

## SISTEMA DE PRUEBA DE CIRCUITOS ELECTRÓNICOS EN TARJETAS DE PROCESAMIENTO DE SEÑAL

Villalobos Corral, Bruno Alberto<sup>1</sup>

Acosta Cano de los Ríos Pedro Rafael<sup>2</sup>

Robledo Vega Isidro<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Daniel Measurement and Control S. de R.L. de C.V.

Ave. Ishikawa Manzana 4 Fr Ii Chihuahua 31170

[bvillalobos@daniel.com](mailto:bvillalobos@daniel.com)

<sup>2,3</sup>Instituto Tecnológico de Chihuahua/Tecnológico Nacional de México

División de Posgrado e Investigación

Av. Tecnológico 2909, Chihuahua, Chihuahua, México

Tel. 614 201 2000 ext 29112

<sup>2</sup>[pedro.ac@chihuahua.tecnm.mx](mailto:pedro.ac@chihuahua.tecnm.mx), <sup>3</sup>[isidro.rv@chihuahua.tecnm.mx](mailto:isidro.rv@chihuahua.tecnm.mx)

### RESUMEN.

Las fallas en tablillas de circuitos impresos (PCBs) usadas para procesos de manufactura en la industria son las causas de múltiples pérdidas monetarias y tiempos muertos a nivel global. Existen generalmente 3 sistemas para análisis y solución de fallas en circuitos electrónicos. Estos son: Análisis de la firma V-C, sistemas de aprendizaje de máquina (kernel, máquinas de vectores soporte y redes neuronales) y métodos termográficos. Algunas son más costosas y/o difíciles de implementar que otras. El laboratorio de calibración de medidores tipo turbinas de la planta DANIEL EMERSON exhibe una cantidad considerable de tiempo muerto debido a fallas en tablillas electrónicas. Para reducir el tiempo muerto y gastos de la empresa atribuidos a problemas en las tablillas electrónicas, se presenta el diseño de un sistema de diagnóstico de fallas en PCBs tanto para componentes análogos como discretos.

**Palabras Clave:** fallas en circuitos electrónicos, sistemas de prueba, circuitos impresos

### ABSTRACT.

Failures in printed circuits boards (PCBs) used in industry manufacturing processes cause many economical losses and dead times globally. Generally, there are 3 system types for failure analysis and solution in electronic circuits. These are: signature analysis, machine learning systems (kernel, vector support machines and neural networks) and thermographic methods. Some of them are more expensive and/or hard to implement than others. The calibration laboratory for sensors of turbine type at DANIEL EMERSON show a considerable amount of dead time and costs due to failures in PCBs. In order to reduce dead time and costs because of failures in PCBs, a design of a PCB fault diagnosis system for analog and digital components is proposed.

**Keywords:** electronic circuits faults, proof systems, printed circuit boards

### 1. INTRODUCCIÓN

Los circuitos análogos y digitales son usados en sistemas industriales para la implementación de controladores, señales de acondicionamiento, protección de módulos críticos y otros. La

ocurrencia de fallas en tablillas de circuitos impresos (PCB) durante la operación en campo puede afectar la funcionalidad del sistema y el costo de las fallas puede ser enorme.

Las fallas pueden ser catastróficas si cambian la topología del PCB (circuitos abiertos o en corto) o paramétricas (desviación fraccional de valores nominales en componentes). [1] [2] [3]

Existe una amplia literatura para técnicas en detección de fallas catastróficas, no sucede lo mismo respecto a fallas paramétricas, [4]. Aunque algunos alcances en el diagnóstico de fallas en circuitos analógicos han sido escritos en la literatura, ningún trabajo de pronóstico en PCBs ha sido realizado, [5]. Hoy en día se ha vuelto más difícil el diagnóstico y reparación de PCBs debido a su cada vez mayor complejidad, [6].

Existen una gran variedad de fallas comunes dependiendo del tipo de PCB, algunos equipos de diagnóstico incluyen un sistema de ayuda y recomendación de soluciones a hacer en base a la falla encontrada, [7].

Una técnica utilizada es el método de análisis voltaje contra corriente V-C [6] consiste en verificar el comportamiento de un componente al suministrarle un ligero voltaje o corriente, se grafica voltaje contra la corriente, se le conoce como firma de componente. Con este método de análisis se vende un equipo llamado "Board Master", [8]. Es necesario contar con una PCB en buen estado para registrar las señales y después usarlas como referencia de comparación. Para componentes dependientes de la frecuencia, tales como condensadores, es posible hacer gráfica en 3D, agregando la frecuencia. Los métodos de aprendizaje de máquina (AP) se han usado para detecciones de falla en circuitos análogos, [5]. El método Kernel basado en AP (aprendizaje de máquina) es empleado para etapas tempranas de detección y aislamiento de fallas, [5]. Las redes neuronales [9], también se han utilizado. Las problemáticas para su uso son [10] convergencia, facilidad de uso y construcción de un diccionario de fallas. Otro método utilizado es aplicando termografía de cristal líquido, [11], detectando por el perfil de temperatura, el defecto. Similarmente, la microscopía térmica de barrido utiliza

un sensor de temperatura, para detectar la temperatura o la conductividad térmica. Por otro lado, se utilizan también procesamiento de imágenes y sistemas integrados [12], considerando que la forma inadecuada del patrón del circuito impreso podría contribuir a la aparición de posibles defectos.

El propósito de este trabajo es presentar un método para detectar las fallas que se presentan en tarjetas electrónicas y ejemplificado en las tarjetas del laboratorio de calibración de medidores tipo turbina dentro de la empresa Daniel Measurement and Control S.A. de R.L. de C.V..

## 2. MÉTODO PROPUESTO

Para la detección de fallas en un PCB, en este trabajo se hizo una combinación entre el análisis voltaje contra corriente y métodos de aprendizaje de máquina mediante el uso de la aplicación de Matlab denominada Classification Learner, que se detallará más adelante. También se compara el uso de Métodos de aprendizaje de máquina contra el uso de redes neuronales. Para el desarrollo de prueba se considera la tarjeta de interfaz de Compact Prover de 12" de la computadora FLoBoss S600+.

El método utilizado se describe a continuación:

Paso 1. Se identifican los componentes más propensos a sufrir fallas: resistencias, diodos, capacitores y circuitos integrados.

Paso 2. Verificar la conexión entre resistencias, diodos y capacitores hacia los circuitos integrados.

Paso 3. Identificar la relación-conexión entre circuitos integrados.

Paso 4. Visualización general de conexión entre circuitos y con resistores, capacitores y diodos.

