



METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE CROMATOGRAFÍA DE GASES REALIZADO A TRANSFORMADORES DE POTENCIA AISLADOS EN ACEITE APLICANDO INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Hugo Román Pérez Ramos FP-UNA

Javier Benítez Arévalos – ITAIPU

Vanderley Espínola Oliveira – ITAIPU

Rolando Rodríguez - ANDE

Paraguay

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo automatizar, optimizar y disminuir el tiempo de interpretación del análisis cromatográfico realizado a transformadores de potencia aislados en aceite, por medio de la combinación de varios de los métodos utilizados en la mayoría de las empresas del sector eléctrico y de esta manera lograr que se complementen a la hora de emitir un diagnóstico para el estado en que se encuentra funcionando el transformador, en el presente proyecto se utilizaron dos técnicas de inteligencia artificial que son, la red neuronal artificial para el proceso de diagnóstico y análisis, la otra técnica empleada fue la lógica difusa, ésta se utilizó en el proceso de elección de la respuesta más confiable. Los datos de los análisis cromatográficos con sus respectivos diagnósticos por parte de profesionales fueron utilizados para el entrenamiento de la red neuronal artificial de manera a que esta pueda generalizar el resto de los casos. Los métodos de análisis utilizados son: las relaciones de Rogers, el método del triángulo de Duval basados en la norma de la IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) y el método propuesto por la NBR 7274 de la ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), estos métodos fueron desarrollados en el programa MatLab, por medio de comandos lógicos. Para el caso en que se produzcan contradicciones en el tipo de diagnóstico que proporcionan los métodos utilizados más la red neuronal pasan a ser analizados por la lógica difusa. Esta combinación de métodos, la utilización de la red neuronal y la inclusión de la lógica difusa permite elevar el grado de confiabilidad en la interpretación del análisis cromatográfico, también con esto se consigue disminuir el tiempo que lleva la interpretación de un análisis cromatográfico, la eliminación del factor humano en el proceso es importante porque hace que se disminuya la probabilidad de errores en el diagnóstico.

PALABRAS CLAVES

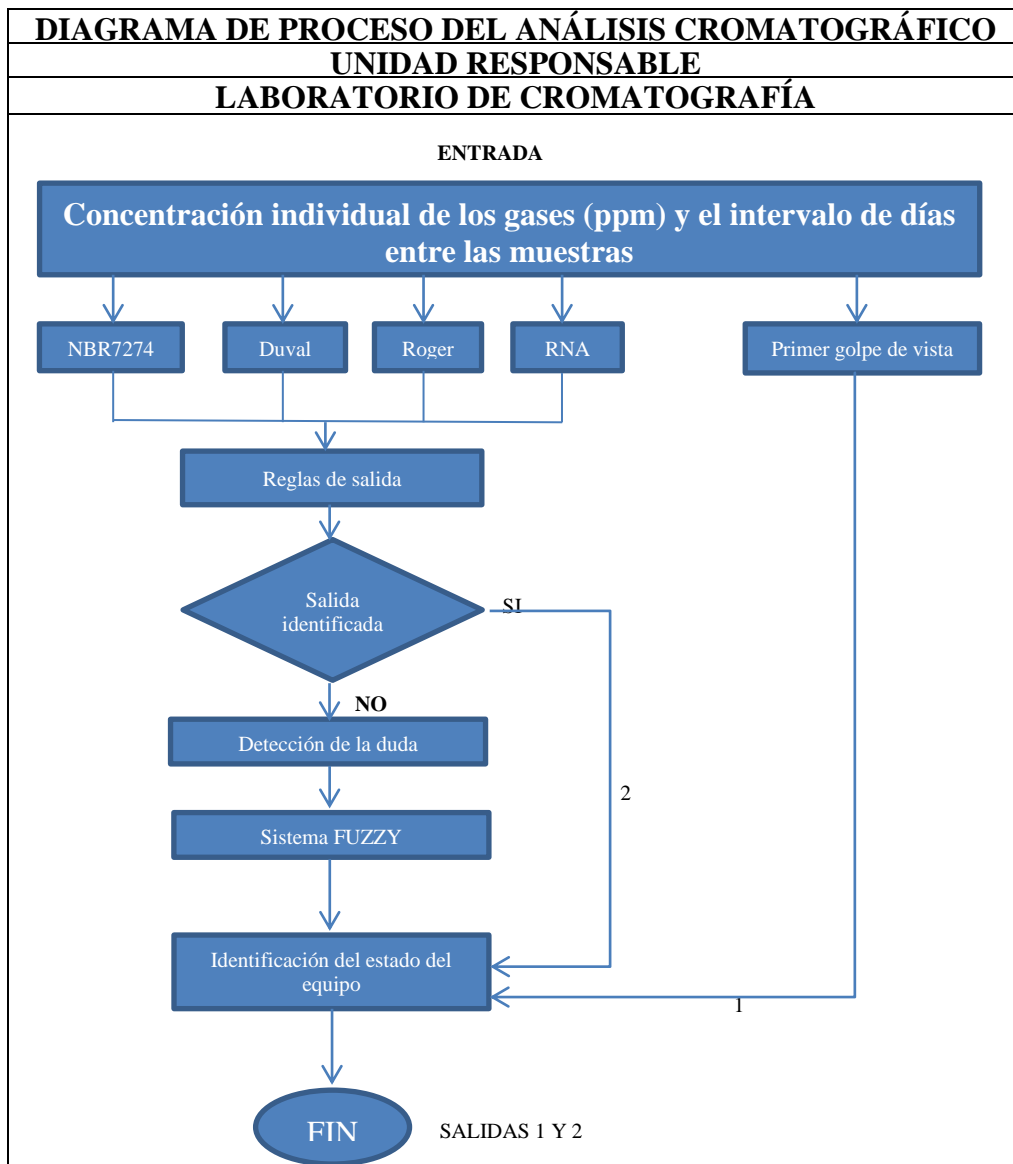
1. Metodología. 2. Automatización. 3. Interpretación. 4. Cromatografía de gases. 5. Combinación de métodos. 6. Redes Neuronales. 7. Lógica difusa. 8. Rogers. 9. Duval. 10. NBR7274. 11. Historial de muestras.

