento	4
36	22	40	36	6	1	Sobrecalentamiento	4
37	1770	3630	1070	8480	78	Sobrecalentamiento	4
38	14	237	92	470	0,01	Sobrecalentamiento	4
39	157	127	34	96	0,01	Sobrecalentamiento	4

Tabla 4.6: Datos recopilados de [5] para pruebas. Fuente: [5]

Casos	Concentraciones de gases en PPM					Estado del transformador (Diagnostico actual)	Clase N.º
	H2	CH4	C2H6	C2H4	C2H2		
1	293	50	13	115	120	Des. de baja energía	2
2	443	85	9,5	103	174	Des. de baja energía	2
3	35	25	0	23	22	Des. de baja energía	2
4	980	73	58	12	0	Des. de baja energía	2
5	160	90	27	17	5	Des. de baja energía	2
6	176	206	47,7	75,7	68,7	Des. de baja energía	2
7	565	93	34	47	0	Des. de baja energía	2
8	150	53	34	20	0	Des. de baja energía	2
9	10	4	3	33	6	Estado normal	3
10	14,7	3,8	10,5	2,7	0,2	Estado normal	3
11	6,7	10	11	71	3,9	Estado normal	3
12	0,33	0,26	0,04	0,27	0	Estado normal	3
13	73	520	140	1200	6	Sobrecalentamiento	4
14	15	125	29	574	7	Sobrecalentamiento	4
15	8	631	254	2020	39	Sobrecalentamiento	4
16	42	97	157	600	0	Sobrecalentamiento	4
17	120	120	33	84	0,55	Sobrecalentamiento	4
18	117	357	92	468	4	Sobrecalentamiento	4
19	766	993	116	665	4	Sobrecalentamiento	4
20	5	517	69	523	6	Sobrecalentamiento	4
21	80	153	42	276	18	Sobrecalentamiento	4
22	16	237	92	470	0	Sobrecalentamiento	4
23	0	434	226	387	0	Sobrecalentamiento	4
24	86	110	18	92	7,4	Sobrecalentamiento	4
25	2844	8517	4422	10196	39	Sobrecalentamiento	4

4.2.2 Normalización de datos

Las RNA funcionan mucho mejor si antes se procesan sus datos de entrada y salida. P.ej., en redes la tendencia es a preferir los valores de 0.1 a 9 o paso binario y otras redes trabajan de preferencia con valores de -1 a 1 o conocido como paso bipolar [38].

Para ilustrar como se realiza la normalización, se muestra el siguiente ejemplo con el primer descriptor (H_2) del primer dato de entrenamiento de las tablas.

$$Dato = 40,8$$

$$H_2 \text{ min} = 0$$

$$H_2 \text{ max} = 17000$$

$$Dato_{Norm} = (dato - H_2 \text{ min}) / (H_2 \text{ max} - H_2 \text{ min})$$

$$Dato_{Norm} = (40,8 - 0) / (17000 - 0)$$

$$Dato_{Norm} = 0,0024$$

Este procedimiento se realizó para cada dato de entrada. Es decir, para cada concentración de gas, considerando los valores mínimos y máximos de las muestras. A continuación, se presenta en la Tabla 4.7 los datos normalizados obtenidos y en el apartado de anexos A y B se muestran las restantes.

Tabla 4.7: Datos normalizados obtenidos de [5]. Fuente: El autor

Entradas normalizadas	H2'	CH4'	C2H6'	C2H4'	C2H2'	Clase N.º
1	0,002400	0,000012	0,000043	0,000039	0,000463	1
2	0,001353	0,000094	0,000143	0,000112	0,003813	1
3	0,003353	0,000103	0,000001	0,000124	0,000750	1
4	0,001824	0,000045	0,000226	0,000053	0,004188	1
5	0,016765	0,000315	0,000893	0,000094	0,008313	1
6	0,310765	0,001612	0,003810	0,033933	0,144625	1
7	0,019706	0,000594	0,000214	0,001607	0,010625	1
8	0,002588	0,000095	0,000040	0,000036	0,001088	1
9	0,002471	0,000548	0,000060	0,000708	0,004563	1
10	0,003529	0,000348	0,000118	0,001236	0,004375	1
11	0,014118	0,000239	0,000071	0,000292	0,005313	1
12	0,027441	0,001337	0,000155	0,002989	0,031938	1
13	0,015294	0,001166	0,000345	0,000944	0,005750	1
14	0,014706	0,000557	0,000045	0,000742	0,007500	1
15	0,003471	0,000049	0,000226	0,000051	0,004438	1
16	0,038235	0,000466	0,000405	0,000225	0,000000	2
17	0,000000	0,000032	0,000061	0,000108	0,000913	2
18	0,092059	0,000830	0,000405	0,000528	0,000000	2
19	0,009412	0,000803	0,000321	0,000191	0,000363	2
20	0,002059	0,000212	0,000000	0,000258	0,001375	2
21	0,000588	0,000021	0,000036	0,000371	0,000375	3
22	0,000581	0,000007	0,000009	0,000046	0,000300	3
23	0,000500	0,000050	0,000051	0,000044	0,000219	3
24	0,001882	0,000266	0,000089	0,000562	0,000069	3
25	0,000794	0,000000	0,000014	0,000007	0,000000	3

26	0,016471	0,013621	0,001786	0,013483	0,008750	4
27	0,013412	0,003439	0,000976	0,011371	0,001188	4
28	0,002941	0,000803	0,000214	0,002921	0,000369	4
29	0,002824	0,002075	0,001905	0,009101	0,000438	4
30	0,005294	0,001439	0,000643	0,003708	0,001813	4
31	0,009882	0,012285	0,006917	0,036865	0,003938	4
32	0,033941	0,031267	0,006202	0,032899	0,000438	4
33	0,082353	0,027258	0,006667	0,039326	0,000250	4
34	0,002765	0,000948	0,000342	0,002721	0,000397	4
35	0,012941	0,003076	0,000500	0,005393	0,000875	4
36	0,022353	0,001712	0,000357	0,003146	0,001375	4
37	0,001765	0,000548	0,000714	0,005169	0,000213	4
38	0,045294	0,012894	0,004774	0,016315	0,000188	4
39	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	4
40	0,004765	0,001166	0,000881	0,002584	0,000181	4
41	0,007647	0,003985	0,002143	0,008202	0,000000	4
42	0,004118	0,000612	0,000345	0,002708	0,000625	4
43	0,007647	0,003985	0,002143	0,008202	0,000000	4
44	0,212141	0,010730	0,003910	0,018031	0,000394	4
45	0,014647	0,006585	0,003310	0,010539	0,000000	4
46	0,010000	0,002985	0,000917	0,003820	0,000813	4
47	0,010000	0,002894	0,000631	0,005843	0,000200	4
48	0,000647	0,000785	0,000988	0,002809	0,000531	4
49	0,058824	0,039076	0,013095	0,060674	0,001500	4
50	0,036059	0,029440	0,017048	0,031326	0,000000	4

Los casos de prueba se normalizaron de igual manera que los casos de entrenamiento, obteniendo los valores máximos y mínimos de los descriptores de los casos de entrenamiento. En el apartado de anexos se muestran ambas tablas con los datos normalizados.

Tabla 4.8: Datos normalizados obtenidos de [23]. Fuente: El autor

Entradas normalizadas	H2'	CH4'	C2H6'	C2H4'	C2H2'	Clase N.º
1	0,011864	0,009295	0,004673	0,005521	0,047913	1
2	0,907910	0,169362	0,074766	0,108000	1,000000	1
3	0,071751	0,029407	0,010280	0,018140	0,173107	1
4	0,033898	0,010948	0,006449	0,012951	0,054096	1
5	0,019463	0,005797	0,002981	0,005285	0,015162	1
6	0,048588	0,008193	0,009346	0,004106	0,022411	1
7	0,033503	0,011224	0,009252	0,013069	0,054096	1
8	0,264972	0,040427	0,011682	0,031229	0,401855	1
9	0,553672	0,020040	0,054206	0,001394	0,000008	2
10	0,553672	0,020040	0,054206	0,001394	0,000008	2
11	0,146893	0,000755	0,016822	0,000215	0,000008	2
12	0,331073	0,005163	0,071963	0,000686	0,000008	2
13	0,102175	0,000066	0,000219	0,000000	0,000000	2
14	0,135028	0,007505	0,005140	0,002986	0,065688	2

15	0,031638	0,001444	0,085981	0,004047	0,021252	2
16	0,016949	0,005989	0,013084	0,000462	0,000077	3
17	0,001638	0,000479	0,001402	0,000014	0,000077	3
18	0,067797	0,004612	0,029907	0,000450	0,017774	3
19	0,008305	0,000948	0,009813	0,000297	0,000155	3
20	0,018644	0,007091	0,005607	0,006229	0,000155	3
21	0,006780	0,002132	0,037383	0,000568	0,000008	3
22	0,151977	0,297746	0,324299	0,203403	0,019320	4
23	0,005650	0,002683	0,007477	0,000097	0,000008	4
24	0,002260	0,027203	0,076636	0,000474	0,000077	4
25	0,028249	0,027479	0,047664	0,035947	0,006955	4
26	0,017401	0,040978	0,044766	0,017196	0,000077	4
27	0,015254	0,037397	0,043832	0,015427	0,000077	4
28	0,102260	0,072110	0,038318	0,003281	0,000008	4
29	0,097740	0,091946	0,160748	0,095794	0,029134	4
30	0,015254	0,024724	0,039252	0,007408	0,000155	4
31	0,048588	0,051447	0,127103	0,042786	0,000008	4
32	0,005650	0,006540	0,347664	0,002809	0,000008	4
33	0,017175	0,032162	0,041308	0,016253	0,000077	4
34	0,112994	0,192780	0,233645	0,087245	0,000773	4
35	0,009040	0,006816	0,017757	0,004578	0,000008	4
36	0,012429	0,010948	0,033645	0,000686	0,000773	4
37	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	0,060278	4
38	0,007910	0,065222	0,085981	0,055404	0,000008	4
39	0,088701	0,034917	0,031776	0,011300	0,000008	4

4.2.3 Resultados obtenidos del entrenamiento de la RNA

Como se explicó en el apartado 3.5.1 para el ensamble clasificador adoptado por la Red Neuronal se diseñaron varias redes en la librería nntool de Matlab para obtener el mejor valor de asertividad. Para lo cual se empleó la red tipo feed-forward backpropagation. En la etapa de entrenamiento se empleó la función traingdm, para el proceso de aprendizaje la función learnngdm y la función de rendimiento de error medio cuadrático (MSE).

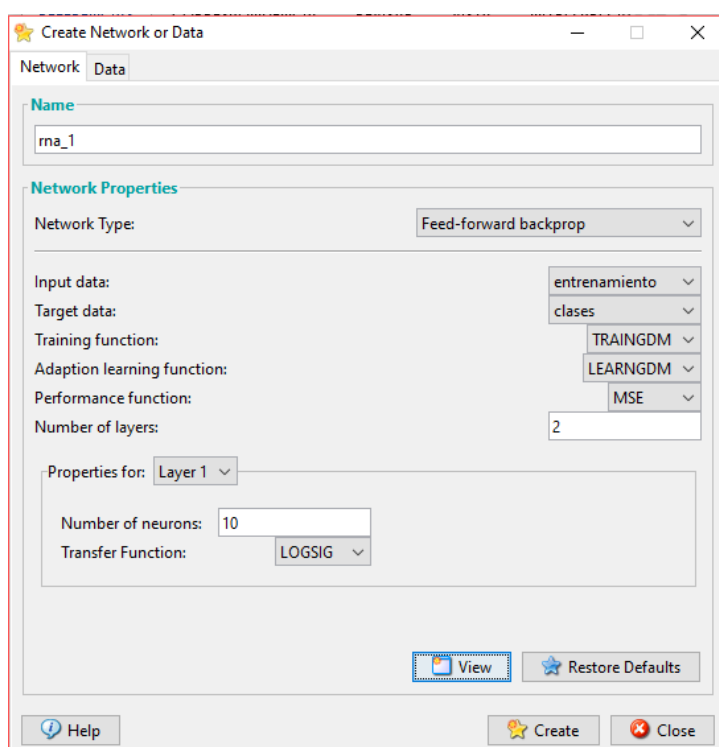


Figura 4.1. Parametrización de la Red Neuronal en Matlab. Fuente: Autor

Tabla 4.9. Pruebas con distintas redes neuronales. Fuente: El autor

N.º de red	N.º de Capas	N.º de neuronas	N.º de entrenamientos	Porcentaje de aciertos
1	1	5	5	63%
2	1	10	5	55%
3	2	5	5	78%
4	2	10	5	84%
5	3	5	5	45%

De acuerdo a los resultados obtenidos con diferentes modelados de redes neuronales, se apreció que la Red N.º 4 es la que más aciertos obtuvo respecto a las otras redes, para lo cual se detallan los resultados obtenidos con los 64 datos de prueba y sus respectivas clases actuales versus la de la Red Neuronal. Se creó la red neuronal rna_1 como se muestra en la Fig. 15 con 2 capas ocultas y 10 neuronas.

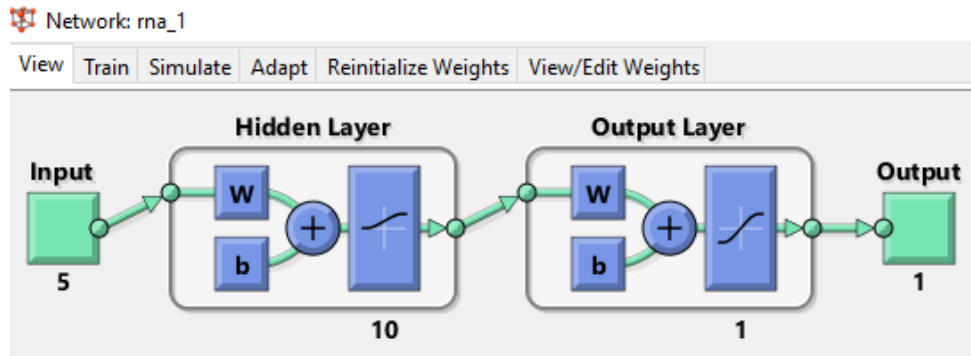


Figura 4.2: Red Neuronal Personalizada. Fuente: Autor

Con el primer entrenamiento de la red neuronal propuesta, se obtuvieron los siguientes resultados mostrados en la Fig. 4.3 y Fig. 4.4:

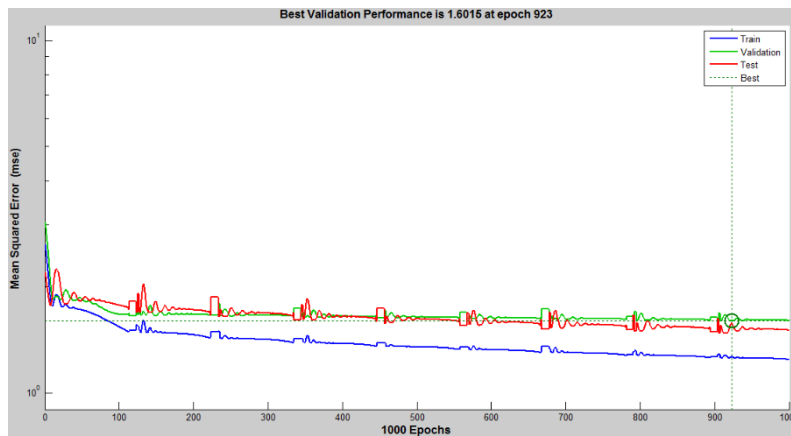


Figura 4.3. Mejor validación de rendimiento

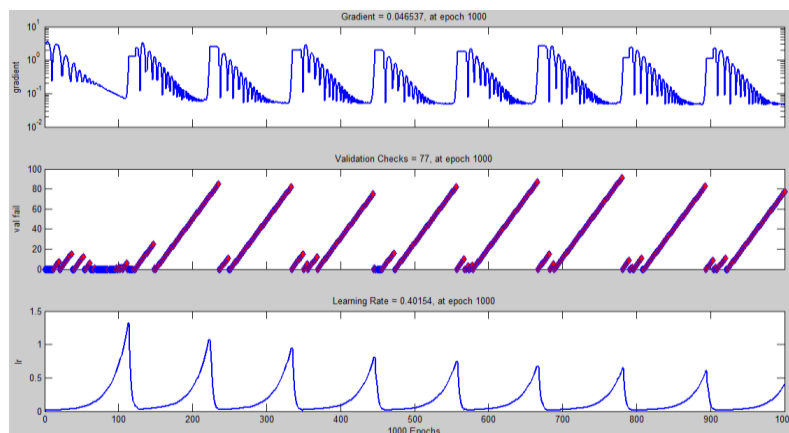


Figura 4.4. Estado de entrenamiento

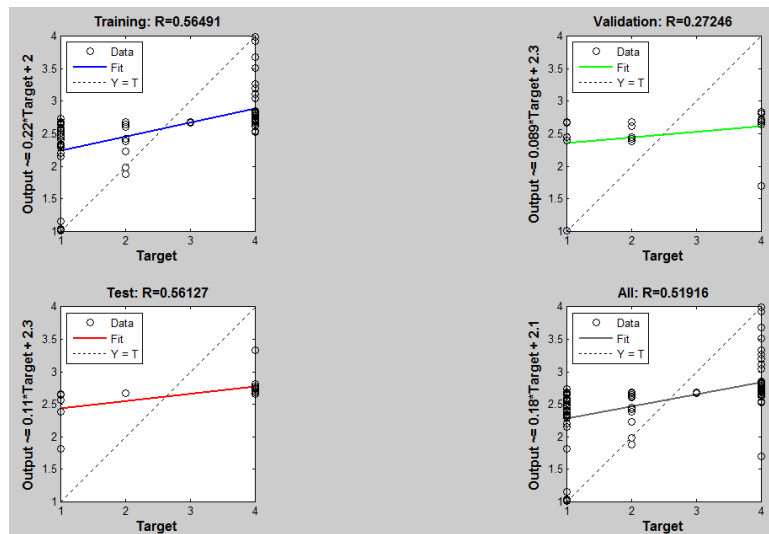


Figura 4.5. Estado de regresión

En los anexos se muestran las gráficas luego de entrenar 5 veces la red neuronal creada, para observar el mejoramiento que presenta la gráfica del estado de regresión.

