FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCIÓN DE POSTGRADO
UNIVERSIDAD DE CARABOBO.
DOCTORADO EN INGENIERIA

"SISTEMA ESTOCÁSTICO UNIFICADO PARA LA PREDICCIÓN CONFIABLE DE FALLAS POR CONDICIONES AMBIENTALES EN TRANFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN"

Tesis Doctoral en Ingeniería presentada por:

MARIA GABRIELA MAGO RAMOS

Bajo la dirección de:

Tutor: Dr. Luis Vallés Defendine (Universidad de Carabobo).
Co-Tutor: PhD. Jhon Jairo Olaya Florez (Universidad Nacional de Colombia).
Asesor PhD. Martha Lucia Zequera (Universidad Pontificia Javeriana de Bogotá).

Valencia, 21 de Febrero del 2014

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCIÓN DE POSTGRADO
UNIVERSIDAD DE CARABOBO.
DOCTORADO EN INGENIERIA

VEREDICTO

Tesis Doctoral en Ingeniería titulada:

"SISTEMA ESTOCÁSTICO UNIFICADO PARA LA PREDICCIÓN CONFIABLE DE FALLAS POR CONDICIONES AMBIENTALES EN TRANFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN"

presentada por:

MARIA GABRIELA MAGO RAMOS
C.I. 10251105

Ha sido calificada:

APROBADO [ ] REPROBADO [ ]

Dra. Laura Saéz Palencia
Jurado Presidente

Dr. Antonio Fedón
Jurado Miembro

Dr. Anwuar Hasmy
Jurado Miembro

Valencia, 21 de Febrero del 2014

Agradecimientos

En primer lugar, al Dr. Luis Vallés Defendine, quien con sus aportes, su altísima exigencia, esa forma de trabajar de manera intensa, estimulando el esfuerzo de esta investigación, con mucha perseverancia e interés, me han permitido avanzar y presentar este proyecto de investigación doctoral.

Agradezco al PhD, Jhon Jairo Olaya Florez, quien me recibió en la Universidad Nacional de Colombia (sede Bogotá), su enorme experiencia en las aplicaciones experimentales, evaluando los materiales de fabricación de manera conjunta conmigo, han hecho posible que la ciencia y tecnología de esta área de la ingeniería, se apliquen a estos equipos eléctricos, cuya vida útil o remanente puede mejorarse con este nuevo método de diagnóstico.

Quiero expresar mi gratitud a la empresa colombiana FYR Ingenieros, C.A, por toda la colaboración prestada en la recolección de muestras. Esa solidaridad y ese afecto incondicional no tengo como calificarlo. Están comprometidos con su país y con el desarrollo de nuevas tecnologías.

Mi más sincero agradecimiento a todos mis compañeros universitarios, tanto de la Universidad de Carabobo, como de la Universidad Nacional de Colombia. Gracias por la amistad, la ayuda brindada. Nuestro compromiso es contribuir con el avance tecnológico y de investigación, tanto de Colombia, como de Venezuela.

Agradezco también, a la PhD, Martha Lucia Zequera por su amistad y sus excelentes recomendaciones en la elaboración de esta propuesta.

Por último al Ing. Raúl Cabrera, Gerente General de la empresa venezolana Transformadores del Centro, C.A, quien ha sido precursor de esta investigación, sus aportes y experiencia han sido sumamente valiosos y también al excelente grupo de investigación (tesistas) que me ha acompañado en este maravilloso proyecto. Ha sido un honor trabajar con ustedes.

Dedicatoria

Esta experiencia investigativa que tomo tanto esfuerzo personal, familiar y económico, se la dedico a mis padres: Nerio e Isvelia, a mis queridos hijos: Priscilla, Abel y Gabo y a mis hermanos: Rosita, Nerio, Ligia, Luis y Armando……. Los amo con todo mi corazón…..

INTRODUCCION.

Los sistemas de distribución de energía eléctrica son fundamentales para usuarios residenciales e industriales, siendo el transformador de distribución el encargado de que la energía llegue de acuerdo a los niveles de tensión, corriente y capacidad requeridos según sea la carga asociada. Los sistemas de protección de estos equipos a traves del tiempo, han sido modificados para garantizar mejoras en los mismos, incluso con versiones en el diseño de acuerdo a la aplicación requerida, los transformadores monofásicos de poste utilizados como "*Equipo Experimental*" en la presente investigación, solo son reemplazados cuando se han dañado por completo ocasionando la suspensión del servicio eléctrico en forma imprevista. Hay ausencia de un sistema que alerte previamente la condición de funcionamiento e igualmente existen una ausencia de investigaciones precedentes entre las fallas asociadas y el estado de los materiales de fabricacion [34].

Sin embargo, es a partir del año 2006 que se retoman los estudios en el esta área de aceros, a partir de una investigación solicitada por un grupo de empresas venezolanas que reparan o fabrican transformadores, sobre "*Estudio de la Factibilidad Técnica y Económica en la Fabricación de la Chapa de Acero al Silicio*", materia prima fundamental en la fabricación del núcleo del transformador de distribución monofásico para su producción en serie en Venezuela[52], dado que la misma es importada por los industriales venezolanos y colombianos de la empresa brasilera Acesita. Los resultados fueron altamente favorables.

A partir de la investigación antes señalada, surge otra necesidad en cuanto a la reutilización de esta chapa de acero, y de cómo las fallas: térmicas, por arco eléctrico o descargas parciales afectarían el estado de este material, además del deterioro del aceite dieléctrico que sirve de refrigerante al núcleo, las bobinas de alta y baja tension y el papel aislante. A qué podría asociarse la disminución del tiempo de vida útil [35], qué pasa con la vida remanente, es que acaso las condiciones ambientales estan influyendo o la calidad en la fabricación ha dismuido. Estas interrogantes analizadas, más las pruebas experimentales realizadas a los transformadores fallados permiten el desarrollo de nuevos métodos de diagnóstico a partir de las mismas, comparando el estado de los materiales y las condiciones de funcionamiento del equipo [36].

Para lograr lo antes señalado, se unen áreas de la ingenierìa eléctrica e ingeniería mecánica con la ciencia y tecnología de los materiales, agregando transversalidad al

conocimiento, siendo esto el punto de partida de esta investigaciòn, planteando de una forma estructurada, un enfoque que pretende desarrollar una modelización del transformador, de acuerdo a lo indicado a continuación:

En el capítulo I se indica el planteamiento del problema, cuáles son las ventajas, el objetivo general y los objetivos específicos, la justificación, es decir; se realiza un análisis de la tesis doctoral. Luego, en el capítulo II, se revisan los antecedentes bibliográficos relacionados con otras investigaciones, las teorías que se aplicaron en el fundamento y desarrollo de la misma, así como también los tipos de fallas, causas y consecuencias utilizadas de referencia para el análisis de los transformadores de distribución monofásicos de poste.

En el capítulo III, se indica la metodología que requerirá la misma. Para su comprensión, este capítulo se ha dividido en tres partes: el recorrido metodológico que incluye la técnica de recolección y análisis de datos, población, muestra y descripción de las fases metodológicas. Luego, las pruebas o procedimientos experimentales utilizados aplicando métodos no convencionales a las muestras de equipos fallados. Por último, el desarrollo de la metodología aplicada a la falla de mayor incidencia.

Luego, en el capítulo IV, se realiza análisis y discusión de los resultados, así como también, las simulaciones efectuadas a los diferentes modelos permitiendo el desarrollo de la propuesta planteada. Por último, se indican conclusiones y prospectivas para futuras investigaciones obtenidas de la presente tesis doctoral.

Título en Español: Sistema Estocástico Unificado para la Predicción Confiable de Fallas por Condiciones Ambientales en Transformadores de Distribución.

Título en Inglés: Unified System For Stochastics Prediction Reliable By Shooting in Environmental Distribution Tranformers.

Nombre del Autor: María Gabriela Mago Ramos.

Nombre del Tutor: Luis Valles Defendine.

Área: BIOINGENIERIA

Lugar: Valencia

Año: 2014

RESUMEN

Los transformadores de distribución son fundamentales para los sistemas eléctricos, ya que permiten energizar redes y servicios residenciales e industriales en áreas servidas de alta demanda, por lo tanto, la garantía en la continuidad del suministro de energía eléctrica es de suma importancia para el desarrollo tecnológico e industrial del país. Mantener operativo el equipo, sus sistemas de protecciones y otros, es un indicador de calidad y eficiencia energética, es por ello, que la creación de nuevas técnicas de diagnóstico evaluando los materiales de fabricación, permiten un alcance hacia técnicas de mantenimiento predictivo y preventivo que proporcionen alertas a los operadores del sistema evitando suspensiones del servicio en forma imprevista. Esta tesis doctoral contempla la aplicación de un sistema estocástico para la predicción confiable de fallas por condiciones ambientales en transformadores de distribución monofásicos de poste, realizando pruebas experimentales a estos materiales comparando su calidad versus la condición de falla, mediante caracterizaciones físicas.Lo anterior es con la finalidad, de crear un método de diagnóstico que permita predecir la ocurrencia de alguna falla versus la posible influencia de variables ambientales que pudieran afectar el proceso de operación normal, dado que hay ensayos a través de métodos convencionales que no demuestran alteraciones aparentes, sin embargo, algunas pruebas experimentales indican cambios importantes que podrían afectar la vida útil del equipo.Los resultados experimentales aplicando técnicas no convencionales a estos equipos, se espera, sirvan de apoyo a las políticas de mantenimiento y servicio de las empresas eléctricas tanto de Venezuela como de Colombia, dado que las universidades de ambos países han brindado esfuerzos técnicos a los diagnósticos predictivos realizados a los transformadores de distribución.

Palabras Clave: Sistema estocástico, fallas, predicción, condiciones ambientales, transformadores de distribución.

INDICE GENERAL

	Pág.
Portada.	i
Veredicto del jurado.	ii
Agradecimiento.	iii
Dedicatoria.	iv
Introducción.	5
Resumen.	7

I. Contextualización del Objeto de Indagación.

1.1	Planteamiento del Problema.	38
1.2	Objetivo de la Tesis Doctoral.	39
1.3	Aportes de la Investigación.	39
1.4	Alcance y Delimitaciones.	40

II. Sustento Teórico.

2. Antecedentes.	43
2.1 Internacionales.	43
2.2 Nacionales.	44
2.3 Corrientes Epistemológicas.	46
2.3.1 Relacionadas con los Sistemas Estocásticos.	46
2.3.1.1 Descripción General de los Sistemas Estocásticos.	46
2.3.2 Relacionadas con la Teoría de Mantenimiento.	48
2.3.2.1 Cálculo y Predicción de Confiabilidad.	51
2.3.3 Relacionadas con el Transformador de Distribución.	52
2.3.3.1 Descripción General del Transformador de Distribución.	53
2.3.3.2 Aceros al Silicio.	54
2.3.3.2.1 Propiedades de las Chapas Magnéticas.	54
2.3.3.3 Relacionadas con Tipos de Fallas en Transformadores de Distribución.	57
2.3.3.3.1 Relacionadas con Otras Causas de Fallas en Transformadores de Distribución.	57
2.3.3.3.2 Relacionadas con Efectos que Ocasionan las Fallas en Transformadores de Distribución.	59

2.3.3.4 Pérdidas Totales en el Núcleo de los Transformadores de Distribución. 65
2.3.3.4.1 Pérdidas por Corrientes de Foucault. 65
2.3.3.4.2 Pérdidas por Histéresis Magnética. 65
2.3.3.4.3 Pérdidas Totales. 66
2.3.4 Relacionadas con Modelos Estadísticos en Transformadores de Distribución.66
2.3.5 Relacionadas con Programas de Análisis Transitorio (ATP/EMTP) en los tipos de fallas que presentan los Transformadores de Distribución. 67
2.3.5.1 Módulos integrados de simulación. 68
2.3.5.2 Métodos de Solución Utilizados en el ATP-EMTP. 69
2.3.5.2.1 En el dominio del tiempo. 69
2.3.5.2.2 PlotXY del ATP/EMTP. 70
2.3.6 Variables Ambientales y su Influencia en la Operación del Transformador. 71
2.3.7 Relacionadas con el Modelo de Regresión Lineal Múltiple. 74
2.3.8 Relacionadas con Métodos no Convencionales realizados a la chapa de acero al silicio y a las bobinas de alta y baja tensión de las muestras de equipos fallados, entre los cuales se encuentran: 75
2.3.8.1 Análisis de Microestructura. 75
2.3.8.2 Pruebas de Microscopia Electrónica de Barrido. 76
2.3.8.3 Pruebas de Difracción por Rayos X. 76
2.3.8.4 Ensayo Aplicando Partículas Magnéticas. 77
2.3.8.5 Ensayo Aplicando Líquidos Penetrantes. 77
2.3.8.6 Pruebas Magnéticas con el Magnetómetro. 79
2.3.8.7 Pruebas de Tensión al Papel Aislante. 84
2.3.9 Relacionadas con Rigidez Dieléctrica a las muestras de equipos fallados. 85
2.3.10 Relacionadas con Simulaciones para Evaluar Condición de Falla en los Transformadores de Distribución. 86
2. 3. 10.1 Máquina de Soporte Vectorial. 86
2.3.10.1.1 Espacios Inducidos por la Función Kernel. 86
2.3.11 Simulación de Montecarlo. 89
2.3.12 Modelos de Control en Espacios de Estado. 90
2.3.12.1 Espacios de Estado: Entradas, Estados, Controlabilidad y Observabilidad.91

III. Metodología.

3.1 Recorrido metodológico. 94

- Paradigma. 94
- Tipo de Investigación. 94
- Tipo de Estudio. 94
- Método. 95

3.1.1 Diseño de la Investigación. 95

3.1.2 Universo, Población y Muestra. 95

3.1.3 Procedimientos o fases metodológicas. 97

3.2 Pruebas Experimentales de la Tesis Doctoral. 99

3.2.1 Estudio estadístico en empresas del sector eléctrico de Venezuela y Colombia respectivamente. 99

3.2.2 Pruebas Aplicando Partículas Magnéticas. 105

3.2.3 Análisis de la Microestructura. 106

3.2.4 Pruebas de Dureza. 117

3.2.5 Análisis Químico. 118

3.2.5.1 Contenido de Carbono (%) versus Resistencia Eléctrica. 122

3.2.5.2 Contenido de Carbono (%) versus Conductibilidad Térmica. 138

3.2.5.3 Contenido de Carbono (%) versus Saturación Magnética. 155

3.2.5.4 Contenido de Carbono (%) versus Fuerza Coercitiva. 172

3.2.5.5 Contenido de Carbono (%) versus Inducción Remanente. 189

3.2.5.6 Contenido de Carbono (%) versus Permeabilidad Magnética Absoluta.206

3.2.6 Microscopia Electrónica de Barrido en Ambiente. 223

3.2.7 Difracción de Rayos X (XRD). 229

3.2.8 Pruebas Magnéticas. 239

3.2.9 Pruebas de Tensión al Papel Aislante. 248

3.2.10 Rigidez Dieléctrica en Muestras de Aceite de Transformadores Fallados.260

3.3 Cálculo de Pérdidas Totales. 261

3.3.1 Pérdidas por Corrientes de Foucault. 261

3.3.2 Pérdidas por Histéresis Magnética. 263

3.3.3 Pérdidas Totales. 264

3.4 Desarrollo de la Metodología. 266

3.4.1 Análisis Estadístico Aplicando el Programa SPSS. 266

3.4.2 Análisis de la Falla por Arco Eléctrico Aplicando el Programa ATP al Transformador Monofásico Caso Estudio. 267

3.4.3 Análisis de los Resultados Experimentales realizados a la Chapa de Acero al Silicio de los Transformadores Fallados. 272

3.4.4 Análisis de los Resultados Experimentales realizados a las Muestras de Papel Aislante de los Transformadores Fallados. 285

3.4.5 Análisis de los Resultados de Rigidez Dieléctrica realizados a las Muestras de Aceite de los Transformadores Fallados. 287

3.4.6 Análisis de los Resultados Obtenidos al Aplicar la Máquina de Soporte Vectorial a los Resultados Experimentales realizados a la Chapa de Acero al Silicio. Caso: Transformadores Fallados por Arco Eléctrico. 288

3.4.7 Análisis de la Simulación de Montecarlo para Determinar la Relación entre las Pérdidas Totales y el Tamaño de Cristal (Grano). 290

3.4.8 Análisis del Modelo en Espacios de Estado Obtenido. Caso: Transformadores Fallados por Arco Eléctrico. 297

3.4.9 Análisis del Sistema Estocástico Propuesto en la Presente Investigación Doctoral. Caso: Transformadores Fallados por Arco Eléctrico. 305

3.4.9.1 Ecuaciones Diferenciales Estocásticas de Primer Orden. 305

3.4.9.2 Estimación Puntual: Método de Máxima Verosimilitud. 309

3.4.9.3 Densidad Espectral. 312

3.4.10 Determinar la Confiabilidad de la Muestra de Equipos Fallados, a fin de mejorar las Políticas de Mantenimiento Preventivo y Predictivo, en las empresas de los Sectores Eléctricos de Venezuela y Colombia. 315

IV. Análisis y Discusión de Resultados.

4.1 Resultados Obtenidos Aplicando el Programa SPSS. 317

4.1.1 Análisis y Discusión de estos Resultados. 317

4.2 Resultados de la Falla por Arco Eléctrico Aplicando Programa ATP. 318

4.2.1 Análisis y Discusión de estos Resultados. 318

4.3 Resultados Experimentales realizados a la Chapa de Acero al Silicio de los Transformadores Fallados. 318

4.3.1 Análisis y Discusión de estos Resultados. 318

4.4 Resultados Experimentales realizados a las Muestras de Papel Aislante de los Transformadores Fallados. 320

4.4.1 Análisis y Discusión de estos Resultados. 320

4.5 Resultados de Rigidez Dieléctrica realizados a las Muestras de Aceite de los Transformadores Fallados. 320

4.5.1 Análisis y Discusión de estos Resultados. 320

4.6 Resultados Obtenidos al Aplicar la Máquina de Soporte Vectorial a los Resultados Experimentales realizados a la Chapa de Acero al Silicio. 320

4.6.1 Análisis y Discusión de estos Resultados. 320

4.7 Resultados de la Simulación de Montecarlo para Determinar la Relación entre las Pérdidas Totales y el Tamaño de Cristal (Grano). 321

4.7.1 Análisis y Discusión de estos Resultados. 321

4.8 Resultados del Modelo en Espacios de Estado Obtenido. Caso: Transformadores Fallados por Arco Eléctrico. 322

4.8.1 Análisis y Discusión de estos Resultados. 322

4.9 Resultados del Sistema Estocástico Obtenido. Caso: Transformadores Fallados por Arco Eléctrico. 322

4.9.1 Análisis y Discusión de estos resultados. 322

4.9.1.1 Ecuaciones Diferenciales Estocásticas. 323

4.9.1.2 Principios Generales de Estimación. 323

4.9.1.3 Densidad Espectral. 323

4.10 Comparar el Modelo Estocástico Propuesto versus el Modelo de Estado. 323

4.10.1 Análisis y Discusión de estos Resultados.

Conclusiones 326

Prospectivas 327

Bibliografía 329

Anexos

ANEXO N° 1…Ecuaciones diferenciales estocásticas de primer orden. 334

ANEXO N° 2…Método de máxima verosimilitud. 337

ANEXO Nº 3… Normas ASTM D-828, ASTM D-877 ASTM 3906-3 y ASTM 3942-3.340

ANEXO Nº 4… Resultados del Análisis Químico de la Chapa de Acero al Silicio.342

ANEXO Nº 5… Script en Matlab© para las aproximaciones gráficas. 361

ANEXO Nº 6... Plano de Fabricación del Transformador de 5 KVA. 364

Apéndices

APENDICE N° 1…Ecuaciones del circuito equivalente del transformador de distribución. 366

APENDICE N° 2…Ecuaciones del modelo de estado. 372

APENDICE Nº 3… Cálculo de confiabilidad. 377

APENDICE N° 4…Script de Matlab© para la máquina de soporte vectorial. 385

Índice de Tablas.

Tabla Nº 1.Condiciones ambientales para transformadores monofásicos según norma colombiana RA7-060. 73
Tabla Nº 2.Condiciones ambientales para transformadores monofásicos según norma venezolana COVENIN 2286:1999. 74
Tabla Nº 3. Población del estudio: regiones de procedencia de las muestras. 96
Tabla Nº 4. Población del estudio: selección definitiva. 96
Tabla Nº 5. Muestra de expertos. 97
Tabla Nº 6. Mediciones de Dureza. 118
Tabla Nº 7 Análisis Químico. 120
Tabla Nº 8 Especificaciones para las Pruebas XRD. 230
Tabla Nº 9. FWHM, 2 theta y Tamaño del cristal (grano). 239
Tabla Nº 10. Especificaciones de las Probetas para las Pruebas de Tensión al Papel Aislante. 250
Tabla Nº 11. Resultados Obtenidos de las Pruebas de Tensión al Papel Aislante.250
Tabla Nº 12. Resultados de la Rigidez Dieléctrica. 261
Tabla Nº 13. Características para la Determinación de las Pérdidas de Potencia. 262
Tabla Nº 14. Pérdidas por corrientes de Foucault. 263
Tabla Nº 15. Pérdidas por Histéresis Magnética. 264
Tabla Nº 16. Pérdidas Totales (W) tomando 75 kg para Transformador de 5 kVA.265
Tabla N°17. Características Técnicas de Transformadores Fallados por Arco Eléctrico.267
Tabla N° 18. Tamaño del cristal (grano) versus el error obtenido. 281
Tabla N° 19. Pérdidas versus tamaño del cristal (grano) de acuerdo al porcentaje de Carbono. 282
Tabla N° 20. Pérdidas versus tamaño del cristal (grano) de acuerdo a las pruebas magnéticas. 284
Tabla N° 21. Datos equipos fallados versus condiciones ambientales. 292
Tabla N° 22. Todas las regresiones posibles para los datos de condiciones ambientales. 292
Tabla N° 23. Datos de pérdidas versus caracterización del material. 293

Tabla N° 24. Todas las regresiones posibles para los datos de caracterización física. 293
Tabla N° 25. Data de equipos fallados. 310
Tabla N° 26. Datos pérdidas totales fallas por arco eléctrico. 311
Tabla Nº 27. Pérdidas totales versus coeficiente de oscilación. 376
Tabla Nº 28. Planilla de Análisis de Fallas. 378
Tabla Nº 29. Método de mínimos cuadrados. 381

Listado de Gráficos.

Gráfico Nº 1. Curva característica que representa los periodos de vida de un equipo.

Gráfico Nº 2. Algunas partes constitutivas del transformador de distribución.

Gráfico Nº 3. Transformador fallado por sobrecarga

Gráfico Nº 4. Apariencia del aceite dieléctrico del transformador fallado por sobrecarga.

Grafica Nº 5. Transformador fallado por sobretensión atmosférica

Grafica Nº 6. Apariencia del aceite dieléctrico del transformador fallado por sobretensión atmosférica.

Gráfico Nº 7. Transformador fallado por cortocircuito externo en alta tensión

Gráfico Nº 8. Apariencia del aceite dieléctrico del transformador fallado por cortocircuito externo en alta tensión

Gráfico Nº 9. Transformador fallado por defecto de operación

Gráfico Nº 10. Apariencia del aceite dieléctrico del transformador fallado por defecto de operación.

Gráfico Nº 11. Transformador fallado por humedad.

Gráfico Nº 12. Apariencia del aceite dieléctrico del transformador fallado por humedad.

Gráfico Nº 13. Transformador fallado por defecto de fabricación.

Gráfico Nº 14. Apariencia del aceite dieléctrico del transformador fallado por defecto de fabricación.

Gráfica 15. Vista Esquemática de los Módulos de Simulación y Rutinas de Soporte.

Gráfico 16. Ventana del PlotXY.

Gráfico 17. Ejemplo de una gráfica con el PlotXY

Grafico 18. Preparación de las probetas para las muestras de transformadores fallados.

Gráfico 19. Chapa de acero al momento de aplicar corriente magnetizante (habiendo aplicado previamente partículas magnéticas al material).

Gráfico 20. Chapas de acero de equipos fallados preparadas para realizar ensayo aplicando líquidos penetrantes.

Gráfico 21. Chapas de acero de equipos fallados luego de aplicar liquido revelador.
Gráfico 22. Curva de histéresis magnética.
Gráfico 23. Relación entre densidad de campo magnético versus intensidad de flujo.
Gráfico 24. Densidad de flujo remanente Br.
Gráfico 25. Efecto de la Saturación Magnética.
Gráfico 26. Fuerza Coercitiva.
Gráfico 27. Determinación del punto de fluencia por el método del 0.2%.
Gráfico 28. Espacio de entradas a un espacio de características de mayor dimensión.
Gráfico 29. Modelo de espacio de estado típico
Gráfico 30. Histograma de frecuencias de meses del año con transformadores fallados.
Gráfico 31. Histograma de frecuencias de capacidad de transformadores fallados.
Gráfico 32. Histograma de frecuencias de los municipios de ubicación de los transformadores fallados.
Gráfico 33. Histograma de frecuencias del circuito alimentador de los transformadores fallados.
Gráfico 34. Histograma de frecuencias de meses del año con transformadores fallados.
Gráfico 35. Histograma de frecuencias de marcas de transformadores fallados.
Gráfico 36. Histograma de frecuencias de capacidad de transformadores fallados.
Gráfico 37. Histograma de frecuencias de fallas de transformadores.
Gráfico 38. Histograma de frecuencias de años de fabricación de transformadores fallados.
Gráfico 39. Equipo utilizado para el END aplicando partículas magnéticas.
Gráfico 40. Chapa de acero al momento de aplicar corriente magnetizante.
Gráfico 41.Equipo para preparación y montaje de probetas.
Gráfico 42. Equipo analizador de imágenes.
Grafico 43. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó Falla Térmica debido a una Sobrecarga X100. Región de procedencia: Antioquia (Medellín).

Grafico 44. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla por Descarga Parcial debido a una Sobretensión X100. Región de procedencia: Antioquia (Medellín).
Grafico 45. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla por Arco Eléctrico debido a un Cortocircuito Externo X100. Región de procedencia: Antioquia (Medellín).
Grafico 46. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó Falla Térmica debido a una Sobrecarga X100. Región de procedencia: Caldas (Manizales).
Gráfico Nº 47. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla por Arco Eléctrico debido a un Cortocircuito Externo X100. Región de procedencia: Caldas (Manizales).
Gráfico Nº 48. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla por Arco Eléctrico/Térmica debido a una Sobrecarga X100. Región de procedencia: Caldas (Manizales).
Gráfico Nº 49. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla por Descarga Parcial debido a un Defecto de Fabricación X100. Región de procedencia: Caldas (Manizales).
Gráfico 50. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla Térmica/Arco Eléctrico debido a una Sobrecarga X100. Región de procedencia: Pacífico (Popayán).
Gráfico 51. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla por Arco Eléctrico debido a un Cortocircuito Externo X100. Región de procedencia: Pacífico (Popayán).
Gráfico 52. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla por Descarga Parcial debido a una Sobretensión X100. Región de procedencia: Pacífico (Popayán).
Gráfico 53. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla por Descarga Parcial debido a una Sobretensión X100. Región de procedencia: Bogotá.