Paso 5. Delimitación de toma de capturas de firma.

Paso 6. Realizar la captura de firma (voltaje-corriente) de componentes críticos y circuitos integrados.

Paso 7. Creación de diccionarios por componente contemplando datos buenos y erróneos, así como definir los límites superior e inferior dentro de los cuales los valores serán considerados como buenos.

Paso 8. Clasificación con Herramientas de Aprendizaje de Máquina.

Paso 9. Creación de categorías de datos para validar la precisión de la clasificación obtenida.

### 2.1. Análisis

Los componentes están conectados en la tarjeta. Las firmas se toman sin aislarlos. Es importante detectar la conexión entre los diferentes componentes con los circuitos integrados y estos entre sí para delimitar la cantidad de tomas para las firmas a solamente las necesarias. En la figura 1 se muestra, como ejemplo de conexiones de componentes a integrados, las conexiones de resistencias, capacitores y diodos al integrado identificado como U3. Se verificó con uso de multímetro la conexión entre las resistencias, diodos y capacitores hacia los circuitos integrados. Con esto se identificó que algunas terminales de los circuitos integrados no estaban relacionadas o comunicadas con algún

componente. En la figura 1, se muestran por colores la conexión con los componentes de la siguiente manera:

Resistencias: Celda sombreada en Rojo

Diodos: Celda sombreada en Gris

Capacitores: Celda sombreada en Verde

Ningún componente: Celda sin sombrear marcada como N/A.

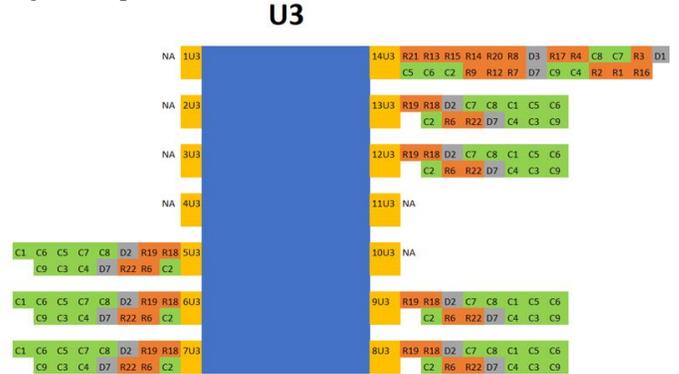


Figura 1. Conexión entre resistencias, capacitores y diodos a circuitos integrados

Como siguiente paso, se tomó la conexión entre circuitos integrados. Los integrados U4 y U5 no fueron considerados para el análisis debido a que mediante el uso de multímetro no se detectaron componentes conectados a estos, sólo conexiones a otros circuitos integrados y por tanto viendo las terminales de los circuitos integrados a donde están conectados, se puede obtener la información. En la figura 2, se muestra la conexión entre circuitos integrados tomando como ejemplo nuevamente el integrado U3.

Ahora, se procede a hacer una visualización de la información obtenida anteriormente con la finalidad de tener una vista general de conexión entre circuitos integrados y con resistores, capacitores y diodos. Al tener esta visualización completa se clasificaron como:

X: Terminales que no son requeridas para captura de firma V-C.

✓: Terminales que son consideradas como requeridas para captura de firma V-C.

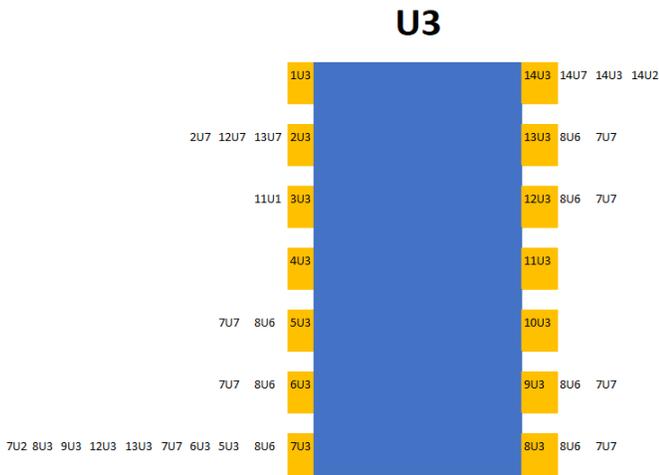


Figura 2. Conexiones entre circuitos integrados.

Se puede observar en la figura 3 que a pesar de que algunas terminales no tienen conexión hacia otros componentes o integrados fueron consideradas como requeridas (✓) debido a que se consideró la captura de firma V-C entre cada una de las terminales a tierra, así como toma entre terminal de entrada con su terminal de salida, como ejemplo se muestra el circuito integrado U6.

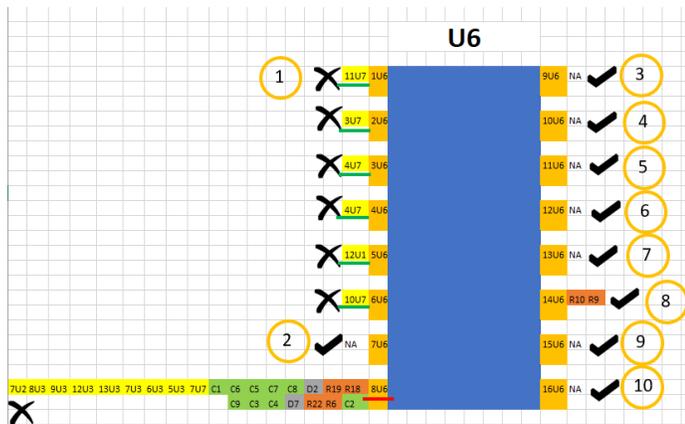


Figura 3. Vista general de las conexiones entre circuitos integrados y con resistores, capacitores y diodos.

Ya que se tiene una visualización entera de las conexiones de resistencias, capacitores, diodos y la conexión entre cada una de las terminales de los circuitos integrados, se logra hacer una delimitación de las terminales en las que hay la necesidad de tomar la captura de firma voltaje corriente con respecto a tierra. De esta manera, se reducen drásticamente las tomas, si los pasos anteriores no hubieran sido realizados. Esto fue un gran avance para conocer cuales terminales dan información que no fue directamente obtenida en otras terminales de cualquier circuito integrado o en algún capacitor, diodo o resistencia, para detectar alguna falla tanto catastrófica como paramétrica. En la figura 4

se muestran las terminales de U7 y U3 seleccionadas como críticas señaladas con una flecha azul. Se inició seleccionando las terminales de U7: 2U7, 3U7, 4U7, 5U7, 10U7 y 11U7 por estar conectadas sólo a otros circuitos integrados y 14U7 por estar conectada a la fuente de alimentación. En U3, la terminal 2U3 está conectada a 2U7 y ya fue seleccionada en U7. En U3 la única terminal seleccionada es la 3U3 ya que está conectada a la terminal 11U1, por lo cual en U1 la terminal 11U1 no será considerada. Se puede observar en las conexiones de la alimentación 14U7 y tierra 7U7, que todos los capacitores están en la fuente, excepto C1 y C3 y también está el diodo D7. Por tanto, todos ellos están incluidos en la firma donde se considere la terminal Vss "Voltage source supply" o voltaje de entrada.