En la Tabla 4.10 se muestra los resultados de las clases obtenidas, y se identifican los casos que no fueron acertados por la metodología de las Redes Neuronales.

Tabla 4.10. Clases pronosticadas mediante RNA

Casos	Estado Actual	Clase actual	Clase pronosticada RNA	Acertado
1	Descarga de alta energía	1	1	SI
2	Descarga de alta energía	1	1	SI
3	Descarga de alta energía	1	1	SI
4	Descarga de alta energía	1	1	SI
5	Descarga de alta energía	1	1	SI
6	Descarga de alta energía	1	1	SI
7	Descarga de alta energía	1	2	NO
8	Descarga de alta energía	1	1	SI
9	Descarga de alta energía	1	2	NO
10	Descarga de alta energía	1	1	SI
11	Descarga de baja energía	2	1	NO
12	Descarga de baja energía	2	1	SI
13	Descarga de baja energía	2	2	SI
14	Descarga de baja energía	2	2	SI
15	Descarga de baja energía	2	2	SI
16	Descarga de baja energía	2	1	NO
17	Descarga de baja energía	2	2	SI
18	Descarga de baja energía	2	2	SI
19	Descarga de baja energía	2	2	SI
20	Descarga de baja energía	2	2	SI
21	Descarga de baja energía	2	2	SI
22	Descarga de baja energía	2	3	NO
23	Descarga de baja energía	2	3	NO
24	Estado normal	3	3	SI
25	Estado normal	3	3	SI
26	Estado normal	3	3	SI
27	Estado normal	3	3	SI
28	Estado normal	3	3	SI
29	Estado normal	3	3	SI
30	Estado normal	3	3	SI
31	Estado normal	3	3	SI
32	Estado normal	3	4	NO
33	Estado normal	3	3	SI
34	Sobrecalentamiento	4	3	NO
35	Sobrecalentamiento	4	4	SI
36	Sobrecalentamiento	4	4	SI
37	Sobrecalentamiento	4	3	NO
38	Sobrecalentamiento	4	4	SI
39	Sobrecalentamiento	4	4	SI
40	Sobrecalentamiento	4	4	SI
41	Sobrecalentamiento	4	4	SI
42	Sobrecalentamiento	4	4	SI
43	Sobrecalentamiento	4	4	SI
44	Sobrecalentamiento	4	3	NO
45	Sobrecalentamiento	4	4	SI
46	Sobrecalentamiento	4	4	SI
47	Sobrecalentamiento	4	4	SI

48	Sobrecalentamiento	4	4	SI
49	Sobrecalentamiento	4	4	SI
50	Sobrecalentamiento	4	4	SI
51	Sobrecalentamiento	4	4	SI
52	Sobrecalentamiento	4	4	SI
53	Sobrecalentamiento	4	4	SI
54	Sobrecalentamiento	4	4	SI
55	Sobrecalentamiento	4	4	SI
56	Sobrecalentamiento	4	4	SI
57	Sobrecalentamiento	4	4	SI
58	Sobrecalentamiento	4	4	SI
59	Sobrecalentamiento	4	4	SI
60	Sobrecalentamiento	4	4	SI
61	Sobrecalentamiento	4	4	SI
62	Sobrecalentamiento	4	4	SI
63	Sobrecalentamiento	4	4	SI
64	Sobrecalentamiento	4	4	SI

4.2.4 Comparación entre diferentes metodologías

Un estudio comparativo del diagnóstico de fallas en transformadores, determinado por los diferentes métodos, con los 64 casos de prueba se ilustra en la Tabla 4.11. Allí se visualizan los resultados dados por los reportes de los diferentes artículos (diagnostico actual), los entregados por la Red Neuronal (RNA) y los obtenidos mediante los métodos convencionales de interpretación de fallas como: Rogers y Dornenburg.

Tabla 4.11. Comparación de metodologías para diagnóstico de fallos. Fuente:
El autor

Casos	Método de Rogers	Método de Dornenburg	RNA	Diagnostico Actual
1	N.A.	N.A.	Descarga de alta energía	Descarga de alta energía
2	Descarga de alta energía	N.A.	Descarga de alta energía	Descarga de alta energía
3	Descarga de alta energía	N.A.	Descarga de alta energía	Descarga de alta energía
4	Descarga de alta energía	N.A.	Descarga de alta energía	Descarga de alta energía
5	N.A.	N.A.	Descarga de alta energía	Descarga de alta energía
6	Descarga de alta energía	N.A.	Descarga de alta energía	Descarga de alta energía

7	Sobrecalentamiento	Sobrecalentamiento	Descarga de baja energía	Descarga de alta energía
8	Descarga de alta energía	Descarga de alta energía	Descarga de alta energía	Descarga de alta energía
9	Descarga de alta energía	Descarga de alta energía	Descarga de baja energía	Descarga de alta energía
10	Descarga de alta energía	N.A.	Descarga de alta energía	Descarga de alta energía
11	Descarga de baja energía	Descarga de alta energía	Descarga de alta energía	Descarga de baja energía
12	Descarga de baja energía	Descarga de alta energía	Descarga de alta energía	Descarga de baja energía
13	N.A.	Descarga de alta energía	Descarga de baja energía	Descarga de baja energía
14	N.A.	Descarga de alta energía	Descarga de baja energía	Descarga de baja energía
15	Descarga de baja energía	N.A.	Descarga de baja energía	Descarga de baja energía
16	Descarga de alta energía	Descarga de baja energía	Descarga de alta energía	Descarga de baja energía
17	N.A.	Descarga de baja energía	Descarga de baja energía	Descarga de baja energía
18	N.A.	Descarga de alta energía	Descarga de baja energía	Descarga de baja energía
19	Descarga de baja energía	N.A.	Descarga de baja energía	Descarga de baja energía
20	Descarga de baja energía	Descarga de alta energía	Descarga de baja energía	Descarga de baja energía
21	N.A.	Descarga de alta energía	Descarga de baja energía	Descarga de baja energía
22	Sobrecalentamiento	N.A.	Estado normal	Descarga de baja energía
23	Estado normal	N.A.	Descarga de baja energía	Descarga de baja energía
24	Estado normal	Descarga de alta energía	Estado normal	Estado normal
25	Estado normal	Descarga de alta energía	Estado normal	Estado normal

26	N.A.	Descarga de alta energía	Estado normal	Estado normal
27	Sobrecalentamiento	Descarga de alta energía	Estado normal	Estado normal
28	N.A.	Descarga de alta energía	Estado normal	Estado normal
29	N.A.	Descarga de alta energía	Estado normal	Estado normal
30	N.A.	N.A.	Estado normal	Estado normal
31	Sobrecalentamiento	N.A.	Estado normal	Estado normal
32	N.A.	Sobrecalentamiento	Sobrecalentamiento	Estado normal
33	N.A.	N.A.	Estado normal	Estado normal
34	N.A.	N.A.	Estado normal	Sobrecalentamiento
35	Sobrecalentamiento	N.A.	Sobrecalentamiento	Sobrecalentamiento
36	Sobrecalentamiento	N.A.	Sobrecalentamiento	Sobrecalentamiento
37	Sobrecalentamiento	N.A.	Estado normal	Sobrecalentamiento
38	N.A.	N.A.	Sobrecalentamiento	Sobrecalentamiento
39	N.A.	Sobrecalentamiento	Sobrecalentamiento	Sobrecalentamiento
40	Sobrecalentamiento	N.A.	Sobrecalentamiento	Sobrecalentamiento
41	Sobrecalentamiento	N.A.	Sobrecalentamiento	Sobrecalentamiento
42	N.A.	N.A.	Sobrecalentamiento	Sobrecalentamiento
43	Descarga de baja energía	N.A.	Sobrecalentamiento	Sobrecalentamiento
44	N.A.	N.A.	Estado normal	Sobrecalentamiento
45	N.A.	N.A.	Sobrecalentamiento	Sobrecalentamiento
46	N.A.	N.A.	Sobrecalentamiento	Sobrecalentamiento
47	Descarga de baja energía	N.A.	Sobrecalentamiento	Sobrecalentamiento
48	Sobrecalentamiento	N.A.	Sobrecalentamiento	Sobrecalentamiento
49	Sobrecalentamiento	N.A.	Sobrecalentamiento	Sobrecalentamiento
50	N.A.	N.A.	Sobrecalentamiento	Sobrecalentamiento

51	Sobrecalentamiento	Descarga de alta energía	Sobrecalentamiento	Sobrecalentamiento
52	N.A.	N.A.	Sobrecalentamiento	Sobrecalentamiento
53	N.A.	N.A.	Sobrecalentamiento	Sobrecalentamiento
54	N.A.	Sobrecalentamiento	Sobrecalentamiento	Sobrecalentamiento
55	N.A.	N.A.	Sobrecalentamiento	Sobrecalentamiento
56	Sobrecalentamiento	Descarga de alta energía	Sobrecalentamiento	Sobrecalentamiento
57	N.A.	Descarga de alta energía	Sobrecalentamiento	Sobrecalentamiento
58	Sobrecalentamiento	Descarga de alta energía	Sobrecalentamiento	Sobrecalentamiento
59	N.A.	N.A.	Sobrecalentamiento	Sobrecalentamiento
60	Sobrecalentamiento	N.A.	Sobrecalentamiento	Sobrecalentamiento
61	N.A.	N.A.	Sobrecalentamiento	Sobrecalentamiento
62	N.A.	N.A.	Sobrecalentamiento	Sobrecalentamiento
63	Sobrecalentamiento	N.A.	Sobrecalentamiento	Sobrecalentamiento
64	N.A.	N.A.	Sobrecalentamiento	Sobrecalentamiento

4.2.5 Discusión

En la Tabla 4.10 se apreció los resultados dados por los reportes de las publicaciones citadas y los entregados por la red neuronal, demostrando gran coincidencia a excepción de los casos 7, 9, 11, 12, 16, 22, 32, 34, 37 y 44.

Como se observó en la Tabla 4.11, solo se muestran los resultados de dos metodologías convencionales: Rogers y Dornenburg. Quedaron excluidas los métodos de Duval, Gases claves e IEC.

Para analizar los resultados presentados en la Tabla 4.11, se realiza un gráfico comparativo, en el cual se puede observar la efectividad de las diferentes metodologías con las cuales se puede realizar un diagnóstico de un transformador de potencia empleando muestras del análisis de gases disuelto en el aceite AGD.

Figura 4.6: Gráfica del número de casos acertados entre métodos estudiados

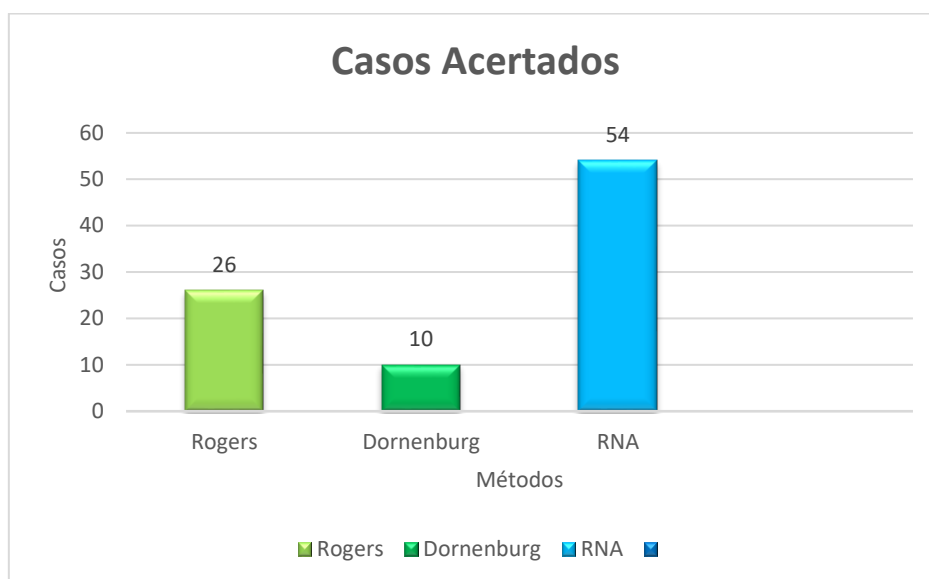
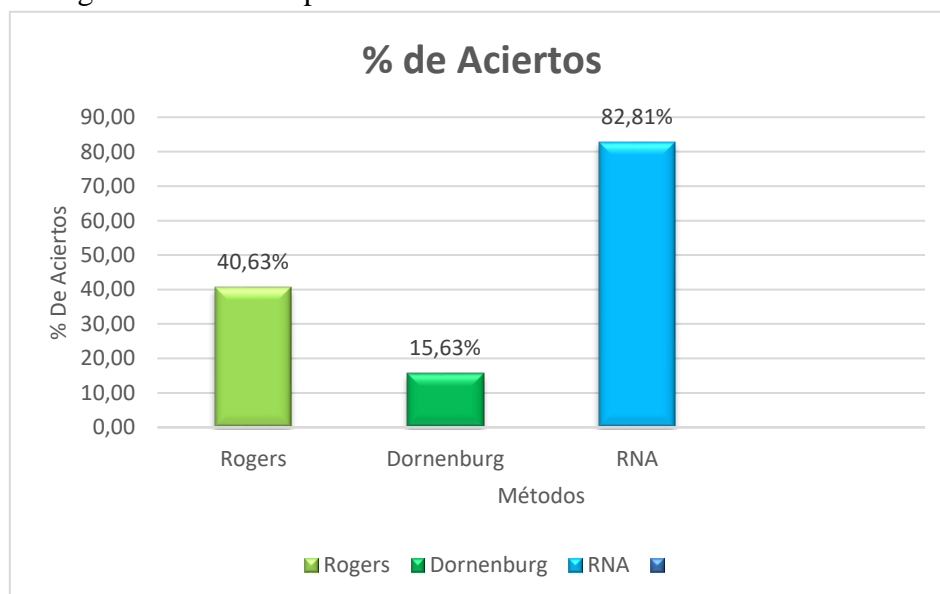


Figura 4.7: Gráfica porcentual de aciertos entre métodos estudiados



Como se puede observar en la Fig. 4.6 y 4.7, la red neuronal es la técnica que mejores resultados entrega. En la Tabla 4.11 se presentaron los casos en que este método converge hacia el mayor número de aciertos para obtener el mejor resultado comparativo respecto a las otras técnicas.