Gráfico 54. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla por Térmica debido a una Sobrecarga X100. Región de procedencia: Bogotá.
Gráfico 55. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla por Térmica debido a una Sobrecarga X100. Región de procedencia: Bogotá.
Gráfico 56. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla por Arco Eléctrico debido a una Sobrecarga X100. Región de procedencia: Bogotá.
Gráfico 57. Fotomicrografía de la muestra Patrón sin ataque químico X50.
Grafico 58. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó Falla Térmica debido a una Sobrecarga X50. Región de procedencia: Antioquia (Medellín).
Grafico 59. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla por Descarga Parcial debido a una Sobretensión X50. Región de procedencia: Antioquia (Medellín).
Grafico 60. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla por Arco Eléctrico debido a un Cortocircuito Externo X50. Región de procedencia: Antioquia (Medellín).
Gráfico 61. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó Falla Térmica debido a una Sobrecarga X50. Región de procedencia: Caldas (Manizales).
Gráfico 62. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla por Arco Eléctrico debido a un Cortocircuito Externo X50. Región de procedencia: Caldas (Manizales).
Gráfico 63. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla por Arco Eléctrico/Térmica debido a una Sobrecarga X50. Región de procedencia: Caldas (Manizales).
Gráfico 64. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla por Descarga Parcial debido a un Defecto de Fabricación X50. Región de procedencia: Caldas (Manizales).

Gráfico 65. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla Térmica/Arco Eléctrico debido a una Sobrecarga X50. Región de procedencia: Pacífico (Popayán).
Gráfico 66. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla por Arco Eléctrico debido a un Cortocircuito Externo X50. Región de procedencia: Pacífico (Popayán).
Gráfico 67. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla por Descarga Parcial debido a una Sobretensión X50. Región de procedencia: Pacífico (Popayán).
Gráfico 68. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla Térmica debido a una Sobrecarga X50. Región de procedencia: Cundinamarca.
Gráfico 69. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla por Descarga Parcial debido a una Sobretensión X50. Región de procedencia: Bogotá.
Gráfico 70. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla por Térmica debido a una Sobrecarga X50. Región de procedencia: Bogotá.
Gráfico 71. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla por Térmica debido a una Sobrecarga X50. Región de procedencia: Bogotá.
Gráfico 72. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla por Arco Eléctrico debido a una Sobrecarga X50. Región de procedencia: Bogotá.
Gráfico 73. Fotomicrografía de la muestra Patrón mostrando ataque químico X50.
Gráfico 74. Equipo para medir dureza o "Hardness Test".
Gráfico 75. Equipo para realizar análisis químico.
Gráfico 76. Influencia del Carbono en las Propiedades Físicas del Acero.
Gráfico 77. Porcentaje de Carbono versus Resistencia eléctrica.
Gráfico 78. Porcentaje de Carbono versus Conductibilidad Térmica.
Gráfico 79. Porcentaje de Carbono versus Saturación magnética.

Gráfico 80. Porcentaje de Carbono versus Fuerza coercitiva.
Gráfico 81. Porcentaje de Carbono versus Inducción remanente.
Gráfico 82. Porcentaje de Carbono versus Permeabilidad magnética.
Gráfico 83. Cálculo de la resistividad. Región Antioquia. Falla Térmica.
Gráfico 84. Cálculo de la resistividad. Región Antioquia. Falla Descarga Parcial.
Gráfico 85. Cálculo de la resistividad. Región Antioquia. Falla Arco Eléctrico.
Gráfico 86. Cálculo de la resistividad. Región Caldas. Falla Térmica.
Gráfico 87. Cálculo de la resistividad. Región Caldas. Falla Arco Eléctrico.
Gráfico 88. Cálculo de la resistividad. Región Caldas. Falla Arco Eléctrico/ Térmica.
Gráfico 89. Cálculo de la resistividad. Región Caldas. Falla Descarga Parcial.
Gráfico 90. Cálculo de la resistividad. Región Pacífico. Falla Arco Eléctrico/Térmica.
Gráfico 91. Cálculo de la resistividad. Región Pacífico. Falla Arco Eléctrico.
Gráfico 92. Cálculo de la resistividad. Región Pacífico. Falla Descarga Parcial.
Gráfico 93. Cálculo de la resistividad. Región Cundinamarca. Falla Térmica.
Gráfico 94. Cálculo de la resistividad. Región Bogotá. Falla Arco Eléctrico/Térmica.
Gráfico 95. Cálculo de la resistividad. Región Bogotá. Falla Arco Eléctrico.
Gráfico 96. Cálculo de la resistividad. Región Bogotá. Falla Descarga Parcial.
Gráfico 97. Cálculo de la resistividad. Región Bogotá. Falla Térmica.
Gráfico 98. Cálculo de la resistividad. Muestra Patrón.
Gráfico 99. Cálculo de la conductibilidad. Región Antioquia. Falla Térmica.
Gráfico 100. Cálculo de la conductibilidad. Región Antioquia. Falla Térmica.
Gráfico 101. Cálculo de la conductibilidad. Región Antioquia. Falla Descarga Parcial.
Gráfico 102. Cálculo de la conductibilidad. Región Antioquia. Falla Arco Eléctrico.
Gráfico 103. Cálculo de la conductibilidad. Región Caldas. Falla Térmica.
Gráfico 104. Cálculo de la conductibilidad. Región Caldas. Falla Arco Eléctrico.
Gráfico 105. Cálculo de la conductibilidad. Región Caldas. Falla Arco Eléctrico/ Térmica.
Gráfico 106. Cálculo de la conductibilidad. Región Caldas. Falla Descarga Parcial.
Gráfico 107. Cálculo de la conductibilidad. Región Pacífico. Falla Arco Eléctrico/Térmica.
Gráfico 108. Cálculo de la conductibilidad. Región Pacífico. Falla Arco Eléctrico.

Gráfico 109. Cálculo de la conductibilidad. Región Pacífico. Falla Descarga Parcial.
Gráfico 110. Cálculo de la conductibilidad. Región Cundinamarca. Falla Térmica.
Gráfico 111. Cálculo de la conductibilidad. Región Bogotá. Falla Arco Eléctrico/Térmica.
Gráfico 112. Cálculo de la conductibilidad. Región Bogotá. Falla Arco Eléctrico.
Gráfico 113. Cálculo de la conductibilidad. Región Bogotá. Falla Descarga Parcial.
Gráfico 114. Cálculo de la conductibilidad. Región Bogotá. Falla Térmica.
Gráfico 115. Cálculo de la conductibilidad. Muestra Patrón.
Gráfico 116. Cálculo de la saturación magnética. Región Antioquia. Falla Térmica.
Gráfico 117. Cálculo de la saturación magnética. Región Antioquia. Falla Descarga Parcial.
Gráfico 118. Cálculo de la saturación magnética. Región Antioquia. Falla Arco Eléctrico.
Gráfico 119. Cálculo de la saturación magnética. Región Caldas. Falla Térmica.
Gráfico 120. Cálculo de la saturación magnética. Región Caldas. Falla Arco Eléctrico.
Gráfico 121. Cálculo de la saturación magnética. Región Caldas. Falla Arco Eléctrico/Térmica.
Gráfico 122. Cálculo de la saturación magnética. Región Caldas. Falla Descarga Parcial.
Gráfico 123. Cálculo de la saturación magnética. Región Pacífico. Falla Térmica/Arco Eléctrico.
Gráfico 124. Cálculo de la saturación magnética. Región Pacífico. Falla Arco Eléctrico.
Gráfico 125. Cálculo de la saturación magnética. Región Pacífico. Falla Descarga Parcial.
Gráfico 126. Cálculo de la saturación magnética. Región Cundinamarca. Falla Descarga Parcial.
Gráfico 127. Cálculo de la saturación magnética. Región Bogotá. Falla Arco Eléctrico/Térmica.
Gráfico 128. Cálculo de la saturación magnética. Región Bogotá. Falla Arco Eléctrico.
Gráfico 129. Cálculo de la saturación magnética. Región Bogotá. Falla Arco Eléctrico.
Gráfico 130. Cálculo de la saturación magnética. Región Bogotá. Falla Descarga Parcial.
Gráfico 131. Cálculo de la saturación magnética. Región Bogotá. Falla Térmica.
Gráfico 132. Cálculo de la saturación magnética. Muestra Patrón.
Gráfico 133. Cálculo de la fuerza coercitiva. Región Antioquia. Falla Térmica.
Gráfico 134. Cálculo de la fuerza coercitiva. Región Antioquia. Falla Descarga Parcial.
Gráfico 135. Cálculo de la fuerza coercitiva. Región Antioquia. Falla Arco Eléctrico.
Gráfico 136. Cálculo de la fuerza coercitiva. Región Caldas. Falla Térmica.

Gráfico 137. Cálculo de la fuerza coercitiva. Región Caldas. Falla Arco Eléctrico.
Gráfico 138. Cálculo de la fuerza coercitiva. Región Caldas. Falla Arco Eléctrico/Térmica.
Gráfico 139. Cálculo de la fuerza coercitiva. Región Caldas. Falla Descarga Parcial.
Gráfico 140. Cálculo de la fuerza coercitiva. Región Pacífico. Falla Descarga Parcial.
Gráfico 141. Cálculo de la fuerza coercitiva. Región Pacífico. Falla Arco Eléctrico.
Gráfico 142. Cálculo de la fuerza coercitiva. Región Pacífico. Falla Descarga Parcial.
Gráfico 143. Cálculo de la fuerza coercitiva. Región Cundinamarca. Falla Térmica.
Gráfico 144. Cálculo de la fuerza coercitiva. Región Bogotá. Falla Arco Eléctrico/Térmica.
Gráfico 145. Cálculo de la fuerza coercitiva. Región Bogotá. Falla Arco Eléctrico.
Gráfico 146. Cálculo de la fuerza coercitiva. Región Bogotá. Falla Arco Eléctrico.
Gráfico 147. Cálculo de la fuerza coercitiva. Región Bogotá. Falla Descarga Parcial.
Gráfico 148. Cálculo de la fuerza coercitiva. Región Bogotá. Falla Térmica.
Gráfico 149. Cálculo de la fuerza coercitiva. Muestra Patrón.
Gráfico 150. Cálculo de la inducción remanente. Región Antioquia. Falla Térmica.
Gráfico 151. Cálculo de la inducción remanente. Región Antioquia. Falla Descarga Parcial.
Gráfico 152. Cálculo de la inducción remanente. Región Antioquia. Falla Arco Eléctrico.
Gráfico 153. Cálculo de la inducción remanente. Región Caldas. Falla Térmica.
Gráfico 154. Cálculo de la inducción remanente. Región Caldas. Falla Arco Eléctrico.
Gráfico 155. Cálculo de la inducción remanente. Región Caldas. Falla Arco Eléctrico/Térmica.
Gráfico 156. Cálculo de la inducción remanente. Región Caldas. Falla Descarga Parcial.
Gráfico 157. Cálculo de la inducción remanente. Región Pacífico. Falla Térmica/Arco Eléctrico.
Gráfico 158. Cálculo de la inducción remanente. Región Pacífico. Falla Arco Eléctrico.
Gráfico 159. Cálculo de la inducción remanente. Región Pacífico. Falla Descarga Parcial.
Gráfico 160. Cálculo de la inducción remanente. Región Cundinamarca. Falla Térmica.
Gráfico 161. Cálculo de la inducción remanente. Región Bogotá. Falla Arco Eléctrico/Térmica.
Gráfico 162. Cálculo de la inducción remanente. Región Bogotá. Falla Arco Eléctrico.
Gráfico 163. Cálculo de la inducción remanente. Región Bogotá. Falla Arco Eléctrico.
Gráfico 164. Cálculo de la inducción remanente. Región Bogotá. Falla Descarga Parcial.
Gráfico 165. Cálculo de la inducción remanente. Región Bogotá. Falla Térmica.
Gráfico 166. Cálculo de la inducción remanente. Muestra Patrón.

Gráfico 167. Cálculo de la permeabilidad magnética absoluta. Región Antioquia. Falla Térmica.
Gráfico 168. Cálculo de la permeabilidad magnética absoluta. Región Antioquia.
Falla Descarga Parcial.
Gráfico 169. Cálculo de la permeabilidad magnética absoluta. Región Antioquia.
Falla Arco Eléctrico.
Gráfico 170. Cálculo de la permeabilidad magnética absoluta. Región Caldas. Falla Térmica.
Gráfico 171. Cálculo de la permeabilidad magnética absoluta. Región Caldas. Falla Arco Eléctrico.
Gráfico 172. Cálculo de la permeabilidad magnética absoluta. Región Caldas. Falla Arco Eléctrico/Térmica.
Gráfico 173. Cálculo de la permeabilidad magnética absoluta. Región Caldas. Falla Descarga Parcial.
Gráfico 174. Cálculo de la permeabilidad magnética absoluta. Región Pacífico. Falla Térmica/Arco Eléctrico.
Gráfico 175. Cálculo de la permeabilidad magnética absoluta. Región Pacífico. Falla Arco Eléctrico.
Gráfico 176. Cálculo de la permeabilidad magnética absoluta. Región Pacífico. Falla Descarga Parcial.
Gráfico 177. Cálculo de la permeabilidad magnética absoluta. Región Cundinamarca. Falla Térmica.
Gráfico 178. Cálculo de la permeabilidad magnética absoluta. Región Bogotá. Falla Arco Eléctrico/Térmica.
Gráfico 179. Cálculo de la permeabilidad magnética absoluta. Región Bogotá. Falla Arco Eléctrico.
Gráfico 180. Cálculo de la permeabilidad magnética absoluta. Región Bogotá. Falla Arco Eléctrico.
Gráfico 181. Cálculo de la permeabilidad magnética absoluta. Región Bogotá. Falla Descarga Parcial.
Gráfico 182. Cálculo de la permeabilidad magnética absoluta. Región Bogotá. Falla Térmica.
Gráfico 183. Cálculo de la permeabilidad magnética absoluta. Muestra Patrón.
Gráfico 184. Microscopio Electrónico de Barrido en Ambiente marca Phillips modelo XL 30 ESEM TMP.
Gráfico 185. Microscopia Electrónica de Barrido Muestra Región Antioquia. Falla: Térmica.

Gráfico 186. Microscopia Electrónica de Barrido Muestra Región Antioquia. Falla: Descarga Parcial.
Gráfico 187. Microscopia Electrónica de Barrido Muestra Región Antioquia. Falla: Arco Eléctrico.
Gráfico 188. Microscopia Electrónica de Barrido Muestra Región Caldas. Falla: Térmica.
Gráfico 189. Microscopia Electrónica de Barrido Muestra Región Caldas. Falla: Arco Eléctrico.
Gráfico 190. Microscopia Electrónica de Barrido Muestra Región Caldas. Falla: Arco Eléctrico/Térmica.
Gráfico 191. Microscopia Electrónica de Barrido Muestra Región Caldas. Falla: Descarga Parcial.
Gráfico 192. Microscopia Electrónica de Barrido Muestra Región Pacífico. Falla: Térmica/Arco Eléctrico.
Gráfico 193. Microscopia Electrónica de Barrido Muestra Región Pacífico. Falla: Arco Eléctrico.
Gráfico 194. Microscopia Electrónica de Barrido Muestra Región Pacífico. Falla: Descarga Parcial.
Gráfico 195. Microscopia Electrónica de Barrido Muestra Región Cundinamarca. Falla: Térmica.
Gráfico 196. Microscopia Electrónica de Barrido Muestra Región Bogotá. Falla: Arco Eléctrico/Térmica.
Gráfico 197. Microscopia Electrónica de Barrido Muestra Región Bogotá. Falla: Arco Eléctrico.
Gráfico 198. Microscopia Electrónica de Barrido Muestra Región Bogotá. Falla: Descarga Parcial.
Gráfico 199. Microscopia Electrónica de Barrido Muestra Región Bogotá. Falla: Térmica.
Gráfico 200. Microscopia Electrónica de Barrido Muestra Patrón.
Gráfico 201. Difractómetro de Rayos X "RIGAKU, MINIFLEX II.
Gráfico 202. XRD Muestra Región Antioquia. Falla: Térmica.
Gráfico 203. XRD Muestra Región Antioquia. Falla: Arco Eléctrico.
Gráfico 204. XRD Muestra Región Antioquia. Falla: Descarga Parcial.
Gráfico 205. XRD Muestra Región Caldas. Falla: Térmica.
Gráfico 206. XRD Muestra Región Caldas. Falla: Arco Eléctrico.
Gráfico 207. XRD Muestra Región Caldas. Falla: Arco Eléctrico/Térmica.

Gráfico 208. XRD Muestra Región Caldas. Falla: Descarga Parcial.
Gráfico 209. XRD Muestra Región Pacífico. Falla: Térmica.
Gráfico 210. XRD Muestra Región Pacífico. Falla: Arco Eléctrico.
Gráfico 211. XRD Muestra Región Pacífico. Falla: Descarga Parcial.
Gráfico 212. XRD Muestra Región Cundinamarca. Falla: Térmica.
Gráfico 213. XRD Muestra Región Bogotá. Falla: Arco Eléctrico/Térmica.
Gráfico 214. XRD Muestra Región Bogotá. Falla: Arco Eléctrico.
Gráfico 215. XRD Muestra Región Bogotá. Falla: Descarga Parcial.
Gráfico 216. XRD Muestra Región Bogotá. Falla: Térmica.
Gráfico 217. XRD Muestra Patrón.
Gráfico 218. Magnetómetro Convencional.
Gráfico 219. Prueba Magnética Muestra Región Antioquia. Falla: Térmica.
Gráfico 220. Prueba Magnética Muestra Región Antioquia. Falla: Descarga Parcial.
Gráfico 221. Prueba Magnética Muestra Región Antioquia. Falla: Cortocircuito Externo.
Gráfico 222. Prueba Magnética Muestra Región Caldas. Falla: Térmica.
Gráfico 223. Prueba Magnética Muestra Región Caldas. Falla: Arco Eléctrico.
Gráfico 224. Prueba Magnética Muestra Región Caldas. Falla: Arco Eléctrico/Térmica.
Gráfico 225. Prueba Magnética Muestra Región Caldas. Falla: Descarga Parcial.
Gráfico 226. Prueba Magnética Muestra Región Pacífico. Falla: Térmica/Arco Eléctrico.
Gráfico 227. Prueba Magnética Muestra Región Pacífico. Falla: Arco Eléctrico.
Gráfico 228. Prueba Magnética Muestra Región Pacífico. Falla: Descarga Parcial.
Gráfico 229. Prueba Magnética Muestra Región Cundinamarca. Falla: Térmica.
Gráfico 230. Prueba Magnética Muestra Región Bogotá. Falla: Térmica/Arco Eléctrico.
Gráfico 231. Prueba Magnética Muestra Región Bogotá. Falla: Arco Eléctrico.
Gráfico 232. Prueba Magnética Muestra Región Bogotá. Falla: Descarga Parcial.
Gráfico 233. Prueba Magnética Muestra Región Bogotá. Falla: Térmica.
Gráfico 234. Prueba Magnética Muestra Patrón.
Gráfico 235. Determinación del punto de fluencia por el método del 0.2%.
Gráfico 236. Máquina Autograph para realizar Pruebas de Tensión.
Gráfico 237. Analizador de la Máquina Autograph.
Gráfico 238. Resultados de las Pruebas de Tensión de las Muestras de la Región Antioquia versus Muestra Patrón.
Gráfico 239. Resultados de las Pruebas de Tensión de las Muestras de la Región Caldas versus Muestra Patrón.

Gráfico 240. Resultados de las Pruebas de Tensión de las Muestras de la Región Pacífico versus Muestra Patrón.
Gráfico 241. Resultados de las Pruebas de Tensión de la Muestra de la Región Cundinamarca versus Muestra Patrón.
Gráfico 242. Resultados de las Pruebas de Tensión de las Muestras de la Región Bogotá versus Muestra Patrón.
Gráfico 243. Comparación de las Pruebas de Tensión a las Muestras de Transformadores que presentaron Fallas Térmicas en todas las Regiones versus Muestra Patrón.
Gráfico 244. Comparación de las Pruebas de Tensión a las Muestras de Transformadores que presentaron Fallas por Descarga Parcial en todas las regiones versus Muestra Patrón.
Gráfico 245. Comparación de las Pruebas de Tensión a las Muestras de Transformadores que presentaron Fallas por Arco Eléctrico en todas las regiones versus Muestra Patrón.
Gráfico 246. Comparación de las Pruebas de Tensión a las Muestras de Transformadores que presentaron Fallas por Arco Eléctrico/Térmica en todas las regiones versus Muestra Patrón.
Gráfico 247. Probador de Rigidez Dieléctrica.
Gráfico 248. Conjunto interno del chispómetro.
Gráfico 249. Modelo propuesto en el programa ATP.
Grafico 250. Atributos del circuito equivalente, para la medición de potencia y energía en el transformador.
Gráfico 251. Respuesta en régimen transitorio y permanente cuando ocurre el arco eléctrico en el transformador
Gráfico 252. Medición de potencia en el transformador.
Gráfico 253. Medición de energía en el transformador.
Grafico 254. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla por Arco Eléctrico debido a un Cortocircuito Externo X100. Región de procedencia: Antioquia (Medellín). TIPO D: OXIDOS GRUESOS 12 μ.
Gráfico 255. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla por Arco Eléctrico debido a un Cortocircuito Externo X100. Región de procedencia: Caldas (Manizales). TIPO D: OXIDOS GRUESOS 10 μ.
Gráfico 256. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla por Arco Eléctrico debido a un Cortocircuito Externo X100.Región de procedencia: Pacífico (Popayán). TIPO D: OXIDOS FINOS 7 μ.

Gráfico 257. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla por Arco Eléctrico debido a una Sobrecarga X100. Región de procedencia: Bogotá. TIPO D: OXIDOS FINOS 4 μ.
Gráfico 258. Fotomicrografía de la muestra Patrón sin ataque químico X50. TIPO D: OXIDOS FINOS 4 μ.
Gráfico 259. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla por Arco Eléctrico debido a un Cortocircuito Externo X50. Región de procedencia: Antioquia (Medellín). TAMAÑO 1. FWHM 1,704 2 THETA 43,672 TAMAÑO DEL CRISTAL (GRANO) 5,05 nm.
Gráfico 260. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla por Arco Eléctrico debido a un Cortocircuito Externo X50.Región de procedencia: Caldas (Manizales). TAMAÑO 2. FWHM 0,144 2 THETA 43,505 TAMAÑO DEL CRISTAL (GRANO) NO SE APRECIA ESCALA (0 nm).
Gráfico 261. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla por Arco Eléctrico debido a un Cortocircuito Externo X50.Región de procedencia: Pacífico (Popayán). TAMAÑO 1. FWHM 0,271 2 THETA 43,875 TAMAÑO DEL CRISTAL (GRANO) 41,06 nm.
Gráfico 262. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicioque presentó una Falla por Arco Eléctrico debido a una Sobrecarga X50.Región de procedencia: Bogotá. TAMAÑO 2. FWHM 0,234 2 THETA 43,888 TAMAÑO DEL CRISTAL (GRANO) 54,36 nm.
Gráfico 263. Fotomicrografía de la muestra Patrón mostrando ataque químico X50.
TAMAÑO 1 FWHM 0,652 2 THETA 43,459 TAMAÑO DEL CRISTAL (GRANO) 13,6 nm.
Gráfico 264. Análisis Porcentaje Carbono versus Resistividad, Fuerza Coercitiva e Inducción Remanente en la Falla por Arco Eléctrico.
Gráfico 265. Análisis de la Conductibilidad, Saturación Magnética y Permeabilidad en la Falla por Arco Eléctrico.
Gráfico 266. Resultados obtenidos de las mediciones de dureza en las muestras de Fallas por Arco Eléctrico.
Grafico 267. ESEM Muestra Región Antioquia.

Grafico 268. E-SEM Muestra Región Caldas.
Gráfico 269. E-SEM Muestra Región Pacífico.
Gráfico 270. E-SEM Muestra Región Bogotá.
Gráfico 271. E-SEM Muestra Patrón.
Gráfico 272. Tamaño de cristal (grano) en la falla por arco eléctrico.
Gráfico 273. Tamaño de cristal (grano) versus relación de pérdidas en la falla por arco eléctrico de acuerdo al porcentaje de carbono.
Gráfico 274. Resultados obtenidos de las pruebas magnéticas para la Falla por arco eléctrico.
Gráfico 275. Tamaño de cristal (grano) versus relación de pérdidas en la Falla por arco eléctrico de acuerdo a las pruebas magnéticas.
Gráfico 276. Máxima carga aplicada a las probetas de la Falla por Arco Eléctrico.
Gráfico 277. Máximo desplazamiento aplicado a las probetas de la Falla por Arco Eléctrico.
Gráfico 278. Máxima deformación aplicada a las probetas de la Falla por Arco Eléctrico.
Gráfico 279. Pérdidas totales (W) 75 kg peso del transformador de 5 kVA versus tamaño del cristal (grano).
Gráfico 280. Tamaño de grano versus inclusiones. Caso 1
Gráfico 281. Caso N° 1: Tamaño de cristal (grano) 1 versus 4 μ de Óxidos. (Microestructura)
Gráfico 282. Muestra Patrón: Tamaño de cristal (grano) 13,6 nm versus 4μ de Óxidos.
Gráfico 283. Región Caldas: Tamaño de cristal (grano) 0 nm versus 10 μ Óxidos.
Gráfico 284. Tamaño de cristal (grano) versus inclusiones. Caso 2.
Gráfico 285. Caso N° 2: Tamaño de cristal (grano) 5,05 nm versus 12μ de Óxidos.
Gráfico 286. Esquema del Modelo de Control
Gráfico 287. Señal de corriente en el lado secundario del transformador.
Gráfico 288. Señal de corriente en el lado primario del transformador.
Gráfico 289. Señal de corriente en la rama de magnetización.
Gráfico 290. Diagrama de estado del modelo propuesto.