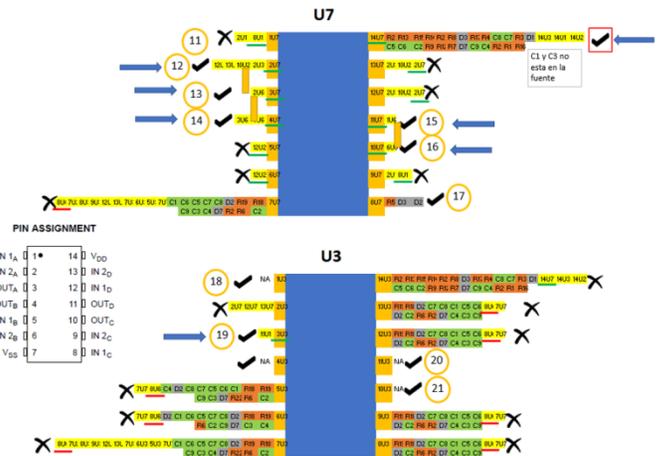


Figura 4. Delimitación en terminaciones de los circuitos integrados U7 y U3.

## 2.2. Captura de Firmas

A continuación, se tomaron las capturas de las corrientes para diferentes voltajes en las resistencias, diodos y capacitores usando una fuente de voltaje modelo QW-MS605D para alimentar la tablilla y un multímetro FLUKE 87V. Para las resistencias se usó un rango desde 0.2 voltios hasta 3 voltios con intervalos de 0.2, es decir, un total de 15 tomas por resistencia y se graficó la captura de firma V-C de cada resistencia en Excel. La tablilla consta con un total de 22 resistencias. En la figura 5 se muestra el registro de la toma de firma de las resistencias R2, R3 y R4 con polarización (-) (+). Se detectó que algunas firmas no siguen exactamente la característica de una resistencia aislada ya que éstas se encuentran conectadas con otros componentes de la tablilla, por lo tanto, su comportamiento de firma no necesariamente fue lineal. En la figura 6 se muestra el registro de la toma de firma R2, R3 y R4 de las resistencias con polarización (+) (-).

Para los diodos se usó un rango desde 0.2 volts hasta 2 voltios con intervalos de 0.2, es decir, un total de 20 tomas por diodo, 10 en polarización directa y 10 en polarización inversa, y se graficó la captura de firma V-C de cada uno de ellos en Excel. Esto fue realizado para los 8 diodos de la tablilla. En la figura 7

se muestra el registro de la toma de firma de los diodos D1, D3 y D4 con polarización directa.

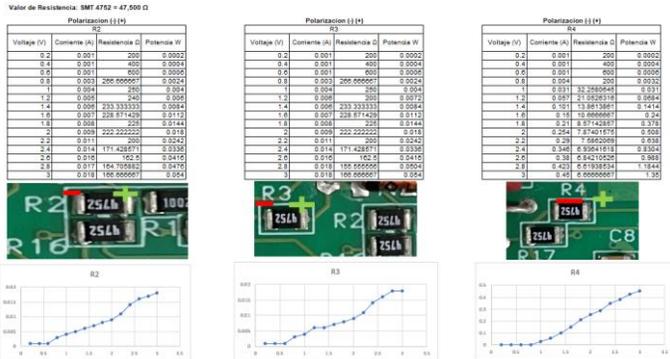


Figura 5. Registro de firma V-C de las Resistencias R2, R3 y R4 con polarización (-) (+).

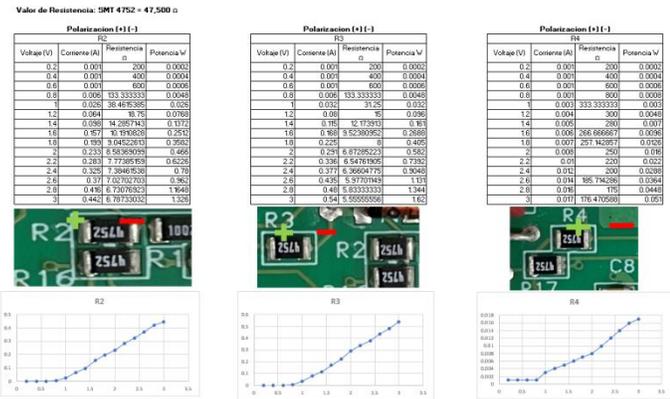


Figura 6. Registro de firma V-C de las Resistencias R2, R3 y R4 con polarización (+) (-).

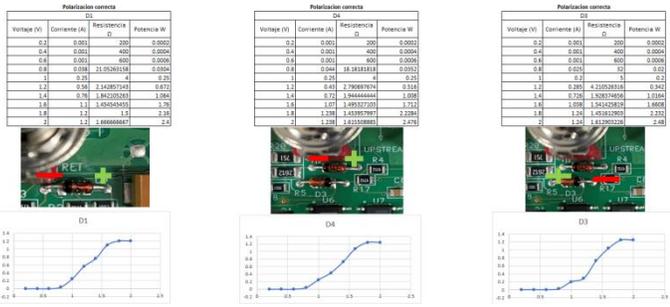


Figura 7. Registro de firma V-C de los Diodos D1, D3 y D4 con polarización directa.

En la figura 8 se ilustra el registro de la toma de firma de los diodos D1, D3 y D4 con polarización inversa.

Para los capacitores se usó un rango desde 0.2 volts hasta 2 voltios con intervalos de 0.2 y como los 2 últimos registros en voltajes de 2.6 y 3, es decir, un total de 12 tomas por capacitor y se graficó la captura de firma V-C de cada capacitor en Excel. Esto fue realizado para un total de 8 capacitores. En la figura 9

se muestra el registro de la toma de firma de los capacitores C1, C2 y C3 con polarización correcta. El capacitor C2 es uno de los que están conectados a la fuente de alimentación directamente.