Capítulo 5

Conclusiones

Al seleccionar un histórico de datos del AGD en transformadores de potencia sometido a diagnósticos reales, se obtuvo una fuente confiable de valores de ingreso para los modelos de las RNA, los cuales fueron los descriptores del problema que ayudaron a la salida del clasificador.

Al utilizar una técnica inteligente para proporcionar una solución al problema planteado, se evidenció que las redes neuronales obtienen más del 80% de efectividad respecto a las técnicas convencionales que están por debajo del 41%. Si se desea mejorar la respuesta de salida de la RNA, una forma es obtener más datos para la etapa de entrenamiento.

De acuerdo al estudio comparativo realizado, se confirmó que la metodología de redes neuronales está por encima del 42% de efectividad respecto a los métodos convencionales evaluados. Esto se debe a que los métodos convencionales utilizan una relación de gases que no siempre se puede satisfacer, porque en algunos casos se obtienen resultados indeterminados. A diferencia de los métodos inteligentes, los cuales aprenden en base a los ejemplos introducidos, siempre van a obtener un resultado y no una indeterminación numérica.

Con todos los resultados obtenidos, se concluye finalmente que la técnica presentada en este trabajo, es de gran ayuda para la planificación de los mantenimientos que se implementan a los transformadores de potencia en las centrales de generación. Por otra parte, si se adopta una política estándar respecto a la reducción en los intervalos de muestreo (frecuencia) de los niveles de gases en los transformadores de potencia por parte de las empresas generadoras, con el objetivo de crear una base de datos más numerosa, los resultados al aplicar las redes neuronales para su interpretación aumentarían su efectividad como se evidenció el capítulo 4.

Recomendaciones y trabajo futuro

En Ecuador existe un gran número de transformadores de potencia ligados a la generación, a las subestaciones de las empresas de transmisión y empresas distribuidoras. En las tablas del anexo *D* se muestran las cantidades por tipo de empresa de generación.

El número total de transformadores de potencia en empresas públicas es de 134, y en empresas privadas es de 101; resultando un total de 235 transformadores de potencia en Ecuador, cuyas potencias máximas van desde 1 a 173 MVA. Recordando que una falla en un equipo transformador de potencia podría ocasionar grandes pérdidas económicas, se vuelve una tarea importante el monitoreo de los transformadores. A través de este trabajo, se brinda la opción de mejorar las interpretaciones de los monitoreos para el departamento de mantenimiento de las centrales de generación públicas y privadas del País.

Gracias al estudio realizado, se induce que para tener una mayor precisión en el diagnóstico (en el caso de estado normal), es necesario contar con datos en los cuales sea más específico el tipo de falla y la concentración de gases que la producen. Se sugiere obtener una base de datos más completa e introducir un mayor número de clases para ser más específico en cada falla.

Como se pudo observar en las tablas de entrenamiento 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4 para las dos técnicas propuestas, el buen desempeño está ligado a los parámetros para cada técnica. En este trabajo la elección de parámetros se realizó mediante una búsqueda en malla que el mismo software contiene en su toolbox. Se recomienda que para seleccionar los parámetros que permitan obtener el mejor resultado, se utilice un método de optimización para asegurar que estos sean los adecuados para esta técnica.

Para trabajos futuros se propone mejorar la herramienta presentada en este trabajo, a partir de la adición de una interfaz gráfica. Asimismo, esta herramienta se debe coordinar con un cromatógrafo de gases en línea para que la adquisición de datos sea más sencilla. De esta manera será más fácil de utilizar por diferentes personas y empresas dedicadas al diagnóstico de fallas en transformadores de potencia.

Finalmente, con los resultados obtenidos y debido al gran número de transformadores de potencia que existen en el país (235 hasta el año 2019), las empresas generadoras pueden adoptar la metodología expuesta en este trabajo de investigación para obtener una nueva perspectiva sobre el estado en el que se encuentra sus transformadores. Resultando una forma de evaluar los planes de mantenimientos programados para la intervención de sus equipos.

Capítulo 6

Glosario

RNA Redes neuronales artificiales, técnica basada en inteligencia artificial que asemeja el comportamiento de las redes neuronales humanas.

MLP Perceptrón multicapa en una red neuronal conformada por múltiples capas.

RBF Función de base radial es una red neuronal cuya entrada de activación en una función de base radial.

AGD Análisis de gases disueltos para la obtención de contenidos de gases en aceites y otros líquidos viscosos.

NEI Intensidad energética normalizada, indicador del grado de energía que se produce ante un fallo o una descarga.

DP Grado de polimerización del papel utilizado para envolver los arreglos de bobinas en los transformadores.

PD Descargas parciales en los conductores eléctricos de alta tensión.

BIBLIOGRAFIA

- [1] IEEE, "IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Mineral Oil-Immersed Transformers". Patent IEEE Std C57.104-2019, 1 11 2019.
- [2] J. M. Cadena Zapata and J. A. Cadena Zapata, "Aplicación de redes neuronales probabilísticas en la detección de fallas incipientes en transformadores," *Scientia et Technica* , vol. XIV, no. 39, pp. 48-53, 2008.
- [3] A. A. De La Torre Macías , *Análisis de algoritmos basados en máquinas de soporte vectorial y redes neuronales artificiales para el diagnóstico de fallas en transformadores de potencia empleando muestras de gases disueltos en el aceite*, Quevedo: Quevedo: UTEQ, 2016, 2016.
- [4] Duraisamy and Deverajan, "Neural fuzzy schemes for fault detection in power transformer," *Applied Soft Computing*, vol. VII, no. 7, pp. 534-539, 2007.
- [5] L. Ganyun , C. Haozhong, Z. Haibao and D. Lixin, "Fault diagnosis of power transformer based on multi-layer SVM classifier," *Electric power systems research* , vol. DXXV, pp. 9-15, 2005.
- [6] M. Golkhah, S. Saffar and M. Ali Vahidi, "Artificial neural networks applied to DGA for fault diagnosis in oil-filled power transformers," *IEEE*, vol. III, pp. 1-10, 2011.
- [7] NORMA TECNICA ECUATORIANA , «INEN,» 04 06 2013. [En línea]. Available: https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte_inen_2110-1.pdf. [Último acceso: 26 04 2021].
- [8] C. Jara y D. M. , «Análisis del estado y la vida remanente de un transformador elevador de 275 MVA, 18KV/550KV,» *X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ*, pp. 1-10, 2012.
- [9] ASTM, "Standard Test Method for Acid and Base Number by Color Indicator Titration". Patent ASTM D974 - 21, 2021.

- [10] ASTM, "Standard Test Method for Interfacial Tension of Insulating Liquids Against Water by the Ring Method". Patent ASTM D971 - 20, 2020.
- [11] E. Gallo Martínez, Diagnóstico y mantenimiento a transformadores en campo, Bogotá : Transequipos, 2010.
- [12] E. GALLO MARTINEZ, "Lanotaenergetica," Transequipos, 26 Junio 2020. [Online]. Available: <https://lanotaenergetica.wordpress.com/2020/06/26/entendiendo-la-nueva-norma-ieee-c7-104-2019-publicada-en-noviembre-1-de-2019/>. [Accessed 18 Mayo 2021].
- [13] A. Carrera Gómez, Análisis de gases disueltos en el aceite para el mantenimiento preventivo a transformadores de potencia mediante la implementación de software, México D.F., 2013.
- [14] ASTM, "Standard Test Method for Analysis of Gases Dissolved in Electrical Insulating Oil by Gas Chromatography". Patent ASTM D3612 - 02 (2017), 2017.
- [15] M. Duval, "A review of faults detectable by Gas-in-Oil Analysis in transformers," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. XVIII, no. 3, pp. 8-17, 2002.
- [16] S. A. Ward, "Evaluating transformer condition using DGA Oil Analysis," *IEEE*, vol. III, pp. 463-468, 2003.
- [17] M. Duval and J. Dukarm, "Improving the reliability of transformer Gas-in-Oil Diagnosis," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. XXI, no. 4, pp. 21-27, 2005.
- [18] J. Ganesha, "Dissolved Gas analysis of tranformer Oils: Effects of electric arc," *International conference on power systems*, vol. VI, pp. 371-380, 2006.
- [19] M. Duval, "The Duval triangle for load tap changers, nom-mineral oils and low temperature faults in transformers," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. XXIV, no. 6, pp. 22-29, 2008.
- [20] A. Akbari, A. Setayeshmehr, H. Borsi and E. Gockenbach, "A software implementation of the Duval Triangle Method," *IEEE*, pp. 124-127, 2008.
- [21] E. A. Mackenzie, J. Crossey, A. De Pablo and W. Ferguson, "On-line monitoring and diagnostics for power transformers," in *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, San Diego, 2010.
- [22] H.-C. Sun, Y.-C. Huang and C.-M. Huang, "A review of Dissolved Gas Analysis in Power Transformers," *ELSEVIER*, pp. 1220-1225, 2011.

- [23] S. Ghoneim and I. Taha, "Artificial neural networks for power transformers fault diagnosis based on IEC code using dissolved gas analysis," *International journal of control automation and systems*, vol. IV, no. 2, pp. 18-21, 2015.
- [24] D. Pugh, "Advances in Fault Diagnosis by Combustible Gas Analysis," in *Minutes of Forty-First International Conference of Doble*, Watertown, 1974.
- [25] IEEE, "IEEE Guide for Interpretation of Gasses Generated in Silicone-Immersed Transformers". Patent C57.146:2006, 10 Marzo 2006.
- [26] D. Bhalla, R. Kumar Bansal and H. Om Gupta, "Application of artificial Intelligence Techniques for Dissolved Gas Analysis of Transformers - A review," *World Academy of Science and technology*, vol. 4, no. 2, p. 9, 2010.
- [27] E. F. Caicedo and J. A. López, "La neurona artificial," in *Una aproximación práctica a las redes neuronales artificiales*, Cali, Programa editorial universidad del valle, 2017, p. 219.
- [28] C. G., *Curso de Redes Neuronales*, Merida: Universidad de los Andes, 2008.
- [29] H. Chin-Pao and W. Mang-Hui, "Diagnosis of incipient faults in power transformers using CMAC neural network approach," *Electric power systems research*, vol. DXXI, pp. 235-244, 2004.
- [30] K. Shrivastava and A. Choubey, "A novel association rule mining with IEC ratio based dissolved gas analysis for fault diagnosis of power transformers," *International journal of advanced computer research*, vol. II, no. 2, pp. 34-44, 2012.
- [31] M. Gonzales Penedo, *Aprendizaje y Entrenamiento*, Coruña: Universidad da Coruña, 2014.
- [32] S. SARMA and G. KALYANI, "Application of AI Techniques for non destructive evaluation of power transformers using DGA," *International Journal of Innovations in Energy System and Power*, vol. II, no. 1, pp. 37-43, 2007.
- [33] Y. SUN and S. ZHANG, "Improved BP Neuronal Network for transformer Fault Diagnosis," *Journal of China University of Mining & Technology*, vol. 17, no. 1, pp. 138-142, 2007.
- [34] S. SARMA and KALYANI, ANN Approach for Condition Monitoring of Power Transformers Using DGA, Warangal: IEEE, 2004.
- [35] J. A. Cadena Zapata, *Diagnóstico de fallas en transformadores de potencia*, Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira, 2009.

- [36] MATH WORKS, "The MathWorks, Inc.," 2 Febrero 2015. [Online]. Available: <http://es.mathworks.com/discovery/redes-neuronales.html>. [Accessed 4 Julio 2016].
- [37] M. T, "Practical Neural Networks recipes in C++," *Academic Press*, pp. 173-180, 1993.
- [38] L. SERGIO, "Las Redes Neuronales implementacion y consideraciones prácticas," *Fifth Mexican International Conference on Artificial Intelligence*, pp. 14-15, 24 Noviembre 2013.
- [39] L. Cázares, *Técnicas actuales de investigación documental*, México: Trillas, 1991.
- [40] J. DiGiorgio, "Technical bulletin dissolved gas analysis," NTT, Sacramento, 2013.
- [41] IEEE, "IEEE," 2 Febreeo 2009. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4776518&isnumber=4776517>. [Accessed 1 Febrero 2016].
- [42] ASTM, "ASTM," Febrero 2009. [Online]. Available: <http://www.astm.org/Standards/D3612.htm>. [Accessed 15 Dciembre 2015].
- [43] J. Sarria , N. Guerrero and E. Rivas, "Estado del arte del análisis de gases disueltos en transformadores de potencia," *Revista Facultad de Ingeniería Universidad Distrital Francisco José de Caldas*, vol. XXIII, no. 36, pp. 105-122, 2014.
- [44] AMPERIS PRODUCTS SL, "AMPERIS," 2013. [Online]. Available: <http://www.amperis.com/recursos/articulos/analisis-gases-disueltos/>. [Accessed 5 1 2016].
- [45] Z. Wang, *Artificial intelligence application in the diagnosis of power transformer incipient faults*, Virginia: Virginia Polytechnic Institute, 2000.
- [46] Universidad Tecnológica de Pereira, "Universidad Tecnológica de Pereira," 4 2000. [Online]. Available: <http://ohm.utp.edu.co:16080/neuronales/main.htm>. [Accessed 15 1 2016].
- [47] R. Henao, *Selección de hiperparámetros en máquinas de soporte*, Pereira: Tesis de postgrado - Universidad Nacional de Pereira, 2004.
- [48] A. Chatterjee and N. Kunar Roy, "Health monitoring of power transformers by dissolved gas analysis using regression method and study the effect of filtration on oil," *International journal of electrical, computer, energetic, electronic and communication engineering* , vol. III, no. 11, pp. 1909-1914, 2009.

- [49] J. Cervantes Canales, *Clasificación de grandes conjuntos de datos vía Máquinas de Vectores Soporte y aplicaciones en sistemas biológicos*, México D.F.: Centro de investigación y de estudios avanzados del Instituto Politécnico Nacional, 2009.
- [50] G. Enríquez Harper, "Proteccion de transformadores contra acumulacion de gases o fallas incipientes," in *Fundamentos de instalaciones eléctricas de media y alta tensión*, México, Limusa Noriega Editores, 2005, pp. 408-409.
- [51] ABE, "Support vector machines for pattern classification," in *Support vector machines for pattern classification*, 2005.
- [52] B. M. YESSENIA, "RECONOCIMIENTO Y CLASIFICACION DE ROSAS UTILIZANDO R.N.A Y MANTENIMIENTO DE INVENTARIO EN UN SITIO WEB," *TESIS DE GRADO DE LA UNIVERSIDAD TECNOLOGICA EQUINOCCIAL*, vol. I, no. 1, pp. 62-64, 2011.
- [53] A. R. Oscar, «Creación de una red neuronal artificial e implementacion en un microcontrolador,» *ENINVIE 2010*, vol. VI, n° 8, pp. 40-44, 2010.
- [54] R. O. Víctor, "Reconocimiento de localizaciones mediante Máquinas de Soporte Vectorial," *Proyecto fin de carrera de la Universidad Carlos III de Madrid*, pp. 60-90, 2012.
- [55] W. F. and E. M. , "Vida de transformadores de potencia sumergidos en aceite aislante: Situación actual," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 5, no. 1, 2007.
- [56] IEEE, "Guide for Interpretation of Gases Generated in Natural Ester and Synthetic Ester-Immersed Transformers". Patent C57.155-2014, 28 Noviembre 2014.
- [57] A. International, "ASTM D923-15, Standard Practices for Sampling Electrical Insulating Liquids". USA Patent D923-15, 2015.