Gráfico 291. Caso 1: Tamaño de grano 1 inclusiones 4µ.
Gráfico 292. Comparando con el resultado anterior.
Gráfico 293. Tamaño de cristal (grano) 13,6 nm y 4µ de óxidos tipo D correspondiente a resultados presentados en muestra Patrón.
Gráfico 294. Comparando con el resultado anterior.
Gráfico 295. Tamaño de cristal (grano) 0 y 10 µ de óxidos tipo D correspondiente a muestra procedente Región Caldas.
Gráfico 296. Comparación con resultado anterior.
Gráfico 297. Tamaño de cristal (grano) 5,05 nm y 12µ de óxidos tipo D correspondiente a muestra procedente de la Región Antioquia..
Gráfico 298. Comparación con resultado anterior.
Gráfico 299. Data equipos fallados año 2011. Región Caldas Cap. 5 kVA.
Gráfico 300. Relación entre las pérdidas totales de acuerdo a la Regiones de procedencia.
Gráfico 301. Periodograma de la densidad espectral de energía de las Pérdidas Totales.
Gráfico 302. Periodograma de la densidad espectral de energía.
Gráfico 303. Periodograma estimado de la densidad espectral de energía utilizando la ventana de Hamming.
Gráfico 304. Región Antioquia. Tipo de Falla: Térmica. Causa: Sobrecarga. Fuente: Laboratorio de Metalografía de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.
Gráfico 305. Región Antioquia. Tipo de Falla: Descarga parcial. Causa: Sobretensión. Fuente: Laboratorio de Metalografía de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.
Gráfico 306. Región Antioquia. Tipo de Falla: Arco eléctrico. Causa: Cortocircuito externo. Fuente: Laboratorio de Metalografía de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.
Gráfico 307. Región Caldas. Tipo de Falla: Térmica. Causa: Sobrecarga. Fuente: Laboratorio de Metalografía de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

Gráfico 308. Región Caldas. Tipo de Falla: Arco eléctrico. Causa: Cortocircuito Externo. Fuente: Laboratorio de Metalografía de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.
Gráfico 309. Región Caldas. Tipo de Falla: Arco eléctrico/térmica. Causa: Sobrecarga. Fuente: Laboratorio de Metalografía de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.
Gráfico 310. Región Caldas. Tipo de Falla: Descarga parcial. Causa: Defecto de fabricación/Humedad. Fuente: Laboratorio de Metalografía de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.
Gráfico 311. Región Pacífico. Tipo de Falla: Térmica/Arco eléctrico. Causa: Sobrecarga. Fuente: Laboratorio de Metalografía de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.
Gráfico 312. Región Pacífico. Tipo de Falla: Arco eléctrico. Causa: Cortocircuito externo. Fuente: Laboratorio de Metalografía de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.
Gráfico 313. Región Pacífico. Tipo de Falla: Descarga parcial. Causa: Sobretensión. Fuente: Laboratorio de Metalografía de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.
Gráfico 314. Región Cundinamarca. Tipo de Falla: Térmica. Causa: Sobrecarga. Fuente: Laboratorio de Metalografía de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.
Gráfico 315. Región Bogotá. Tipo de Falla: Arco eléctrico/Térmica. Causa: Sobrecarga. Fuente: Laboratorio de Metalografía de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.
Gráfico 316. Región Bogotá. Tipo de Falla: Arco Eléctrico. Causa: Sobretensión. Fuente: Laboratorio de Metalografía de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.
Gráfico 317. Región Bogotá. Tipo de Falla: Arco eléctrico. Causa: Cortocircuito externo. Fuente: Laboratorio de Metalografía de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

Gráfico 318. Región Bogotá. Tipo de Falla: Descarga parcial. Causa: Sobretensión. Fuente: Laboratorio de Metalografía de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.
Gráfico 319. Región Bogotá. Tipo de Falla: Térmica. Causa: Sobrecarga. Fuente: Laboratorio de Metalografía de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.
Gráfico 320. Muestra Patrón. Fuente: Laboratorio de Metalografía de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.
Gráfico 321. Muestra Patrón. Fuente: Laboratorio de Metalografía de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.
Gráfico 322. Plano del Transformador Cap. 5 kVA. Fuente: Empresa TRANCECA
Gráfico 323. Circuito Equivalente de Transformador de Distribución.
Gráfica 324. Porcentaje de carbono.
Gráfico 325. Pruebas Magnéticas.
Gráfico 326. Circuito equivalente del transformador referido al lado primario.

Nomenclatura de Ecuaciones.

(1)Ecuación diferencial estocástica.

(2)Ecuación diferencial satisfaciendo condiciones iniciales en un intervalo.

(3)Teorema 1 que corresponde proceso gaussiano de la ecuación diferencial estocástica.

(4)Solución general para la ecuación diferencial estocástica.

(5)Solución sobre proceso de segundo orden estable.

(6)Estimador óptimo.

(7)Función de covarianza.

(8)Función de densidad espectral.

(9)Probabilidad de supervivencia.

(10) Rata de fallas.

(11) Probabilidad de fallas.

(12) Coeficiente de vida característica.

(13) Coeficiente de dispersión.

(14) Tiempo promedio entre fallas.

(15) Pérdidas por corrientes de Foucault.

(16) Pérdidas por histéresis magnética o fórmula de Steinmentz.

(17) Pérdidas totales en el núcleo.

(18) Matriz nodal de conductancias.

(19) Sistema de ecuaciones lineales para cálculos en el ATP.

(20) Coeficiente de temperatura en el transformador.

(21) Modelo de regresión lineal múltiple.

(22) Coeficiente de determinación múltiple.

(23) Tensión superficial.

(24) Fuerza aplicada hacia arriba.

(25) Fuerza aplicada hacia abajo.

(26) Nuevo espacio de características de la función Kernel.

(27) Propiedad simétrica del espacio de características la función Kernel.

(28) Propiedad de Cauchy- Schwarz del espacio de características la función Kernel.

(29) Relación entre variables de estado y entradas del sistema.

(30) Debye-Scherrer

Glosario de Abreviaturas y Símbolos.

Abreviaturas

Aq	*Análisis químico (Average de carbono)*
ATP	*Programa de transitorios electromagnéticos*
B	*Inducción remanente (Oe)*
Bmax	*Inducción máxima (Gauss)*
Bmax'	*Inducción máxima (Tesla)*
Bs	*Brillo solar*
C	*Carbono*
Cm	*Campo magnético (Oe)*
D	*Dureza (Knoop)*
Df	*Deformación (%)*
Esem	*Microscopía electrónica de barrido en ambiente*
Ef	*Esfuerzo (kPa)*
f	*Frecuencia (Hz)*
FWHM	*2 theta*
Hc	*Fuerza coercitiva (Oe)*
Im	*Inclusiones o impurezas*
In	*Intensidad (u.a)*
Kg	*Peso del transformador*
Kh	*Coeficiente de cada material*
M	*Magnetómetro*
Ma	*Magnetización (emu/g)*

Mc	*Microestructura (µm)*
Mi	*Microones (µm)*
nm	*Tamaño de cristal (grano)*
np	*Nivel pluviométrico*
Pf	*Pérdidas por corriente de Foucault (W/Kg)*
Ph	*Pérdidas por histéresis (W/Kg)*
Pm	*Partículas magnéticas*
Pmg	*Pruebas magnéticas*
Pme	*Promedio (Average)*
Pt	*Pérdidas totales*
PT	*Pruebas de tensión*
Sm	*Saturación magnética (4πι∞)*
XRD	*Difracción de rayos X*
Ve	*Velocidad del viento*

Símbolos

λ	*Conductibilidad térmica (W/m.grad(cal/cm.s.grad)*
ρ	*Resistencia eléctrica (Ω.mm⁻²)*
µa	*Permeabilidad magnética absoluta (Gs/Oe)*
%	*Porcentaje de carbono*
Δ	*Espesor chapa magnética (mm)*
T	*Temperatura*
Le	*Limite elástico*
Rm	*Tracción (Resistencia) máxima*
F	*Carga aplicada*

R	*Resistividad*
A	*Área*
σ	*Tensión (Esfuerzo)*
ε	*Deformación.*
Lf	*Longitud inicial*
Lo	*Longitud final*
Δl	*Diferencia entre longitudes*
Ao	*Área inicial*
Af	*Área final*
R	*Rigidez dieléctrica*
E	*Estadística*
CF	*Confiabilidad*
X	*Estado*
$U(z)$	*Función de entrada*
$Y(z)$	*Función de salida*
V	*Observabilidad*
C	*Controlabilidad*
$\hat{P}$	*Estimador P*
f_x	*Función densidad espectral*
P	*Patrón*

I. Contextualización del Objeto de Indagación

1.1 Planteamiento del Problema.

1.2 Objetivo de la Tesis Doctoral.

1.3 Aportes de la Investigación.

1.4 Alcance y Delimitaciones.

I. CONTEXTUALIZACION DEL OBJETO DE INDAGACIÓN.

1.1 Planteamiento del Problema.

En la transmisión de energía eléctrica uno de los equipos fundamentales es el transformador de distribución, ya que tiene como una de las principales funciones disminuir el nivel de voltaje según lo requiera el sistema eléctrico mediante la acción transformadora de un campo magnético, además de reducir los costos de transmisión de energía.

En las redes de distribución eléctrica en Venezuela, son escasas las políticas de mantenimiento preventivo[60], ni siquiera se realiza a estos transformadores monofásicos de poste, un análisis físico-químico al aceite dieléctrico que utilizan como refrigerante, o quizás técnicas de termografía con equipos especiales, que pudieran detectar alguna condición anormal en el funcionamiento. La revisión de estos equipos es considerado en Venezuela, como algo innecesario y de elevado costo, no existiendo información precisa sobre la vida remanente de los mismos, lo cual permitiría la detección precoz de una posible falla [14]. En Colombia, existen empresas en algunos Departamentos, cuyas áreas servidas cumplen normativas de planes de mantenimiento y reemplazo de los mismos [27].

Dada la importancia de las redes de distribución eléctrica, por suministrar la energía requerida para la población e industrias del país, actualmente; la presente tesis doctoral plantea la necesidad de desarrollar un sistema estocástico para la predicción confiable de las fallas que presentan los transformadores de distribución monofásicos ubicados en los postes, dada la importancia que estos equipos poseen proporcionando la energía eléctrica para este servicio y que debido a inadecuadas políticas de mantenimiento, tiempo de uso, condiciones ambientales, entre otros factores, solo son tomados en cuenta cuando se han dañado por completo, lo que ocasiona suspensiones del servicio eléctrico en forma imprevista o no programadas.

El diseñar un sistema para predecir confiablemente las fallas, permite identificar los factores ambientales reales que influyen en los daños que estos presentan, contribuyendo en la creación de nuevas políticas de mantenimiento en las empresas del sector eléctrico

evitando la interrupción del servicio de forma imprevista, además de que la aplicación de métodos no convencionales como condición causal de comparación para los diagnósticos de falla, son inéditos para estos equipos eléctricos.

1.2 Objetivo de la Tesis Doctoral.

Para el abordaje de la investigación se plantea el diseño de un sistema estocástico unificado para la predicción confiable de fallas por condiciones ambientales en transformadores de distribución, para lo cual se requiere lo indicado a continuación:

1. Determinar las condiciones de funcionamiento de los transformadores de distribución de acuerdo al medio ambiente donde se desempeñen, analizando los factores que influyen en los daños que estos presentan.
2. Identificar los modos de falla por condiciones ambientales, determinando causas reales que originan los mismos, aplicando métodos no convencionales a los materiales de fabricación.
3. Modelar las causas reales que originan los modos de falla por condiciones ambientales en los transformadores de distribución.
4. Desarrollar un sistema estocástico para predecir de manera confiable las fallas producto de la acción ambiental en los transformadores de distribución, determinando la vida útil de los mismos.

1.3 Aportes de la Investigación.

El conocimiento a adquirir a través del diagnóstico de fallas en transformadores de distribución, contribuye a mejorar actividades relacionadas con el mantenimiento preventivo que permitan disminuir suspensiones del servicio eléctrico en forma imprevista, incrementado la confiabilidad de las redes de transmisión y distribución de Venezuela y Colombia, respectivamente.

Con los procedimientos desarrollados en la presente investigación se aplican otros métodos de análisis de fallas para estos equipos, además del análisis físico – químico del aceite dieléctrico, que es el ensayo utilizado por excelencia en el sector industrial, con lo

cual se espera aumentar la experticia en las fallas probables. Se focalizan los aportes hacia una propuesta técnica que tendrá repercusiones directas en las mejoras del servicio eléctrico y la obtención de información apoya las políticas de mantenimiento en las empresas del sector eléctrico. La importancia se plantea en los siguientes términos:

a) La investigación documenta problemas prácticos que afectan a las empresas del sector eléctrico nacional e internacional.

b) La investigación deriva y sustenta nuevos trabajos hacia el estudio de los transformadores de distribución en Venezuela, Colombia y otras regiones del continente.

c) La investigación permite a la Universidad de Carabobo y a la Universidad Nacional de Colombia enlazarse con los sectores eléctricos nacionales, tanto públicos como privados, ofreciendo asistencia técnica en el área.

Se mejoran las variables que intervienen en los procesos eléctricos, favoreciendo a la industria, contribuyendo con los valores normalizados de calidad de energía, que a la vez mejorando los costos a las empresas del sector eléctrico, y por consiguiente; a los consumidores. Lo anterior se traduce en mejoras indirectas a la población.

1.4 Alcance y Delimitaciones.

- **De Espacio (geográfico):** El presente trabajo de investigación se limita a las muestras de equipos fallados aportados por las empresas que fabrican o reparan transformadores de distribución en el Departamento de Cundinamarca (Bogotá, Colombia). No se utilizaron muestras de equipos fallados en Venezuela por limitaciones al acceso por parte de la empresa del sector eléctrico nacional, solamente fue suministrada información para elaborar la estadística de fallas, para el área servida (Valencia, Venezuela), de igual manera en (Bogotá, Colombia). Para otras empresas dedicadas a esta área tanto del sector público o privado de otras regiones, deberá realizarse la investigación centrada en las necesidades específicas.

Las muestras de los transformadores fallados fueron ubicadas en Colombia por quien suscribe, durante la estancia doctoral en la Universidad Nacional de Colombia (UNAL) (sede Bogotá) que se llevó a cabo en el lapso de tiempo indicado a continuación.

- **De Tiempo:** El estudio y recopilación de la información se llevó a cabo desde Enero 2010 hasta Diciembre del 2011. Las muestras de transformadores fallados desde Agosto 2010 hasta Mayo del 2011, aunque la información recopilada puede ser variable en el tiempo de acuerdo al avance tecnológico y cambios en los procesos.
- **De contenido:** El estudio es un proyecto que requiere tomar las variables presentes en la transmisión de energía eléctrica y complementarlo con lo académico, de manera que el diagnóstico de fallas apoye planes de mantenimiento, aplicando herramientas que puedan ser utilizadas por cuerpos docentes, estudiantes entre otros en cuanto a detecciones de las mismas, influencia del estado de los materiales de fabricación que sirvan de referencia a investigaciones similares en el área.

Esta investigación es viable, dado que se van a focalizar los aportes hacia la pertinencia con las líneas de investigación del Centro de Materiales de la Escuela de Mecánica, de la Universidad de Carabobo referida a; *"Confiabilidad",* y de *"Análisis de fallas"* del grupo AFIS de la Escuela de Mecánica, de la Universidad Nacional de Colombia, cuyos resultados servirán de referencia a estudios posteriores en esta área.

Para abordar el tema de las fallas de los transformadores de distribución el sustento teórico orienta la investigación a partir del estudio del estado del arte en su proceso heurístico con informaciones que sirven de apoyo a la investigación, modelos o teorías sobre los cuales se sustenta la misma y el proceso hermenéutico a través de la decodificación de los datos.

II. Sustento Teórico

2.1 Antecedentes Internacionales.

2.2 Antecedentes Nacionales.

2.3 Corrientes Epistemológicas.

II. SUSTENTO TEÓRICO.

Una vez definido el planteamiento del problema y precisado los objetivos general y específicos, es

necesario establecer los aspectos epistemológicos de la investigación. En consecuencia, dentro del marco teórico se describen los antecedentes de la investigación y las corrientes epistemológicas.

2. Antecedentes

2.1 Internacionales

Santofimia (2006) llevó a cabo una tesis doctoral en la Universidad Complutense de Madrid sobre la *"**Transformación Bainítica sin Formación de Carburos en Acero"***, cuya metodología y resultados obtenidos sobre el porcentaje de carbono que posee el acero al silicio, son de suma importancia en la determinación de las propiedades magnéticas de la chapa con la cual se fabrican los núcleos de los transformadores de distribución.

Fue consultado otro trabajo de investigación realizado por Rincón (2006) de la Universidad Autónoma de México sobre *"**Introducción a las Ecuaciones Diferenciales Estocásticas"***, utilizando la integral de Ito respecto del movimiento Browniano. Se presentan además varios ejemplos y modelos particulares que ayudan a desarrollar la intuición y comprensión del comportamiento de las soluciones de dichas ecuaciones.

También se ha consultado otro trabajo doctoral de Montoya (2009) de la Universidad de Granada, España; titulado "***Optimización de Tensión en Redes de Distribución Utilizando Técnicas Evolutivas"***, donde la aplicación de algoritmos genéticos, a través de modelos matemáticos, adquiere una importancia fundamental para la propuesta en estudio, ya que los valores requeridos por los dispositivos de la red son manejados a través de software que permiten normalizar las mismas a valores estándares, cuya aplicación en los mercados eléctricos de algunas regiones en el mundo, adquiere una alta significación, ya que permite consolidar la modelación hacia el desarrollo estocástico para el diagnóstico y predicción de fallas en los transformadores de distribución.

Hernández (2006) en su tesis para obtener el grado de maestro en ciencias con especialidad en Ingeniería Eléctrica del Instituto Politécnico Nacional (Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, México), realizó una *"**Implementación de Modelos de Arco Eléctrico para la Simulación de Interruptores de Potencia en el EMTP"***, analizando los efectos del arco eléctrico implementando modelos tipo "general" utilizando el programa de uso comercial ATP/EMTP y su interfaz gráfica ATPDraw. Las ecuaciones que definen

la dinámica del arco se resuelven empleando dispositivos de control conocidos como TACS (System Control Analisys Transient), que permiten obtener de este modelo la respuesta de potencia (energía) de un transformador monofásico cuando ocurre ese evento. Esto contribuye en el alcance de uno de los objetivos específicos de esta investigación analizando los factores que influyen en los daños que estos presentan.

En el mismo orden de ideas, Boix (1996) de la Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona; elaboró una propuesta doctoral titulada "***Estudio y Modelización en Régimen Permanente de Cargas No Lineales para el Análisis Armónico de Redes Eléctricas"***, cuya aplicación para las condiciones que persisten actualmente en las redes de distribución, es necesario considerar, dada la presencia de dispositivos fabricados con electrónica de potencia, que alimentan de armónicos a las mismas, afectando de forma importante la vida útil de los transformadores de distribución, ya que incrementan los valores de temperatura, corriente nominal entre otros, cuya evaluación a través de modelos matemáticos permite analizar las posibles causas y consecuencias de fallas por condiciones de funcionamiento, además de los factores ambientales.

Saldaña (2004) realizo una investigación para la maestría en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León, San Nicolás de los Garza, México; titulada ***"Modelado y Detección de Fallas Incipientes en Transformadores Utilizando Redundancia Analítica"***, la cual sirve de comprobación en las ecuaciones de modelo de estado propuesto en la presente investigación doctoral.

2.2 Nacionales

La investigación titulada *"****Análisis de Fallas en Transformadores de Distribución Utilizando Métodos No Convencionales"***, realizada por Mago, (2011) en la Maestría de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Carabobo, crea un nuevo espacio de aplicaciones para el análisis de fallas en equipos eléctricos, utilizando métodos que permiten evaluar la vida remante o útil de equipos fundamentales para las redes de distribución de energía eléctrica, y que fueron el punto de partida en la presente investigación doctoral.

Existe un trabajo de investigación titulado ***"Reconocimiento de Patrones Utilizando Máquinas de Soporte Vectorial (MSV)"*** realizado por Labrador (2009) de la Universidad Nacional Abierta***,*** la contribución de este trabajo radica, en la utilización de

máquinas de soporte vectorial como un sistema clasificador de patrones presentes en rostros y huellas dactilares de personas, obtenidos de fotografías digitales e imágenes escaneadas, lo cual es necesario, dentro de la aplicación que se desea realizar en la presente investigación, para la caracterización física de la chapa de acero al silicio en transformadores de distribución monofásicos.

En este mismo orden de ideas, otro de los trabajos de investigación que se ha tomado como referencia es el efectuado por Shortt (2005) de la Universidad Rafael Urdaneta, quien realizó el desarrollo de una ***"Metodología Forense Para el Diagnóstico de Fallas en Transformadores Monofásicos Tipo Poste en la Red de Distribución de 23.9 kV de ENELVEN"***, con el propósito de conocer las causas que determinan las fallas de transformadores monofásicos tipo poste, instalados en la red de distribución de 23.9 kV de la empresa ENELVEN. También desarrolló una metodología para el análisis y diagnóstico de unidades falladas; basada en la experiencia propia del personal de la empresa, así como también, de fabricantes y empresas suplidoras de servicios. Como resultado de esta investigación, determinó que las fallas en los transformadores de distribución se deben a diferentes causas: sobretensión, sobrecarga, defecto de fabricación, operación o instalación deficiente, falta de hermeticidad en tanque, cortocircuito externo y daños de terceros.

En este mismo orden de ideas, Balderrama, (2000) de la Universidad de Carabobo, realizó un *"**Estudio de Tipos de Fallas, Cargas y Sistema de Protección en los Transformadores de Distribución de las Redes de ELECENTRO"***. Este tipo de estudio establece los valores de carga inicial y carga de reemplazo para cada capacidad de transformador, el estudio del aislamiento, la temperatura que soporta y el tiempo de servicio, permitiendo tener una visión de las políticas de mantenimiento que aplican algunas de las empresas del sector eléctrico nacional.

Por otra parte, Martínez y Aristizabal (2000) de la Universidad Simón Bolívar trabajaron sobre el *"**Uso del ATP/AMTP para el Estudio de las Sobretensiones Inducidas en Líneas Aéreas Considerando el Efecto de Cables de Guarda y Neutro"***, indicando el efecto de las descargas atmosféricas utilizando simulaciones a través del programa de transitorios electromagnéticos, que es una de las herramientas de aplicación para simular la falla por arco eléctrico que presentan los transformadores de distribución en mayor

porcentaje, en algunas regiones de Colombia, y que constituye uno de los objetivos a desarrollar en esta propuesta de investigación doctoral.

2.3 Corrientes Epistemológicas.

2.3.1 Relacionadas con los Sistemas Estocásticos.

Los modelos estocásticos describen fenómenos reales cuya evolución temporal depende del azar. El análisis de estos modelos permite predecir el rendimiento de los sistemas y ayuda a la toma de decisiones, bien en el diseño de sistemas o bien, en la comparación de políticas alternativas. Los modelos han de ser simples y suficientemente próximos a la realidad que representan, de forma que las conclusiones derivadas del mismo tengan credibilidad.

Los modelos empíricos sobre un sistema, facilitan el proceso de toma de decisiones al proporcionar estimaciones del comportamiento del mismo y su evolución en el tiempo. En la práctica, se pueden caracterizar a partir de un número pequeño de parámetros y el interés se centra en determinar el valor de los mismos para optimizar el rendimiento del sistema. La confianza en el método utilizado se apoya en el hecho de que las hipótesis asumidas en el ajuste y la estimación del modelo, se verifiquen.

2.3.1.1 Descripción General de los Sistemas Estocásticos.

Los sistemas estocásticos modelan la operación de un proceso, indican la posible estructura probabilística que subyace al comportamiento aleatorio del mismo y el propósito que lleva a su análisis. Hay que establecer una serie de hipótesis, paso previo a la creación del modelo, realizando un análisis cuidadoso del mismo explicando el comportamiento de un sistema en diferentes condiciones o escenarios, comparar diferentes políticas o estrategias con el contraste estadístico de los resultados y predecir el rendimiento del sistema cuando la experimentación no es factible o es muy costosa[24].

• **Ecuaciones Diferenciales Estocásticas**

$$AoX^{(n)}(t) + A1\,X^{(n-1)}(t) + \ldots + AnX(t) = W'(t) \quad \ldots\ldots\ldots (1)$$

Un proceso estocástico donde *X(t)* es una solución para un intervalo contener los puntos *to* si *n-1* satisface la siguiente condición;

$$Ao\left(X^{(n-1)}(t) - X^{(n-1)}\,(to)\right) + \ \ldots + An - 1\,\left(X(t)\right) - X(to))$$

$$+An\int_{to}^{t} X(s)ds = W(t) - W(to) \quad (2)$$

Sobre ese intervalo.

Teorema 1 *El proceso X(t) , t≥ to , definido por*

$$X(t) = \int_{to}^{t} h(t-s)dW(s), \ t \geq to \qquad (3)$$

Es una solución para la ecuación [1] sobre [*to, ∞]* satisfaciendo las condiciones iniciales. A continuación se muestra la solución general;

$$X(t) = X(to)\ \Phi 1(t - to) + \ \ldots + X^{(n-1)}(to)\,\Phi_n(t - to) + \int_{to}^{t} h(t-s)dW(s), \qquad t \geq to$$

(4)

Si X(t) es un proceso de segundo orden, estable que satisface el intervalo indicado entonces corresponde a;

$$\lim_{s,t\to+\infty}\left(r_x(s,t) - \left(r_{xo}(s,t)\right)\right) = 0 \qquad (5)$$

Principios generales de Estimación.

Teorema 2 *Si $\mathcal{M}$ satisface las condiciones (i) e (ii). Entonces $\hat{Y} \in$ M es un estimador óptimo de Y si y solo si,*

$$E\left(\hat{Y} - Y\right)Z = 0, \ \ Z \in \mathcal{M} \qquad (6)$$

Si $\hat{Y} y \bar{\bar{Y}}$ son ambos estimadores óptimos de Y, entonces $E\left(\bar{\bar{Y}} - \hat{Y}\right)^2 = 0$

Densidad Espectral

X(t), -∞< t<∞, si el proceso estacionario es de segundo orden teniendo una función de covarianza tal que;

$$\int_{-\infty}^{\infty} \lfloor r_x(t) \rfloor \, dt \; < \infty \qquad (7)$$

La función de densidad espectral $f_x(\lambda), -\infty<\lambda<\infty$ *esta definida por;*

$$f_x(\lambda) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-(i\lambda t)} r_{(x)(t)dt,} \; -\infty<\lambda<\infty \qquad (8)$$

2.3.2 Relacionadas con la Teoría de Mantenimiento.

Las Teorías de Mantenimiento basadas en Fiabilidad, Confiabilidad, Mantenibilidad o Disponibilidad, permiten el diseño de estrategias donde se implementen programas de mantenimiento en plantas industriales o empresas de servicio, que mejoren los procesos y aumenten la vida útil de los equipos. En las empresas del sector eléctrico por ejemplo, la organización de mantenimiento localiza un conjunto de recursos y una demanda de servicios de suma importancia para los usuarios residenciales o industriales, siendo necesario el diseño de planes de acción, que garanticen la continuidad del suministro de energía eléctrica bajo los parámetros establecidos de calidad y eficiencia energética.

Es necesario determinar la causa, magnitud y frecuencia de fallas que permita un *Estudio de Confiabilidad,* para Nava, J. (2006): *es el paso más importante en la determinación de un programa de mantenimiento óptimo que depende del conocimiento del índice de fallas de un equipo en cualquier momento de su vida útil* (p: 10).

En esta investigación, se aplica el desarrollado de una teoría utilizando las ecuaciones de Weibull, determinando el periodo de vida de estos equipos.

La probabilidad de supervivencia o sobrevivencia es el "*término sinónimo de confiabilidad"*, en cambio, la probabilidad de falla es el que representa la "*desconfiabilidad"*. Para realizar estudios de confiabilidad se debe conocer la causa y la influencia del factor tiempo o en su defecto, cantidad de equipos fallados en un periodo determinado, utilizando para ello, los resultados de análisis estadístico o similar. Los parámetros utilizados para el estudio de confiabilidad son: tiempo promedio entre fallas, probabilidad de supervivencia y rata de fallas, como se indica a continuación:

Probabilidad de supervivencia

$$P(s) = 1 - PF(t) \quad (9)$$

Rata de fallas

$$r(t) = \frac{p(t)}{Ps(t)}$$

$$Ps(t) = e^{-\int_0^t r(t)dt} \quad (10)$$

La vida útil de un equipo está dividida en tres periodos separados, los cuales se definen en función del comportamiento de la rata de fallas: arranque, operación normal y desgaste (obsolescencia).