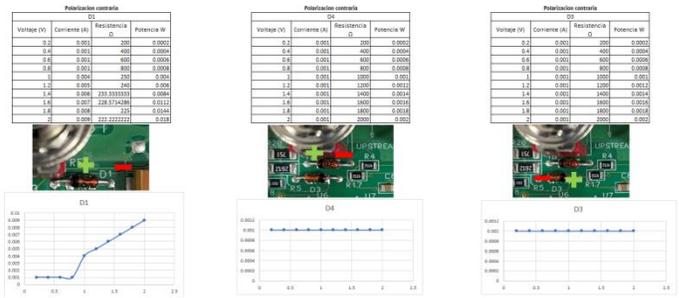


Figura 8. Registro de la firma V-C de los Diodos D1, D3 y D4 con polarización inversa.

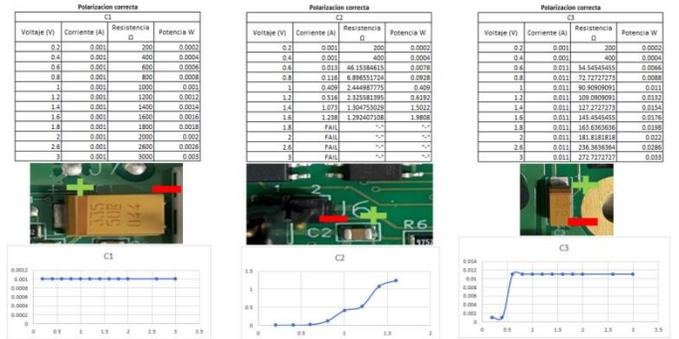


Figura 9. Registro de la firma V-C de los Capacitores C1, C2 y C3 con polarización correcta.

En la figura 10 se ve el registro de la toma de firma de los capacitores C1, C2 y C3 con polarización inversa.

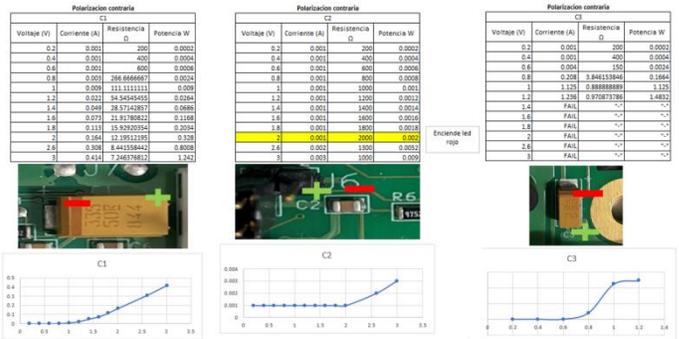


Figura 10. Registro de la firma V-C de los Capacitores C1, C2 y C3 con polarización inversa.

2.3. Diccionarios

El siguiente paso es la creación de diccionarios por componente. Se contemplan datos buenos y erróneos, así como definir los límites superior e inferior dentro de los cuales los valores serán considerados como buenos.

Se muestra como ejemplo el diccionario para la resistencia R3. Para las resistencias se consideró un porcentaje de aceptación para límite superior de +5% y para límite inferior de -5%. Dado esto, se simularon valores que estuvieran dentro y fuera de esa tolerancia para ambos límites y se añadieron al diccionario, teniendo de esta manera 3 posibles resultados. En el caso de la resistencia R3, los tres posibles resultados serían:

R3 – Resultado Aceptable

R3 ERROR INFERIOR – Resultado no aceptable con valor por debajo del 5% de tolerancia del límite inferior.

R3 ERROR SUPERIOR – Resultado no aceptable con valor por encima del 5% de tolerancia del límite superior.

Utilizando este diccionario, en Matlab se entrenó al clasificador con el uso de la aplicación Clasification Learner. Además de conocer si el resultado es erróneo, se sabrá si quedó fuera del límite inferior o del límite superior.

El diccionario para la resistencia R3, se muestra en la figura 11. En el diccionario se muestran los valores medidos de corriente para la firma en los primeros 15 renglones de la columna de corriente real. Hay cuatro columnas denominadas corriente inferior y otras cuatro denominadas corriente superior. Los primeros 15 renglones son valores considerados como buenos. En las columnas corriente inferior, los valores se obtienen en forma aleatoria utilizando como límites el valor real y el límite inferior aceptable. En cuanto a los valores de las columnas corriente superior, se obtienen en forma aleatoria utilizando como límites el valor real y el límite superior aceptable. Por tanto, se tienen 165 valores dentro de los límites para entrenamiento.

En los siguientes 15 renglones se generan valores aleatorios que van de 0 a 95% del valor de corriente real, para esto se usó la función  $RANDBETWEEN(0, \$B3 * 100000) / 100000$  en donde el valor de B cambia entre las filas 18 a 32 de B3 a B17, originando así valores erróneos con corriente menor a la esperada. En los últimos 15 renglones se generan valores aleatorios que van de 1.05% a 1.45% del valor de corriente real, para esto se usó la función

$RANDBETWEEN(\$L3 * 100000, \$G3 * 1.45 * 100000) / 100000$ , donde el valor de L y G se obtuvieron cambiando las filas 33 a 47 de L3 y B3 a B17 y L17, originando así valores erróneos aleatoriamente por encima de la corriente esperada. De esta forma se tienen 330 valores fuera de los límites y 495 datos para entrenamiento en cada diccionario.

En la Tabla 1 se muestran algunos de los valores que serán utilizados en Matlab para entrenamiento y validación. Los primeros ocho valores son para los voltajes de 0.2 a 1.6 y los siguientes 7 son para los voltajes de 1.8 a 3.0. Para el entrenamiento de resultados buenos se usaron valores reales, obtenidos previamente en la toma de la firma voltaje-corriente. Para el límite inferior se multiplicaron los valores reales por un factor de 0.97, es decir, sólo 2% por encima del límite inferior considerado bueno y para resultados erróneos en el límite inferior se usaron valores 2% por debajo del límite inferior. Con esto se muestra que hay muy poca diferencia entre los valores buenos y erróneos con base en ambos límites.