ANEXOS

A. Anexo del histórico de datos

A.1 Datos para el entrenamiento de las RNA

A.1.1 Datos de entrenamiento recopilados de [5]

Tabla A.1: Datos de entrenamientos para la base de datos #1

Casos	Concentraciones de gases en PPM					Estado del transformador (Diagnostico actual)	Clase N.º
	H2	CH4	C2H6	C2H4	C2H2		
1	40,8	3	3,6	3,5	7,4	Des. de alta energía	1
2	23	12	12	10	61	Des. de alta energía	1
3	57	13	0,1	11	12	Des. de alta energía	1
4	31	6,6	19	4,7	67	Des. de alta energía	1
5	285	36,3	75	8,4	133	Des. de alta energía	1
6	5283	179	320	3020	2314	Des. de alta energía	1
7	335	67	18	143	170	Des. de alta energía	1
8	44	12,2	3,4	3,2	17,4	Des. de alta energía	1
9	42	62	5	63	73	Des. de alta energía	1
10	60	40	9,9	110	70	Des. de alta energía	1
11	240	28	6	26	85	Des. de alta energía	1
12	466,5	148,8	13	266	511	Des. de alta energía	1
13	260	130	29	84	92	Des. de alta energía	1
14	250	63	3,8	66	120	Des. de alta energía	1
15	59	7,1	19	4,5	71	Des. de alta energía	1
16	650	53	34	20	0	Des. de baja energía	2
17	0	5,2	5,12	9,58	14,6	Des. de baja energía	2
18	1565	93	34	47	0	Des. de baja energía	2
19	160	90	27	17	5,8	Des. de baja energía	2
20	35	25	0	23	22	Des. de baja energía	2
21	10	4	3	33	6	Estado normal	3
22	9,87	2,49	0,79	4,06	4,8	Estado normal	3
23	8,5	7,2	4,3	3,9	3,5	Estado normal	3
24	32	31	7,5	50	1,1	Estado normal	3
25	13,5	1,7	1,2	0,6	0	Estado normal	3

26	280	1500	150	1200	140	Sobrecalentamiento	4
27	228	380	82	1012	19	Sobrecalentamiento	4
28	50	90	18	260	5,9	Sobrecalentamiento	4
29	48	230	160	810	7	Sobrecalentamiento	4
30	90	160	54	330	29	Sobrecalentamiento	4
31	168	1353	581	3281	63	Sobrecalentamiento	4
32	577	3441	521	2928	7	Sobrecalentamiento	4
33	1400	3000	560	3500	4	Sobrecalentamiento	4
34	47	106	28,7	242,2	6,35	Sobrecalentamiento	4
35	220	340	42	480	14	Sobrecalentamiento	4
36	380	190	30	280	22	Sobrecalentamiento	4
37	30	62	60	460	3,4	Sobrecalentamiento	4
38	770	1420	401	1452	3	Sobrecalentamiento	4
39	17000	110000	84000	89000	16000	Sobrecalentamiento	4
40	81	130	74	230	2,9	Sobrecalentamiento	4
41	130	440	180	730	0	Sobrecalentamiento	4
42	70	69	29	241	10	Sobrecalentamiento	4
43	130	440	180	730	0	Sobrecalentamiento	4
44	3606,4	1182	328,4	1604,8	6,3	Sobrecalentamiento	4
45	249	726	278	938	0	Sobrecalentamiento	4
46	170	330	77	340	13	Sobrecalentamiento	4
47	170	320	53	520	3,2	Sobrecalentamiento	4
48	11	88	83	250	8,5	Sobrecalentamiento	4
49	1000	4300	1100	5400	24	Sobrecalentamiento	4
50	613	3240	1432	2788	0	Sobrecalentamiento	4

A.1.2 Datos de entrenamiento recopilados de [34]

Tabla A.2: Datos de entrenamientos para la base de datos #12

Casos	Concentraciones de gases en PPM					Estado del transformador (Diagnostico actual)	Clase N.º
	H2	CH4	C2H6	C2H4	C2H2		
1	24	13	5	43	319	Des. de alta energía	1
2	127	24	0	32	81	Des. de alta energía	1
3	127	107	11	154	224	Des. de alta energía	1
4	212	38	15	47	78	Des. de alta energía	1
5	274	27	5	33	97	Des. de alta energía	1
6	307	22	2	33	109	Des. de alta energía	1
7	416	695	74	867	0	Des. de alta energía	1
8	441	207	43	224	261	Des. de alta energía	1
9	800	1393	304	2817	3000	Des. de alta energía	1
10	858	1324	208	2793	7672	Des. de alta energía	1
11	1249	370	56	606	1371	Des. de alta energía	1
12	4906	8784	1404	9924	9671	Des. de alta energía	1
13	9474	4066	353	6552	12997	Des. de alta energía	1
14	160	10	3	1	1	Des. de baja energía	2
15	240	20	5	28	96	Des. de baja energía	2
16	1076	95	4	71	231	Des. de baja energía	2

17	16	87	75	395	30	Sobrecalentamiento	4
18	33	79	30	215	5	Sobrecalentamiento	4
19	60	144	67	449	9	Sobrecalentamiento	4
20	65	61	16	143	3	Sobrecalentamiento	4
21	80	619	326	2480	0	Sobrecalentamiento	4
22	117	167	48	481	7	Sobrecalentamiento	4
23	137	369	144	1242	16	Sobrecalentamiento	4
24	199	770	217	1508	72	Sobrecalentamiento	4
25	231	3997	1726	5584	0	Sobrecalentamiento	4
26	244	754	172	1281	27	sobrecalentamiento	4
27	266	584	328	862	1	Sobrecalentamiento	4
28	425	1742	7299	37043	158	Sobrecalentamiento	4
29	507	1053	297	1440	17	Sobrecalentamiento	4
30	2004	9739	2750	5113	0	Sobrecalentamiento	4

A.1.3 Datos de entrenamiento recopilados de [29]

Tabla A.3: Datos de entrenamientos para la base de datos #3

Casos	Concentraciones de gases en PPM					Estado del transformador (Diagnostico actual)	Clase N.º
	H2	CH4	C2H6	C2H4	C2H2		
1	127	107	11	154	224	Des. de alta energía	1
2	60	40	6,9	110	70	Des. de alta energía	1
3	200	48	14	117	131	Des. de alta energía	1
4	32,4	5,5	1,4	12,6	13,2	Des. de alta energía	1
5	345	112,3	27,5	51,5	58,8	Des. de baja energía	2
6	565	53	34	47	0	Des. de baja energía	2
7	980	73	58	12	0	Des. de baja energía	2
8	650	53	34	20	0	Des. de baja energía	2
9	14,7	3,7	10,5	2,7	0,2	Estado normal	3
10	181	262	41	28	0	Sobrecalentamiento	4
11	173	334	172	812,5	37,7	Sobrecalentamiento	4
12	220	340	42	480	14	Sobrecalentamiento	4
13	170	320	53	520	3,2	Sobrecalentamiento	4
14	27	90	42	63	0,2	Sobrecalentamiento	4
15	56	286	96	928	7	Sobrecalentamiento	4
16	78	161	86	353	10	Sobrecalentamiento	4
17	160	53	34	20	0	Sobrecalentamiento	4
18	95	110	160	50	0	Sobrecalentamiento	4
19	300	490	180	360	95	Sobrecalentamiento	4
20	200	700	250	740	1	Sobrecalentamiento	4

A.1.4 Datos de entrenamiento recopilados de [30]

Tabla A.4: Datos de entrenamientos para la base de datos #4

Casos	Concentraciones de gases en PPM					Estado del transformador (Diagnostico actual)	Clase N.º
	H2	CH4	C2H6	C2H4	C2H2		
1	1,7011	1,1971	0,8177	0,117	0,1293	Des. de alta energía	1
2	1,3229	0,4296	0,04557	0,0002	0,0131	Des. de alta energía	1
3	29,9914	1,8591	0,5192	0,7374	0,0591	Des. de alta energía	1
4	2,7011	1,1871	0,7167	0,217	0,2293	Des. de alta energía	1
5	30,991	2,8591	0,6192	0,6374	0,0691	Des. de alta energía	1
6	8,6976	1,0636	2,1259	0,5134	0,5348	Des. de alta energía	1
7	1,8012	1,231	0,6167	0,113	0,2133	Des. de alta energía	1
8	5,3862	0,4166	0,28271	0,0477	0,0004	Des. de baja energía	2
9	4,3368	1,0566	0,9231	0,2002	0,0025	Des. de baja energía	2
10	5,7787	0,5458	0,07298	0,1546	0,0069	Des. de baja energía	2
11	31,9914	2,113	0,5583	0,6613	0,0513	Des. de baja energía	2
12	0,5585	0,1546	0,0041	0,0008	0,0169	Des. de baja energía	2
13	7,9165	4,3174	5,211	3,284	1,8652	Des. de baja energía	2
14	1,6427	1,4899	0,5277	7,4315	0,0045	Estado normal	3
15	6,8729	2,2421	0,17	0,4064	0,0059	Estado Normal	3
16	1,8421	0,8287	0,1761	0,618	0,0025	Estado normal	3
17	4,5925	24,797	13,8563	14,707	0,0030	Sobrecalentamiento	4
18	4,1159	0,898	2,5779	0,9623	0,0377	Sobrecalentamiento	4
19	1,8589	3,108	3,212	2,148	0,0080	Sobrecalentamiento	4
20	0,3985	5,5257	4,442	0,825	0,0027	Sobrecalentamiento	4
21	1,702	0,2414	0,2545	0,2089	0,0040	Sobrecalentamiento	4
22	6,0646	12,025	15,713	0,6513	0,0013	Sobrecalentamiento	4
23	0,7323	3,0435	1,382	0,2912	0,0019	Sobrecalentamiento	4
24	0,1487	0,9906	0,1008	0,0745	0,0096	Sobrecalentamiento	4
25	2,608	18,9712	2,74	39,848	0,0041	Sobrecalentamiento	4
26	3,1681	9,265	6,6307	2,9401	0,0221	Sobrecalentamiento	4
27	0,8573	6,3671	4,9939	5,0809	0,0001	Sobrecalentamiento	4
28	4,4798	45,47	342,5	35,39	21,562	Sobrecalentamiento	4
29	4,4171	0,3517	0,1288	0,0297	0,0050	NO ASIGNADO	-
30	0,7683	0,7255	0,00873	0,1139	0,0099	NO ASIGNADO	-
31	2,545	0,145	0,0044	0,0007	0,0135	NO ASIGNADO	-
32	7,3779	0,6711	0,9027	0,6864	0,0037	NO ASIGNADO	-

A.2 Datos para las pruebas de los métodos de Rogers, Dornenburg, RNA

A 2.1 Datos de prueba recopilados de [23]

Tabla A.5: Datos ingresados para prueba #1

Casos	Concentraciones de gases en PPM					Estado del transformador (Diagnostico actual)	Clase N.º
	H2	CH4	C2H6	C2H4	C2H2		
1	21	34	5	47	62	Des. de alta energía	1
2	1607	615	80	916	1294	Des. de alta energía	1
3	127	107	11	154	224	Des. de alta energía	1
4	60	40	6,9	110	70	Des. de alta energía	1
5	34,45	21,3	3,19	45	19,62	Des. de alta energía	1
6	86	30	10	35	29	Des. de alta energía	1
7	59,3	41	9,9	111	70	Des. de alta energía	1
8	469	147	12,5	265	520	Des. de alta energía	1
9	980	73	58	12	0,01	Des. de baja energía	2
10	980	73	58	12	0,01	Des. de baja energía	2
11	260	3	18	2	0,01	Des. de baja energía	2
12	586	19	77	6	0,01	Des. de baja energía	2
13	180,85	0,5	0,234	0,18	0,0001	Des. de baja energía	2
14	239	27,5	5,5	25,5	85	Des. de baja energía	2
15	56	5,5	92	34,5	27,5	Des. de baja energía	2
16	30	22	14	4,1	0,1	Estado normal	3
17	2,9	2	1,5	0,3	0,1	Estado normal	3
18	120	17	32	4	23	Estado Normal	3
19	14,7	3,7	10,5	2,7	0,2	Estado normal	3
20	33	26	6	53	0,2	Estado normal	3
21	12	8	40	5	0,01	Estado normal	3
22	269	1081	347	1725	25	Sobrecalentamiento	4
23	10	10	8	1	0,01	Sobrecalentamiento	4
24	4	99	82	4,2	0,1	Sobrecalentamiento	4
25	50	100	51	305	9	Sobrecalentamiento	4
26	30,8	149	47,9	146	0,1	Sobrecalentamiento	4
27	27	615	80	916	1294	Sobrecalentamiento	4
28	181	262	41	28	0,01	Sobrecalentamiento	4
29	173	334	172	812,5	37,7	Sobrecalentamiento	4
30	27	90	42	63	0,2	Sobrecalentamiento	4
31	86	187	136	363	0,01	Sobrecalentamiento	4
32	10	24	372	24	0,01	Sobrecalentamiento	4
33	30,4	117	44,2	138	0,1	Sobrecalentamiento	4
34	200	700	250	740	1	Sobrecalentamiento	4
35	16	25	19	39	0,01	Sobrecalentamiento	4
36	22	40	36	6	1	Sobrecalentamiento	4
37	1770	3630	1070	8480	78	Sobrecalentamiento	4
38	14	237	92	470	0,01	Sobrecalentamiento	4
39	157	127	34	96	0,01	Sobrecalentamiento	4

A 2.2 Datos de prueba recopilados de [5]

Tabla A.6: Datos ingresados para prueba #2

Casos	Concentraciones de gases en PPM					Estado del transformador (Diagnostico actual)	Clase N.º
	H2	CH4	C2H6	C2H4	C2H2		
1	293	50	13	115	120	Des. de alta energía	1
2	443	85	9,5	103	174	Des. de alta energía	1
3	35	25	0	23	22	Des. de baja energía	2
4	980	73	58	12	0	Des. de baja energía	2
5	160	90	27	17	5	Des. de baja energía	2
6	176	206	47,7	75,7	68,7	Des. de baja energía	2
7	565	93	34	47	0	Des. de baja energía	2
8	150	53	34	20	0	Des. de baja energía	2
9	10	4	3	33	6	Estado normal	3
10	14,7	3,8	10,5	2,7	0,2	Estado normal	3
11	6,7	10	11	71	3,9	Estado normal	3
12	0,33	0,26	0,04	0,27	0	Estado normal	3
13	73	520	140	1200	6	Sobrecalentamiento	4
14	15	125	29	574	7	Sobrecalentamiento	4
15	8	631	254	2020	39	Sobrecalentamiento	4
16	42	97	157	600	0	Sobrecalentamiento	4
17	120	120	33	84	0,55	Sobrecalentamiento	4
18	117	357	92	468	4	Sobrecalentamiento	4
19	766	993	116	665	4	Sobrecalentamiento	4
20	5	517	69	523	6	Sobrecalentamiento	4
21	80	153	42	276	18	Sobrecalentamiento	4
22	16	237	92	470	0	Sobrecalentamiento	4
23	0	434	226	387	0	Sobrecalentamiento	4
24	86	110	18	92	7,4	Sobrecalentamiento	4

A.3 Datos normalizados para el entrenamiento de las RNA

A 3.1 Datos normalizados de entrenamiento obtenidos de [5]

Tabla A.7: Datos de entrenamiento normalizados #1

Datos	H2'	CH4'	C2H6'	C2H4'	C2H2'	Clase N.º
1	0,002400	0,000012	0,000043	0,000039	0,000463	1
2	0,001353	0,000094	0,000143	0,000112	0,003813	1
3	0,003353	0,000103	0,000001	0,000124	0,000750	1
4	0,001824	0,000045	0,000226	0,000053	0,004188	1
5	0,016765	0,000315	0,000893	0,000094	0,008313	1
6	0,310765	0,001612	0,003810	0,033933	0,144625	1
7	0,019706	0,000594	0,000214	0,001607	0,010625	1
8	0,002588	0,000095	0,000040	0,000036	0,001088	1
9	0,002471	0,000548	0,000060	0,000708	0,004563	1