Período de arranque o mortalidad infantil: las características resaltantes de este período son:

- ✓ Al aumentar el tiempo, la rata de fallas decrece.
- ✓ Baja confiabilidad.
- ✓ Se corrigen defectos en las operaciones producto del arranque de los equipos hasta el punto que la frecuencia de fallas disminuye y llega a estabilizarse en un índice constante.

Período normal: las características resaltantes de este período son:

- ✓ Índice de fallas constante, es decir, la rata de fallas no varía, mientras ocurre el envejecimiento del equipo.

$$r(t) = r = constante = \frac{1}{MTEF}$$

Resolviendo queda:

$$Ps(t) = \frac{p(t)re^{-rt}}{r(t)r} = e^{-rt}$$

- ✓ Repentinas acumulaciones de esfuerzos por encima de la resistencia de diseño de los componentes.

- ✓ El coeficiente de variación es igual a uno, es decir, $\frac{\sigma}{MTEF} = 1$

$$p(t) = r(t)e^{-\int_0^t r(t)dt}$$

Periodo de desgaste: las características resaltantes de este período son:

- ✓ Un índice de falla decreciente, es decir, al aumentar el tiempo, la rata de fallas r(t), se incrementa. Las fallas son debidas a: fatiga, desgaste mecánico, corrosión, erosión.
- ✓ Cuando un equipo entra a este periodo, debe someterse a una reparación general.
- ✓ El coeficiente de variación es menor que uno, es decir, $\frac{\sigma}{MTEF} < 1$

A continuación en el grafico 1, se muestra la curva característica que representa los periodos de vida de un equipo:

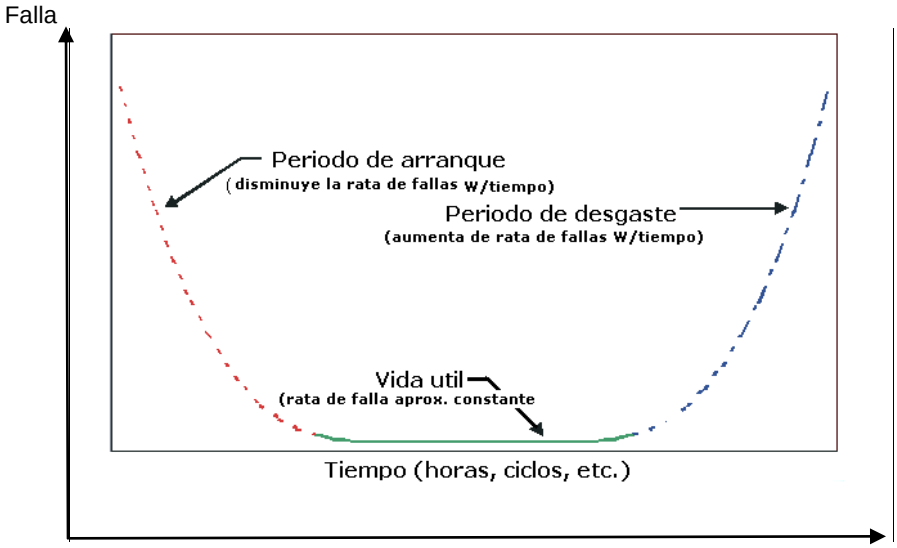


Gráfico 1. Curva característica que representa los periodos de vida de un equipo.
Fuente: M. Mago

Para estimar la condición del equipo en estudio, que en el caso de la presente investigación corresponde a transformadores fallados, se aplica de manera bastante útil la *Distribución de Weibull*, ya que describe las fallas durante cualquier período en la vida de un equipo. La estimación de los parámetros que aplican a este modelo de distribución se obtiene, a partir de la función de sobrevivencia por el método de mínimos cuadrados. A los valores obtenidos en la distribución se les llama *"V"* vida característica o edad característica en el momento de la falla, y el valor de *"K"* es una media de dispersión y se

utiliza para calcular la varianza o período de vida de un equipo, donde sí *"K"*<1 supone una tasa de falla decreciente o también conocida como "mortalidad infantil", si *"K"*=1 supone una tasa de falla constante o también conocida como operación normal, en cambio sí *"K"*>1 supone una tasa de falla creciente o también conocida como obsolescencia.

De acuerdo a lo indicado anteriormente, se tomaron los resultados obtenidos del análisis estadístico[44], clasificando la frecuencia de fallas de los equipos, de acuerdo al mes de ocurrencia correspondiente, determinando la probabilidad de falla y sobrevivencia respectivamente, utilizando un modelo de *"Planilla de análisis de falla"*[47].

2.3.2.1 Cálculo y Predicción de Confiabilidad

1. Las fallas están clasificadas según los meses de ocurrencia de las mismas. Los tiempos entre fallas (TEF) deben ser ordenados en orden ascendente (de menor a mayor) y listados en forma consecutiva en la columna T(N) (ver planilla de análisis de fallas).
2. En el caso de dos observaciones con el mismo valor, se debe determinar la medida geométrica de los números de igual orden.

T(N) = tiempo de sobrevivencia, entonces
M(N) = N

Donde; $M = \sqrt{N_i - N_j}$

$NiyNj$ indican rangos menores y mayores respectivamente.

El rango M(n) se usa para determinar la probabilidad de falla *PF(t)*, de acuerdo a lo siguiente:

$$PF(t) = \frac{M(N)}{Nmax+1.0} \qquad (11)$$

Para cada rango se calcula la probabilidad de supervivencia. Luego, utilizando el método de mínimos cuadrados, a partir de esta función de sobrevivencia se pueden estimar los valores teóricos de *V y K*, calculando luego, el ***TPEF*** (tiempo promedio entre fallas) ***o MTEF***. A continuación lo indicado:

$$V = exp\left[\left[\frac{(N\sum_{i=1}^{n} Zibi - \sum_{i=1}^{n} Zi\sum_{i=1}^{n} bi)}{(\sum_{i=1}^{n} Zibi\sum_{i=1}^{n} bi - \sum_{i=1}^{n} Zi\sum_{i=1}^{n} bi^2)}\right]\right] \qquad (12)$$

$$K = \frac{\sum Zibi}{\sum bi - \ln Vx \sum b^2} \quad (13)$$

$$TPEF = V * \left(1 + \left(\frac{1}{K}\right)\right) \quad (14)$$

2.3.3 Relacionadas con el Transformador de Distribución.

Un transformador es una máquina eléctrica, que permite aumentar o disminuir la tensión en un circuito eléctrico de corriente alterna, manteniendo la frecuencia. La potencia que ingresa al equipo, en el caso de un transformador ideal, esto es, sin pérdidas, es igual a la que se obtiene a la salida. Las máquinas reales presentan un pequeño porcentaje de pérdidas, dependiendo de su diseño, tamaño, etc.

Los transformadores son dispositivos basados en el fenómeno de la inducción electromagnética y están constituidos, en su forma más simple, por dos bobinas devanadas sobre un núcleo cerrado de hierro dulce o hierro silicio. Las bobinas o devanados se denominan primarios y secundarios según correspondan a la entrada o salida del sistema en cuestión, respectivamente. También existen transformadores con más devanados; en este caso, puede existir un devanado "terciario", de menor tensión que el secundario.

Se consideran transformadores monofásicos de distribución aquellos con capacidad nominal de 10 a 167.5 kVA de acuerdo a la norma venezolana[49]. En Colombia existen transformadores monofásicos de distribución con capacidad nominal desde 3 kVA. Si la capacidad es mayor de 500 kVA, se consideran transformadores de potencia.Los transformadores de distribución a su vez se pueden clasificar en dos tipos, de acuerdo a su potencia y nivel de tensión: transformadores de distribución de potencia, los cuales están ubicados en las subestaciones de distribución y transformadores de distribución propiamente dichos, los cuales se encargan de reducir los niveles de tensión hasta los valores normalizados utilizados por los usuarios, entre los cuales se encuentran los siguientes:

- Transformador Tipo Poste: *"es aquel transformador que por su configuración externa está dispuesto en forma adecuada para sujetarse o instalarse en un poste o en alguna estructura similar"*, existen una clasificación de acuerdo al medio ambiente u otras características técnicas, los cuales se indican a continuación:

- Tipo Normal: se diseñan para trabajar a temperatura promedio del ambiente que no exceda de 30º C y la temperatura máxima no sea mayor de 40º C.
- Tipo Costa: *"es el conjunto formado por un transformador de distribución con un gabinete integrado, en el cual se incluyen accesorios para conectarse en sistemas de distribución subterránea; este conjunto está destinado para instalarse en un pedestal y para servicio intemperie",* se diseñan para trabajar a temperatura del ambiente mayor de 40º C y la promedio del ambiente durante cualquier periodo de las 24 horas mayor de 30º C.
- Transformadores Autoprotegidos: *"son aquellos que poseen un sistema de protección denominado CSP, contra rayos, fallas secundarias, sobrecargas severas y proporciona aviso visual de la existencia de condiciones antieconómicas de carga. El sistema de protección CSP también protege al sistema de distribución contra separación de línea en el caso de una falla del transformador*". Hay de dos tipos: existen el transformador tipo normal y el transformador tipo costa para esta condición.
- Transformador Tipo Sumergible: *"es aquel que por su configuración externa, está dispuesto en forma adecuada para ser instalado en un pozo o bóveda y estará expuesto a sufrir inundaciones"*.
- Transformador Tipo Subestación: *"es aquel transformador que por su configuración externa, está dispuesto en forma adecuada para ser instalado en una plataforma, cimentación o estructura similar y su acceso está limitado por un área restrictiva"*[48].

2.3.3.1 Descripción General del Transformador de Distribución.

El transformador está constituido básicamente por una parte activa la cual es el corazón del transformador. En esta sección es donde se transforman las tensiones y corrientes, está conformada por el núcleo y las bobinas. El núcleo se construye con láminas de acero al silicio (3.15%) de granos orientados, lo que permite una densidad mayor de flujo magnético. El espesor usual de la chapa de acero al silicio es de 0.35 mm, el silicio

reduce las pérdidas por histéresis y aumenta la resistencia del hierro. En el gráfico nº 2 se observan partes constitutivas del transformador de distribución monofásico [17].

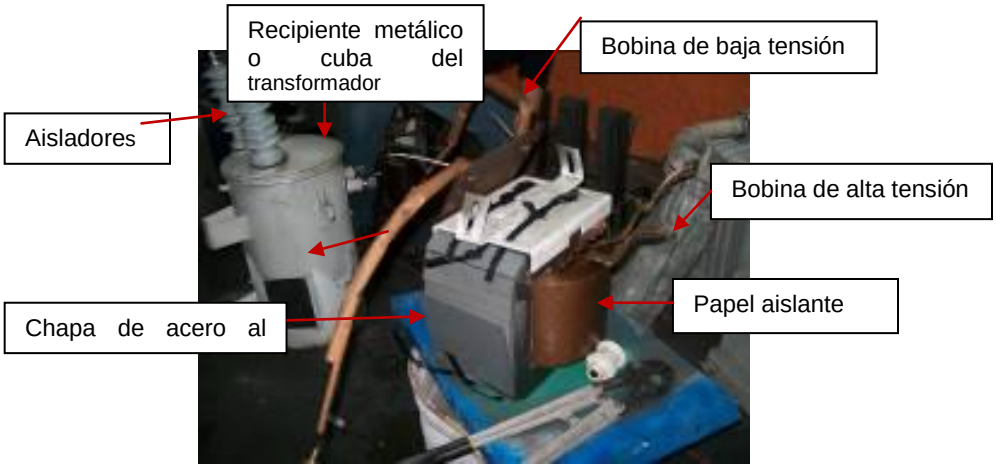


Gráfico 2. Algunas partes constitutivas del Transformador de Distribución. Fuente: M. Mago.

2.3.3.2 Aceros al Silicio

Estos aceros se emplean generalmente en forma de chapa o fleje para la fabricación de núcleos o piezas de máquinas eléctricas y transformadores, que están sometidos a la acción de campos magnéticos que cambian rápidamente de valor. En la actualidad, el material más empleado es el acero al silicio de bajo contenido de carbono y con 2 a 4,5 % de silicio, también se emplea en algunos casos, aunque muy limitados, otros materiales como el hierro dulce de calidad corriente, el hierro Armco, y la fundición del acero moldeado.

2.3.3.2.1 Propiedades de las Chapas Magnéticas.

Las chapas magnéticas se caracterizan por uno o varios de los siguientes atributos:

a) Pueden imanarse mucho más fácilmente que los demás materiales. Esta característica viene indicada por una gran permeabilidad relativa μ / μ_0 .

b) Tienen una inducción magnética intrínseca máxima $\beta_{máx}$ muy elevada.

c) Se imanan con una facilidad muy diferente según sea el valor del campo magnético. Este atributo lleva a una relación no lineal entre los módulos B de la inducción magnética y H del campo magnético.

d) Un aumento del campo magnético les origina una variación de flujo diferente de la variación que originaría una disminución igual de campo magnético. Este atributo indica que las relaciones que expresan la inducción magnética y la permeabilidad μ como funciones del campo magnético, no son lineales ni uniformes.

e) Conservan la imanación cuando se suprime el campo magnético.

f) Tienden a oponerse a la inversión del sentido de la imanación una vez imanados.

Otra característica importante que define la calidad magnética es la que vincula los valores de inducción con los valores de campo, (característica B-H), observándose que para las aplicaciones en corriente alterna los valores de inducción son máximos, mientras que los de corriente (causa de H) son eficaces. El aumento de excitación da lugar a un aumento del campo inducido, hasta llegar a un límite en que, para un aumento sensible de este último, haría falta un aumento exagerado de excitación y, por lo tanto, un consumo de energía anormal. Este fenómeno, denominado *saturación del material*, señala un límite superior en el empleo de los materiales magnéticos de distinta calidad. Los materiales se consiguen con diferentes contenidos de silicio, que puede alcanzar hasta el 4,5%. Si bien, un aumento del contenido de silicio da lugar a pérdidas por unidad de peso menores, la saturación se presenta para valores de inducción más bajos, el material se vuelve más frágil y se tiene una mayor abrasión sobre los troqueles que se utilizan para la fabricación. Las condiciones de cizallabilidad o corte de material, empeoran a medida que las pérdidas disminuyen, siendo el objetivo de los fabricantes de materiales magnéticos mejorarla para permitir realizar las operaciones de ranurado con una duración aceptable de las matrices[53].

El devanado de baja tensión (secundario) consta de dos arrollados, los cuales están conformados por espiras que se construyen con cintas de aluminio y con un diseño resistente a las fuerzas que ejercen los cortocircuitos externos. Del devanado de baja tensión se extraen cuatro terminales, los cuales van directamente a los cuatro conectores de

baja tensión y dependiendo de la conexión entre ellos se obtiene 120 ó 240 voltios. Los terminales van fijos a las cintas conductoras por medio de soldadura en frío (de alta presión) o por medio de soldadura en un gas inerte, dependiendo de la clase de material usado.

Como aislante, se utiliza papel especial compatible con el aceite dieléctrico, el cual se coloca entre las espiras. Se utilizan unos ductos o canales de refrigeración en algunas capas conductoras (espiras) seleccionadas que facilitan el paso del aceite, mejorando la refrigeración de la parte activa del transformador. Esta parte activa se prensa con dos láminas de acero (cuadrado superior e inferior), lo cual da al conjunto núcleo-bobina un ensamblaje rígido que ayuda a minimizar las pérdidas del núcleo, de la corriente en vacío y del nivel de ruido.

Debido a que los transformadores se calientan a causa de las pérdidas, este aumento de temperatura deteriora los elementos constituyentes del transformador; de allí que estos equipos utilicen aceite como medio refrigerante y aislante. Este aceite proviene de la destilación del petróleo bruto siendo su rigidez dieléctrica y su compatibilidad con el aislamiento los factores más importantes en el transformador. El aceite está contenido dentro de un tanque en el cual se sumerge la parte activa. Este tanque y las tapas (principal y de inspección) se fabrican de láminas de acero pulidas. La preparación del tanque y las tapas para la pintura se hace de tal manera que sea resistente a la corrosión.

Los aisladores o bushing de alta tensión están ubicados en la tapa principal y los de baja en la pared del tanque; ambos aisladores están fabricados de cerámica. Internamente el transformador tiene un cambiador de tomas (tap) para impedir un cambio de una posición por arriba y tres por debajo de la tensión nominal (13.800 voltios). A este cambiador de tomas llegan los seis terminales que se extraen del devanado de alta tensión y de él salen dos terminales que van a los dos bushing de alta tensión ubicados en la tapa principal del tanque.

2.3.3.3 Relacionadas con Tipos de Fallas en Transformadores de Distribución.

Existe una clasificación de los tipos de fallas que presentan los transformadores de distribución, las cuales se indican a continuación:

- **Térmicas:** se presentan cuando la temperatura de trabajo sobrepasa la establecida por el fabricante, ocasionando degradación del aceite dieléctrico de manera

progresiva, lo que trae como consecuencia a mediano plazo, el deterioro del equipo, por efecto de una sobrecarga.

- **Arco Eléctrico:** las mismas ocurren, cuando fallan las protecciones del transformador, lo que trae como consecuencia, cortocircuitos externos que dañan internamente el equipo, dejando esa parte de la red eléctrica fuera de servicio en forma imprevista.
- **Descargas Parciales**: son pequeñas descargas eléctricas que se producen en el seno de cavidades con gas presente en un medio aislante sólido o líquido. En los transformadores de distribución están asociadas a condiciones de sobretensión ocasionando daños en el aislamiento del equipo.

2.3.3.3.1 Relacionadas con Otras Causas de Fallas en Transformadores de Distribución.

Existen otras causas de fallas que se pueden presentar en los transformadores de distribución, para lo cual a continuación se presentan una serie de recomendaciones a fin de evitar la ocurrencia de las mismas[11]:

a) Especificaciones Técnicas: existen características nominales indicadas por los fabricantes, que deben corresponder a la carga requerida por la red de distribución eléctrica, dentro de las cuales es importante considerar lo siguiente:

- Nivel básico de aislamiento (BIL) del valor requerido.
- Impedancia de cortocircuito del valor nominal: si la misma es demasiado alta, afecta la regulación del sistema; y si es demasiado baja, da lugar a elevadas corrientes de corto circuito.
- El conmutador de derivaciones debe ser de accionamiento interno.
- Colocar herrajes adecuados.

b) Defectos de Fabricación: aunque hay formas de construcción preestablecidas, las mismas no están exentas de errores que pudieran presentarse, ocasionando fallas en los transformadores de distribución, por lo tanto, se recomienda tener en cuenta lo indicado a continuación, a fin de evitar estos defectos:

- No es recomendable trabajar a niveles de inducción demasiados altos, porque dan lugar, a la magnetostricción o deformación del núcleo y producen efectos vibratorios en la parte activa.
- Reducir las distancias internas a niveles críticos
- Seleccionar materiales que satisfagan las normas y/o valores exigidos para operar a determinados niveles de esfuerzos dieléctricos.
- Seleccionar láminas, pinturas, refuerzos, aisladores, herrajes, empaques de caucho, etc. que soporten condiciones del medio ambiente u otros esfuerzos internos, originados en el transformador.
- Evitar procesos de corte del núcleo inadecuados.
- Evitar proceso de "recocido" del núcleo a temperatura y tiempo diferente al recomendado por el fabricante.
- Revisar el ajuste de las bobinas, ya que si están mal ajustadas, al menor esfuerzo sufren corrimiento o malformación.
- Tener cuidado con el ensamble núcleo-bobinas, porque esto ocasiona defectos, al igual que la sujeción de la parte activa al tanque.
- Revisar el sellado final del tanque.
- No maltratar los materiales que se encuentran en proceso de fabricación.
- Se recomienda no utilizar material envejecido o en mal estado en la reparación y/o fabricación de transformadores de distribución.

c) Defectos de Operación: los errores humanos que se presentan en la maniobra de equipos son inevitables, a pesar de la preparación que reciben los operadores del sistema eléctrico. Se recomienda tener en cuenta lo indicado a continuación, a fin de minimizar la ocurrencia de estos efectos:

- Realizar adecuado sistema de selección y montaje.
- Implementar sistemas y programas de mantenimiento.
- Utilizar sistemas de movilización y almacenaje apropiados.
- Evaluar el sistema de protecciones existente, a fin de disminuir la condición de falla que pudiera presentarse de acuerdo a las siguientes causas:
  - Sobretensiones (directas: por rayos y/o de maniobra).
  - Sobrecargas.

- Fallas en la red (líneas a tierra, cortocircuitos en la red, desbalances de carga).

❖ Implementar rutinas de inspección que eviten el vandalismo hacia los transformadores de distribución.

2.3.3.3.2 Relacionadas con Efectos que ocasionan las Fallas en Transformadores de Distribución.

Utilizando las definiciones indicadas en el manual de CORPOELEC (CADAFE) [34], que fueron desarrolladas por el Ing. Raúl Cabrera actual Gerente General de la Empresa Transformadores del Centro (Valencia, Venezuela), de las causas y efectos que originan los diferentes tipos de fallas sobre el transformador y que sirven de referencia al personal que realiza labores de reparación y/o mantenimiento para apoyar los diagnósticos, a continuación se indican las mismas:

- **SOBRECARGA:** cuando un transformador falla debido a una sobrecarga se presentan los siguientes efectos:

✓ En la conexión de baja tensión hay salidas de cobre descoloridas.
✓ El papel aislante de la bobina y salidas es quebradizo.
✓ Aceite dieléctrico ennegrecido o quemado con gran formación de lodo.
✓ Paredes del tanque descoloridas.
✓ Formaleta con gran contenido de lodo.
✓ En caso de ser por mala conexión en las bobinas de baja tensión se podrá observar una dañada y otra en buen estado. En el gráfico 3 se muestra un transformador fallado bajo esa condición y en el gráfico 4, la apariencia del aceite dieléctrico:

Gráfico 3. Transformador fallado por Sobrecarga.
Fuente: M. Mago.

Gráfico 4. Apariencia del aceite dieléctrico de este transformador fallado.
Fuente: M .Mago.

- **<u>SOBRETENSIONES DE ORIGEN ATMOSFERICO</u>**: cuando un transformador falla debido a sobretensiones se pueden observar algunos de los siguientes daños:

✓ Cortocircuito entre las espiras pertenecientes a las dos primeras o dos últimas capas o más.

✓ A veces se observa también ennegrecimiento de uno de los aisladores de alta tensión.

✓ A menudo la bobina descarga la sobretensión sobre el núcleo, o sobre el tanque, pudiendo estar los mismos parcialmente fundidos.

✓ Evidencia de descarga entre los devanados de alta tensión y baja tensión.

En el gráfico 5 se muestra imagen de un equipo fallado por esta condición y en gráfico 6, la apariencia del aceite dieléctrico:

Gráfico 5. Transformador fallado por Sobretensión Atmosférica
Fuente: M .Mago.

Gráfico 6. Apariencia del aceite dieléctrico de este transformador fallado
Fuente: M .Mago.

- **CORTOCIRCUITO EXTERNO:** cuando ocurre un cortocircuito externo se observa que las bobinas presentan algunos devanados deformados o desplazados el uno con respecto al otro. En el gráfico 7 se muestra un equipo fallado por cortocircuito externo en alta tensión y en gráfico 8, la apariencia del aceite dieléctrico:

Gráfico 7. Transformador fallado por Cortocircuito Externo en alta tensión.
Fuente: M .Mago.

Gráfico 8. Apariencia del aceite dieléctrico de este transformador fallado.
Fuente: M .Mago.

- **<u>CONEXIÓN ERRADA EN BAJA TENSION:</u>** las bobinas se presentan con devanados deformados o desplazados el uno con respecto al otro y el transformador puede quedar en buen estado de funcionamiento.
- **<u>DEFECTO DE OPERACIÓN:</u>** cuando un transformador falla por defecto de operación se pueden observar los siguientes daños:

✓ Rotura del conmutador.
✓ Conexiones erradas en baja tensión.
✓ Aceite con buena apariencia.
✓ Puede encontrarse bien la parte activa del transformador.

En el gráfico 9 se muestra un transformador fallado por defecto de operación y en el grafico 10 la apariencia del aceite dieléctrico:

Gráfico 9. Transformador fallado por Defecto de Operación.
Fuente: M .Mago.

Gráfico 10. Apariencia del aceite dieléctrico de este transformador fallado.
Fuente: M .Mago.

- **<u>HUMEDAD:</u>** cuando un transformador falla por humedad se presentan los siguientes efectos:

✓ Presencia de agua en el fondo del tanque, en la parte superior de la estructura de soporte y apreciables manchas de óxido en las piezas metálicas.

✓ Puntos de oxidación en las partes que no se encuentran sumergidas en el aceite.

✓ Cortocircuito entre capas de la bobina en su parte superior.

En el gráfico 11 se muestra un transformador fallado bajo esta condición y en el gráfico 12, la apariencia del aceite dieléctrico:

Gráfico 11. Transformador fallado por Humedad
Fuente: M .Mago.

Gráfico 12. Apariencia del aceite dieléctrico de este transformador fallado
Fuente: M .Mago.

- **SATURACION MAGNETICA**: cuando un transformador falla debido saturación magnética se presentan los siguientes efectos:

✓ Aceite ennegrecido.
✓ Papel aislante quebradizo.
✓ Núcleo quemado.

- **DEFECTO DE FABRICACION:** cuando un transformador falla por defectos de fabricación se presentan los siguientes efectos:

✓ Cortocircuito en el devanado de alta tensión por efecto en el aislamiento.
✓ Aceite deteriorado o algo turbio, a veces se deteriora sin quemarse.
✓ Signos de recalentamiento.
✓ Señales de descarga eléctrica.
✓ Fusión de conductores.

En el gráfico 13 se muestra un transformador fallado bajo esta condición y en el gráfico 14, la apariencia del aceite dieléctrico:

Gráfico 13. Transformador fallado por Defecto de Fabricación.
Fuente: M .Mago.

Gráfico 14. Transformador fallado por Defecto de Fabricación.
Fuente: M .Mago.

2.3.3.4 Pérdidas Totales en el Núcleo de los Transformadores de Distribución.

En un transformador se producen las pérdidas por corrientes de Foucault *(P_F)*, pérdidas por histéresis *(P_H)* y en el cobre del bobinado (*Pcu*).

2.3.3.4.1<u>Pérdidas por Corrientes de Foucault:</u> se producen en cualquier material conductor cuando se encuentra sometido a una variación de flujo magnético. Se conocen también como pérdidas por corrientes parásitas y dependerán del material del que esté constituido el núcleo magnético. Para determinar las pérdidas en el hierro por las corrientes de Foucault se aplica la formula siguiente:

$$P_F = \frac{2{,}2.\ f^2\ .\beta max^2.\Delta^2}{10^{11}} \qquad (15)$$

Dónde:

P_F = perdidas por corriente de Foucault (W/kg).

f = frecuencia en Hz.