1 INTRODUCCIÓN

El presente trabajo consiste en el desarrollo de un software capaz de realizar la interpretación de una prueba cromatográfica de manera más precisa y confiable por medio de la implementación de tres tipos de métodos de análisis y la inclusión de una red neuronal entrenada con datos reales de pruebas realizadas anteriormente y capaz de generalizar el comportamiento del sistema. En dicho software también fue incluido el sistema de lógica difusa para la toma de decisiones en los casos de que los métodos de diagnóstico y la red neuronal presenten resultados contradictorios.

2 METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA DETERMINACIÓN DEL ESTADO DE LOS TRANSFORMADORES

Tabla I Diagrama de proceso del análisis del software



La técnica desarrollada sugiere implementar tres de los métodos ya conocidos y una red neuronal entrenada con datos reales de manera que se complementen cada uno de estos métodos y se pueda aumentar el grado de confiabilidad que ofrece el análisis de la prueba cromatográfica, y por medio de los resultados arrojados se realiza la toma de decisión de forma normal y/o implementando la lógica difusa. También fue incluido el análisis del nivel de gases generados, ya que estos cuentan con un límite de generación para ser considerados normales o sometidos a estudio.

Para un mejor entendimiento del trabajo fue realizado un diagrama de flujos del proceso realizado por la herramienta desarrollada que se puede observar en la Tabla I.

3 DESARROLLO DE LOS CRITERIOS UTILIZADOS EN EL ANÁLISIS CROMATOGRÁFICO DE TRANSFORMADORES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL SOFTWARE

En este trabajo son utilizados dos criterios internacionales: el criterio del triángulo de Duval y el criterio de Roger, comprendidas en la norma IEEE C57.104 (1991); y la NBR7274 (1982) – Interpretación del Análisis de los gases de transformadores en servicio basada en la IEC 599/78. Cabe mencionar que cada una de las salidas de los métodos utilizados en este programa, fueron agrupadas en tres tipos de fallas de modo a que se pueda realizar las comparaciones de las salidas dadas por cada uno de los criterios y obtener una salida en el programa.

3.1 Desarrollo del método clásico de Rogers

La implementación del método de Roger fue realizada en forma lógica por medio de la herramienta Matlab. El estado del transformador es mostrado en pantalla por medio de la interfaz gráfica desarrollada que permite realizar el análisis por el método de Rogers en forma individual.

Cada diagnóstico obtenido por medio de este método es agrupado en tres conjuntos, adoptándolos para la salida del programa, las cuales son: Operación normal, falla térmica y falla eléctrica. Los agrupamientos son presentados en la tabla II.