10	0,003529	0,000348	0,000118	0,001236	0,004375	1
11	0,014118	0,000239	0,000071	0,000292	0,005313	1
12	0,027441	0,001337	0,000155	0,002989	0,031938	1
13	0,015294	0,001166	0,000345	0,000944	0,005750	1
14	0,014706	0,000557	0,000045	0,000742	0,007500	1
15	0,003471	0,000049	0,000226	0,000051	0,004438	1
16	0,038235	0,000466	0,000405	0,000225	0,000000	2
17	0,000000	0,000032	0,000061	0,000108	0,000913	2
18	0,092059	0,000830	0,000405	0,000528	0,000000	2
19	0,009412	0,000803	0,000321	0,000191	0,000363	2
20	0,002059	0,000212	0,000000	0,000258	0,001375	2
21	0,000588	0,000021	0,000036	0,000371	0,000375	3
22	0,000581	0,000007	0,000009	0,000046	0,000300	3
23	0,000500	0,000050	0,000051	0,000044	0,000219	3
24	0,001882	0,000266	0,000089	0,000562	0,000069	3
25	0,000794	0,000000	0,000014	0,000007	0,000000	3
26	0,016471	0,013621	0,001786	0,013483	0,008750	4
27	0,013412	0,003439	0,000976	0,011371	0,001188	4
28	0,002941	0,000803	0,000214	0,002921	0,000369	4
29	0,002824	0,002075	0,001905	0,009101	0,000438	4
30	0,005294	0,001439	0,000643	0,003708	0,001813	4
31	0,009882	0,012285	0,006917	0,036865	0,003938	4
32	0,033941	0,031267	0,006202	0,032899	0,000438	4
33	0,082353	0,027258	0,006667	0,039326	0,000250	4
34	0,002765	0,000948	0,000342	0,002721	0,000397	4
35	0,012941	0,003076	0,000500	0,005393	0,000875	4
36	0,022353	0,001712	0,000357	0,003146	0,001375	4
37	0,001765	0,000548	0,000714	0,005169	0,000213	4
38	0,045294	0,012894	0,004774	0,016315	0,000188	4
39	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	4
40	0,004765	0,001166	0,000881	0,002584	0,000181	4
41	0,007647	0,003985	0,002143	0,008202	0,000000	4
42	0,004118	0,000612	0,000345	0,002708	0,000625	4
43	0,007647	0,003985	0,002143	0,008202	0,000000	4
44	0,212141	0,010730	0,003910	0,018031	0,000394	4
45	0,014647	0,006585	0,003310	0,010539	0,000000	4
46	0,010000	0,002985	0,000917	0,003820	0,000813	4
47	0,010000	0,002894	0,000631	0,005843	0,000200	4
48	0,000647	0,000785	0,000988	0,002809	0,000531	4
49	0,058824	0,039076	0,013095	0,060674	0,001500	4
50	0,036059	0,029440	0,017048	0,031326	0,000000	4

A 3.2 Datos normalizados de entrenamiento recopilados de [34]

Tabla A.8: Datos de entrenamiento normalizados #2

Datos	H2'	CH4'	C2H6'	C2H4'	C2H2'	Clase N.º
1	0,001412	0,000117	0,000060	0,000483	0,019938	1
2	0,007471	0,000217	0,000000	0,000360	0,005063	1

3	0,007471	0,000971	0,000131	0,001730	0,014000	1
4	0,012471	0,000344	0,000179	0,000528	0,004875	1
5	0,016118	0,000244	0,000060	0,000371	0,006063	1
6	0,018059	0,000199	0,000024	0,000371	0,006813	1
7	0,024471	0,006317	0,000881	0,009742	0,000000	1
8	0,025941	0,001881	0,000512	0,002517	0,016313	1
9	0,047059	0,012662	0,003619	0,031652	0,187500	1
10	0,050471	0,012035	0,002476	0,031382	0,479500	1
11	0,073471	0,003362	0,000667	0,006809	0,085688	1
12	0,288588	0,079853	0,016714	0,111506	0,604438	1
13	0,557294	0,036962	0,004202	0,073618	0,812313	1
14	0,009412	0,000090	0,000036	0,000011	0,000063	2
15	0,014118	0,000181	0,000060	0,000315	0,006000	2
16	0,063294	0,000862	0,000048	0,000798	0,014438	2
17	0,000941	0,000790	0,000893	0,004438	0,001875	4
18	0,001941	0,000717	0,000357	0,002416	0,000313	4
19	0,003529	0,001308	0,000798	0,005045	0,000563	4
20	0,003824	0,000553	0,000190	0,001607	0,000188	4
21	0,004706	0,005626	0,003881	0,027865	0,000000	4
22	0,006882	0,001517	0,000571	0,005404	0,000438	4
23	0,008059	0,003353	0,001714	0,013955	0,001000	4
24	0,011706	0,006999	0,002583	0,016944	0,004500	4
25	0,013588	0,036335	0,020548	0,062742	0,000000	4
26	0,014353	0,006853	0,002048	0,014393	0,001688	4
27	0,015647	0,005308	0,003905	0,009685	0,000063	4
28	0,025000	0,015835	0,086893	0,416213	0,009875	4
29	0,029824	0,009571	0,003536	0,016180	0,001063	4
30	0,117882	0,088535	0,032738	0,057449	0,000000	4

A. 3.3 Datos normalizados de entrenamiento obtenidos de [29]

Tabla A.9: Datos de entrenamiento normalizados #3

Datos	H2'	CH4'	C2H6'	C2H4'	C2H2'	Clase N.º
1	0,007471	0,000957	0,000131	0,001724	0,014000	1
2	0,003529	0,000348	0,000082	0,001229	0,004375	1
3	0,011765	0,000421	0,000167	0,001308	0,008188	1
4	0,001906	0,000035	0,000017	0,000135	0,000825	1
5	0,020294	0,001005	0,000327	0,000572	0,003675	2
6	0,033235	0,000466	0,000405	0,000521	0,000000	2
7	0,057647	0,000648	0,000690	0,000128	0,000000	2
8	0,038235	0,000466	0,000405	0,000218	0,000000	2
9	0,000865	0,000018	0,000125	0,000024	0,000013	3
10	0,010647	0,002366	0,000488	0,000308	0,000000	4
11	0,010176	0,003021	0,002048	0,009123	0,002356	4
12	0,012941	0,003076	0,000500	0,005387	0,000875	4
13	0,010000	0,002894	0,000631	0,005836	0,000200	4
14	0,001588	0,000803	0,000500	0,000701	0,000013	4
15	0,003294	0,002585	0,001143	0,010420	0,000438	4

16	0,004588	0,001448	0,001024	0,003960	0,000625	4
17	0,009412	0,000466	0,000405	0,000218	0,000000	4
18	0,005588	0,000985	0,001905	0,000555	0,000000	4
19	0,017647	0,004439	0,002143	0,004038	0,005938	4
20	0,011765	0,006348	0,002976	0,008308	0,000063	4

A 3.4 Datos normalizados de entrenamiento obtenidos de [30]

Tabla A.10: Datos de entrenamiento normalizados #4

Datos	H2'	CH4'	C2H6'	C2H4'	C2H2'	Clase N.º
1	0.000100	0.000010	0.000010	0.000001	0.000008	1
2	0.000078	0.000003	0.000001	0.000000	0.000001	1
3	0.001764	0.000016	0.000006	0.000008	0.000004	1
4	0.000159	0.000009	0.000009	0.000002	0.000014	1
5	0.001823	0.000025	0.000007	0.000007	0.000004	1
6	0.000512	0.000008	0.000025	0.000006	0.000033	1
7	0.000106	0.000010	0.000007	0.000001	0.000013	1
8	0.000317	0.000002	0.000003	0.000001	0.000000	2
9	0.000255	0.000008	0.000011	0.000002	0.000000	2
10	0.000340	0.000004	0.000001	0.000002	0.000000	2
11	0.001882	0.000018	0.000007	0.000007	0.000003	2
12	0.000033	0.000000	0.000000	0.000000	0.000001	2
13	0.000466	0.000038	0.000062	0.000037	0.000117	2
14	0.000097	0.000012	0.000006	0.000083	0.000000	3
15	0.000404	0.000019	0.000002	0.000005	0.000000	3
16	0.000108	0.000006	0.000002	0.000007	0.000000	3
17	0.000270	0.000224	0.000165	0.000165	0.000000	4
18	0.000242	0.000007	0.000031	0.000011	0.000002	4
19	0.000109	0.000027	0.000038	0.000024	0.000001	4
20	0.000023	0.000049	0.000053	0.000009	0.000000	4
21	0.000100	0.000001	0.000003	0.000002	0.000000	4
22	0.000357	0.000108	0.000187	0.000007	0.000000	4
23	0.000043	0.000026	0.000016	0.000003	0.000000	4
24	0.000009	0.000008	0.000001	0.000001	0.000001	4
25	0.000153	0.000171	0.000033	0.000448	0.000000	4
26	0.000186	0.000083	0.000079	0.000033	0.000001	4
27	0.000050	0.000057	0.000059	0.000057	0.000000	4
28	0.000264	0.000412	0.004077	0.000398	0.001348	4
29	0.000260	0.000002	0.000002	0.000000	0.000000	-
30	0.000045	0.000005	0.000000	0.000001	0.000001	-
31	0.000150	0.000000	0.000000	0.000000	0.000001	-
32	0.000434	0.000005	0.000011	0.000008	0.000000	-

A.4 datos normalizados para las pruebas de los métodos de Rogers, Dornenburg, RNA

A 4.1 Datos normalizados de prueba recopilados de [23]

Tabla A.11: Datos de prueba normalizados #1

Datos	H2'	CH4'	C2H6'	C2H4'	C2H2'	Clase N.º
1	0,011864	0,009295	0,004673	0,005521	0,047913	1
2	0,907910	0,169362	0,074766	0,108000	1,000000	1
3	0,071751	0,029407	0,010280	0,018140	0,173107	1
4	0,033898	0,010948	0,006449	0,012951	0,054096	1
5	0,019463	0,005797	0,002981	0,005285	0,015162	1
6	0,048588	0,008193	0,009346	0,004106	0,022411	1
7	0,033503	0,011224	0,009252	0,013069	0,054096	1
8	0,264972	0,040427	0,011682	0,031229	0,401855	1
9	0,553672	0,020040	0,054206	0,001394	0,000008	2
10	0,553672	0,020040	0,054206	0,001394	0,000008	2
11	0,146893	0,000755	0,016822	0,000215	0,000008	2
12	0,331073	0,005163	0,071963	0,000686	0,000008	2
13	0,102175	0,000066	0,000219	0,000000	0,000000	2
14	0,135028	0,007505	0,005140	0,002986	0,065688	2
15	0,031638	0,001444	0,085981	0,004047	0,021252	2
16	0,016949	0,005989	0,013084	0,000462	0,000077	3
17	0,001638	0,000479	0,001402	0,000014	0,000077	3
18	0,067797	0,004612	0,029907	0,000450	0,017774	3
19	0,008305	0,000948	0,009813	0,000297	0,000155	3
20	0,018644	0,007091	0,005607	0,006229	0,000155	3
21	0,006780	0,002132	0,037383	0,000568	0,000008	3
22	0,151977	0,297746	0,324299	0,203403	0,019320	4
23	0,005650	0,002683	0,007477	0,000097	0,000008	4
24	0,002260	0,027203	0,076636	0,000474	0,000077	4
25	0,028249	0,027479	0,047664	0,035947	0,006955	4
26	0,017401	0,040978	0,044766	0,017196	0,000077	4
27	0,015254	0,037397	0,043832	0,015427	0,000077	4
28	0,102260	0,072110	0,038318	0,003281	0,000008	4
29	0,097740	0,091946	0,160748	0,095794	0,029134	4
30	0,015254	0,024724	0,039252	0,007408	0,000155	4
31	0,048588	0,051447	0,127103	0,042786	0,000008	4
32	0,005650	0,006540	0,347664	0,002809	0,000008	4
33	0,017175	0,032162	0,041308	0,016253	0,000077	4
34	0,112994	0,192780	0,233645	0,087245	0,000773	4
35	0,009040	0,006816	0,017757	0,004578	0,000008	4
36	0,012429	0,010948	0,033645	0,000686	0,000773	4
37	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	0,060278	4
38	0,007910	0,065222	0,085981	0,055404	0,000008	4
39	0,088701	0,034917	0,031776	0,011300	0,000008	4

A 4.2 Datos normalizados de prueba extraídos de [5]

Tabla A.12: Datos de prueba normalizados #2

Datos	H2'	CH4'	C2H6'	C2H4'	C2H2'	Clase N.º
1	0.165537	0.013703	0.012150	0.013540	0.092736	1
2	0.250282	0.023346	0.008879	0.012125	0.134467	1
3	0.019774	0.006816	0.000000	0.002691	0.017002	1
4	0.553672	0.020040	0.054206	0.001394	0.000000	1
5	0.090395	0.024724	0.025234	0.001984	0.003864	1
6	0.099435	0.056682	0.044579	0.008906	0.053091	1
7	0.319209	0.025550	0.031776	0.005521	0.000000	1
8	0.084746	0.014530	0.031776	0.002337	0.000000	1
9	0.005650	0.001030	0.002804	0.003870	0.004637	1
10	0.008305	0.000975	0.009813	0.000297	0.000155	1
11	0.003785	0.002683	0.010280	0.008352	0.003014	1
12	0.000186	0.000000	0.000037	0.000011	0.000000	2
13	0.041243	0.143189	0.130841	0.141491	0.004637	2
14	0.008475	0.034366	0.027103	0.067669	0.005410	4
15	0.004520	0.173770	0.237383	0.238191	0.030139	4
16	0.023729	0.026652	0.146729	0.070735	0.000000	4
17	0.067797	0.032989	0.030841	0.009885	0.000425	4
18	0.066102	0.098283	0.085981	0.055169	0.003091	4
19	0.432768	0.273502	0.108411	0.078400	0.003091	4
20	0.002825	0.142363	0.064486	0.061655	0.004637	4
21	0.045198	0.042080	0.039252	0.032527	0.013910	4
22	0.009040	0.065222	0.085981	0.055404	0.000000	4
23	0.000000	0.119496	0.211215	0.045617	0.000000	4
24	0.048588	0.030234	0.016822	0.010828	0.005719	4

A.5 Histórico de datos para el entrenamiento de las RNA

A 5.1 Datos unificados para el entrenamiento de las RNA

Tabla A.13: Base de datos para el entrenamiento de las RNA

Casos	Concentraciones de gases en PPM					Estado del transformador (Diagnostico actual)	Clase N.º
	H2	CH4	C2H6	C2H4	C2H2		
1	40.8	3	3.6	3.5	7.4	Des. de alta energía	1
2	23	12	12	10	61	Des. de alta energía	1
3	57	13	0.1	11	12	Des. de alta energía	1
4	31	6.6	19	4.7	67	Des. de alta energía	1
5	285	36.3	75	8.4	133	Des. de alta energía	1
6	5283	179	320	3020	2314	Des. de alta energía	1
7	335	67	18	143	170	Des. de alta energía	1
8	44	12.2	3.4	3.2	17.4	Des. de alta energía	1