Similarmente, para el límite superior se usaron valores reales, obtenidos previamente en la toma de la firma voltaje-corriente, multiplicados por un factor de 1.03; es decir sólo 2% por debajo del límite superior considerado bueno, y para resultados

Voltaje [V]	Corriente Límite Inferior	Corriente Inferior 1	Corriente Inferior 2	Corriente Inferior 3	Corriente Inferior 4	Corriente real	Corriente Superior 1	Corriente Superior 2	Corriente Superior 3	Corriente Superior 4	Corriente Límite Superior	Etiqueta
0.2	0.00095000	0.00098000	0.00097000	0.00097000	0.00099000	0.001	0.00101000	0.00101000	0.00101000	0.00101000	0.00105000	R3
0.4	0.00095000	0.00095000	0.00099000	0.00095000	0.00098000	0.001	0.00105000	0.00100000	0.00103000	0.00103000	0.00103000	R3
0.6	0.00095000	0.00095000	0.00098000	0.00095000	0.00100000	0.001	0.00103000	0.00103000	0.00104000	0.00105000	0.00105000	R3
0.8	0.00285000	0.00290000	0.00297000	0.00292000	0.00293000	0.003	0.00304000	0.00307000	0.00309000	0.00309000	0.00309000	R3
1	0.00382000	0.00399000	0.00399000	0.00399000	0.00383000	0.004	0.00407000	0.00409000	0.00409000	0.00409000	0.00409000	R3
1.2	0.00570000	0.00583000	0.00575000	0.00595000	0.00594000	0.006	0.00607000	0.00617000	0.00618000	0.00603000	0.00603000	R3
1.4	0.00570000	0.00598000	0.00570000	0.00585000	0.00579000	0.006	0.00600000	0.00628000	0.00611000	0.00616000	0.00616000	R3
1.6	0.00665000	0.00684000	0.00685000	0.00677000	0.00671000	0.007	0.00725000	0.00733000	0.00701000	0.00720000	0.00720000	R3
1.8	0.00760000	0.00774000	0.00773000	0.00795000	0.00776000	0.008	0.00802000	0.00830000	0.00831000	0.00810000	0.00810000	R3
2	0.00855000	0.00840000	0.00858000	0.00860000	0.00875000	0.009	0.00914000	0.00925000	0.00929000	0.00917000	0.00917000	R3
2.2	0.01045000	0.01081000	0.01062000	0.01062000	0.01079000	0.011	0.01145000	0.01132000	0.01138000	0.01127000	0.01127000	R3
2.4	0.01330000	0.01377000	0.01390000	0.01390000	0.01346000	0.014	0.01459000	0.01413000	0.01427000	0.01427000	0.01427000	R3
2.6	0.01520000	0.01567000	0.01543000	0.01527000	0.01590000	0.016	0.01656000	0.01638000	0.01626000	0.01626000	0.01626000	R3
2.8	0.01710000	0.01780000	0.01780000	0.01715000	0.01769000	0.018	0.01824000	0.01851000	0.01854000	0.01820000	0.01820000	R3
3	0.01710000	0.01781000	0.01732000	0.01754000	0.01774000	0.018	0.01854000	0.01851000	0.01870000	0.01867000	0.01867000	R3
0.2	0.00030000	0.00058000	0.00062000	0.00046000	0.00069000	0.00020000	0.00072000	0.00029000	0.00047000	0.00022000	0.00016000	R3 ERROR INFERIOR
0.4	0.00045000	0.00050000	0.00054000	0.00048000	0.00049000	0.00012000	0.00069000	0.00017000	0.00024000	0.00038000	0.00027000	R3 ERROR INFERIOR
0.6	0.00057000	0.00043000	0.00033000	0.00090000	0.00051000	0.00017000	0.00036000	0.00042000	0.00050000	0.00042000	0.00058000	R3 ERROR INFERIOR
0.8	0.00171000	0.00225000	0.00194000	0.00140000	0.00195000	0.00225000	0.00199000	0.00199000	0.00128000	0.00196000	0.00041000	R3 ERROR INFERIOR
1	0.00348000	0.00377000	0.00083000	0.00020000	0.00109000	0.00289000	0.00332000	0.00064000	0.00371000	0.00109000	0.00104000	R3 ERROR INFERIOR
1.2	0.00118000	0.00288000	0.00493000	0.00019000	0.00019000	0.00081000	0.00091000	0.00017000	0.00119000	0.00014000	0.00217000	R3 ERROR INFERIOR
1.4	0.00138000	0.00268000	0.00453000	0.00371000	0.00016000	0.00161000	0.00292000	0.00389000	0.00040000	0.00109000	0.00270000	R3 ERROR INFERIOR
1.6	0.00262000	0.00088000	0.00055000	0.00209000	0.00430000	0.00304000	0.00458000	0.00062000	0.00153000	0.00547000	0.00620000	R3 ERROR INFERIOR
1.8	0.00516000	0.00078000	0.00028000	0.00162000	0.00387000	0.00494000	0.00275000	0.00228000	0.00255000	0.00639000	0.00268000	R3 ERROR INFERIOR
2	0.00731000	0.00674000	0.00516000	0.00091000	0.00795000	0.00860000	0.00760000	0.00142000	0.00892000	0.00230000	0.00517000	R3 ERROR INFERIOR
2.2	0.00779000	0.00320000	0.00417000	0.00469000	0.00469000	0.00187000	0.00897000	0.00725000	0.00879000	0.00879000	0.00590000	R3 ERROR INFERIOR
2.4	0.00939000	0.00187000	0.00099000	0.00093000	0.00393000	0.01189000	0.00199000	0.00179000	0.00230000	0.00870000	0.00463000	R3 ERROR INFERIOR
2.6	0.00853000	0.00859000	0.01473000	0.00121000	0.00178000	0.01480000	0.00394000	0.01269000	0.00190000	0.00890000	0.00933000	R3 ERROR INFERIOR
2.8	0.01245000	0.00291000	0.01368000	0.01151000	0.00380000	0.00402000	0.01107000	0.00509000	0.01221000	0.01051000	0.00060000	R3 ERROR INFERIOR
3	0.00603000	0.01472000	0.01135000	0.01601000	0.00735000	0.01596000	0.00705000	0.01022000	0.00402000	0.01467000	0.00620000	R3 ERROR INFERIOR
0.2	0.00107000	0.00121000	0.00112000	0.00120000	0.00118000	0.00107000	0.00139000	0.00127000	0.00144000	0.00116000	0.00109000	R3 ERROR SUPERIOR
0.4	0.00137000	0.00108000	0.00107000	0.00143000	0.00140000	0.00109000	0.00141000	0.00114000	0.00131000	0.00142000	0.00120000	R3 ERROR SUPERIOR
0.6	0.00128000	0.00143000	0.00112000	0.00122000	0.00128000	0.00140000	0.00144000	0.00125000	0.00119000	0.00124000	0.00127000	R3 ERROR SUPERIOR
0.8	0.00263000	0.00378000	0.00401000	0.00326000	0.00434000	0.00348000	0.00428000	0.00389000	0.00469000	0.00429000	0.00326000	R3 ERROR SUPERIOR
1	0.00678000	0.00689000	0.00469000	0.00580000	0.00484000	0.00481000	0.00522000	0.00492000	0.00492000	0.00492000	0.00492000	R3 ERROR SUPERIOR
1.2	0.00855000	0.00695000	0.00690000	0.00698000	0.00722000	0.00788000	0.00705000	0.00661000	0.00706000	0.00670000	0.00767000	R3 ERROR SUPERIOR
1.4	0.00880000	0.00640000	0.00749000	0.00771000	0.00810000	0.00861000	0.00756000	0.00750000	0.00653000	0.00772000	0.00789000	R3 ERROR SUPERIOR
1.6	0.00928000	0.00802000	0.00783000	0.00745000	0.00994000	0.00905000	0.00752000	0.00827000	0.00988000	0.00782000	0.00971000	R3 ERROR SUPERIOR
1.8	0.01137000	0.00982000	0.01037000	0.00958000	0.01019000	0.01123000	0.01139000	0.01030000	0.00979000	0.01076000	0.00853000	R3 ERROR SUPERIOR
2	0.00953000	0.01178000	0.00962000	0.01248000	0.01050000	0.00966000	0.01297000	0.01148000	0.01107000	0.01281000	0.00991000	R3 ERROR SUPERIOR
2.2	0.01268000	0.01227000	0.01250000	0.01315000	0.01487000	0.01187000	0.01190000	0.01478000	0.01578000	0.01466000	0.01301000	R3 ERROR SUPERIOR
2.4	0.01793000	0.01700000	0.02007000	0.01747000	0.02029000	0.01972000	0.02021000	0.01875000	0.01794000	0.01760000	0.01735000	R3 ERROR SUPERIOR
2.6	0.01883000	0.02114000	0.01895000	0.02136000	0.02272000	0.02302000	0.01878000	0.02234000	0.02160000	0.01785000	0.01912000	R3 ERROR SUPERIOR
2.8	0.02333000	0.01966000	0.02287000	0.02531000	0.02064000	0.01932000	0.02281000	0.02164000	0.02251000	0.01953000	0.02167000	R3 ERROR SUPERIOR
3	0.02428000	0.02163000	0.02064000	0.02180000	0.02353000	0.02009000	0.01954000	0.02372000	0.02602000	0.02260000	0.02210000	R3 ERROR SUPERIOR