Bmáx = inducción máxima en Gauss.

Δ = espesor de la chapa en mm.

2.3.3.4.2<u>Pérdidas por Histéresis Magnética:</u> la histéresis magnética es el fenómeno que se produce cuando la imantación de los materiales ferromagnéticos no solo depende del valor del flujo sino también de los estados magnéticos anteriores. Las pérdidas por histéresis magnética dependen esencialmente del tipo de material, la inducción magnética

dependerá del tipo de chapa, esta se determina aplicando la fórmula de Steinmentz indicada a continuación:

$$P_H = K_h . f. {Bmax}^{n} \qquad (16)$$

Dónde:

P_h = perdidas por Histéresis Magnética (W/kg).

K_h = coeficiente de cada material.

f = frecuencia en Hz.

Bmáx = inducción máxima en Tesla.

N = 2 para β›1 Tesla y 1,6 para β‹1 Tesla

2.3.3.4.3<u>Pérdidas Totales:</u> las pérdidas de potencia en el hierro (P_{FE}) o en el núcleo magnético son la suma correspondiente a las pérdidas por Foucault (P_F) y por histéresis (P_h) como se indica a continuación:

$$\text{Pérdida Total en el Núcleo} = (P_F) + (P_h) \qquad (17)$$

2.3.4 Relacionadas con Modelos Estadísticos en los Transformadores de Distribución.

En el presente estudio se utilizarán métodos de aplicación de *Estadística Descriptiva* Mago, M; Monagas, E (2004), *"cálculos de la frecuencia, modas, medias, desviación estándar y varianza"* utilizando el software estadístico SPSS a la muestra de transformadores fallados.

También se va a realizar un *Análisis Estadístico de Datos* [44] de acuerdo a la siguiente clasificación:

- Análisis factorial: permite identificar con el menor número de factores posibles un conjunto de variables que pueden ser utilizados para representar la relación existente entre un conjunto de variables intercorrelacionadas. El análisis factorial consiste en construir escenarios o dimensiones hipotéticas agrupando variables originalmente correlacionadas. En la presente investigación este análisis se utiliza

para determinar la correlación entre las variables de acuerdo a lo indicado a continuación:

- ❖ Cuál es la relación entre la distribución de fallas y la empresa fabricante.
- ❖ Cuál es la relación entre la distribución de fallas y año de fabricación.
- ❖ Cuál es la relación entre las fallas y el ambiente o lugar geográfico donde se ubica el transformador.

- Análisis discriminante: es una técnica empleada cuando se desea investigar las diferencias entre grupos de individuos, en este sentido, permite determinar cuáles son las variables que mejor explican la pertenencia a un grupo. Los pasos que comprende al análisis discriminante consisten en formulación, estimación, determinación de la significancia e interpretación de los resultados. Para esto se identifica el objetivo del análisis, se identifica la variable criterio y las variables independientes. Esta investigación permitirá identificar por ejemplo:
  - ❖ Características diferenciadoras entre los tipos de fallas que presenten los transformadores de distribución y el mes de mayor ocurrencia.
  - ❖ Características diferenciadoras entre los tipos de fallas que presentan los transformadores de distribución y el fabricante del mismo.

Es necesario determinar la causa, magnitud y frecuencia de fallas que permita un *Estudio de Confiabilidad* Nava, J. (2006), "*es el paso más importante en la determinación de un programa de mantenimiento óptimo que depende del conocimiento del índice de fallas de un equipo en cualquier momento de su vida útil"*. Hay que tener presente de manera concreta y especifica el análisis estadístico que permite identificar el tiempo promedio entre fallas ó MTEF y la probabilidad de fallas.

2.3.5 Relacionadas con Programas de Análisis Transitorio (ATP/EMTP) en los tipos de fallas que presentan los Transformadores de Distribución.

El programa de análisis de transitorios ATP/EMTP es un programa de uso comercial utilizado para la simulación de sistemas eléctricos y de control en régimen transitorio. El programa se basa en la regla del trapecio para la solución de sistemas de ecuaciones diferenciales.

A continuación en el gráfico 15 se presenta una vista esquemática de los módulos de simulación y rutinas de soporte además de su interacción:

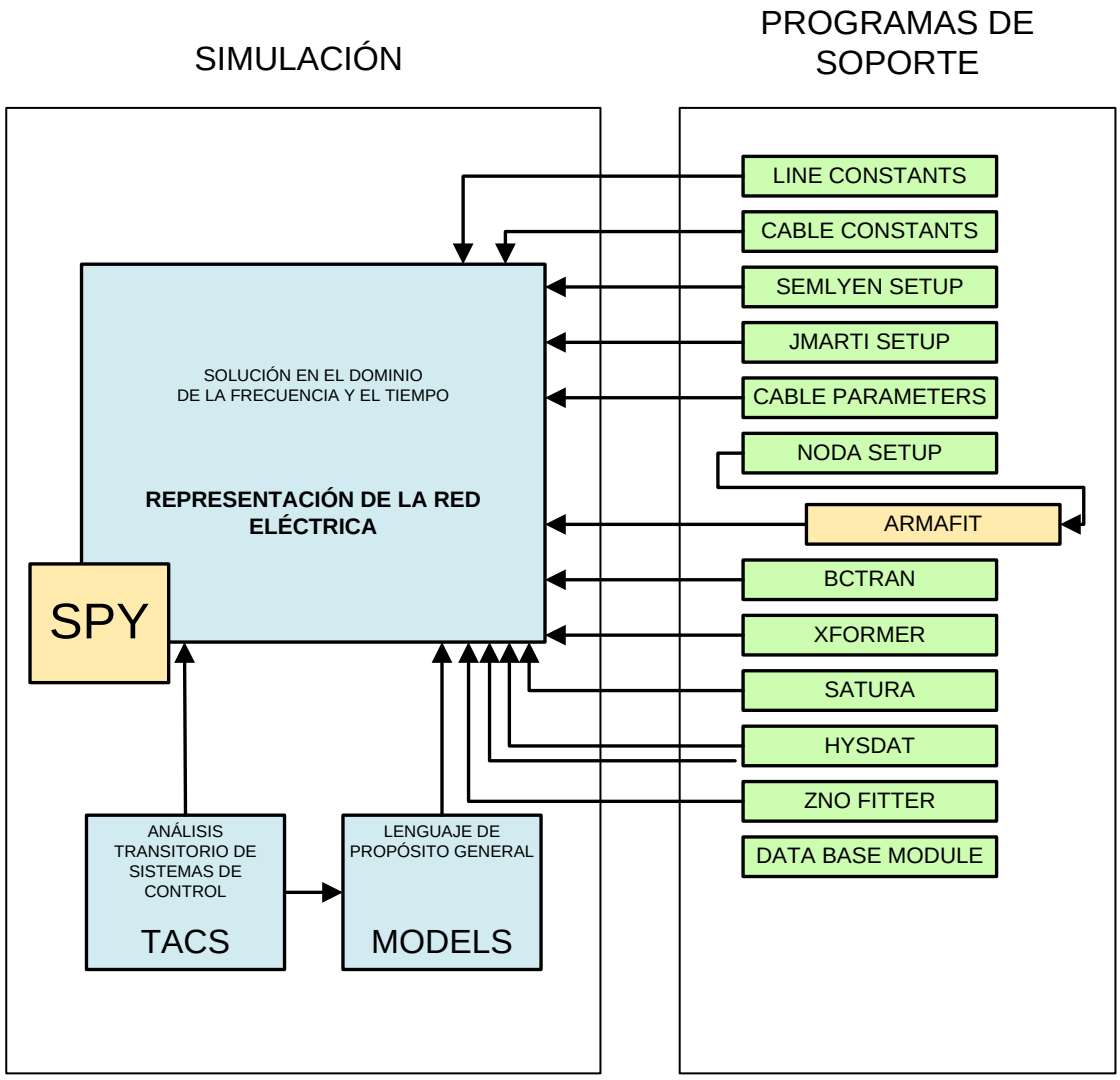


Gráfico 15. Vista Esquemática de los Módulos de Simulación y Rutinas de Soporte
Fuente: J. Castillo y J. Reyes.

2.3.5.1 Módulos integrados de simulación.

- **MODELS:** consiste en un lenguaje de descripción de propósito general que posee una serie de herramientas para la simulación de sistemas variables en el tiempo. Esta herramienta aplica dos pasos fundamentales; primero la creación del icono del modelo a crear, en esta parte se definen los parámetros de entrada, la posición de

cada uno de los nodos del componente y el icono del mismo. Por último, la creación del archivo en el cual a través de un lenguaje de programación, se define el comportamiento del componente.

- **TACS:** Para el caso de la simulación de sistemas de control o sistemas que pueden ser modelados con la teoría de control, se cuenta con la herramienta TACS, que posee componentes que ayudan a desarrollar los modelos a través de la representación de diagramas de bloques de sistemas de control. TACS es un módulo de simulación en el dominio del tiempo de sistemas de control, fue originalmente desarrollado para la simulación de sistemas de conversión HVDC.

La forma de interacción entre la red eléctrica y los TACS se establecen a través de voltajes en nodos, corriente en interruptores, estados en interruptores, resistencias variables en el tiempo y fuentes de voltaje y corriente.

2.3.5.2 Métodos de Solución Utilizados en el ATP-EMTP.

2.3.5.2.1 En el dominio del tiempo.

La red eléctrica es descrita en el ATP-EMTP usando ecuaciones de nodos, es decir, los voltajes de los nodos son las cantidades a ser determinadas. Las corrientes de malla son expresadas en función de los voltajes de los nodos.

La solución en el dominio del tiempo de cada elemento se realiza de forma discreta, esto quiere decir que en lugar de trabajar en base a un tiempo continuo, se trabajara en tiempo discreto utilizando un Δtmuy pequeño. Así que se parte de que se conocen todas las variables en un instante $\boldsymbol{t - \Delta t}$ y se quiere determinar dichos valores para un instante $\boldsymbol{t}$.Se asume $\boldsymbol{\Delta t}$ tan pequeño, que las ecuaciones diferenciales se aproximan a una diferencia de ecuaciones.

Así que para un sistema de n nodos, se produce un sistema de n ecuaciones como la que se muestra a continuación:

$$[G][v(t)] = [i(t)]\text{-}[I_{hist}] \qquad (18)$$

Dónde:

[G]: es la matriz nodal de conductacias de nxn.

[v(t)]: vector de voltajes de nodos de n elementos.

[i(t)]: vector de corrientes.

$[I_{hist}]$: vector de n términos conocidos.

El vector $[\boldsymbol{I_{hist}}]$ representa los términos que se conocen de la ecuación, que como se ha dicho, representa los valores conocidos $\boldsymbol{t - \Delta t}$ el cual tiene unidades de Ampere.

Es obvio, que en muchas redes se conozcan los voltajes de algunos nodos, esto debido a que en ellos se conectan fuentes de voltaje, o son nodos aterrados, así que resultan dos matrices de conductancias, una para los nodos A que son incógnitas, y otra para los nodos B, cuyos voltajes ya se conocen, por lo que (17) pasa a quedar de la siguiente forma:

$$[G_{AA}][v_A(t)] = [i_A(t)] - [I_{hist_A}] - [G_{AB}][v_B(t)] \qquad (19)$$

El sistema de ecuaciones lineales se resuelve para $[\boldsymbol{v_A(t)}]$ usando la información contenida en la matriz triangular de conductancias. Antes de pasar al siguiente instante de tiempo se cargan los términos correspondientes en el vector $[\boldsymbol{I_{hist_A}}][I_{hist_A}]$.

2.3.5.2.2 PlotXY del ATP/EMTP.

Es un programa de Win32 el cual se utiliza en el ATP para mostrar de forma gráfica los resultados de las simulaciones. Permite seleccionar una o varias graficas de forma simultánea, además múltiples herramientas que permiten personalizar la gráfica. Entre las herramientas más útiles se encuentra la capacidad que tiene de copiar la gráfica en el portapapeles del sistema operativo tal y como, se indica a continuación en los gráficos 16 y 17 respectivamente:

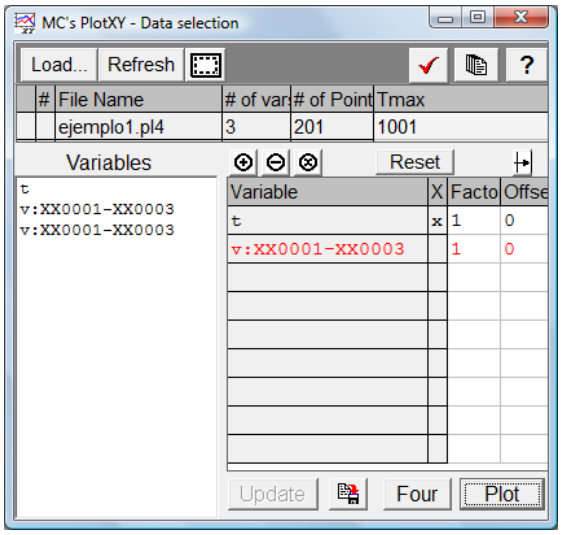


Gráfico 16. Ventana del PlotXY.
Fuente: J. Castillo y J. Reyes.

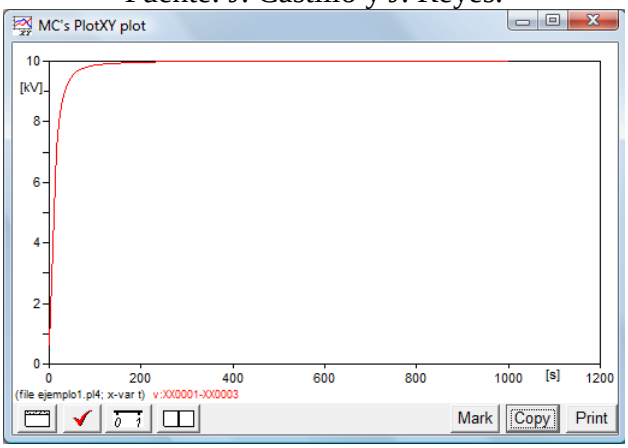


Gráfico 17. Ejemplo de una gráfica con el PlotXY
Fuente: J. Castillo y J. Reyes.

2.3.6 Variables Ambientales y su Influencia en la Operación del Transformador.

Las variables ambientales son de suma importancia para evaluar probabilidad de falla de acuerdo a la ubicación geográfica del transformador de distribución, que a pesar de estar diseñado bajo estándares de calidad acordes con las mismas, el incremento en la temperatura modifica su condición de operación, ya que el entorno físico de los elementos, están íntimamente ligados a las variables eléctricas que sirven de base para indicar el comportamiento o condiciones de funcionamiento. Existe una relación importante entre los cambios en la temperatura de operación y las condiciones ambientales, de hecho, una de las variables que resulta más afectada, es la rigidez dieléctrica del aceite, ya que al disminuir y

se ubicarse en valores por debajo del aceptado, puede producir múltiples averías debidas a descargas parciales o fallas en el aislamiento de los devanados [59].

Una baja rigidez dieléctrica hace que los altos niveles de campo eléctrico en el devanado produzcan pequeños arcos que pueden desgastar el aislamiento del cobre y por consiguiente, generar cortocircuitos. Para obtener teóricamente la temperatura del aceite del transformador, utilizaremos la ecuación:

$$\Delta\theta_{T0} = (\Delta\theta_{T0,u}\text{-}\Delta\theta_{T0,i})\left[1\text{-}e^{\left(-\frac{1}{\tau_{t0}}\right)}\right] + \Delta\theta_{T0,i} \qquad (20)$$

A continuación se indican algunas de las condiciones ambientales que serán tomadas en cuenta para el desarrollo de la presente investigación:

- **Temperatura promedio:** Consiste en el promedio de las temperaturas máximas y mínimas. Con las temperaturas medias mensuales (promedio de las temperaturas medias diarias a lo largo de un mes) se obtiene el grafico de las temperaturas de un lugar a lo largo de un determinado año, y con estos mismos datos referidos a una sucesión de muchos años (30 o más), de obtiene un promedio estadístico de la temperatura en dicho lugar.[15]
- **Brillo solar**: La duración del brillo solar o heliofanía en horas, representa el tiempo total durante el cual incide luz solar directa sobre alguna localidad, entre el alba y el atardecer. El total de horas de brillo solar de un lugar es uno de los factores que determinan el clima de esa localidad. La exposición prolongada al sol puede producir altas temperaturas en el tanque del transformador lo que generaría efectos que a largo plazo afecten sus condiciones de funcionamiento.[41]
- **Velocidad del viento:**El viento viene definido por dos parámetros esenciales que son, su dirección y su velocidad. La velocidad media del viento varía entre 3 y 7 m/seg., según diversas situaciones meteorológicas; es elevada en las costas, más de 6 m/seg., así como en algunos valles más o menos estrechos. En otras regiones es en general, de 3 a 4 m/seg., siendo bastante más elevada en las montañas. Para realizar la medida de las velocidades del viento se utilizan los anemómetros; existen muy diversos tipos de estos aparatos, que en un principio se pueden clasificar en anemómetros de rotación y anemómetros de presión.[42]

- **Precipitaciones:** es cualquier forma de hidrometeoro, conformado de partículas acuosas de forma sólida o líquida que caen de las nubes y llegan al suelo. Existen varios tipos de precipitación dependiendo de la cantidad o forma de las partículas, el diámetro se halla generalmente comprendido entre 0,5 y 7 mm, (1 mm de precipitación es la lámina que alcanzaría un litro de agua sobre una superficie de un metro cuadrado, sin que se evapore o percole), a una velocidad del orden de los 3 m/s.[43]

Para el uso de los transformadores monofásicos hay que tener en cuenta las condiciones ambientales a la que estarán expuestos los equipos, por ejemplo, altura, temperatura, humedad, brillo solar, velocidad de viento, entre otras variables. En las tablas Nº 1 y Nº 2 se indican normas técnicas, para la instalación de transformadores monofásicos tipo poste en base a las condiciones ambientales de la zona. En el caso de las normativas colombianas las mismas se presentan en la tabla Nº 1.

Tabla Nº 1. Condiciones ambientales para transformadores monofásicos según norma colombiana RA7-060

CONDICIONES AMBIENTALES SEGÚN LA NORMATIVA COLOMBIANA RA7-060	**CONDICIONES AMBIENTALES**	
	Altura sobre el nivel del mar	Entre 1000 y 3000 m
	Ambiente	Tropical
	Humedad relativa máxima	99%
	Temperatura ambiente máxima	40ºC
	Temperatura ambiente mínima	-2ºC
	Temperatura ambiente promedio	21ºC
	Velocidad de viento	< 34
	Radiación solar	< 1000 w/m^2
	Capa de hielo máxima	< 1 mm

Nota. Fuente: Norma RA7-070. Centro de Información de Redes y Energía, Colombia (2005)

En el caso de las normativas venezolanas para transformadores monofásicos estos se rigen según la norma COVENIN 2286:1999 titulada "*Transformadores de Tensión"* indicadas a continuación en la tabla Nº 2:

Tabla Nº 2. Condiciones ambientales para transformadores monofásicos según norma venezolana COVENIN 2286:1999

CONDICIONES AMBIENTALES SEGÚN NORMATIVA VENEZOLANA	**CONDICIONES AMBIENTALES**
Altura sobre el nivel del mar	1000 m
Ambiente	Tropical
Humedad relativa máxima	99%
Temperatura ambiente máxima	40ºC
Temperatura ambiente mínima	5ºC
Temperatura ambiente promedio	30ºC
Velocidad de viento	< 34

Nota. Fuente: Norma COVENIN 2286:1999. Transformadores de Tensión. Especificaciones Generales (1999)

2.3.7 Relacionadas con el Modelo de Regresión Lineal Múltiple.

De acuerdo a las condiciones ambientales indicadas anteriormente, hay que definir un modelo para el conjunto variables, lo cual permitirá seleccionar una o la combinación de varias de manera tal que, se exprese la siguiente relación:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \in \qquad (21)$$

Esta función de aproximación permite medir los cambios esperados de acuerdo a los resultados de los coeficientes de regresión parciales (β_1, β_2, …, etc.), más un término que representan un error aleatorio, utilizando el análisis de varianza para la prueba de significancia de la regresión simple, ya que solo tiene una variable independiente o regresor.[40,45].

Pueden emplearse varias técnicas para medir la adecuación del modelo de regresión, sin embargo, en la presente investigación se utiliza el coeficiente de determinación múltiple que está definido por:

$$R^2 = \frac{SS_R}{S_{yy}} = 1 - \frac{SS_E}{S_{yy}} \qquad (22)$$

Este coeficiente corresponde a una medida de la magnitud de la reducción en la variabilidad de *y* obtenida mediante el empleo de las variables de regresión que corresponden a las condiciones ambientales propuestas: temperatura promedio, brillo solar, precipitaciones y velocidad del viento, a fin de verificar la asociación lineal entre la condición de falla y las mismas.

En la construcción de modelos que contengan el *"mejor"* subconjunto o ecuación posible debe incorporarse el estadístico del $\bar{R}_P^{\,2}$ ***ajustado*** así como el ***sesgo*** más pequeño o cercano a *p* (esto es, $C_P \approx p$).

2.3.8 Relacionadas con Métodos no Convencionales realizados a la chapa de acero al silicio y a las bobinas de alta y baja tensión de las muestras de equipos fallados, entre los cuales se encuentran:

2.3.8.1 Análisis de Microestructura.

El análisis metalográfico, consiste en observar en el microscopio, probetas pulidas y atacadas químicamente con reactivos apropiados, permitiendo deducir la historia térmica del metal [18,53,59,61]. En el gráfico 18, se muestra la preparación de las probetas utilizadas en la presente investigación:

Grafico 18. Preparación de las probetas para las muestras de transformadores fallados.
Fuente: M. Mago.

2.3.8.2 Pruebas de Microscopia Electrónica de Barrido.

El microscopio electrónico de barrido (SEM) es un instrumento que permite la observación y caracterización superficial de materiales inorgánicos y orgánicos, entregando información morfológica del material analizado. A partir de él se producen distintos tipos de señal que se generan desde la muestra y se utilizan para examinar muchas de sus características. Con él se pueden realizar estudios de aspectos morfológicos de zonas microscópicas de los distintos materiales con los que trabajan los investigadores de la comunidad científica y las empresas privadas, además del procesamiento y análisis de las imágenes obtenidas. Las principales utilidades del SEM son la alta resolución (~100 Å), la gran profundidad de campo que le da apariencia tridimensional a las imágenes y la sencilla preparación de las muestras.

2.3.8.3 Pruebas de Difracción por Rayos X.

La difracción de rayos X (XRD) es una de las técnicas de caracterización más potentes y más comúnmente utilizadas para el análisis estructural de cristales. Sus características principales son consecuencia de ser una "sonda" electromagnética de la materia con una longitud de onda (λ~1.5Å) de magnitud muy parecida al espaciado interplanar de los sólidos (típicamente del orden de unos pocos A). Por ser los fotones partículas de masa en reposo nula y libre de carga, interactúan con la materia de una forma "suave", lo que produce que la XRD sea una técnica de caracterización no destructiva. Otra

ventaja importante es que no requiere ningún proceso específico de preparación de muestras para ser analizadas. [18]

2.3.8.4 Ensayo Aplicando Partículas Magnéticas.

Para evaluar los defectos en las chapas de acero al silicio que sean invisibles, continuos y críticos. Se magnetiza el material en estudio utilizando electrodos o puntas de contacto de tal forma, que las posibles grietas produzcan un escape de flujo magnético; al aplicar partículas con propiedades magnéticas, se produce acumulación en esas zonas, delatando la presencia de defectos. Es ideal que las líneas de flujo magnético crucen perpendicularmente las fisuras en forma perpendicular. En el gráfico 19, se muestra la imantación por electrodos de la chapa de acero al silicio al momento de aplicar corriente magnetizante:

Gráfico 19. Chapa de acero al momento de aplicar corriente magnetizante (habiendo aplicado previamente partículas magnéticas al material).
Fuente: M. Mago

2.3.8.5 Ensayo Aplicando Líquidos Penetrantes.

Se utiliza otro método para evaluar control de defectos limpiando la chapa de acero, aplicando líquido penetrante, luego, frotando de nuevo la superficie, y por último, colocando revelador que extrae el líquido de las grietas permitiendo inspeccionar posibles defectos. La efectividad del ensayo se basa en las características humectantes del líquido penetrante con respecto al material en estudio, es decir, en la capacidad de formar una película continua y de

penetrar en pequeñas cavidades. La*"mojabilidad"*es el índice de la capacidad del líquido para penetrar vasos capilares; el líquido penetra en las grietas por capilaridad, y después es extraído hacia el revelador también por capilaridad. El fenómeno de capilaridad es gobernado por la *Tensión superficial (Tgs)*: una molécula dentro del líquido se interrelaciona con las que la rodean por las fuerzas gravitacionales, eléctricas y químicas esto se conoce como *Cohesión (Tlg)* y cuando la molécula está completamente sumergida presenta sus fuerzas en total equilibrio y se muestra la *Adhesión (Tgl)* que origina en las superficies planas comportamientos como los indicados en la siguiente ecuación:

$$\boldsymbol{Tgs = Tlg + Tgl\ cos\theta.} \qquad (23)$$

El ángulo pequeño indica que el líquido "moja" el sólido [18], y es lo ideal para un buen comportamiento del penetrante. Se puede establecer en el material a evaluar, que la fuerza hacia arriba es:

$$\boldsymbol{F\alpha = Tcos2\theta\pi r} \qquad (24)$$

y la fuerza hacia abajo es;

$$\boldsymbol{F_{\beta} = \pi r^2 \rho g h} \qquad (25)$$

Es decir, que la altura es directamente proporcional a la tensión superficial y al coseno del ángulo de contacto, e inversamente proporcional, a la densidad del líquido y al radio del tubo capilar.

Lo anterior es fundamental en el material en estudio, dado que el acero magnético blando (chapa de acero al silicio) de 0.35 mm de espesor, debe ser revisado muy detalladamente, a fin de observar discontinuidades importantes que evidencien deterioro en el mismo y que indiquen fallas en su funcionamiento. En los gráficos 20 y 21 indicados a continuación, se muestran resultados de este procedimiento:

Gráfico 20. Chapas de acero de equipos fallados preparadas para realizar ensayo aplicando líquidos penetrantes.
Fuente: M. Mago

Gráfico 21. Chapas de acero de equipos fallados luego de aplicar liquido revelador.
Fuente: M. Mago

2.3.8.6 Pruebas Magnéticas con el Magnetómetro.

Estas se realizan para evaluar las propiedades magnéticas que poseen los materiales, de acuerdo a la siguiente clasificación:

- **Diamagnéticos:** cuando el flujo magnético obtenido es ligeramente menor que con núcleo de aire, su susceptibilidad magnética será por lo tanto negativa
- **Paramagnéticos:** cuando el flujo magnético obtenido es ligeramente superior que con núcleo de aire, su susceptibilidad magnética será por lo tanto negativa
- **Ferromagnéticos:** cuando el flujo magnético obtenido es muy superior que con núcleo de aire.
- **Histéresis Magnética:** cuando el material magnético ha realizado un ciclo completo de magnetización y desmagnetización, el resultado se muestra en el gráfico 22, comenzando con un material magnético neutral, recorriendo la curva *B*-

H que empieza en el punto *X*, mientras *H* se incrementa, la densidad de flujo *B* aumenta a lo largo de la línea combinada al punto de saturación *Bs*. Ahora, cuando *H* se decrementa y *B* es trazado, la curva *B-H* recorre la trayectoria de *Br* donde *H* es cero el núcleo aun esta magnetizado. El flujo aquí es llamado flujo remanente y tiene una densidad de flujo *Br*.