9	42	62	5	63	73	Des. de alta energía	1
10	60	40	9.9	110	70	Des. de alta energía	1
11	240	28	6	26	85	Des. de alta energía	1
12	466.5	148.8	13	266	511	Des. de alta energía	1
13	260	130	29	84	92	Des. de alta energía	1
14	250	63	3.8	66	120	Des. de alta energía	1
15	59	7.1	19	4.5	71	Des. de alta energía	1
16	24	13	5	43	319	Des. de alta energía	1
17	127	24	0	32	81	Des. de alta energía	1
18	127	107	11	154	224	Des. de alta energía	1
19	212	38	15	47	78	Des. de alta energía	1
20	274	27	5	33	97	Des. de alta energía	1
21	307	22	2	33	109	Des. de alta energía	1
22	416	695	74	867	0	Des. de alta energía	1
23	441	207	43	224	261	Des. de alta energía	1
24	800	1393	304	2817	3000	Des. de alta energía	1
25	858	1324	208	2793	7672	Des. de alta energía	1
26	1249	370	56	606	1371	Des. de alta energía	1
27	4906	8784	1404	9924	9671	Des. de alta energía	1
28	9474	4066	353	6552	12997	Des. de alta energía	1
29	127	107	11	154	224	Des. de alta energía	1
30	60	40	6.9	110	70	Des. de alta energía	1
31	200	48	14	117	131	Des. de alta energía	1
32	32.4	5.5	1.4	12.6	13.2	Des. de alta energía	1
33	1.7011	1.1971	0.8177	0.117	0.1293	Des. de alta energía	1
34	1.3229	0.4296	0.0455	0.000205	0.01314	Des. de alta energía	1
35	29.9914	1.8591	0.5192	0.7374	0.0591	Des. de alta energía	1
36	2.7011	1.1871	0.7167	0.217	0.2293	Des. de alta energía	1
37	30.991	2.8591	0.6192	0.6374	0.0691	Des. de alta energía	1
38	8.6976	1.0636	2.1259	0.5134	0.5348	Des. de alta energía	1
39	1.8012	1.231	0.6167	0.113	0.2133	Des. de alta energía	1
40	650	53	34	20	0	Des. de baja energía	2
41	0	5.2	5.12	9.58	14.6	Des. de baja energía	2
42	1565	93	34	47	0	Des. de baja energía	2
43	160	90	27	17	5.8	Des. de baja energía	2
44	35	25	0	23	22	Des. de baja energía	2
45	160	10	3	1	1	Des. de baja energía	2
46	240	20	5	28	96	Des. de baja energía	2
47	1076	95	4	71	231	Des. de baja energía	2
48	345	112.3	27.5	51.5	58.8	Des. de baja energía	2
49	565	53	34	47	0	Des. de baja energía	2
50	980	73	58	12	0	Des. de baja energía	2
51	650	53	34	20	0	Des. de baja energía	2
52	5.3862	0.4166	0.2827	0.04776	0.00040	Des. de baja energía	2
53	4.3368	1.0566	0.9231	0.2002	0.00250	Des. de baja energía	2
54	5.7787	0.5458	0.0729	0.1546	0.00692	Des. de baja energía	2
55	31.9914	2.113	0.5583	0.6613	0.0513	Des. de baja energía	2
56	0.5585	0.1546	0.0041	0.000846	0.01696	Des. de baja energía	2
57	7.9165	4.3174	5.211	3.284	1.8652	Des. de baja energía	2
58	10	4	3	33	6	Estado normal	3
59	9.87	2.49	0.79	4.06	4.8	Estado normal	3

60	8.5	7.2	4.3	3.9	3.5	Estado normal	3
61	32	31	7.5	50	1.1	Estado normal	3
62	13.5	1.7	1.2	0.6	0	Estado normal	3
63	14.7	3.7	10.5	2.7	0.2	Estado normal	3
64	1.6427	1.4899	0.5277	7.4315	0.00452	Estado normal	3
65	6.8729	2.2421	0.17	0.4064	0.00599	Estado Normal	3
66	1.8421	0.8287	0.1761	0.618	0.00252	Estado normal	3
67	280	1500	150	1200	140	Sobrecalentamiento	4
68	228	380	82	1012	19	Sobrecalentamiento	4
69	50	90	18	260	5.9	Sobrecalentamiento	4
70	48	230	160	810	7	Sobrecalentamiento	4
71	90	160	54	330	29	Sobrecalentamiento	4
72	168	1353	581	3281	63	Sobrecalentamiento	4
73	577	3441	521	2928	7	Sobrecalentamiento	4
74	1400	3000	560	3500	4	Sobrecalentamiento	4
75	47	106	28.7	242.2	6.35	Sobrecalentamiento	4
76	220	340	42	480	14	Sobrecalentamiento	4
77	380	190	30	280	22	Sobrecalentamiento	4
78	30	62	60	460	3.4	Sobrecalentamiento	4
79	770	1420	401	1452	3	Sobrecalentamiento	4
80	17000	110000	84000	89000	16000	Sobrecalentamiento	4
81	81	130	74	230	2.9	Sobrecalentamiento	4
82	130	440	180	730	0	Sobrecalentamiento	4
83	70	69	29	241	10	Sobrecalentamiento	4
84	130	440	180	730	0	Sobrecalentamiento	4
85	3606.4	1182	328.4	1604.8	6.3	Sobrecalentamiento	4
86	249	726	278	938	0	Sobrecalentamiento	4
87	170	330	77	340	13	Sobrecalentamiento	4
88	170	320	53	520	3.2	Sobrecalentamiento	4
89	11	88	83	250	8.5	Sobrecalentamiento	4
90	1000	4300	1100	5400	24	Sobrecalentamiento	4
91	613	3240	1432	2788	0	Sobrecalentamiento	4
92	16	87	75	395	30	Sobrecalentamiento	4
93	33	79	30	215	5	Sobrecalentamiento	4
94	60	144	67	449	9	Sobrecalentamiento	4
95	65	61	16	143	3	Sobrecalentamiento	4
96	80	619	326	2480	0	Sobrecalentamiento	4
97	117	167	48	481	7	Sobrecalentamiento	4
98	137	369	144	1242	16	Sobrecalentamiento	4
99	199	770	217	1508	72	Sobrecalentamiento	4
100	231	3997	1726	5584	0	Sobrecalentamiento	4
101	244	754	172	1281	27	sobrecalentamiento	4
102	266	584	328	862	1	Sobrecalentamiento	4
103	425	1742	7299	37043	158	Sobrecalentamiento	4
104	507	1053	297	1440	17	Sobrecalentamiento	4
105	2004	9739	2750	5113	0	Sobrecalentamiento	4
106	181	262	41	28	0	Sobrecalentamiento	4
107	173	334	172	812.5	37.7	Sobrecalentamiento	4
108	220	340	42	480	14	Sobrecalentamiento	4
109	170	320	53	520	3.2	Sobrecalentamiento	4
110	27	90	42	63	0.2	Sobrecalentamiento	4

111	56	286	96	928	7	Sobrecalentamiento	4
112	78	161	86	353	10	Sobrecalentamiento	4
113	160	53	34	20	0	Sobrecalentamiento	4
114	95	110	160	50	0	Sobrecalentamiento	4
115	300	490	180	360	95	Sobrecalentamiento	4
116	200	700	250	740	1	Sobrecalentamiento	4
117	4.5925	24.797	13.856	14.707	0.00303	Sobrecalentamiento	4
118	4.1159	0.898	2.5779	0.9623	0.03779	Sobrecalentamiento	4
119	1.8589	3.108	3.212	2.148	0.00807	Sobrecalentamiento	4
120	0.3985	5.5257	4.442	0.825	0.00277	Sobrecalentamiento	4
121	1.702	0.2414	0.2545	0.2089	0.00405	Sobrecalentamiento	4
122	6.0646	12.025	15.713	0.6513	0.00138	Sobrecalentamiento	4
123	0.7323	3.0435	1.382	0.2912	0.00198	Sobrecalentamiento	4
124	0.1487	0.9906	0.1008	0.0745	0.00965	Sobrecalentamiento	4
125	2.608	18.9712	2.74	39.848	0.00415	Sobrecalentamiento	4
126	3.1681	9.265	6.6307	2.9401	0.02215	Sobrecalentamiento	4
127	0.8573	6.3671	4.9939	5.0809	0.00012	Sobrecalentamiento	4
128	4.4798	45.47	342.5	35.39	21.562	Sobrecalentamiento	4
129	4.4171	0.3517	0.1288	0.0297	0.00501	NO ASIGNADO	-
130	0.7683	0.7255	0.0087	0.1139	0.00994	NO ASIGNADO	-
131	2.545	0.145	0.0044	0.00074	0.01355	NO ASIGNADO	-
132	7.3779	0.6711	0.9027	0.6864	0.00379	NO ASIGNADO	-

A 5.2 Datos unificados normalizados para el entrenamiento de las RNA

Tabla A.14: Base de datos normalizados para el entrenamiento de las RNA

Datos	H2'	CH4'	C2H6'	C2H4'	C2H2'	Clase N.º
1	0.557294	0.036949	0.004202	0.073618	0.812313	1
2	0.310765	0.001612	0.003810	0.033933	0.144625	1
3	0.288588	0.079840	0.016714	0.111506	0.604438	1
4	0.073471	0.003348	0.000667	0.006809	0.085688	1
5	0.050471	0.012021	0.002476	0.031382	0.479500	1
6	0.047059	0.012648	0.003619	0.031652	0.187500	1
7	0.027441	0.001337	0.000155	0.002989	0.031938	1
8	0.025941	0.001866	0.000512	0.002517	0.016313	1
9	0.024471	0.006303	0.000881	0.009742	0.000000	1
10	0.019706	0.000594	0.000214	0.001607	0.010625	1
11	0.018059	0.000185	0.000024	0.000371	0.006813	1
12	0.016765	0.000315	0.000893	0.000094	0.008313	1
13	0.016118	0.000230	0.000060	0.000371	0.006063	1
14	0.015294	0.001166	0.000345	0.000944	0.005750	1
15	0.014706	0.000557	0.000045	0.000742	0.007500	1
16	0.014118	0.000239	0.000071	0.000292	0.005313	1
17	0.012471	0.000330	0.000179	0.000528	0.004875	1
18	0.011765	0.000421	0.000167	0.001308	0.008188	1
19	0.007471	0.000203	0.000000	0.000360	0.005063	1
20	0.007471	0.000957	0.000131	0.001730	0.014000	1
21	0.007471	0.000957	0.000131	0.001724	0.014000	1

22	0.003529	0.000348	0.000118	0.001236	0.004375	1
23	0.003529	0.000348	0.000082	0.001229	0.004375	1
24	0.003471	0.000049	0.000226	0.000051	0.004438	1
25	0.003353	0.000103	0.000001	0.000124	0.000750	1
26	0.002588	0.000095	0.000040	0.000036	0.001088	1
27	0.002471	0.000548	0.000060	0.000708	0.004563	1
28	0.002400	0.000012	0.000043	0.000039	0.000463	1
29	0.001906	0.000035	0.000017	0.000135	0.000825	1
30	0.001824	0.000045	0.000226	0.000053	0.004188	1
31	0.001823	0.000025	0.000007	0.000007	0.000004	1
32	0.001764	0.000016	0.000006	0.000008	0.000004	1
33	0.001412	0.000103	0.000060	0.000483	0.019938	1
34	0.001353	0.000094	0.000143	0.000112	0.003813	1
35	0.000512	0.000008	0.000025	0.000006	0.000033	1
36	0.000159	0.000009	0.000009	0.000002	0.000014	1
37	0.000106	0.000010	0.000007	0.000001	0.000013	1
38	0.000100	0.000010	0.000010	0.000001	0.000008	1
39	0.000078	0.000003	0.000001	0.000000	0.000001	1
40	0.092059	0.000830	0.000405	0.000528	0.000000	2
41	0.063294	0.000848	0.000048	0.000798	0.014438	2
42	0.057647	0.000648	0.000690	0.000128	0.000000	2
43	0.038235	0.000466	0.000405	0.000225	0.000000	2
44	0.038235	0.000466	0.000405	0.000218	0.000000	2
45	0.033235	0.000466	0.000405	0.000521	0.000000	2
46	0.020294	0.001005	0.000327	0.000572	0.003675	2
47	0.014118	0.000166	0.000060	0.000315	0.006000	2
48	0.009412	0.000803	0.000321	0.000191	0.000363	2
49	0.009412	0.000075	0.000036	0.000011	0.000063	2
50	0.002059	0.000212	0.000000	0.000258	0.001375	2
51	0.001882	0.000018	0.000007	0.000007	0.000003	2
52	0.000466	0.000038	0.000062	0.000037	0.000117	2
53	0.000340	0.000004	0.000001	0.000002	0.000000	2
54	0.000317	0.000002	0.000003	0.000001	0.000000	2
55	0.000255	0.000008	0.000011	0.000002	0.000000	2
56	0.000033	0.000000	0.000000	0.000000	0.000001	2
57	0.000000	0.000032	0.000061	0.000108	0.000913	2
58	0.001882	0.000266	0.000089	0.000562	0.000069	3
59	0.000865	0.000018	0.000125	0.000024	0.000013	3
60	0.000794	0.000000	0.000014	0.000007	0.000000	3
61	0.000588	0.000021	0.000036	0.000371	0.000375	3
62	0.000581	0.000007	0.000009	0.000046	0.000300	3
63	0.000500	0.000050	0.000051	0.000044	0.000219	3
64	0.000404	0.000019	0.000002	0.000005	0.000000	3
65	0.000108	0.000006	0.000002	0.000007	0.000000	3
66	0.000097	0.000012	0.000006	0.000083	0.000000	3
67	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	4
68	0.212141	0.010730	0.003910	0.018031	0.000394	4
69	0.117882	0.088522	0.032738	0.057449	0.000000	4
70	0.082353	0.027258	0.006667	0.039326	0.000250	4
71	0.058824	0.039076	0.013095	0.060674	0.001500	4
72	0.045294	0.012894	0.004774	0.016315	0.000188	4

73	0.036059	0.029440	0.017048	0.031326	0.000000	4
74	0.033941	0.031267	0.006202	0.032899	0.000438	4
75	0.029824	0.009557	0.003536	0.016180	0.001063	4
76	0.025000	0.015821	0.086893	0.416213	0.009875	4
77	0.022353	0.001712	0.000357	0.003146	0.001375	4
78	0.017647	0.004439	0.002143	0.004038	0.005938	4
79	0.016471	0.013621	0.001786	0.013483	0.008750	4
80	0.015647	0.005294	0.003905	0.009685	0.000063	4
81	0.014647	0.006585	0.003310	0.010539	0.000000	4
82	0.014353	0.006839	0.002048	0.014393	0.001688	4
83	0.013588	0.036321	0.020548	0.062742	0.000000	4
84	0.013412	0.003439	0.000976	0.011371	0.001188	4
85	0.012941	0.003076	0.000500	0.005393	0.000875	4
86	0.012941	0.003076	0.000500	0.005387	0.000875	4
87	0.011765	0.006348	0.002976	0.008308	0.000063	4
88	0.011706	0.006985	0.002583	0.016944	0.004500	4
89	0.010647	0.002366	0.000488	0.000308	0.000000	4
90	0.010176	0.003021	0.002048	0.009123	0.002356	4
91	0.010000	0.002985	0.000917	0.003820	0.000813	4
92	0.010000	0.002894	0.000631	0.005843	0.000200	4
93	0.010000	0.002894	0.000631	0.005836	0.000200	4
94	0.009882	0.012285	0.006917	0.036865	0.003938	4
95	0.009412	0.000466	0.000405	0.000218	0.000000	4
96	0.008059	0.003339	0.001714	0.013955	0.001000	4
97	0.007647	0.003985	0.002143	0.008202	0.000000	4
98	0.007647	0.003985	0.002143	0.008202	0.000000	4
99	0.006882	0.001503	0.000571	0.005404	0.000438	4
100	0.005588	0.000985	0.001905	0.000555	0.000000	4
101	0.005294	0.001439	0.000643	0.003708	0.001813	4
102	0.004765	0.001166	0.000881	0.002584	0.000181	4
103	0.004706	0.005612	0.003881	0.027865	0.000000	4
104	0.004588	0.001448	0.001024	0.003960	0.000625	4
105	0.004118	0.000612	0.000345	0.002708	0.000625	4
106	0.003824	0.000539	0.000190	0.001607	0.000188	4
107	0.003529	0.001294	0.000798	0.005045	0.000563	4
108	0.003294	0.002585	0.001143	0.010420	0.000438	4
109	0.002941	0.000803	0.000214	0.002921	0.000369	4
110	0.002824	0.002075	0.001905	0.009101	0.000438	4
111	0.002765	0.000948	0.000342	0.002721	0.000397	4
112	0.001941	0.000703	0.000357	0.002416	0.000313	4
113	0.001765	0.000548	0.000714	0.005169	0.000213	4
114	0.001588	0.000803	0.000500	0.000701	0.000013	4
115	0.000941	0.000775	0.000893	0.004438	0.001875	4
116	0.000647	0.000785	0.000988	0.002809	0.000531	4
117	0.000357	0.000108	0.000187	0.000007	0.000000	4
118	0.000270	0.000224	0.000165	0.000165	0.000000	4
119	0.000264	0.000412	0.004077	0.000398	0.001348	4
120	0.000242	0.000007	0.000031	0.000011	0.000002	4
121	0.000186	0.000083	0.000079	0.000033	0.000001	4
122	0.000153	0.000171	0.000033	0.000448	0.000000	4
123	0.000109	0.000027	0.000038	0.000024	0.000001	4