Tabla II. Agrupamiento de las salidas del método de Roger

SALIDAS CONSIDERADAS	DIAGNÓSTICOS OBTENIDOS
Normal	- Deterioro normal
Falla Eléctrica	- Descargas parciales - Descargas continuas - Arco con alta energía - Descarga continua de baja potencia - Descarga parcial en papel envolvente
Falla térmica	- Falla térmica por temperaturas inferiores a 150°C. - Falla térmica por temperaturas entre 150°C y 200°C. - Falla térmica por temperaturas entre 200°C y 300°C. - Sobre calentamiento de conductores - Corriente de circulación en el enrollado - Corriente de circulación en el núcleo del tanque - Sobre calentamiento en conexiones

3.2 Desarrollo del método de la NBR7274

Ya que el método de la NBR7274 es similar al método de Roger, la mecánica utilizada para su desarrollo en forma lógica dentro del software es casi la misma, solamente cambian algunos límites constantes de las relaciones y también algunas alteraciones en la interpretación del diagnóstico.

Así también como se ha hecho en el método anterior, los diagnósticos obtenidos por este criterio son agrupados en tres conjuntos, los cuales se presentan en la tabla III.

Tabla III. Agrupamiento de las salidas del método de la NBR7274

SALIDAS CONSIDERADAS	DIAGNÓSTICOS OBTENIDOS
Normal	- Envejecimiento Normal.
Falla Eléctrica	- Descarga parcial de baja energía. - Descarga parcial de alta energía. - Arco, descarga de baja energía. - Arco, descarga de alta energía.
Falla Térmica	- Sobrecalentamiento entre 150°C y 300°C. - Sobrecalentamiento entre 300°C y 700°C. - Sobrecalentamiento mayor a 700°C.

3.3 Desarrollo del método de Duval

Para la implementación del método de Duval como un programa dentro del software fue necesario definir ciertos límites, dentro de los cuales se puede encontrar cada falla. Los límites fijados corresponde al triángulo de Duval donde se muestran las zonas de falla.

Se pueden notar el valor de los límites que permiten definir cada zona de falla y se describen en la tabla IV.

Tabla IV. Límites de las zonas de fallas diferentes

ZONA DE FALLA	LIMITES
D1	- %C2H2>13 - %C2H4<23
D2	- 20<%C2H4<40 y %C2H2>13 - %C2H4>40 y %C2H2>29
DT	- 4<%C2H4<13 y %C2H2<50 - 13<%C2H4<15 y 40<%C2H2<50 - 15<%C2H4<29 y %C2H2>40
T1	- %CH4<98 y %C2H2<4
T2	- 20<%C2H2<50 y %C2H4<4
T3	- %C2H2>50 y %C2H4<4
PD	- %CH4>98 y %C2H4>4

Donde PD es la zona de descargas parciales, T1, T2 y T3 indica la zona de falla térmica, y la zona de falla térmica es indicada por las siglas D1 y D2. La zona DT es aquella en donde existe una falla térmica en conjunto con una falla eléctrica.

Asimismo, como en los métodos anteriores, se realizó el agrupamiento de las salidas en tres conjuntos, los cuales se pueden ver en la tabla V.

Tabla V. Agrupamiento de las salidas del método de Duval

SALIDAS CONSIDERADAS	DIAGNOSTICOS OBTENIDOS
FALLA TÉRMICA	<ul style="list-style-type: none"> - Falla térmica menor a 300°C. - Falla térmica ente 300°C y 700°C. - Falla térmica mayor a 700°C.
FALLA ELÉCTRICA	<ul style="list-style-type: none"> - Descargas parciales. - Descargas de baja energía. - Descargas de alta energía.

3.4 Desarrollo de la red neuronal

Para la definición del tipo de red neuronal a utilizar, fueron presentados los mismos datos a cinco tipos de redes neuronales artificiales, sometiéndolos a prueba. Fueron implementadas en el programa Matlab. La red de regresión generalizada resulto ser la que posee mejor desempeño en la identificación del estado del equipo.

Los datos se usaron un 70% (337) para el entrenamiento de la red neuronal y el otro 30% (145) para probar el funcionamiento de la red. La red fue implementada en el programa MATLAB, el cuál de manera automática realiza el entrenamiento y su procesamiento interno, proporcionando como respuesta una red preparada para su utilización. La salida de la red neuronal fue entrenada para que proporcione tres tipos de salidas (Normal, Falla eléctrica, Falla térmica), esto se realizó de manera a poder comparar las salidas de los diferentes métodos.