La fuerza de magnetización *H* se invierte en polaridad para dar un valor negativo. La fuerza de magnetización requerida para reducir el flujo *Br* es llamada fuerza coercitiva (*Hc*). Cuando el núcleo es forzado a saturación, la retentividad *Brs* es el flujo resultante después de la saturación, y la coercitividad (*Hcs*) es la fuerza requerida para restablecer a cero. A lo largo de la curva de magnetización original (*X*, la línea combinada de la gráfica 22) B aumenta de la no linealidad original con *H* hasta que el material se satura. En la práctica la magnetización de un núcleo en un transformador excitado nunca sigue esta curva, porque el núcleo nunca está totalmente desmagnetizado cuando la fuerza magnetizante es aplicada por primera vez.

La curva de histéresis representa la energía perdida en el núcleo. El mejor camino para visualizar la curva de histéresis es usar corriente directa, porque la intensidad de la fuerza de magnetización puede ser cambiada muy lentamente de manera que no sean generadas corrientes de Eddy en el material. Solo bajo esta condición está el área dentro de la curva cerrada *B-H* indicativa de pérdidas por histéresis. El área encerrada es una medida de pérdida de energía en el material del núcleo durante este ciclo. En aplicaciones de corriente alterna, este proceso se repite continuamente y la pérdida total de histéresis es dependiente de la frecuencia

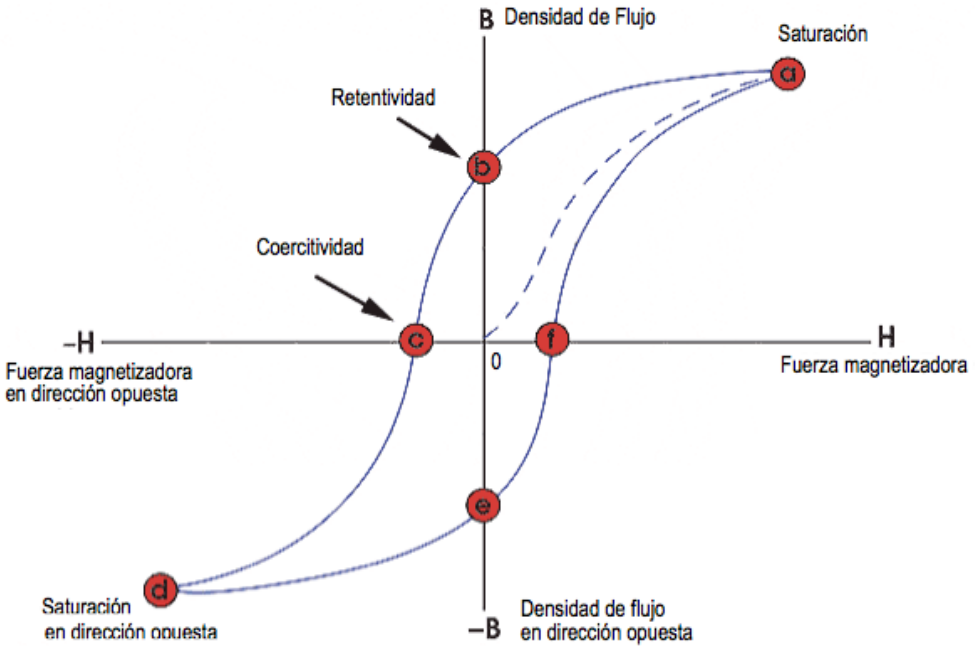


Gráfico 22. Curva de histéresis magnética.
Fuente: http://centrobioenergetica.squarespace.com/magnetismo/2012/4/15/curva-de-histeresis.html.

- **Pruebas o Características Magnéticas:** entre las principales pruebas tenemos las indicadas a continuación[32]:

  - Permeabilidad Magnética: es la capacidad de una sustancia o medio para atraer o hacer pasar a través de ella campos magnéticos, la cual está dada por la relación entre la inducción magnética existente y la intensidad de campo magnético que aparece en el interior de dicho material.

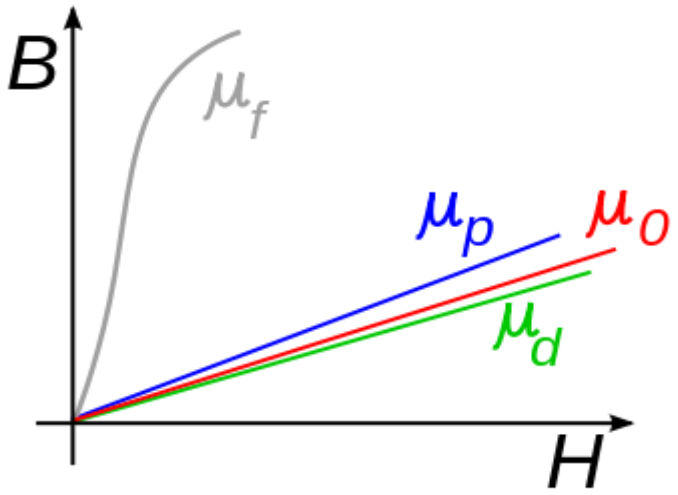


Gráfico 23. Relación entre densidad de campo magnético versus intensidad de flujo.
Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Permeabilidad_magnética.

- Inducción Remanente: es el nivel de inducción magnética aun existente en una sustancia ferromagnética después de someterla a la acción de un campo magnético. En el grafico 24 *Br* corresponde a esta condición.

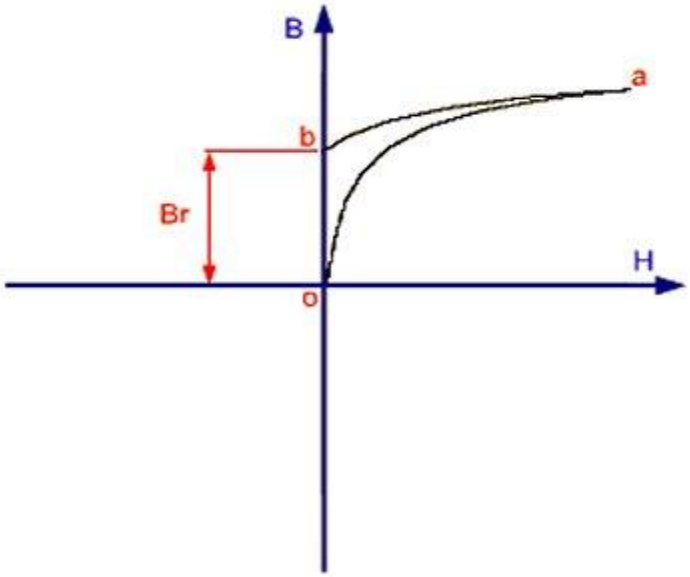


Gráfico 24. Densidad de flujo remanente *Br*.
Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Magnetismo_remanente.

- Saturación Magnética: es un efecto que se observa en algunos materiales magnéticos, y se caracteriza como el estado alcanzado cuando cualquier incremento posterior en un campo de magnetización externo *H* no provoca

un aumento en la *magnetización* del material. Esto demuestra que el *campo magnético* total *B* tiende a estabilizarse.

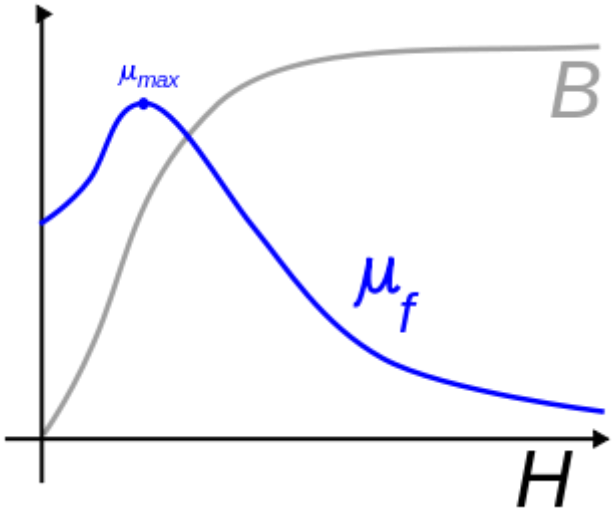


Gráfico 25. Efecto de la Saturación Magnética.
Fuente: http://es.m.wikipedia.org/wiki/Saturaciòn_magnètica

- Fuerza Coercitiva: es la fuerza de campo magnético que se necesita para desmagnetizar un material.

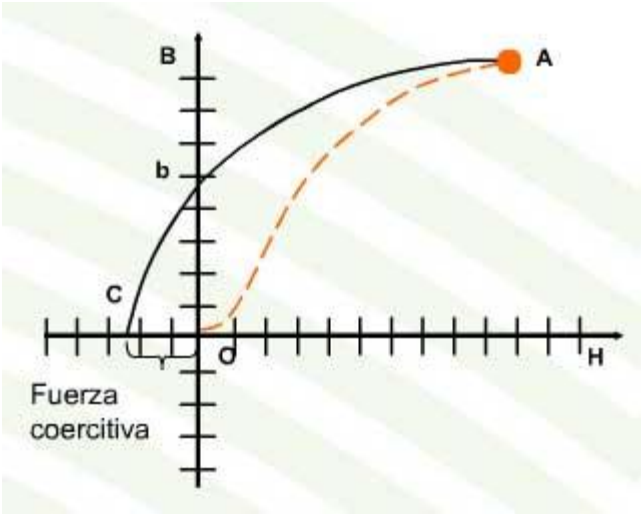


Gráfico 26. Fuerza Coercitiva.
Fuente: http://www.capacitacionypnd.com/art_det.php?id=22.

- Conductibilidad Térmica: o también conocida como conductividad térmica, es una propiedad física de los materiales que mide la capacidad de conducción de calor.

- Resistencia Eléctrica: es la mayor o menor oposición que tienen los electrones para desplazarse a través de un conductor.
- Densidad Eléctrica: es una magnitud vectorial que tiene unidades de *corriente eléctrica* por unidad de superficie, es decir, intensidad por unidad de área.

2.3.8.7 Pruebas de tensión al papel aislante.

Las propiedades mecánicas son aquellas que para su determinación y medida requieren de la aplicación de una fuerza exterior. El papel aislante utilizado en la fabricación de estos equipos, posee características técnicas bastante específicas, sin embargo, cuando es sometido a un proceso de falla por distintas causas es significativo evaluar el cambio en algunas de sus propiedades entre las cuales se encuentra la *"Resistencia a la tensión",* que consiste en una prueba de estiramiento del papel que sirve de muestra, cuya probeta ha sido preparada previamente según indica el Standard Test Method for Tensile Properties of Paper and Paperboard Using Constant-Rate-of-Elongation Apparatus (ASTM D-828) de las propiedades del papel aislante para transformadores, analizando cada uno de los fenómenos que se producen al ir incrementado la fuerza aplicada al cuerpo para alargarlo hasta producir su ruptura. En el gráfico 27 se muestra la curva característica utilizada para este ensayo:

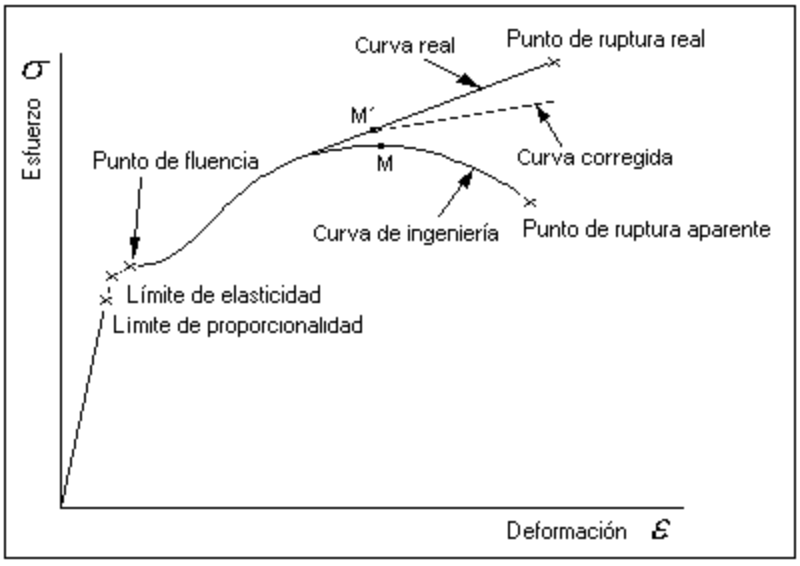


Gráfico 27. Determinación del punto de fluencia por el método del 0.2%
Fuente: http://blog.utp.edu.co/metalografia/2012/07/31/2-propiedades-mecanicas-de-los-materiales/

2.3.9 Relacionadas con Rigidez Dieléctrica a las muestras de equipos fallados.

El aceite dieléctrico en los transformadores de distribución realiza dos grandes funciones: primero, sirve como elemento aislante para soportar los altos voltajes que se generan internamente dentro del transformador. Segundo, tiene la función de servir de elemento trasmisor para disipar el calor generado por los bobinados y núcleo del transformador. De manera que, al mantener excelentes propiedades eléctricas puede soportar la degradación térmica y la oxidación [16,21].

La rigidez dieléctrica o también conocida como "*Tensión de Ruptura"* de acuerdo a la norma ASTM D877 consiste en medir el nivel máximo de la diferencia de voltaje alcanzada entre dos electrodos, que se encuentran sumergidos en aceite a una distancia predeterminada (una pulgada equivalente a 2.54 mm) hasta que se produce la chispa o descarga entre ellos. La tensión de ruptura del aceite utilizado para la prueba, es precisamente, el voltaje que indica el voltímetro al producirse la chispa[56,64].

2.3.10 Relacionadas con Simulaciones para Evaluar Condición de Falla en los Transformadores de Distribución.

2. 3. 10.1 Máquina de Soporte Vectorial.

Las máquinas de Vectores de Soporte (Support Vector Machine, por sus siglas en ingles SVM) o también conocidas como máquinas de soporte vectorial, son un sistema de aprendizaje que ha tenido un desarrollo muy significativo en los últimos años tanto en la generación de nuevos algoritmos como en las estrategias para su implementación [1]. SVM o MSVes un sistema basado en el uso de un espacio de hipótesis de funciones lineales en una región de mayor dimensión, inducido por un Kernel, en el cual las hipótesis son entrenadas por un algoritmo tomado de la teoría de optimización que utiliza elementos de la teoría de generalización. SVM es un sistema para entrenar máquinas de aprendizaje lineal

bastante eficiente, tanto que; para clasificación como para regresión, han encontrado muchas aplicaciones en el ordenamiento de imágenes, reconocimiento de caracteres, detección de proteínas, clasificación de patrones, identificación de funciones, entre otros.

2. 3.10.1.1 Espacios Inducidos por la Función Kernel

Debido a las limitaciones computacionales de las máquinas de aprendizaje lineal estas no pueden ser utilizadas en la mayoría de las aplicaciones del mundo real. La representación por medio del Kernel ofrece una solución alternativa a este problema, proyectando la información a un espacio de características de mayor dimensión el cual aumenta la capacidad computacional de las máquinas de aprendizaje lineal. La forma más común consiste en que las máquinas de aprendizaje lineales aprenden una función objetivo cambiando la representación de la función, esto es similar a mapear el espacio de entradas X a un nuevo espacio de características $F = \{\varphi(x) | x \in X\}$. Esto es:

$$x = \{\chi_1, \chi_2 \cdots, \chi_n\} \rightarrow \varphi(x) = \{\varphi(x)_1, \varphi(x)_2, \cdots \varphi(x)_n\} \quad (26)$$

Las cantidades introducidas para describir la información original o atributos son conocidas como características, mientras que a la selección de la mejor representación se le conoce como selección de características.

El gráfico 28 muestra un espacio de entradas de dos dimensiones a un espacio de características de dos dimensiones, donde la información no puede ser separada por una máquina lineal en el espacio de entradas mientras que en el espacio de características, esto resulta muy sencillo.

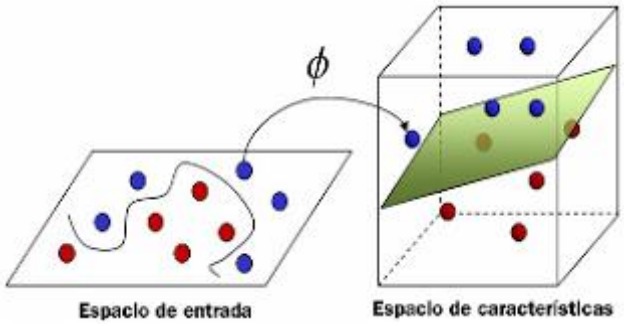


Gráfico 28. Espacio de entradas a un espacio de características de mayor dimensión.

Fuente: http://compuinteligencia.blogspot.com/2009/06/maquinas-de-soporte-vectorial.html.

Las máquinas de aprendizaje lineales son funciones reales $f : X \in R_n \rightarrow Y \in R$ la función f se considera como una función lineal de $x \in X$, tal que se pude escribir como

$$f(x) = \langle w \bullet x \rangle + b$$

$$= w x^T + b$$

$$= \sum_{i=1}^{n} w_i x_i + b$$

Donde w es el vector de pesos y b es el bias, términos tomados de la literatura de redes neuronales. Este tipo de máquinas admiten una representación dual, esto es si definimos a

$$w = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i y_i x_i$$

Por tano tenemos que la función lineal se puede escribir en su forma dual esto es:

$$f(x) = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i y_i \langle x_i \bullet x_i \rangle + b$$

Donde $\langle \bullet \rangle$ es el producto interno. Una propiedad importante de la representación dual es que la información de entrenamiento entra a la función a través de las entradas de la matriz de Gram $G = \langle x_i \bullet x_i \rangle$ a fin de aprender relaciones no lineales con máquinas lineales es necesario seleccionar un conjunto de características no lineales con las cuales poder rescribir la información original en una nueva representación. De ahí que el conjunto de hipótesis que se consideran son del tipo:

$$f(x) = \sum_{i=1}^{n} w_i \phi_i(x) + b$$

Donde $\phi : X \rightarrow F$

Es un mapeo no lineal que va del espacio de entradas a algún espacio de características. Debido a que las máquinas de aprendizaje lineal admiten una representación dual podemos escribir la hipótesis como una combinación lineal de la información de entrada (x_i, y_i) de la siguiente manera:

$$f(x) = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i y_i \left\langle \phi_i^T \bullet \phi_i(x) \right\rangle + b$$

Esto es si podemos calcular el producto interno en el espacio de características como una función de las entradas, estaremos realizando un mapeo del espacio de entradas a el espacio de características donde se realizara el aprendizaje con una máquina lineal. Un Kernel K es una función, tal que para todo x, z ∈ X

$$K(x,z) = \left\langle \phi(x) \bullet \phi(z) \right\rangle = \sum_{i=1}^{l} \phi_i^T(x) \phi_i(z)$$

Donde φ es un mapeo del espacio de entradas X al espacio de características $\hat{Y}$

El uso de la función Kernel hace posible realizar el mapeo de la información de entrada (x,z) al espacio de características $(\phi(x), \phi_i(z))$ (φ (x), de forma implícita y entrenar a la máquina lineal en dicho espacio. La única información necesaria para el entrenamiento es la matriz de Gram, dicha matriz también es conocida como la matriz Kernel la cual se denota con la letra K:

$$K(x,z) = \left\langle \phi(x)_i \bullet \phi(z)_j \right\rangle_{i,j=1}^{l}$$

Una vez que se define a la matriz K, la hipótesis se puede calcular evaluando al menos *l* veces la matriz K de la siguiente manera:

$$f(x) = \sum_{i=1}^{l} \alpha_i y_i K(x_i, x) + b$$

Algunas de las propiedades que debe cumplir la función Kernel para definir un espacio de características son las siguientes:

1. Simétrica

$$K(x,z) = \left\langle \phi(x) \bullet \phi(z) \right\rangle = \left\langle \phi(x) \bullet \phi(z) \right\rangle = \sum_{i=1}^{l} \phi_i(x) \phi_i(z) = K(z,x) \tag{27}$$

2. Desigualdad de Cauchy- Schwarz

$$K(x,z)^2 = \left\langle \phi(x) \bullet \phi(z) \right\rangle^2 \leq \left\| \phi(x) \right\|^2 \left\| \phi(z) \right\|^2 = \left\langle \phi(x) \bullet \phi(x) \right\rangle \left\langle \phi(z) \bullet \phi(z) \right\rangle \tag{28}$$

$$= K(x,x) K(z,z)$$

2.3.11 Simulación de Montecarlo.

Está basada en la generación de números aleatorios y el procedimiento es simular el comportamiento aleatorio del sistema para obtener en forma artificial los índices de confiabilidad de los puntos de carga o caracterización física. El tipo de simulación utilizado es secuencial, dado que los tiempos de salida y restauración generados se van acumulando para obtener el tiempo total de operación del circuito primario bajo estudio.

La simulación es un proceso iterativo en el cual se observa para un periodo de tiempo de interés, los estados operativos que aparecen en el circuito primario debido a los eventos aleatorios de salida y restauración de los componentes. En cada estado operativo se determinan los puntos de carga afectados por la salida de un componente dado. Una vez se termina la simulación, se contabiliza para cada punto de carga el número de salidas que lo afectaron y el tiempo de indisponibilidad. Con estos dos índices básicos se calculan los demás índices de confiabilidad. Para aplicar este método se requiere conocer las distribuciones de probabilidad que modelan los tiempos para salida y restauración de cada uno de los componentes. La simulación se implementa como un software que utiliza la base de datos del sistema, donde se ha registrado para cada circuito primario: componentes con sus distribuciones de probabilidad, puntos de carga, número de usuarios por punto de carga y demanda total por punto de carga. Un asunto clave en construcción de la base de datos del sistema es el método de codificación de los componentes de cada circuito primario, de tal forma que permita conocer cuáles puntos de carga son afectados por la salida de cualquiera de los componentes. Este es el método de análisis más versátil dado que:

• Permite utilizar cualquier distribución para modelar los tiempos para salida y restauración de los componentes.

• Permite resolver sistemas en los cuales no existe una solución analítica. Por ejemplo, sistemas donde alguno de los componentes tiene modelado el tiempo para salida o restauración por medio de la distribución Gausiana.

• Permite obtener las distribuciones de probabilidad de los índices de confiabilidad de los puntos de carga, lo cual es muy útil para valorar el riesgo de que ocurran diferentes valores de los índices.

• Los cambios en el sistema se realizan en la base de datos sin que sea necesario realizar cambios en el software.

Como inconveniente, este método requiere un alto tiempo computacional. Esto, en parte se debe a la gran cantidad de componentes y puntos de carga que por lo general existen en los circuitos primarios de distribución por lo cual el software debe procesar una gran cantidad de información [66]

2.3.12 Modelos de Control en Espacios de Estado.

En ingeniería de control, una representación de espacios de estados es un modelo matemático de un sistema físico descrito mediante un conjunto de entradas, salidas y variables de estado relacionadas por ecuaciones diferenciales de primer orden que se combinan en una ecuación diferencial matricial de primer orden. Para prescindir del número de entradas, salidas y estados, las variables son expresadas como vectores y las ecuaciones algebraicas se escriben en forma matricial (esto último sólo puede hacerse cuando el sistema dinámico es lineal e invariante en el tiempo). La representación de espacios de estado (también conocida como aproximación en el dominio del tiempo) provee un modo compacto y conveniente de modelar y analizar sistemas con múltiples entradas y salidas. Con entradas y salidas, tendríamos que escribir varias veces la transformada de Laplace para procesar toda la información del sistema. A diferencia de la aproximación en el dominio de la frecuencia, el uso de la representación de espacios de estado no está limitado a sistemas con componentes lineales ni con condiciones iniciales iguales a cero. El espacio de estado se refiere al espacio de dimensiones cuyos ejes coordenados están formados por variables de estados. El estado del sistema puede ser representado como un vector dentro de ese espacio.

Las variables de estado son el subconjunto más pequeño de variables de un sistema que pueden representar su estado dinámico completo en un determinado instante. Estas variables de estado deben ser linealmente independientes; una variable de estado no puede ser una combinación lineal de otras variables de estado. El número mínimo de variables de estado necesarias para representar un sistema dado, n, es normalmente igual al orden de la ecuación diferencial que define al sistema. Si el sistema es representado en forma de

función de transferencia, el número mínimo de variables de estado es igual al orden del denominador de la función transferencia después de haber sido reducido a una fracción propia. Cabe destacar que al convertir una representación de espacio de estado a la forma de función de transferencia puede perderse información interna sobre el sistema, pudiendo por ejemplo describir un sistema como estable aun cuando la representación de espacio de estado indica que es inestable en ciertos puntos. En circuitos eléctricos, el número de variables de estado es a menudo, pero no siempre, igual al número de elementos almacenadores de energía, como bobinas y condensadores. [51].

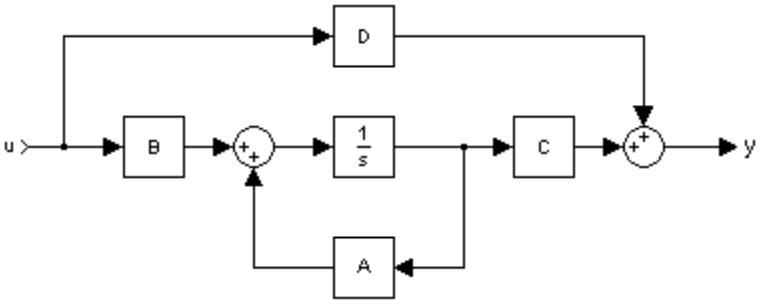


Gráfico 29. Modelo de espacio de estado típico.
http://es.wikipedia.org/wiki/Espacio_de_estados.

2.3.12.1Espacios de Estado: Entradas, Estados, Observabilidad y Controlabilidad.

La teoría de control moderna se basa en la representación matemática de los sistemas dinámicos por medio del concepto de estado, en contraposición con la teoría clásica de control, que utiliza únicamente la relación entre las entradas y salidas. Sepuede mostrar la relación existente entre variables de estado y entradas del sistema de acuerdo a la siguiente expresión matemática:

$$x(t) = \psi(t, to, x(to), u(\tau)) \qquad (29)$$

- **Controlabilidad:**esta condición de estados implica que es posible, mediante entradas admisibles, dirigir los mismos desde cualquier valor inicial a cualquier valor final dentro de un intervalo de tiempo.

- **Observabilidad:** es la medida de cuán correctamente los estados internos de un sistema pueden ser inferidos conociendo las salidas externas. La observabilidad y la controlabilidad son matemáticamente duales.