Figura 11. Diccionario de la resistencia R3

Tabla 1. Factores de multiplicación para definir valores aceptables y erróneos en límite inferior para la resistencia R3.

VOLTAJE	LIM INFERIOR	FACTOR	CLASIFICACION	RESULTADOS ESPERADOS
0.2	0.0009700	*1.37 (MAYOR)	DATOS BUENOS	R3
0.4	0.0009700			R3
0.6	0.0009700			R3
0.8	0.0029100			R3
1.0	0.0038800			R3
1.2	0.0058200			R3
1.4	0.0058200			R3
1.6	0.0067900			R3
1.8	0.0074400	*1.93 (MENOR)	DATOS MALOS	R3 ERROR INFERIOR
2.0	0.0083700			R3 ERROR INFERIOR
2.2	0.0102300			R3 ERROR INFERIOR
2.4	0.0130200			R3 ERROR INFERIOR
2.6	0.0148800			R3 ERROR INFERIOR
2.8	0.0167400			R3 ERROR INFERIOR
3.0	0.0167400			R3 ERROR INFERIOR

erróneos en el límite superior se tomaron valores de 2% por arriba de ese límite superior. De igual manera que para el límite inferior, existe una brecha muy corta (de 4%) entre los valores buenos y valores erróneos. En la Tabla 2 se muestran algunos de los valores usados para el entrenamiento en Matlab. Los primeros ocho valores son para los voltajes de 0.2 a 1.6 y los siguientes 7 son para los voltajes de 1.8 a 3.0.

Para los diodos y capacitores se consideró un porcentaje de aceptación para límite superior de +15% y para límite inferior de -15%. Dado esto, se simularon valores que estuvieran fuera de esa tolerancia para ambos límites y se añadieron al diccionario, teniendo de esta manera 3 posibles salidas, en forma similar al caso de las resistencias.

### 3. ENTRENAMIENTO Y VALIDACIÓN

Para cada componente se aplicó la opción de entrenar con todos los métodos de aprendizaje de máquina disponibles en la Matlab, buscando cual es el método que dé mejores resultados.

Nuevamente, se muestran lo relacionado con la resistencia R3. Una vez que se cargan los valores del archivo Excel, se muestra una gráfica representando con diferentes colores los datos graficados y se aplica la opción de entrenar todos. De esta manera, a un lado de la gráfica, aparecen los diferentes métodos de aprendizajes de máquina mostrando su porcentaje de exactitud, figura 12.

Tabla 2. Factores de multiplicación para definir valores aceptables y erróneos en límite superior para la resistencia R3.

VOLTAJE	LIM SUPERIOR	FACTOR	CLASIFICACION	RESULTADOS ESPERADOS
0.2	0.00103	*1.03 (MENOR)	DATOS BUENOS	R3
0.4	0.00103			R3
0.6	0.00103			R3
0.8	0.00309			R3
1.0	0.00412			R3
1.2	0.00618			R3
1.4	0.00618			R3
1.6	0.00721			R3
1.8	0.00856	*1.07 (MAYOR)	DATOS MALOS	R3 ERROR SUPERIOR
2.0	0.00963			R3 ERROR SUPERIOR
2.2	0.01177			R3 ERROR SUPERIOR
2.4	0.01498			R3 ERROR SUPERIOR
2.6	0.01712			R3 ERROR SUPERIOR
2.8	0.01926			R3 ERROR SUPERIOR
3.0	0.01926			R3 ERROR SUPERIOR

Como ejemplo se muestran los clasificadores con mayor precisión algunos de los componentes: R3: Weighted KNN, C2: Fine KNN, D1: Weighted KNN, U7 2-3: Fine KNN.

Para validación se se usaron 6 diferentes condiciones de datos: SUPERIOR. Datos aleatorios para validar cuando los valores caen por encima del límite superior.

INFERIOR. Datos aleatorios para validar cuando los valores caen por debajo del límite inferior.

DATOS BUENOS. Datos aleatorios dentro de los límites inferior y superior para validar cuando los valores son buenos (correctos).