3.5 Reglas consideradas para la obtención de la salida

Luego de la obtención de las salidas de los cuatro métodos de diagnóstico aplicados a la concentración de los cinco gases, serán aplicadas algunas reglas que pueden o no determinar la condición del equipo analizado, identificando la falla o forzando la realización de un procedimiento posterior que requerirá los valores de los mismos cinco gases pero obtenidos en una prueba anterior a la actual. La tabla VI contempla las respuestas del programa que será Disponible en línea acuerdo a la combinación de los resultados de todos los métodos.

Tabla VI. Reglas consideradas para una salida confiable

Salidas Iguales	Composición de la salida	Respuesta del sistema
4	4 Fallas eléctricas o 4 Fallas térmicas	Diagnostico Propio
3	3 Fallas eléctricas + (1 normal o 1 sin diagnostico)	Falla Eléctrica
3	3 Fallas térmicas + (1 normal o 1 sin diagnostico)	Falla Térmica
2	1 sin diagnostico + 1 Falla eléctrica +1 normal	Falla Eléctrica
2	1 sin diagnostico + 1 Falla térmica +1 normal	Falla Térmica

XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
25 y 26 de Agosto de 2016

2	2 Fallas eléctricas + 2 sin diagnostico	Falla Eléctrica
2	2 Fallas térmicas + 2 sin diagnostico	Falla Térmica

3.6 Desarrollo del sistema de inferencia de lógica Fuzzy

En los caso en el que el análisis por las reglas determinadas en la tabla VI indique la necesidad de verificación por el método de lógica difusa, que son todos los otros casos faltantes en dicha tabla y que están agrupados en tres tipos de dudas en la tabla VII, además de los niveles de gases generados, serán considerados la tasa de generación de cada gas.

Tabla VII. Tipos de dudas consideradas en el análisis difuso

TIPOS DE DUDAS	DIAGNOSTICOS ENCONTRADOS
TIPO 1	Condición Normal + Falla Eléctrica + Falla Térmica Falla Eléctrica + Falla térmica
TIPO 2	Condición Normal + Falla Eléctrica
TIPO 3	Condición Normal + Falla Térmica

3.7 Nivel de gas generado y Tasa de generación de gases

Este análisis es echo basado en los valores de concentración de los gases combustibles (H₂, CH₄, C₂H₆, C₂H₄ y C₂H₂) en ppm., comparado con los valores límites de gases para el mismo equipo, descrito en los trabajos de VARELLA CHEIM (2000).

En base a la tasa de crecimiento de la formación de gases combustibles a lo largo de los meses, es calculada la tasa de generación porcentual. La tasa muestra la evolución del crecimiento en el periodo de un mes.

Los valores Fuzzy utilizados para la tasa de generación de gases y nivel de gas generado se muestran a continuación.

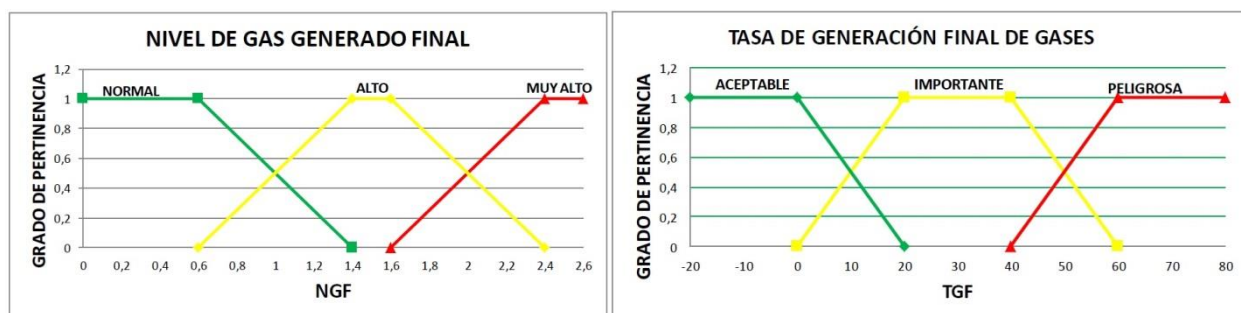


Figura 2. Nivel de gas generado y taza de generación de gases

Las reglas de decisión Fuzzy y la salida del programa pueden resumirse de acuerdo a la tabal VIII y IX.

XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
25 y 26 de Agosto de 2016

Tabla VIII. Resumen de reglas de decisión del sistema Fuzzy

VALORES	NGF NORMAL	NGF ALTO	NGF MUY ALTO
TGF ACEPTABLE	SF	SF	FP
TGF IMPORTANTE	SF	FP	CF
TGF PELIGROSA	FP	CF	CF

Tabla IX. Combinaciones utilizadas en la duda TIPO 1

RESULTADO DE LAS SALIDAS DE CADA METODO		FALLA TÉRMICA		
		SF	FP	CF
FALLA ELÉCTRICA	SF	CN	FTP	FT
	FP	FEP	FTEP	FT
	CF	FE	FE	FTE

Dónde SF indica una condición sin falla, FP indica una condición de falla probable, CF indica una condición con falla, CN indica una condición normal, FEP indica falla eléctrica probable, FTP indica falla térmica probable, FTEP indica falla térmica y eléctrica probable, FE indica una condición de Falla Eléctrica, FT indica una condición de Falla Térmica y FTE falla térmica y eléctrica en conjunto.

De acuerdo a los resultados obtenidos mediante los tres tipos de duda, son cubierto todos los casos posibles. En síntesis el método de lógica difusa hace una comparación del grado de similitud que existe entre un estado determinado del equipo y una condición de falla.

3.8 Desarrollo de la interfaz gráfica.

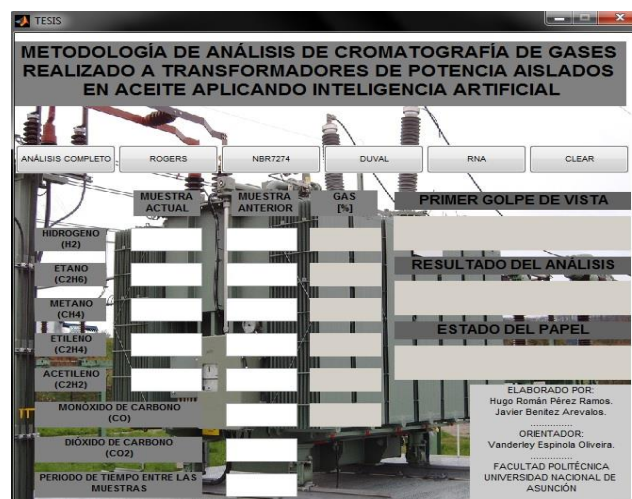


Figura 3. Interfaz gráfica del programa desarrollado

La interfaz gráfica fue desarrollada en el programa Matlab, implementando cuadro de textos editables para la entrada de datos por parte del usuario y cuadros de texto no editables para las indicaciones del tipo de entrada que deberá recibir determinado cuadro editable.

3.9 Análisis de los resultados obtenidos

Cada uno de los métodos utilizados junto con la red neuronal, fueron sometidos a prueba para determinar el grado de aciertos de cada uno de ellos. También fue sometido a estudio el programa desarrollado. Los datos utilizados fueron los obtenidos para el entrenamiento y comprobación de la red neuronal, los cuales ya contaban con sus respectivos diagnósticos a través de especialistas que comprobaron el estado del equipo analizado.

La tabla X muestra que la precisión de la herramienta desarrollada es de un 94% contando con todos los datos de análisis, muy por encima de los demás valores obtenidos por las distintas técnicas de análisis.

Tabla X. Comparación de los métodos de diagnóstico y la herramienta desarrollada

Técnica	Sin Resolver(A) [%]	Mal diagnóstico (B) [%]	Error (A+B)	Precisión (100-Error)
Roger	54	7	61	39
NBR7274	33	32	65	35
Duval	0	16	16	84
RNA	0	11	11	89
Herramienta	0	6	6	94

3.10 Conclusión

La herramienta desarrollada corresponde una gran mejora en cuanto a la precisión de los métodos de interpretación de las pruebas cromatográficas realizadas a transformadores de potencia aislados en aceite, ya que mediante la integración de varios métodos se logra obtener una respuesta más confiable con respecto al estado de operación del transformador.

Ya que fue desarrollada la interfaz gráfica, se logró la automatización del proceso de interpretación y con esto la disminución del tiempo que conlleva dicha interpretación.

Fue comprobada la eficiencia de la utilización de la red neuronal, demostrando su gran capacidad de generalización, incluso con poca cantidad de datos para el entrenamiento.