III. Metodología

3.1 Recorrido Metodológico.

3.2 Pruebas Experimentales.

3.3 Cálculo de Pérdidas.

3.3.1 Pérdidas por Corrientes de Foucault.

3.3.2 Pérdidas por Histéresis Magnética.

3.3.3 Pérdidas Totales.

3.4 Desarrollo de la Metodología.

III. METODOLOGIA.

En el presente capítulo, se describen los procedimientos lógicos, operacionales y técnicos que se llevaron a cabo con la finalidad de manera de poner de manifiesto los supuestos implícitos que se plantearon al inicio de la misma, realizando el recorrido metodológico, luego, se indican pruebas experimentales realizadas a las muestras de equipos fallados obteniendo las pérdidas totales a través del porcentaje de carbono de la aleación y pruebas magnéticas aplicando métodos numéricos. Después, en la última parte, se realiza el desarrollo de la metodología aplicada a la falla de mayor incidencia.

3.1 Recorrido Metodológico

Paradigma

↓

Cualitativo – Cuantitativo: fueron evaluadas condiciones de los materiales de fabricación a través de la inspección visual de las características que presentó el equipo luego de ocurrir la falla (condición cualitativa), posteriormente, algunos de los materiales de fabricación se analizaron aplicando pruebas experimentales (condición cuantitativa).

↓

Tipo de Investigación

↓

Aplicada de Campo: Fueron recolectadas muestras de equipos fallados en algunas regiones de Colombia, lo que hace que sea un trabajo de campo para el candidato (a) a Doctor.

↓

Tipo de Estudio

↓

Causal Comparativo: Existen otros métodos de diagnóstico utilizados por excelencia para verificar condiciones anormales en el funcionamiento de estos equipos entre los cuales se encuentran la cromatografía de gases y/o el análisis físico-químico del aceite dieléctrico que permiten comparar con los métodos no convencionales propuestos, por ejemplo; análisis de la microestructura de la chapa de acero, pruebas de tensión al papel aislante, entre otros.

Método

Cuantitativo: Hay aplicación de métodos cualitativos porque los resultados de las pruebas físicas de los materiales se verifican a través de analizadores observando condiciones diferentes de acuerdo al tipo de falla: presencia de óxidos (inclusiones) y cambio en el tamaño de cristal (grano).

Diseño

Experimental: Se realizan distintas pruebas experimentales simulando estos resultados, obteniendo ecuaciones estocásticas cuyo modelo sirve para la predicción de fallas en los transformadores de distribución.

3.1.1 Diseño de la investigación

Se diseñaron experimentos en laboratorio (Experimentos puros): Según Rodríguez (2003) en este tipo *el investigador tiene control absoluto sobre las variables independientes* (p: 166). Posee grupos de control que tienen perfiles de entrada similares que, en esta investigación, son los equipos fallados, que presentan características específicas, lo que facilita el análisis de los mismos.

3.1.2 Universo, Población y Muestra

Universo: Para definirlo el investigador hace la pregunta clave ¿A quién compete el estudio?, según Rodríguez y Pineda (2007), para lo cual se define la población y muestra de esta investigación.

Población: La población está conformada por los restos de equipos fallados suministrados por la empresa colombiana FYR Ingenieros C.A, que se encarga de repararlos o fabricarlos.

La población total (ver Tabla Nº 3) cuarenta y siete (47) transformadores, de los cuales fueron seleccionados (Ver Tabla Nº 4) dieciséis (16) de acuerdo al tipo de falla por una parte, y por la otra, por cuestiones de costos para algunas pruebas experimentales, además de uno (01) que sirve de referencia para la muestra patrón.

Tabla Nº 3. Población del Estudio: regiones de procedencia de las muestras

DEPARTAMENTO DE PROCEDENCIA DEL TRANSFORMADOR	**CANTIDAD**
Caldas	13
Antioquia	09
Pacifico	09
Cundinamarca	01
Bogotá	15
TOTAL	**47**

Nota. Fuente: M. Mago (2011)

Tabla Nº 4. Población del Estudio: selección definitiva

DEPARTAMENTO DE PROCEDENCIA DEL TRANSFORMADOR	**TIPO DE FALLA**	**CANTIDAD**
Antioquia	Térmica	01
	Arco eléctrico	02
	Descarga parcial	01
Pacifico	Térmica	01
	Arco eléctrico	01
	Descarga parcial	01
Cundinamarca	Térmica	01
Bogotá	Térmica	01
	Arco eléctrico	03
	Descarga parcial	01
Caldas Térmica	Térmica	01
	Arco eléctrico	01
	Descarga parcial	01
TOTAL		**16**

Nota. Fuente: M. Mago (2011)

Muestra: La muestra seleccionada para este estudio es *No Probabilística* según Hernández Sampieri, R, (1991 citado en Rodríguez 2007) se les llama *Muestras Dirigidas.* Aunque con la muestra no probabilística no se puede hacer inferencia estadística sobre la población se selecciona en el estudio por las razones siguientes: a) recoge controladamente la

información de los restos de equipos utilizados en para la propuesta b) razones prácticas de aplicación en el tipo de investigación y de recursos y c) por ser un estudio experimental aplicado con data especifica. En la tesis doctoral se utiliza la *Muestra de expertos*, ya que la misma indica *"la opinión de expertos en un tema"*. En la Tabla Nº 5, indicada a continuación, se aprecia el tipo de muestra y la cantidad de la misma, a los fines del cumplimiento de la presente investigación.

Tabla Nº 5. Muestra de Expertos

DESCRIPCION	**CANTIDAD**
Gerente General FYR Ingenieros	01
Gerente General Transformadores del Centro	01
Ingenieros empresa FYR	04
Ingeniero empresa Pública de Medellín	01
Ingeniero empresa Corporación Hidroeléctrica de Caldas	01
Ingeniero empresa Andina Transformadores	01
Laboratorio de Metalografía	01
Laboratorio de Tratamientos Térmicos	01
Laboratorio de Deformación Plástica	01
Laboratorio de Física del Plasma	02
Laboratorio de Materiales Nanoestructurados y Funcionales	01
Laboratorio de Ingeniería Química	02
Laboratorio de Alta tensión de la Universidad Nacional de Colombia	02
Laboratorio de Ensayos no Destructivos	01
Especialistas en Estadística	01
Especialistas del área de Metalurgia	01
Especialista en programación	01
TOTAL	**23**

Nota. Fuente: M. Mago (2011)

3.1.3 Procedimientos o Fases Metodológicas.

Fase I. Determinación de las condiciones de funcionamiento de los transformadores de distribución de acuerdo al medio ambiente donde se desempeñen, analizando los factores que influyen en los daños que estos presentan, aplicando programas de análisis transitorio.

- Fases I.1 Se realizó el estudio estadístico en empresas del sector eléctrico de Venezuela y Colombia, a fin de identificar los tipos, causas y consecuencias de

fallas en los transformadores de distribución utilizando el programa SPSS bajo ambiente Windows.

- Fase I.2 Se realizó la simulación con el programa de análisis transitorio (ATP/EMTP) del tipo de falla de mayor ocurrencia presentada en las áreas servidas de las empresas del sector eléctrico, cuya muestra sirvió de referencia en la presente investigación.

Fase II. Identificación de los modos de falla por condiciones ambientales, determinando causas reales que originan los mismos, aplicando métodos no convencionales a los materiales de fabricación a fin de caracterizar condiciones físicas que estos presenten.

- Fase II.1 Se realizaron ensayos experimentales a la chapa de acero al silicio de las muestras de equipos fallados aplicando los métodos no convencionales indicados a continuación:
  - Análisis de microestructura.
  - Análisis de dureza.
  - Pruebas de microscopia electrónica de barrido en ambiente.
  - Pruebas de difracción por rayos X.
  - Ensayos por partículas magnéticas.
  - Ensayos de líquidos penetrantes.
  - Pruebas magnéticas con el magnetómetro.
- Fase II.2 Se realizaron ensayos experimentales al papel aislante de las muestras de equipos fallados aplicando los métodos no convencionales indicados a continuación:
  - Pruebas de tensión.
- Fase II.3 Se realizaron análisis de rigidez dieléctrica a las muestras de equipos fallados.
- Fase II.4 Fue utilizada la máquina de soporte vectorial para caracterizar condiciones de la chapa de acero al silicio de los transformadores fallados.

- Fase II.5 Se realizó la simulación de Montecarlo para determinar la relación entre las pérdidas totales del núcleo y el tamaño de cristal (grano), de las muestras de equipos fallados de acuerdo al tipo de falla presentado por las mismas.

Fase III. Modelación de las causas reales que originan los modos de falla por condiciones ambientales en los transformadores de distribución.

- Fase III.1 Se diseñó un modelo de control en espacios de estado utilizando el programa matlab® simulik, permitiendo caracterizar a los materiales de fabricación, versus falla de mayor incidencia y condiciones ambientales.

Fase IV. Diseño de un sistema estocástico unificado prediciendo de manera confiable las fallas producto de la acción ambiental en los transformadores de distribución, determinando la vida útil de los mismos.

- Fase IV.1 Realización de ecuaciones diferenciales estocásticas de primer orden, así como principios generales de estimación y densidad espectral, construyendo el modelo de simulación del transformador de distribución aplicando matlab®.
- Fase IV. 2 Comparación del modelo obtenido del sistema estocástico unificado, con el de control en espacios de estado, prediciendo la probabilidad de ocurrencia de fallas en los transformadores de distribución.
- Fase IV. 3 Determinación de la confiabilidad de la muestra de equipos fallados, con la finalidad de mejorar las políticas de mantenimiento preventivo y predictivo, en las empresas de los sectores eléctricos de Venezuela y Colombia.

3.2 Pruebas Experimentales de la Tesis Doctoral.

3.2.1 El estudio estadístico en empresas del sector eléctrico de Venezuela y Colombia respectivamente, comprende la identificación, tipos, causas y consecuencias de fallas en los transformadores de distribución utilizando el programa SPSS bajo ambiente Windows[37] de acuerdo a lo siguiente:

CASO VENEZUELA.

Los renglones de información son: 1) Fecha de ocurrencia de falla, 2) Capacidad, 3) Municipio y 4) Alimentador. La data utilizada fue suministrada por la Empresa CORPOELEC (antigua ELEVAL). En el histograma de frecuencias del gráfico 30 se

observa una mayor tendencia en los meses de Marzo y Mayo respectivamente, donde el mes de mayor ocurrencia de fallas correspondió a Marzo del 2010 con 24,3% seguido de Mayo con 23,4%.

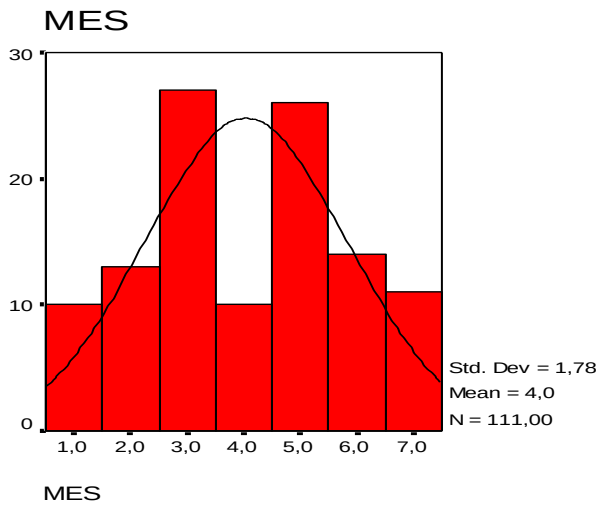


Gráfico 30. Histograma de frecuencias de meses del año con transformadores fallados.
Fuente: M. Mago.

En el histograma de frecuencias del gráfico 31 indica que la capacidad de mayor ocurrencia de fallas correspondió a los transformadores de 25 kVA con 27%, seguida de los de 50 kVA con 26,1%.

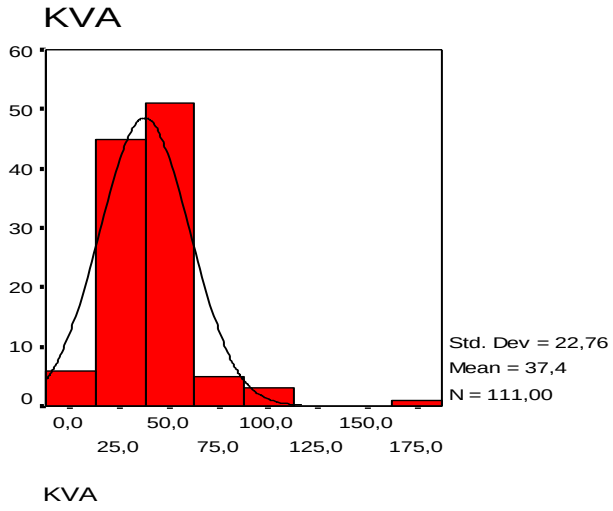


Gráfico 31. Histograma de frecuencias de capacidad de transformadores fallados.
Fuente: M. Mago.

En el histograma de frecuencia del gráfico 32 indica que el municipio donde están ubicados los transformadores con mayor ocurrencia de fallas correspondió a Valencia con 54,1% seguido de San Diego con 11,7%.

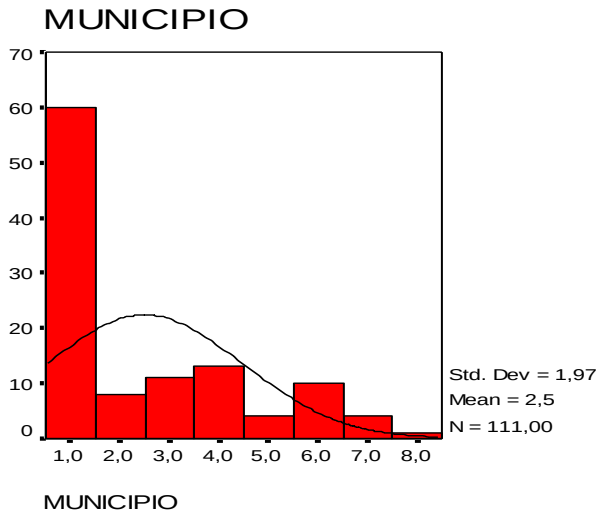


Gráfico 32. Histograma de frecuencias de los municipios de ubicación de los transformadores fallados. Fuente: M. Mago.

En el histograma de frecuencia del gráfico 33 se observa que el alimentador con mayor ocurrencia de fallas correspondió a Cardenera I con 8,1% seguido de Cardenera II con 6,3%.

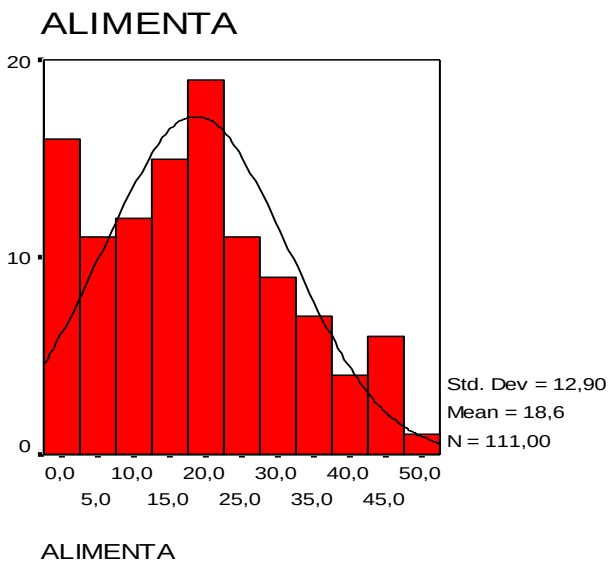


Gráfico 33. Histograma de frecuencias del circuito alimentador de los transformadores fallados. Fuente: M. Mago.

CASO COLOMBIA.

Los renglones de información son: 1) Mes o fecha en que ocurrió la falla, 2) Marca del transformador, 3) Capacidad del transformador fallado, 4) Año de fabricación y 5) Falla presentada. La data utilizada fue suministrada por la Empresa colombiana FYR Ingenieros. En el histograma de frecuencia del gráfico 34 se observa mes de mayor ocurrencia de fallas correspondió a Mayo del 2010 con 35,7% y otras tendencias bastante similares en los meses de Abril y Agosto.

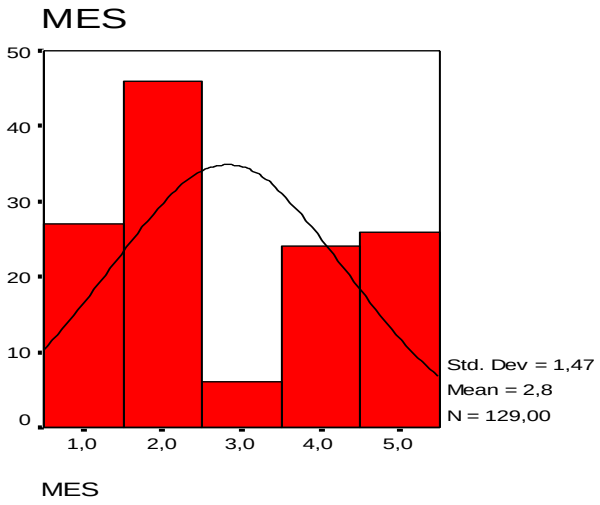


Gráfico 34. Histograma de frecuencias de meses del año con transformadores fallados.
Fuente: M. Mago.

Del histograma de frecuencias del gráfico 35 se observa que la marca de mayor ocurrencia de fallas correspondió a RYMEL con 69%, seguida de Magnetron con 20,9%.

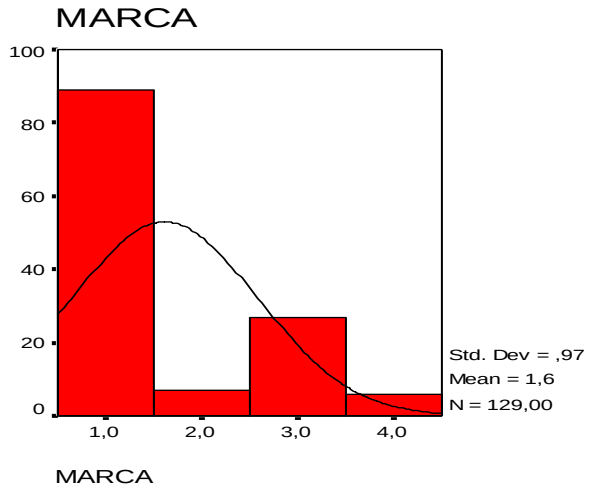


Gráfico 35. Histograma de frecuencias de marcas de transformadores fallados.
Fuente: M. Mago.

Del histograma de frecuencias del gráfico 36 se observa que la capacidad de mayor ocurrencia de fallas correspondió a los transformadores de 5 kVA con 49,6%, seguida de los de 10 kVA con 26,4%.

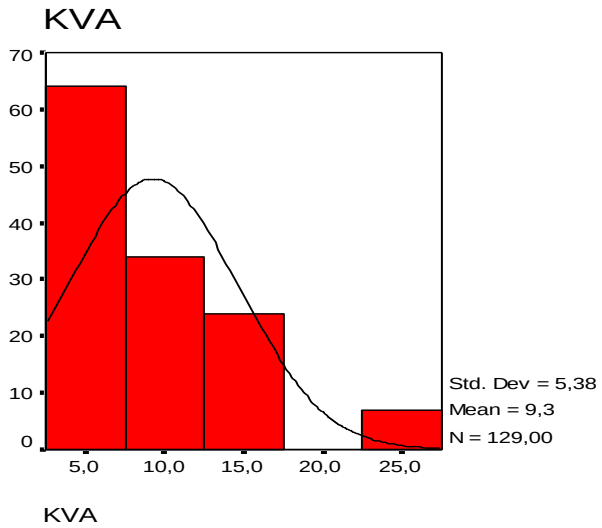


Gráfico 36. Histograma de frecuencias de capacidad de transformadores fallados.
Fuente: M. Mago.

Del histograma de frecuencias del gráfico 37 se observa que la mayor tendencia es hacia la falla debida a cortocircuito externo con 72,1%.

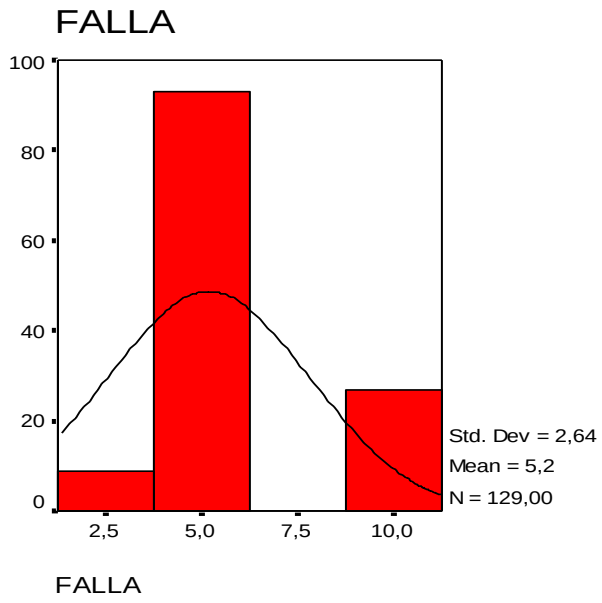


Gráfico 37. Histograma de frecuencias de fallas de transformadores.
Fuente: M. Mago.

Del histograma de frecuencias del gráfico 38 se observa que el año de fabricación de mayor ocurrencia correspondió al 2007 con 36,4%, seguido del 2008 con 20,2% y el 2006 con 10,9%.

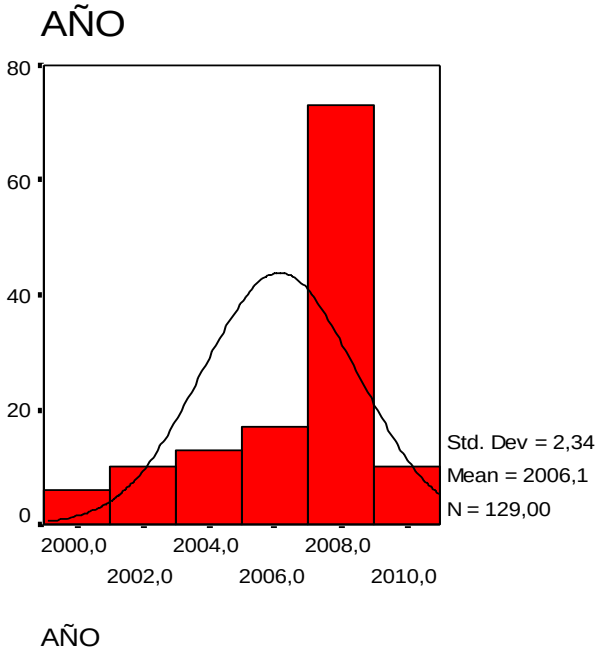


Gráfico 38. Histograma de frecuencias de años de fabricación de transformadores fallados. Fuente: M. Mago.

3.2.2 Pruebas Aplicando Partículas Magnéticas.

Para la llevar a cabo esta prueba o método no convencional, se aplica la norma ASTM E709-01 o *"Standard Guide for Magnetic Particle Examination"*. La superficie a inspeccionar debe estar absolutamente limpia de polvos, grasas u otros agentes. En este ensayo fue utilizado un equipo marca magnaflux de puntas de contacto a partir de dos (02) electrodos, los cuales permiten el paso de la corriente. El tipo de corriente magnetizante utilizada es una señal rectificada de media onda (HWDC) (para la detección de discontinuidades superficiales y subsuperficiales), dado el espesor de la chapa de acero al silicio. El tipo de partícula utilizada es seca, visible de color rojo, la cual fue rociada en la superficie creando una capa uniforme y delgada sobre la muestra. El campo fue aplicado en forma perpendicular como establece la norma. A continuación en el Gráfico 39 se muestra el equipo utilizado en el Laboratorio de END (Ensayos No Destructivos) de la Universidad Nacional de Colombia (Sede Bogotá) y en el Gráfico 40 el procedimiento experimental.

Gráfico 39. Equipo utilizado para el END aplicando partículas magnéticas.
Fuente: M. Mago.

Gráfico 40. Chapa de acero al momento de aplicar corriente magnetizante.
Fuente: M. Mago.

Al llevar a cabo el procedimiento establecido, no se encontraron en los materiales evaluados *ninguna alteración o cambios.*

3.2.3 Análisis de la microestructura.

Esta prueba no convencional utiliza las normas ASTM E 112-96 o *"Standard Test Methods for Determining Average Grain Size"* para determinar tamaño de cristal (grano) y ASTM E 45 o *"Standard Test Methods for Determining Quantity and Inclusions Size".* Se prepararon las probetas con el equipo indicado en el gráfico 41 y luego de un proceso de pulido y ataque químico, fueron llevadas al analizador de imágenes indicado en el gráfico 42, evaluando cantidad de inclusiones y tamaño de grano. Estos equipos se encuentran en el Laboratorio de Tratamientos Térmicos de la Universidad Nacional de Colombia (sede Bogotá). A continuación se muestran los mismos, así como también, fotomicrografías de las muestras de los transformadores fallados utilizados en esta investigación doctoral:

Gráfico 41.Equipo para preparación y montaje de probetas . Fuente: M. Mago.

Gráfico 42. Equipo analizador de imágenes Fuente: M. Mago.

- **Inclusiones o Impurezas en las Chapas de Acero al Silicio de los Transformadores Fallados:**

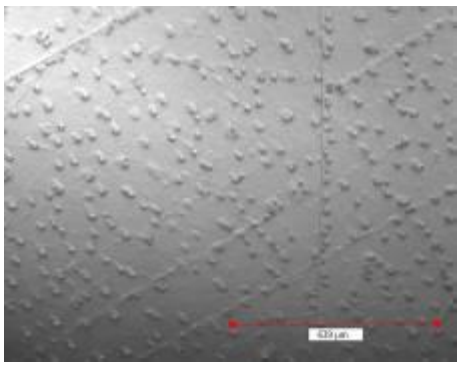


Gráfico Nº 43. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó Falla Térmica debido a una Sobrecarga X100. Región de procedencia: Antioquia (Medellín). Fuente: M. Mago.

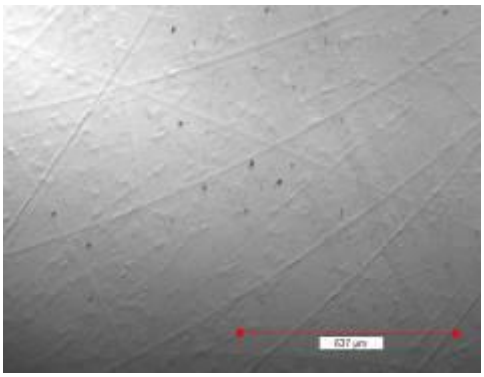


Gráfico Nº 44. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla por Descarga Parcial debido a una Sobretensión X100. Región de procedencia: Antioquia (Medellín). Fuente: M. Mago.

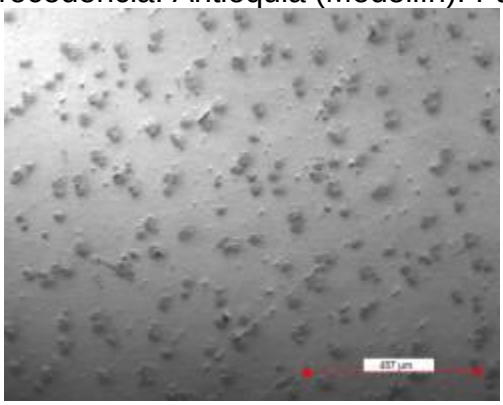


Gráfico Nº 45. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla por Arco Eléctrico debido a un Cortocircuito Externo X100.
Región de procedencia: Antioquia (Medellín). Fuente: M. Mago.