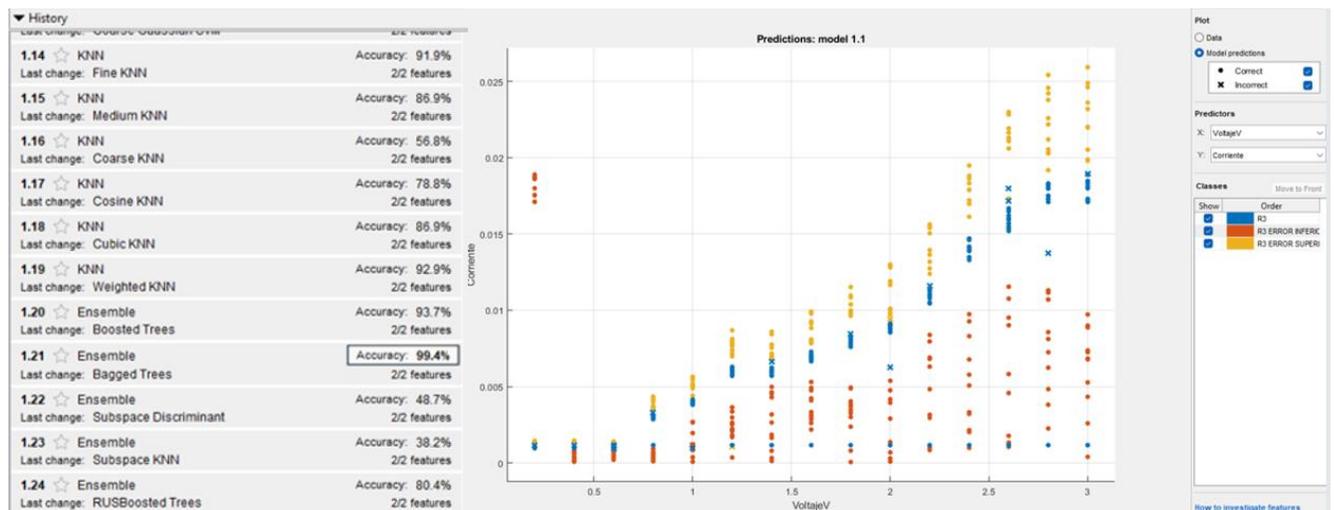


Figura 12. Datos de entrenamiento de la resistencia R3.

**LÍMITE INFERIOR.** Datos para validar el límite inferior; para esto se usaron la primera mitad de los datos 3% por arriba del límite inferior, es decir, el resultado de esta primera mitad de los datos deberán ser clasificados como “buenos” mientras que la segunda mitad de los datos esta 3% por debajo del límite inferior, es decir, que el resultado esperado de estos deberá ser datos erróneos.

**LÍMITE SUPERIOR.** Datos para validar el límite superior; para esto se usaron la primera mitad de los datos 3% por arriba del límite inferior, es decir, el resultado de esta primera mitad de los datos deberán ser clasificados como “buenos” mientras que la segunda mitad de los datos esta 3% por debajo del límite inferior, es decir, que el resultado esperado de estos deberá ser datos erróneos.

**PENDIENTE.** Dos primeros datos erróneos que deberán caer debajo del límite inferior (entre 0 y 0.85 o 0.95 del valor real según sea el caso), dos últimos datos erróneos que deberán caer por encima del límite superior (entre 1.05 o 1.15 y 1.45 del valor real según sea el caso), así como también datos intermedios que están dentro del rango de valores positivos (datos entre +/-5% o +/- 6% según sea el caso).

Los resultados de la clasificación de los datos de validación para la resistencia R3 se muestran en la figura 13.

Como se puede observar, todos los resultados de los datos ingresados como “SUPERIOR” fueron reconocidos como “R3 ERROR SUPERIOR”, es decir, como datos erróneos por arriba del límite superior. En esta clasificación se obtuvo un 100% de exactitud.

De la clasificación “INFERIOR”, 87% de los datos fueron clasificados como “R3 ERROR INFERIOR”. Dos de los quince

intermedios que están dentro del rango de valores positivos (datos entre +/-5% o +/- 6% según sea el caso), se clasificaron erróneamente.

Los resultados de la clasificación de los datos de validación para la resistencia R3 se muestran en la figura 13.

Como se puede observar, todos los resultados de los datos ingresados como “SUPERIOR” fueron reconocidos como “R3 ERROR SUPERIOR”, es decir, como datos erróneos por arriba del límite superior. En esta clasificación se obtuvo un 100% de exactitud.

De la clasificación “INFERIOR”, 87% de los datos fueron clasificados como “R3 ERROR INFERIOR”. Dos de los quince valores ingresados fueron clasificados como buenos, es decir, como si estuvieran por encima del límite inferior.

De la tercera clasificación “BUENOS”, se obtuvo un 100% de exactitud. Todos los valores ingresados están dentro de los límites inferior y superior. Por lo tanto, los datos se clasificaron correctamente al ser clasificados como buenos “R3”.

De la cuarta clasificación “LÍMITE INFERIOR”, el resultado esperado es que la primera sección de los valores (primeros 8 valores) fueran considerados como buenos “R3” ya que se usaron valores aleatorios 3% arriba del límite inferior. La segunda mitad de los datos (últimos 7 valores) se esperaba que fueran considerados como malos “R3 ERROR INFERIOR” ya que son valores que están 3% por debajo del límite inferior, obteniendo una exactitud del 53% en esta validación.

Para la quinta clasificación “LÍMITE SUPERIOR”, el resultado esperado es que la primera mitad de los valores (primeros 8 valores) fueran considerados como buenos “R3” ya que se