124	0.000100	0.000001	0.000003	0.000002	0.000000	4
125	0.000050	0.000057	0.000059	0.000057	0.000000	4
126	0.000043	0.000026	0.000016	0.000003	0.000000	4
127	0.000023	0.000049	0.000053	0.000009	0.000000	4
128	0.000009	0.000008	0.000001	0.000001	0.000001	4
129	0.000260	0.000002	0.000002	0.000000	0.000000	-
130	0.000045	0.000005	0.000000	0.000001	0.000001	-
131	0.000150	0.000000	0.000000	0.000000	0.000001	-
132	0.000434	0.000005	0.000011	0.000008	0.000000	-

A.6 Histórico de datos para las pruebas de los métodos de Rogers, Dornenburg, RNA

A 6.1 Datos unificados para el las pruebas de los métodos de Rogers, Dornenburg, RNA

Tabla A.15: Base de datos para probar los métodos de Rogers, Dornenburg y RNA

Casos	Concentraciones de gases en PPM					Estado del transformador (Diagnostico actual)	Clase N.º
	H2	CH4	C2H6	C2H4	C2H2		
1	21	34	5	47	62	Des. de alta energía	1
2	1607	615	80	916	1294	Des. de alta energía	1
3	127	107	11	154	224	Des. de alta energía	1
4	60	40	6.9	110	70	Des. de alta energía	1
5	34.45	21.3	3.19	45	19.62	Des. de alta energía	1
6	86	30	10	35	29	Des. de alta energía	1
7	59.3	41	9.9	111	70	Des. de alta energía	1
8	469	147	12.5	265	520	Des. de alta energía	1
9	293	50	13	115	120	Des. de alta energía	1
10	443	85	9.5	103	174	Des. de alta energía	1
11	980	73	58	12	0.01	Des. de baja energía	2
12	980	73	58	12	0.01	Des. de baja energía	2
13	260	3	18	2	0.01	Des. de baja energía	2
14	586	19	77	6	0.01	Des. de baja energía	2
15	180.8	0.5	0.234	0.18	0.0001	Des. de baja energía	2
16	239	27.5	5.5	25.5	85	Des. de baja energía	2
17	56	5.5	92	34.5	27.5	Des. de baja energía	2
18	35	25	0	23	22	Des. de baja energía	2
19	980	73	58	12	0	Des. de baja energía	2
20	160	90	27	17	5	Des. de baja energía	2
21	176	206	47.7	75.7	68.7	Des. de baja energía	2
22	565	93	34	47	0	Des. de baja energía	2
23	150	53	34	20	0	Des. de baja energía	2
24	30	22	14	4.1	0.1	Estado normal	3
25	2.9	2	1.5	0.3	0.1	Estado normal	3
26	120	17	32	4	23	Estado Normal	3
27	14.7	3.7	10.5	2.7	0.2	Estado normal	3

28	33	26	6	53	0.2	Estado normal	3
29	12	8	40	5	0.01	Estado normal	3
30	10	4	3	33	6	Estado normal	3
31	14.7	3.8	10.5	2.7	0.2	Estado normal	3
32	6.7	10	11	71	3.9	Estado normal	3
33	0.33	0.26	0.04	0.27	0	Estado normal	3
34	269	1081	347	1725	25	Sobrecalentamiento	4
35	10	10	8	1	0.01	Sobrecalentamiento	4
36	4	99	82	4.2	0.1	Sobrecalentamiento	4
37	50	100	51	305	9	Sobrecalentamiento	4
38	30.8	149	47.9	146	0.1	Sobrecalentamiento	4
39	27	615	80	916	1294	Sobrecalentamiento	4
40	181	262	41	28	0.01	Sobrecalentamiento	4
41	173	334	172	812.5	37.7	Sobrecalentamiento	4
42	27	90	42	63	0.2	Sobrecalentamiento	4
43	86	187	136	363	0.01	Sobrecalentamiento	4
44	10	24	372	24	0.01	Sobrecalentamiento	4
45	30.4	117	44.2	138	0.1	Sobrecalentamiento	4
46	200	700	250	740	1	Sobrecalentamiento	4
47	16	25	19	39	0.01	Sobrecalentamiento	4
48	22	40	36	6	1	Sobrecalentamiento	4
49	1770	3630	1070	8480	78	Sobrecalentamiento	4
50	14	237	92	470	0.01	Sobrecalentamiento	4
51	157	127	34	96	0.01	Sobrecalentamiento	4
52	73	520	140	1200	6	Sobrecalentamiento	4
53	15	125	29	574	7	Sobrecalentamiento	4
54	8	631	254	2020	39	Sobrecalentamiento	4
55	42	97	157	600	0	Sobrecalentamiento	4
56	120	120	33	84	0.55	Sobrecalentamiento	4
57	117	357	92	468	4	Sobrecalentamiento	4
58	766	993	116	665	4	Sobrecalentamiento	4
59	5	517	69	523	6	Sobrecalentamiento	4
60	80	153	42	276	18	Sobrecalentamiento	4
61	16	237	92	470	0	Sobrecalentamiento	4
62	0	434	226	387	0	Sobrecalentamiento	4
63	86	110	18	92	7.4	Sobrecalentamiento	4

A 6.2 Datos unificados normalizados para el las pruebas de los métodos de Rogers, Dornenburg, RNA.

Tabla A.16: Base de datos normalizados para probar los métodos de Rogers, Dornenburg y RNA

Datos	H2'	CH4'	C2H6'	C2H4'	C2H2'	Clase N.º
1	0.011864	0.009295	0.004673	0.005521	0.047913	1
2	0.907910	0.169362	0.074766	0.108000	1.000000	1
3	0.071751	0.029407	0.010280	0.018140	0.173107	1
4	0.033898	0.010948	0.006449	0.012951	0.054096	1

5	0.019463	0.005797	0.002981	0.005285	0.015162	1
6	0.048588	0.008193	0.009346	0.004106	0.022411	1
7	0.033503	0.011224	0.009252	0.013069	0.054096	1
8	0.264972	0.040427	0.011682	0.031229	0.401855	1
9	0.165537	0.013703	0.012150	0.013540	0.092736	1
10	0.250282	0.023346	0.008879	0.012125	0.134467	1
11	0.553672	0.020040	0.054206	0.001394	0.000008	2
12	0.553672	0.020040	0.054206	0.001394	0.000008	2
13	0.146893	0.000755	0.016822	0.000215	0.000008	2
14	0.331073	0.005163	0.071963	0.000686	0.000008	2
15	0.102175	0.000066	0.000219	0.000000	0.000000	2
16	0.135028	0.007505	0.005140	0.002986	0.065688	2
17	0.031638	0.001444	0.085981	0.004047	0.021252	2
18	0.019774	0.006816	0.000000	0.002691	0.017002	2
19	0.553672	0.020040	0.054206	0.001394	0.000000	2
20	0.090395	0.024724	0.025234	0.001984	0.003864	2
21	0.099435	0.056682	0.044579	0.008906	0.053091	2
22	0.319209	0.025550	0.031776	0.005521	0.000000	2
23	0.084746	0.014530	0.031776	0.002337	0.000000	2
24	0.016949	0.005989	0.013084	0.000462	0.000077	3
25	0.001638	0.000479	0.001402	0.000014	0.000077	3
26	0.067797	0.004612	0.029907	0.000450	0.017774	3
27	0.008305	0.000948	0.009813	0.000297	0.000155	3
28	0.018644	0.007091	0.005607	0.006229	0.000155	3
29	0.006780	0.002132	0.037383	0.000568	0.000008	3
30	0.005650	0.001030	0.002804	0.003870	0.004637	3
31	0.008305	0.000975	0.009813	0.000297	0.000155	3
32	0.003785	0.002683	0.010280	0.008352	0.003014	3
33	0.000186	0.000000	0.000037	0.000011	0.000000	3
34	0.151977	0.297746	0.324299	0.203403	0.019320	4
35	0.005650	0.002683	0.007477	0.000097	0.000008	4
36	0.002260	0.027203	0.076636	0.000474	0.000077	4
37	0.028249	0.027479	0.047664	0.035947	0.006955	4
38	0.017401	0.040978	0.044766	0.017196	0.000077	4
39	0.015254	0.037397	0.043832	0.015427	0.000077	4
40	0.102260	0.072110	0.038318	0.003281	0.000008	4
41	0.097740	0.091946	0.160748	0.095794	0.029134	4
42	0.015254	0.024724	0.039252	0.007408	0.000155	4
43	0.048588	0.051447	0.127103	0.042786	0.000008	4
44	0.005650	0.006540	0.347664	0.002809	0.000008	4
45	0.017175	0.032162	0.041308	0.016253	0.000077	4
46	0.112994	0.192780	0.233645	0.087245	0.000773	4
47	0.009040	0.006816	0.017757	0.004578	0.000008	4
48	0.012429	0.010948	0.033645	0.000686	0.000773	4
49	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	0.060278	4
50	0.007910	0.065222	0.085981	0.055404	0.000008	4
51	0.088701	0.034917	0.031776	0.011300	0.000008	4
52	0.041243	0.143189	0.130841	0.141491	0.004637	4
53	0.008475	0.034366	0.027103	0.067669	0.005410	4
54	0.004520	0.173770	0.237383	0.238191	0.030139	4
55	0.023729	0.026652	0.146729	0.070735	0.000000	4

56	0.067797	0.032989	0.030841	0.009885	0.000425	4
57	0.066102	0.098283	0.085981	0.055169	0.003091	4
58	0.432768	0.273502	0.108411	0.078400	0.003091	4
59	0.002825	0.142363	0.064486	0.061655	0.004637	4
60	0.045198	0.042080	0.039252	0.032527	0.013910	4
61	0.009040	0.065222	0.085981	0.055404	0.000000	4
62	0.000000	0.119496	0.211215	0.045617	0.000000	4
63	0.048588	0.030234	0.016822	0.010828	0.005719	4

B. Anexo de resultados

B 1.1 Resultados obtenidos mediante método de Rogers

Tabla B.1: Resultados obtenidos mediante el método de Rogers

METODOLOGÍA DE ROGERS										
Casos	Relación				Código				Tipo de falla	Clase
	R1	R2	R3	R4	R 1	R 2	R 3	R 4		
1	1,62	0,15	9,40	1,32	1	0	2	1	N.A.	-
2	0,38	0,13	11,45	1,41	0	0	2	1	Arco eléctrico	1
3	0,84	0,10	14,00	1,45	0	0	2	1	Arco eléctrico	1
4	0,67	0,17	15,94	0,64	0	0	2	1	Arco eléctrico	1
5	0,62	0,15	14,11	0,44	0	0	2	0	N.A.	-
6	0,35	0,33	3,50	0,83	0	0	2	1	N.A.	1
7	0,69	0,24	11,21	0,63	0	0	1	0	Sobrecalentamiento	4
8	0,31	0,09	21,20	1,96	0	0	2	1	Arco eléctrico	1
9	0,17	0,26	8,85	1,04	0	0	2	1	Arco eléctrico	1
10	0,19	0,11	10,84	1,69	0	0	2	1	Arco eléctrico	1
11	0,07	0,79	0,21	0,00	5	0	0	0	Descarga parcial	2
12	0,07	0,79	0,21	0,00	5	0	0	0	Descarga parcial	2
13	0,01	6,00	0,11	0,01	5	1	0	0	N.A.	-
14	0,03	4,05	0,08	0,00	5	1	0	0	N.A.	-
15	0,00	0,47	0,77	0,00	5	0	0	0	Descarga parcial	2
16	0,12	0,20	4,64	3,33	0	0	2	2	Arco eléctrico	1
17	0,10	16,73	0,38	0,80	5	1	0	1	N.A.	-
18	0,71	0,00	-	0,96	0	0	-	1	N.A.	-
19	0,07	0,79	0,21	0,00	5	0	0	0	Descarga parcial	2
20	0,56	0,30	0,63	0,29	0	0	0	0	Estado normal	3
21	1,17	0,23	1,59	0,91	1	0	1	1	N.A.	-
22	0,16	0,37	1,38	0,00	0	0	1	0	Sobrecalentamiento	4
23	0,35	0,64	0,59	0,00	0	0	0	0	Estado normal	3
24	0,73	0,64	0,29	0,02	0	0	0	0	Estado normal	3
25	0,69	0,75	0,20	0,33	0	0	0	0	Estado normal	3
26	0,14	1,88	0,13	5,75	0	1	0	2	N.A.	-
27	0,25	2,84	0,26	0,07	0	1	0	0	Sobrecalentamiento	4
28	0,79	0,23	8,83	0,00	0	0	2	0	N.A.	-
29	0,67	5,00	0,13	0,00	0	1	1	0	N.A.	-
30	0,40	0,75	11,00	0,18	0	0	2	0	N.A.	-
31	0,26	2,76	0,26	0,07	0	1	0	0	Sobrecalentamiento	4
32	1,49	1,10	6,45	0,05	1	1	2	0	N.A.	-
33	0,79	0,15	6,75	0,00	0	0	2	0	N.A.	-
34	4,02	0,32	4,97	0,01	2	0	2	0	N.A.	-
35	1,00	0,80	0,13	0,01	1	0	0	0	Sobrecalentamiento	4
	24,7									
36	5	0,83	0,05	0,02	2	0	0	0	Sobrecalentamiento	4
37	2,00	0,51	5,98	0,03	1	0	2	0	Sobrecalentamiento	4
38	4,84	0,32	3,05	0,00	2	0	2	0	N.A.	-
	22,7									
39	8	0,13	11,45	1,41	2	0	2	1	N.A.	-
40	1,45	0,16	0,68	0,00	1	0	0	0	Sobrecalentamiento	4
41	1,93	0,51	4,72	0,05	1	0	2	0	Sobrecalentamiento	4

42	3,33	0,47	1,50	0,00	2	1	1	0	N.A.	-
43	2,17	0,73	2,67	0,00	1	0	1	0	Descarga parcial	2
44	2,40	15,50	0,06	0,00	1	1	0	0	N.A.	-
45	3,85	0,38	3,12	0,00	2	0	2	0	N.A.	-
46	3,50	0,36	2,96	0,00	2	0	1	0	N.A.	-
47	1,56	0,76	2,05	0,00	1	0	1	0	Descarga parcial	2
48	1,82	0,90	0,17	0,17	1	0	0	0	Sobrecalentamiento	4
49	2,05	0,29	7,93	0,01	1	0	1	0	Descarga parcial	2
16,9										
50	3	0,39	5,11	0,00	2	0	2	0	N.A.	-
51	0,81	0,27	2,82	0,00	0	0	1	0	Sobrecalentamiento	4
52	7,12	0,27	8,57	0,01	2	0	2	0	N.A.	-
53	8,33	0,23	19,79	0,01	2	0	2	0	N.A.	-
78,8										
54	8	0,40	7,95	0,02	2	0	2	0	N.A.	-
55	2,31	1,62	3,82	0,00	1	1	2	0	N.A.	-
56	1,00	0,28	2,55	0,01	1	0	1	0	Sobrecalentamiento	4
57	3,05	0,26	5,09	0,01	2	0	2	0	N.A.	-
58	1,30	0,12	5,73	0,01	1	0	2	0	Sobrecalentamiento	4
103,										
59	40	0,13	7,58	0,01	2	0	2	0	N.A.	-
60	1,91	0,27	6,57	0,07	1	0	2	0	Sobrecalentamiento	4
14,8										
61	1	0,39	5,11	0,00	2	0	2	0	N.A.	-
62	-	0,52	1,71	0,00	-	-	-	-	N.A.	-
63	1,28	0,16	5,11	0,08	1	0	2	0	Sobrecalentamiento	4