Se demostró la eficiencia de la herramienta desarrollada, siendo esta, mucho mayor a la obtenida por los métodos de diagnóstico en forma individual.



BIBLIOGRAFIA

- ◆ Acevedo, I. J. (2009). Diagnóstico de condición de equipos de subestaciones eléctricas de alta tensión. Medellín: Doble Engineering Company.
- ◆ Barrela, W. D. (2000). Sistemas Especialistas Modulados e Abrangentes para a Gestão de Operações. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- ◆ Braschi, E. A. (2009). Redes Neuronales y Lógica Difusa Aplicada a los Sistemas de Control. Capitán de Fragata: Universidad San Martín de Porres.
- ◆ Campo, J. P. (2005). Diseño, entrenamiento y simulación de redes neuronales.
- ◆ Campos, L. A. (s.f.). Partes que componen un transformador. Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica - Universidad de Puebla.
- ◆ Cheim, V. (2000). Sistema de inferência fuzzy para diagnóstico de transformadores de potência.
- ◆ Falqueto, P. D. (2005). Sistema Especialista Fuzzy para el diagnóstico de transformadores de potencia. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina.
- ◆ Forestieri, J. N. (s.f.). Guia Para el Mantenimiento de Transformadores de Potencia. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del litoral.
- ◆ Gasco, I. M. (2004). Diagnostico del Consumo de vida de un transformador a través del análisis de compuestos furánicos. Madrid.
- ◆ Giraldo, J. R. (2013). Manual Interactivo de Mantenimiento Industrial para Transformadores en aceite. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.
- ◆ Gómez, A. C. (2013). Análisis de gases disueltos en el aceite para el mantenimiento preventivo de transformadores de potencia mediante la implementación de software. México: Instituto Politécnico Nacional.
- ◆ Guerrero, D. O. (2008). Manual de Interfaz gráfica en Matlab.
- ◆ Hodgkin, A. L; Huxley, A. F. (1952). A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve. J. Physiology.
- ◆ Ivan Nunes da Silva, D. H. (2010). Redes neurais artificiais para engenharia e ciências aplicadas (curso prático).
- ◆ Johana Tatiana Sarria, N. A. (2014). Estado del arte del análisis de gases disueltos en transformadores de potencia. Bogotá, Colombia: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.



XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
25 y 26 de Agosto de 2016

- ◆ JR., G. C. (2003). Estimación da Seção em Falta em Sistemas Elétricos de Potência via Redes Neurais e Sistemas Especialistas Realizada em Nível de Centro de Controle. Florianópolis.
- ◆ Kosow, I. I. (1975). Maquinas eléctricas y transformadores.
- ◆ McCulloch, W; Pitts, W. (1943). A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. Bulletin of Mathematical Biophysics. Vol 5.
- ◆ Moreno, L. V. (2009). Influencia de la Humedad y la Temperatura en las características dieléctricas del papel kraft. Madrid: Universidad Carlos III, Escuela Técnica Superior.
- ◆ Olabe, X. B. (2008). Redes Neuronales Artificiales y sus Aplicaciones. Escuela Superior de Ingeniería de Bilbao.
- ◆ Palma, R. (2008). Conversión Electromecánica de energía. Santiago: Facultad de Ciencia Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.
- ◆ Pérez, I. R. (2010). Procedimiento para realizar e interpretar la prueba de cromatografía de gases de transformadores de potencia. México: Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.
- ◆ Rodríguez, A. M. (2009). Desarrollo de una interfaz gráfica de redes neuronales usando Matlab. Universidad Carlos III de Madrid.
- ◆ Suñé, J. (2001). Manutenção preditiva inteligente de transformadores via análise de cromatográfica. Escola federal de engenharia de Itajubá.
- ◆ Técnicas, A. B. (2015). Guia para amostragem de gases e óleo em transformadores e análise dos gases livres e dissolvidos NBR 7070.
- ◆ Técnicas, A. B. (2015). Interpretação da análise dos gases de transformadores em serviço NBR 7274.
- ◆ Universidad tecnológica de pereira. (2000). Aplicaciones de las Redes Neuronales a la Ingeniería Eléctrica.
- ◆ VARELLA, V.; CHEIM, L.; DUPONT, C.; (2000). Sistema de Inferência Fuzzy para Diagnóstico de Transformadores de Potência. In: VII SEPOPE – Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning. Curitiba – Paraná.
- ◆ Zurada, J. M. (1992). Introduction to Artificial Neural Systems. Los Angeles, San Francisco.