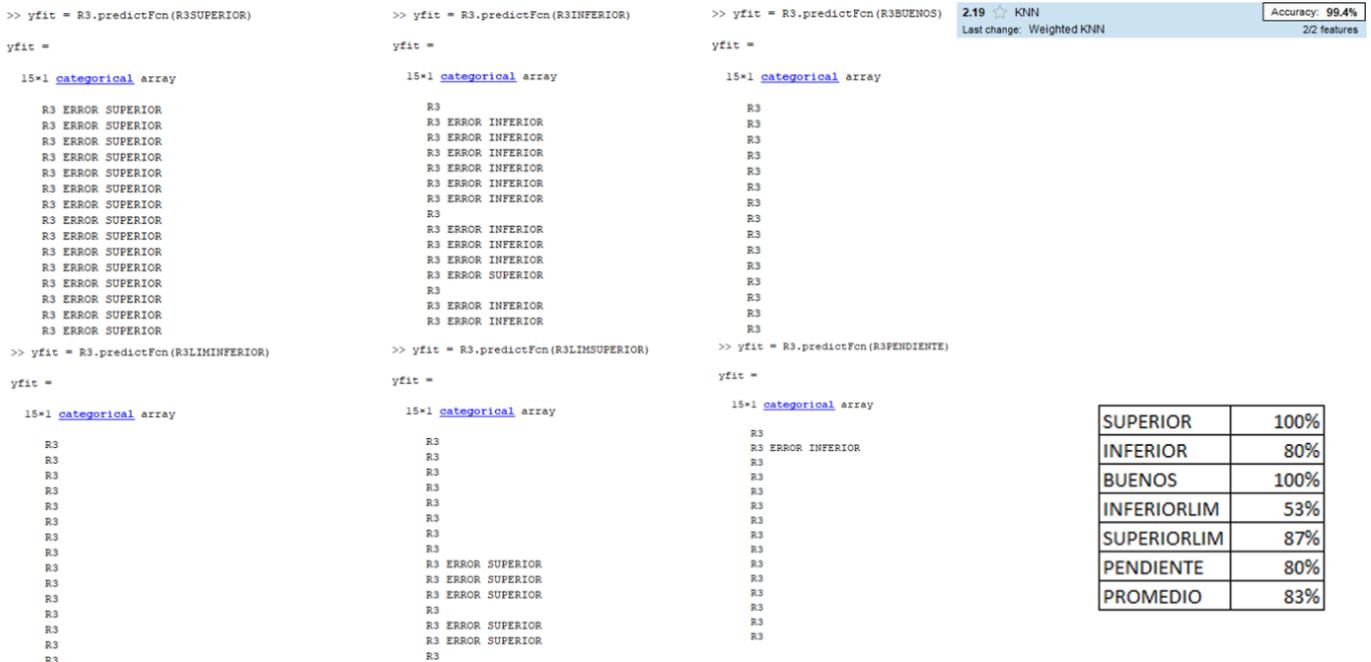


Figura 13. Resultados validación para la resistencia R3

usaron valores aleatorios 3% debajo del límite superior. De lo contrario la segunda mitad de los datos, últimos 7 valores, se esperaba que fueran considerados como malos “R3 ERROR SUPERIOR” ya que son valores que están 3% por arriba del límite superior, obteniendo una exactitud del 87% en esta validación.

En la última clasificación “PENDIENTE”, el resultado esperado es que los dos primeros valores, así como los dos últimos se clasifiquen como erróneos mientras que todos los demás se deberán clasificar como correctos. Los dos primeros valores son valores que están por debajo del límite inferior, por lo tanto, se espera que se clasifiquen como “R3 ERROR INFERIOR”. Los dos últimos valores son valores por encima del límite superior, por lo que se espera que se categoricen como “R3 ERROR SUPERIOR”. El resto de los valores son valores aleatorios dentro de los dos límites, por tanto, se espera que se clasifiquen como buenos “R3”. Como resultado de esta sexta clasificación se obtuvo un 80% de exactitud.

Después de haber obtenido los resultados para cada una de las 6 clasificaciones se procede a promediar los porcentajes de exactitud obteniendo como resultado un 83% de exactitud.

#### 4. CONCLUSIONES

Usando la combinación de análisis de firma y métodos de aprendizaje de máquina es una manera rápida y precisa para detectar componentes que no están funcionando de manera correcta, ya sea por fallas paramétricas o catastróficas.

De los experimentos realizados se concluye que el procedimiento desarrollado es un método efectivo para la detección de fallas en componentes de tablas electrónicas, reduciendo significativamente las pruebas realizadas.

Es importante mencionar que en las fallas de los clasificadores sucedieron en valores fuera de límites a los que el clasificador consideró como dentro de los límites. En ningún caso se observó que algún dato dentro de los límites fuera clasificado fuera de los límites. No queda claro la razón de esto, se requiere mayor investigación para saber si es una tendencia o simplemente fue coincidencia en este estudio.

Un aspecto que no se consideró en este trabajo es la variación en los capacitores a diferente frecuencia, así pues, los capacitores que tienen alguna función de filtrado de señal y tienen alguna falla en el valor de la capacitancia, pudieran no ser detectados en este sentido.

Como trabajo a futuro se considera el empleo de un método o sistema de captura de firmas V-I que ayude a reducir el tiempo en la captura de éstas y que además facilite la tarea.

#### 5. REFERENCIAS

- [1] J. L. S. García, “Diagnóstico de Circuitos Integrados Analógicos y de Comunicaciones”, *Ingeniería de sistemas*, vol. 1, n° 1, p. 13, 2011.
- [2] R. A. Pease, “Troubleshooting Analog Circuits”, Wobum: National Semiconductor, 1991.
- [3] M. Slamani y B. Kaminska, “Analog Circuit Fault Diagnosis”, Quebec, Canada, March 1992.
- [4] S. Sindia, V. Agrawal y V. Singh, “Test and Diagnosis of Analog Circuits using moment generating functions”, *Asian Test Symposium*, p. 6, 2011.
- [5] A. S. Sarathi Vasan, B. Long y M. Pecht, “Diagnostics and Prognostics Method for Analog Electronics Circuits”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60 No. 11, p. 5, November 2013.
- [6] A. Insafo, M. Salman Baiga, Z. A. Nayyara y M. A. Baigh, “Techniques to Identify and Test PCB Faults with Proposed Solution”, *Journal of Basic & Applied Sciences*, vol. 10, pp. 532-536, 2014.
- [7] M. B. Bassat, D. B. Arie, I. Beniaminy, J. Cheifetz y M. Klinger, “Ai-Test a Real Life Expert System for Electronic” p. 9.
- [8] ABI Electronics, Test & Measurement Systems, 1983. [En línea]. disponible: <https://www.abielectronics.co.uk/>. [Último acceso: 20 October 2020].
- [9] B. Martín del Brío y C. Serrano Cinca, “Fundamentos de las redes neuronales”, p. 23, ene-jun 1995.
- [10] L. Wright, V. Kirkland y R. Glenn, “Using Neural Networks to Solve Testing Problems”, *IEEE AES Systems Magazine*, p. 5, 1997.
- [11] B. Yang, “Thermography techniques for integrated circuits and semiconductor devices”, *Sensor Review*, p. 18, 2007.
- [12] N. Dave, V. Tambade, B. Pandhare y S. Saurav, “PCB Defect Detection Using Image Processing And Embedded System”, *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, vol. 03, n° 05, p. 5, 2016.