B 1.2 Resultados obtenidos mediante método de Dornenburg

Tabla B.2: Resultados obtenidos mediante el método de Dornenburg

METODOLOGÍA DE DORNENBURG						
Casos	Relación				Tipo de falla	Clase
	R1	R2	R3	R4		
1	1,62	1,32	1,82	0,08	N.A.	-
2	0,38	1,41	2,10	0,06	N.A.	-
3	0,84	1,45	2,09	0,05	N.A.	-
4	0,67	0,64	1,75	0,10	N.A.	-
5	0,62	0,44	0,92	0,16	N.A.	-
6	0,35	0,83	0,97	0,34	N.A.	-
7	0,69	0,63	1,71	0,14	Sobrecalentamiento	4
8	0,31	1,96	3,54	0,02	Arco eléctrico	1
9	0,17	1,04	2,40	0,11	Arco eléctrico	1
10	0,19	1,69	2,05	0,05	N.A.	-
11	0,07	0,00	0,00	-	Arco eléctrico	1
12	0,07	0,00	0,00	-	Arco eléctrico	1
13	0,01	0,01	0,00	-	Arco eléctrico	1
14	0,03	0,00	0,00	-	Arco eléctrico	1
15	0,00	0,00	0,00	-	N.A.	-
16	0,12	3,33	3,09	0,06	Descarga parcial	2
17	0,10	0,80	5,00	3,35	Descarga parcial	2
18	0,71	0,96	0,88	0,00	Arco eléctrico	1

19	0,07	0,00	0,00	-	N.A.	-
20	0,56	0,29	0,06	5,40	Arco eléctrico	1
21	1,17	0,91	0,33	0,69	Arco eléctrico	1
22	0,16	0,00	0,00	-	N.A.	-
23	0,35	0,00	0,00	-	N.A.	-
24	0,73	0,02	0,00	140,00	Arco eléctrico	1
25	0,69	0,33	0,05	15,00	Arco eléctrico	1
26	0,14	5,75	1,35	1,39	Arco eléctrico	1
27	0,25	0,07	0,05	52,50	Arco eléctrico	1
28	0,79	0,00	0,01	30,00	Arco eléctrico	1
29	0,67	0,00	0,00	-	Arco eléctrico	1
30	0,40	0,18	1,50	0,50	N.A.	-
31	0,26	0,07	0,05	52,50	N.A.	-
32	1,49	0,05	0,39	2,82	Sobrecalentamiento	4
33	0,79	0,00	0,00	-	N.A.	-
34	4,02	0,01	0,02	13,88	N.A.	-
35	1,00	0,01	0,00	800,00	N.A.	-
36	24,75	0,02	0,00	820,00	N.A.	-
37	2,00	0,03	0,09	5,67	N.A.	-
38	4,84	0,00	0,00	479,00	N.A.	-
39	22,78	1,41	2,10	0,06	Sobrecalentamiento	4
40	1,45	0,00	0,00	-	N.A.	-
41	1,93	0,05	0,11	4,56	N.A.	-
42	3,33	0,00	0,00	210,00	N.A.	-
43	2,17	0,00	0,00	-	N.A.	-
44	2,40	0,00	0,00	-	N.A.	-
45	3,85	0,00	0,00	442,00	N.A.	-
46	3,50	0,00	0,00	250,00	N.A.	-
47	1,56	0,00	0,00	-	N.A.	-
48	1,82	0,17	0,03	36,00	N.A.	-
49	2,05	0,01	0,02	13,72	N.A.	-
50	16,93	0,00	0,00	-	N.A.	-
51	0,81	0,00	0,00	-	Arco eléctrico	1
52	7,12	0,01	0,01	23,33	N.A.	-
53	8,33	0,01	0,06	4,14	N.A.	-
54	78,88	0,02	0,06	6,51	Sobrecalentamiento	4
55	2,31	0,00	0,00	-	N.A.	-
56	1,00	0,01	0,00	60,00	Arco eléctrico	1
57	3,05	0,01	0,01	23,00	Arco eléctrico	1
58	1,30	0,01	0,00	29,00	Arco eléctrico	1
59	103,40	0,01	0,01	11,50	N.A.	-
60	1,91	0,07	0,12	2,33	N.A.	-
61	14,81	0,00	0,00	-	N.A.	-
62	-	0,00	0,00	-	N.A.	-
63	1,28	0,08	0,07	2,43	N.A.	-

B 1.3 Resultados obtenidos mediante RNA.

Tabla B.3: Resultados obtenidos mediante RNA

METODOLOGÍA BASADA EN REDES NEURONALES				
Casos	Estado Actual	Clase actual	Clase pronosticada	Clase RNA

1	Descarga de alta energía	1	1
2	Descarga de alta energía	1	1
3	Descarga de alta energía	1	1
4	Descarga de alta energía	1	1
5	Descarga de alta energía	1	1
6	Descarga de alta energía	1	1
7	Descarga de alta energía	1	2
8	Descarga de alta energía	1	1
9	Descarga de alta energía	1	2
10	Descarga de alta energía	1	1
11	Descarga de baja energía	2	1
12	Descarga de baja energía	2	1
13	Descarga de baja energía	2	2
14	Descarga de baja energía	2	2
15	Descarga de baja energía	2	2
16	Descarga de baja energía	2	1
17	Descarga de baja energía	2	2
18	Descarga de baja energía	2	2
19	Descarga de baja energía	2	2
20	Descarga de baja energía	2	2
21	Descarga de baja energía	2	2
22	Descarga de baja energía	2	3
23	Descarga de baja energía	2	3
24	Estado normal	3	3
25	Estado normal	3	3
26	Estado normal	3	3
27	Estado normal	3	3
28	Estado normal	3	3
29	Estado normal	3	3
30	Estado normal	3	3
31	Estado normal	3	3
32	Estado normal	3	4
33	Estado normal	3	3
34	Sobrecalentamiento	4	3
35	Sobrecalentamiento	4	4
36	Sobrecalentamiento	4	4
37	Sobrecalentamiento	4	3
38	Sobrecalentamiento	4	4
39	Sobrecalentamiento	4	4
40	Sobrecalentamiento	4	4
41	Sobrecalentamiento	4	4
42	Sobrecalentamiento	4	4
43	Sobrecalentamiento	4	4
44	Sobrecalentamiento	4	3
45	Sobrecalentamiento	4	4
46	Sobrecalentamiento	4	4
47	Sobrecalentamiento	4	4
48	Sobrecalentamiento	4	4
49	Sobrecalentamiento	4	4
50	Sobrecalentamiento	4	4
51	Sobrecalentamiento	4	4
52	Sobrecalentamiento	4	4
53	Sobrecalentamiento	4	4
54	Sobrecalentamiento	4	4
55	Sobrecalentamiento	4	4
56	Sobrecalentamiento	4	4

57	Sobrecalentamiento	4	4
58	Sobrecalentamiento	4	4
59	Sobrecalentamiento	4	4
60	Sobrecalentamiento	4	4
61	Sobrecalentamiento	4	4
62	Sobrecalentamiento	4	4
63	Sobrecalentamiento	4	4

C. Anexo de simulaciones

C 1.1 Simulaciones con RNA

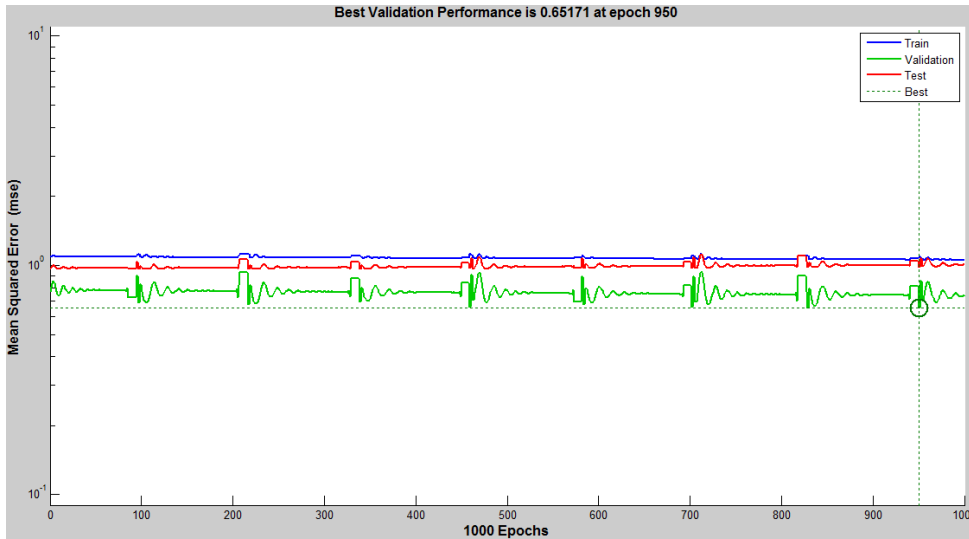


Figura C.1. Mejor validación de rendimiento (Entrenamiento #5)

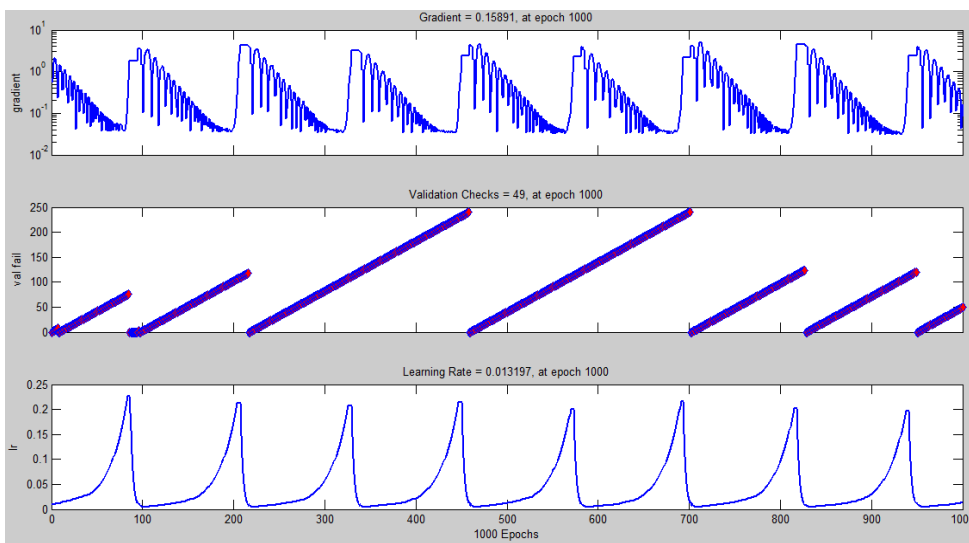


Figura C.2: Estado de entrenamiento (Entrenamiento #5)

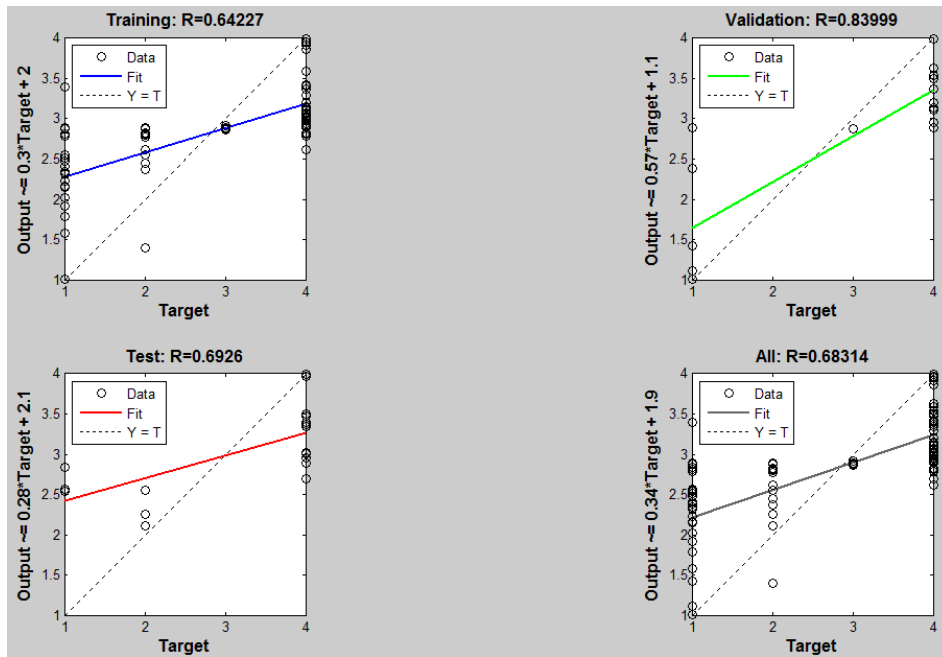


Figura C.3: Estado de regresión (Entrenamiento #5)

D. Anexo de transformadores existentes en el país

Tabla D.1: Cantidad de transformadores de potencia distribuidos por empresa ubicados en subestaciones de las centrales de generación. Fuente: Autor.

Tipo de transformador	Empresa	Cantidad de transformadores	MVA Máximos
Elevador	Electroguayas	2	206,00
	Gensur	1	25,00
	Hidroagoyan	6	505,00
	Hidroazogues	1	12,50
	Hidronación	2	102,00
	Termoesmeraldas	3	185,00
	Termogas Machala	4	386,00
	Termomanabi	4	225,00
	Termopichincha	5	136,00
	Elecaastro	7	81,11
	ElitEnergy	2	46,00
	EMAC-BGP	1	2,20
	Epfotovoltaica	2	1,99
	EPMAPS	2	30,50
	Gransolar	3	3,00
	Hidrosigchos	1	27,00
	Hidrovictoria	1	12,00
	Intervisa Trade	1	150,00
IPNEGAL	1	13,00	
Total		49	2161,30

Tabla D.2: Cantidad de transformadores de potencia distribuidos por empresas ubicados en casa de máquinas de las centrales de generación. Fuente: Autor

Tipo de transformador	Empresa	Cantidad de transformadores	MVA Máximos
Elevador	Algonotec	1	2,00
	Coca Codo Sinclair	10	1734,80
	Electroguayas	11	663,20
	Enerjubones	3	360,00
	Gensur	3	225,00
	Hidronación	3	255,00
	Hidropaute	15	2078,50
	Termomanabi	9	77,19
	Termopichincha	1	4,00
	Ecuagesa	1	35,00
	Elecausto	2	25,25
	Electrisol	1	1,25
	EPMAPS	2	36,00
	Gasgreen	2	3,20
	Generoca	2	66,66
	Gonzanergy	1	1,25
	Hidrosibimbe	1	18,00

	Hidrotambo	1	10,00
	Hidrotavalo	2	1,30
	Lojaenergy	1	1,25
	Renova Loja	1	1,25
	Sabiangosolar	1	1,25
	San Pedro	1	1,25
	Sanersol	1	1,25
	Sansau	1	1,25
	Saracaysol	1	1,25
	Solchacaras	1	1,25
	Solhuaqui	1	1,25
	Solsantonio	1	1,25
	Solsantros	1	1,25
	Surenergy	1	1,25
	Valsolar	1	1,25
	Wildtecsa	1	1,25
	Total	85	5615,10

Tabla D.3: Cantidad de transformadores de potencia distribuidos por empresas ubicados en casa de máquinas y subestaciones de las centrales de autogeneración. Fuente: Autor

Tipo de transformador	Empresa	Número de transformadores	Capacidad Máxima (MVA)
Elevador	Repsol	10	239,00
	Petroamazonas	17	222,65
	Andes Petro	7	108,00
	San Carlos	6	82,40
	Hidrosanbartolo	1	56,00
	Hidroabanico	2	45,00
	Coazucar	1	31,60
	Agip	5	21,28
	Enermax	1	20,80
	Ecoluz	2	9,10
	Vicunha	2	9,00
	Sipac	2	8,00
	Ecoelectric	1	6,25
	Perlabi	1	3,15
	Hidroalto	1	70,00
Hidronormandia	1	56,00	
Reducción	Repsol	21	186,30
	Petroamazonas	5	31,25
	Coazucar	1	8,67
	Agip	8	24,00
	Ecoluz	1	6,60
	Vicunha	2	6,00
	UCEM	2	19,00
	UNACEM	1	35,00
Total, general		101	1305,05

Tabla D.4: Número de transformadores de potencia ligados a la generación en Ecuador. Fuente: Autor

Numero de transformadores	Tipo de empresa
134	Públicas
101	Privadas
235	Total