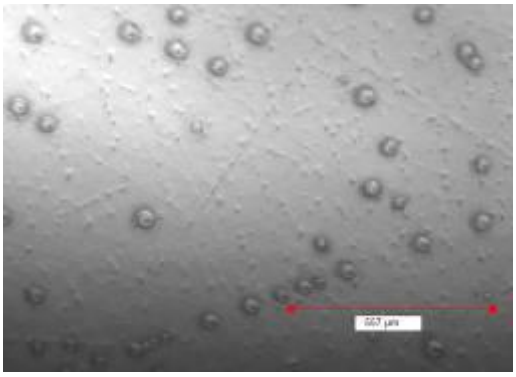


Gráfico Nº 46. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó Falla Térmica debido a una Sobrecarga X100.
Región de procedencia: Caldas (Manizales). Fuente: M. Mago.

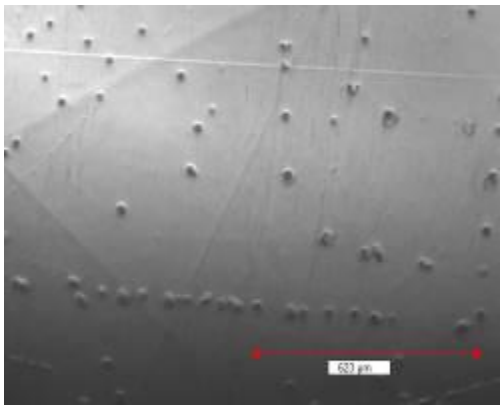


Gráfico Nº 47. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla por Arco Eléctrico debido a un Cortocircuito Externo X100.
Región de procedencia: Caldas (Manizales). Fuente: M. Mago.

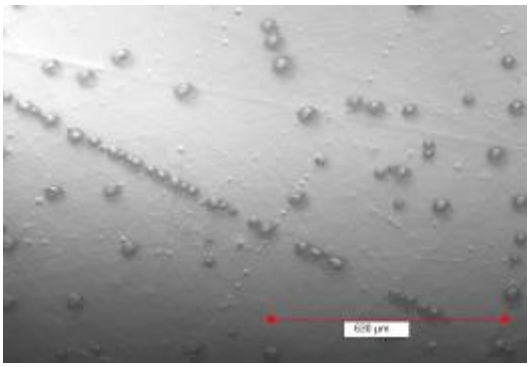


Gráfico Nº 48. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla por Arco Eléctrico/Térmica debido a una Sobrecarga X100.
Región de procedencia: Caldas (Manizales). Fuente: M. Mago.

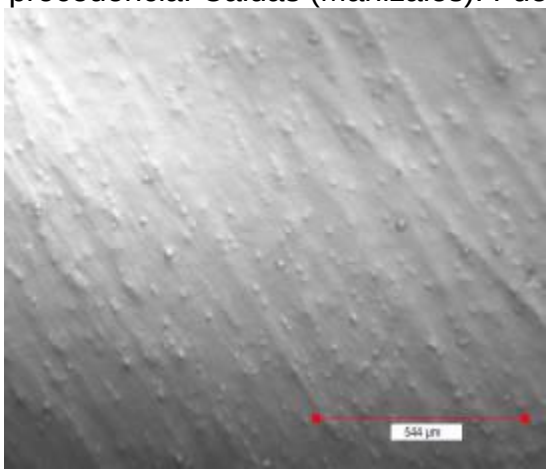


Gráfico Nº 49. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla por Descarga Parcial debido a un Defecto de Fabricación X100. Región de procedencia: Caldas (Manizales). Fuente: M. Mago.

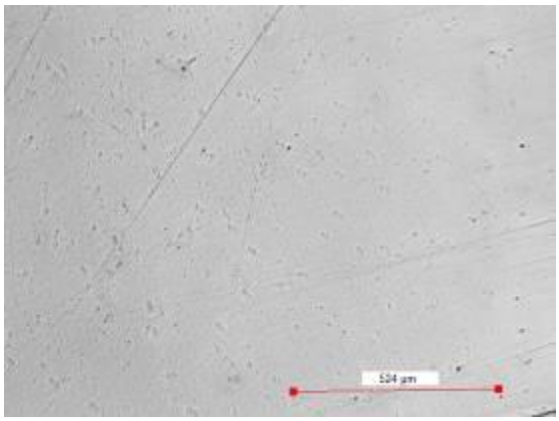


Gráfico 50. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla Térmica/Arco Eléctrico debido a una Sobrecarga X100. Región de procedencia: Pacífico (Popayán). Fuente: M. Mago.

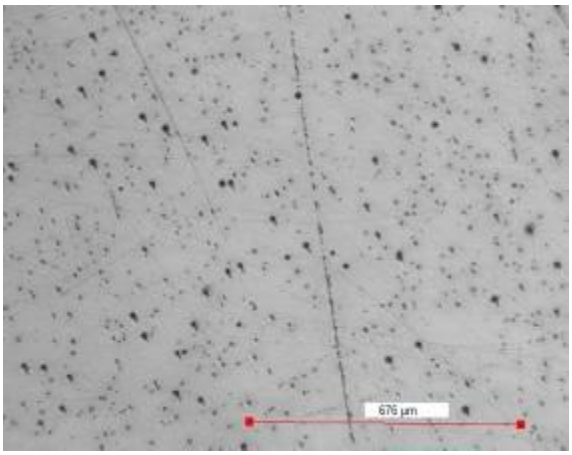


Gráfico 51. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla por Arco Eléctrico debido a un Cortocircuito Externo X100.
Región de procedencia: Pacífico (Popayán). Fuente: M. Mago.

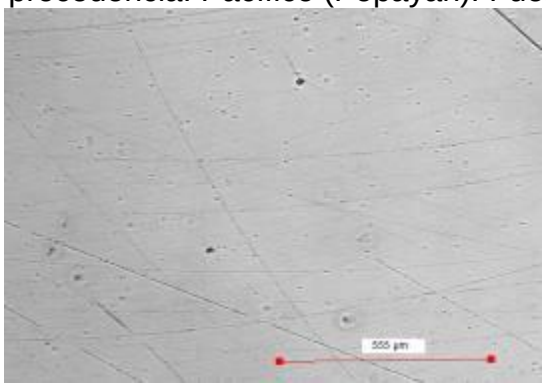


Gráfico 52. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla por Descarga Parcial debido a una Sobretensión X100. Región de procedencia: Pacífico (Popayán). Fuente: M. Mago.

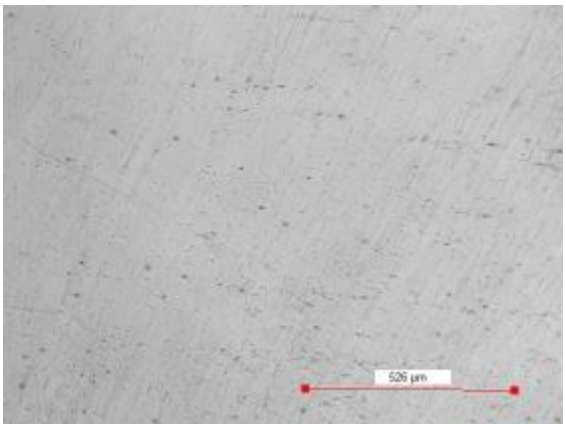


Gráfico 53. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla por Descarga Parcial debido a una Sobretensión X100. Región de procedencia: Bogotá. Fuente: M. Mago.

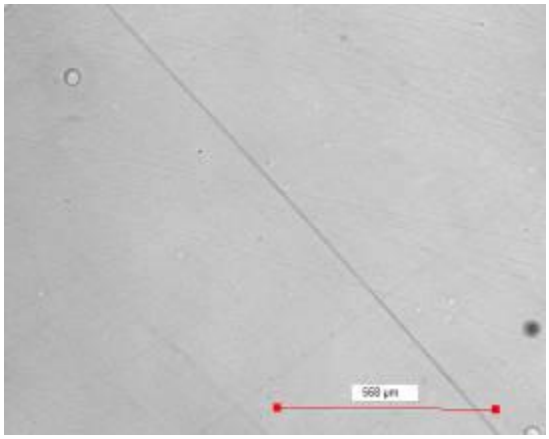


Gráfico 54. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla por Térmica debido a una Sobrecarga X100. Región de procedencia: Bogotá. Fuente: M. Mago.

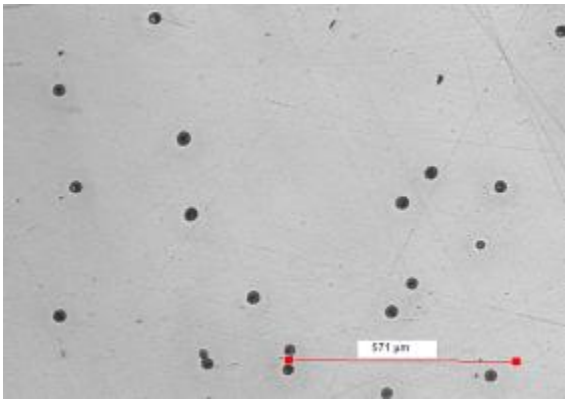


Gráfico 55. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla por Térmica debido a una Sobrecarga X100. Región de procedencia: Bogotá. Fuente: M. Mago.

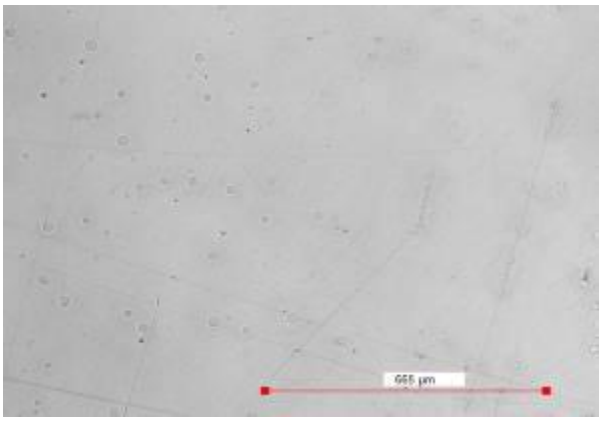


Gráfico 56. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla por Arco Eléctrico debido a una Sobrecarga X100. Región de procedencia: Bogotá. Fuente: M. Mago.

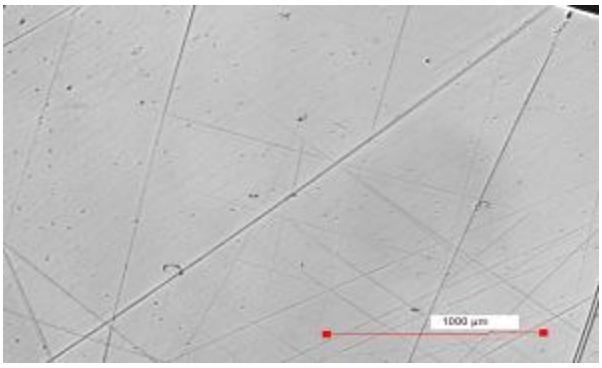


Gráfico 57. Fotomicrografía de la muestra Patrón sin ataque químico X50. Fuente: M. Mago.

- **Tamaño de cristal (grano) en las Chapas de Acero al Silicio de los Transformadores Fallados:**

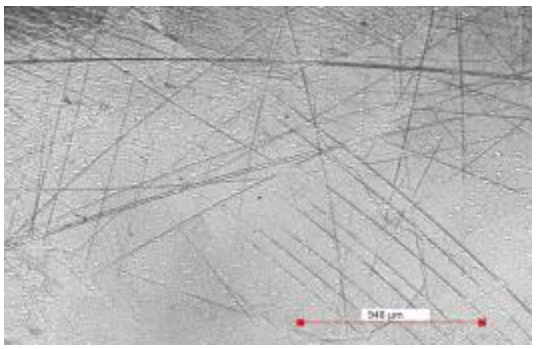


Gráfico Nº 58. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó Falla Térmica debido a una Sobrecarga X50. Región de procedencia: Antioquia (Medellín). Fuente: M. Mago.

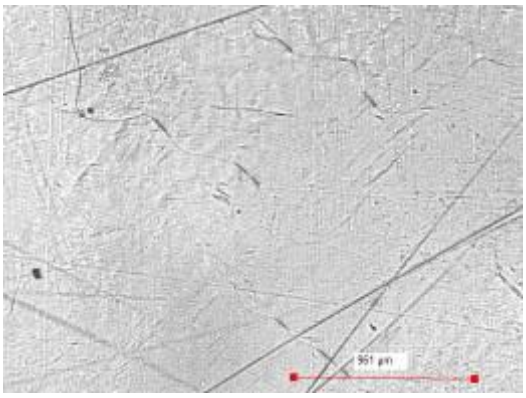


Gráfico Nº 59. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla por Descarga Parcial debido a una Sobretensión X50. Región de procedencia: Antioquia (Medellín). Fuente: M. Mago.

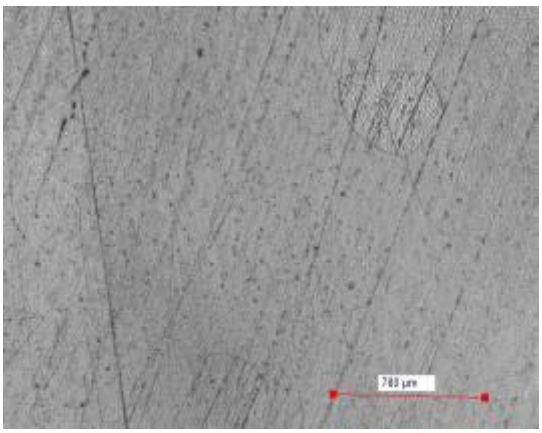


Gráfico Nº 60. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla por Arco Eléctrico debido a un Cortocircuito Externo X50. Región de procedencia: Antioquia (Medellín). Fuente: M. Mago.

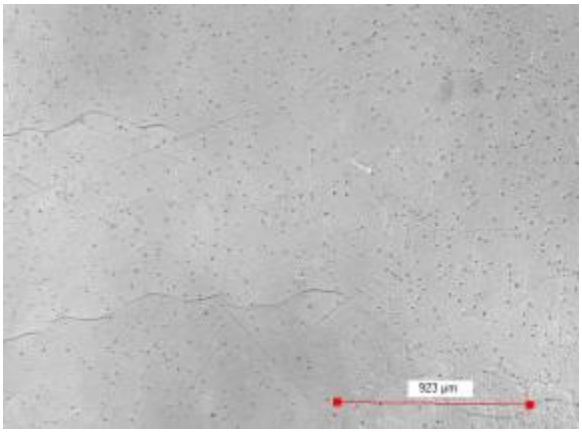


Gráfico Nº 61. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó Falla Térmica debido a una Sobrecarga X50. Región de procedencia: Caldas (Manizales). Fuente: M. Mago.

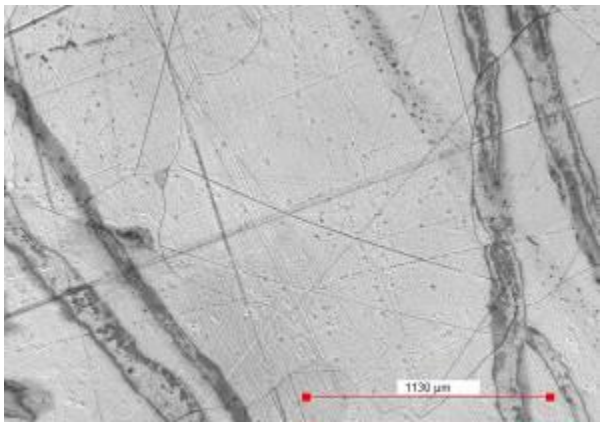


Gráfico Nº 62. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla por Arco Eléctrico debido a un Cortocircuito Externo X50. Región de procedencia: Caldas (Manizales). Fuente: M. Mago.

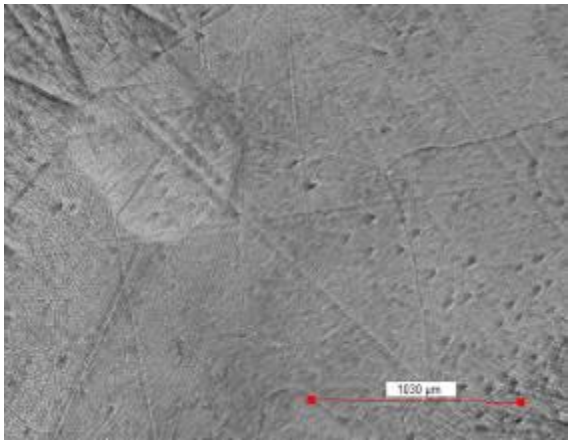


Gráfico Nº 63. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla por Arco Eléctrico/Térmica debido a una Sobrecarga X50. Región de procedencia: Caldas (Manizales). Fuente: M. Mago.

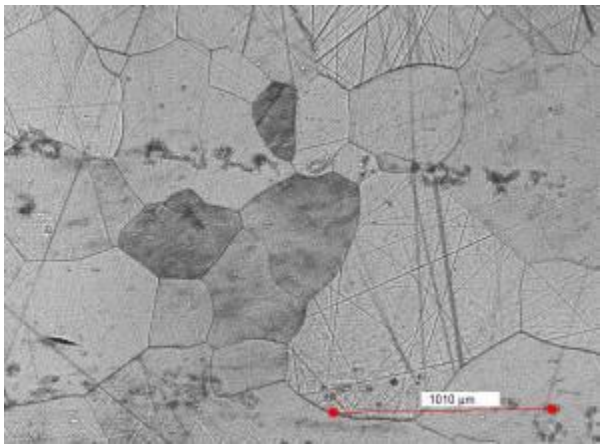


Gráfico Nº 64. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla por Descarga Parcial debido a un Defecto de Fabricación X50. Región de procedencia: Caldas (Manizales). Fuente: M. Mago.

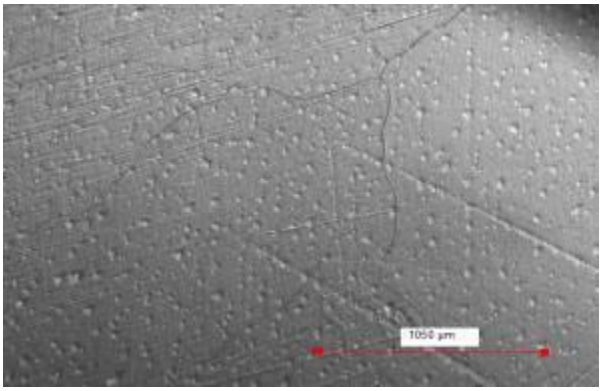


Gráfico 65. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla Térmica/Arco Eléctrico debido a una Sobrecarga X50. Región de procedencia: Pacífico (Popayán). Fuente: M. Mago.

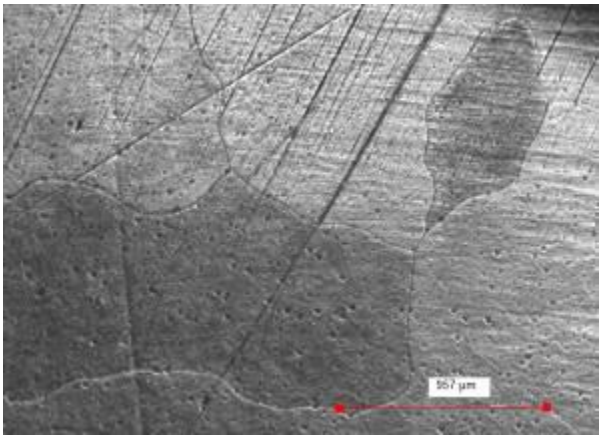


Gráfico 66. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla por Arco Eléctrico debido a un Cortocircuito Externo X50. Región de procedencia: Pacífico (Popayán). Fuente: M. Mago.

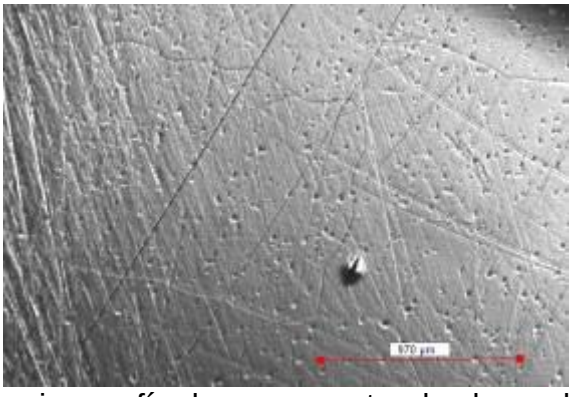


Gráfico 67. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla por Descarga Parcial debido a una Sobretensión X50. Región de procedencia: Pacífico (Popayán). Fuente: M. Mago.

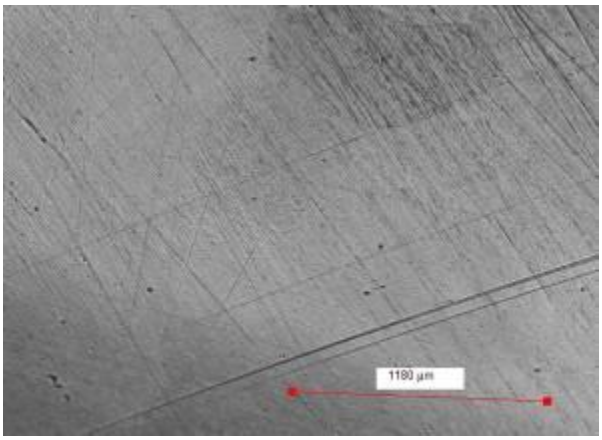


Gráfico 68. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla Térmica debido a una Sobrecarga X50. Región de procedencia: Cundinamarca. Fuente: M. Mago.

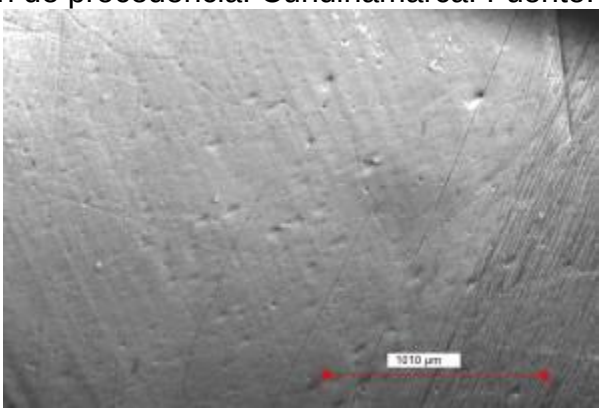


Gráfico 69. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla por Descarga Parcial debido a una Sobretensión X50. Región de procedencia: Bogotá. Fuente: M. Mago.

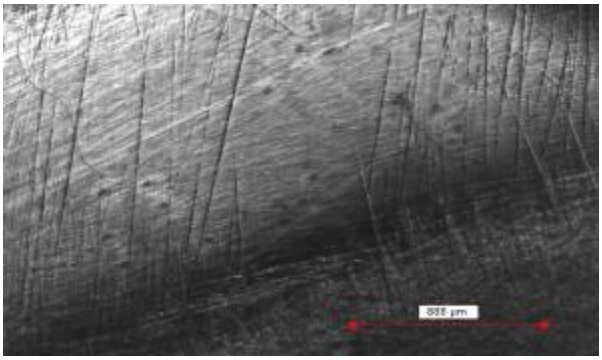


Gráfico 70. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla por Térmica debido a una Sobrecarga X50. Región de procedencia: Bogotá. Fuente: M. Mago.

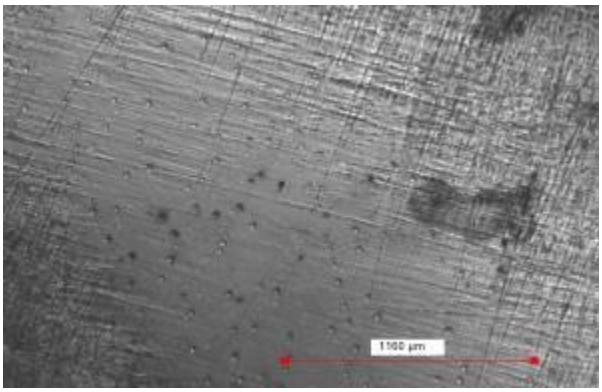


Gráfico 71. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla por Térmica debido a una Sobrecarga X50. Región de procedencia: Bogotá. Fuente: M. Mago.

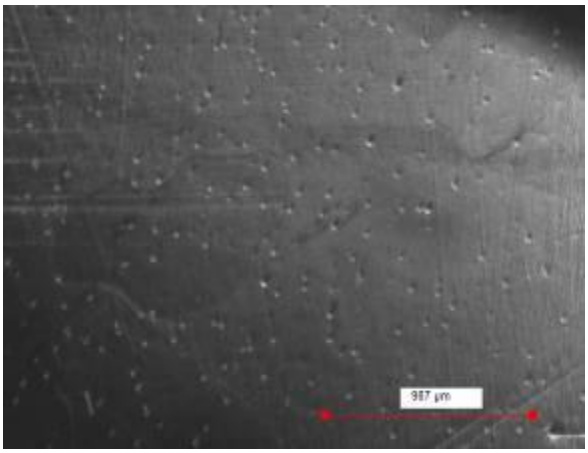


Gráfico 72. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla por Arco Eléctrico debido a una Sobrecarga X50. Región de procedencia: Bogotá. Fuente: M. Mago.

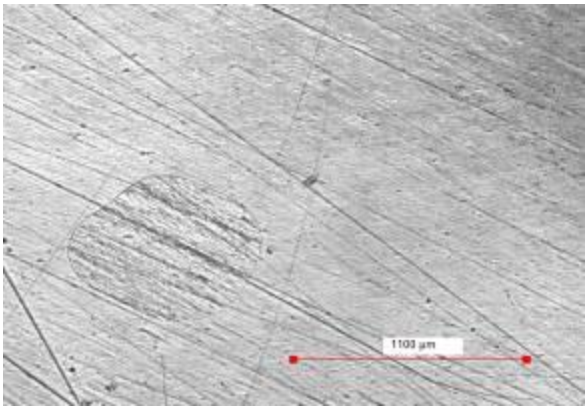


Gráfico 73. Fotomicrografía de la muestra Patrón mostrando ataque químico X50.
Fuente: M. Mago.

3.2.4 Pruebas de Dureza.

Esta prueba corresponde a la cualidad que tienen los metales para presentar mayor resistencia al corte, a la tracción, deformación, penetración o rayado. Esta condición del material está íntimamente ligada a la microestructura y por lo tanto, con las propiedades mecánicas. Las probetas utilizadas en los ensayos metalográficos fueron utilizadas para medir dureza en un equipo marca Leco Modelo M-400 G2 perteneciente al Laboratorio de Tratamientos Térmicos de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, utilizando dureza Knoop, a una carga de 500 Kg con tiempo de 5 segundos, el cual se muestra en el Gráfico 74 indicado a continuación:

Gráfico 74. Equipo para medir dureza o "Hardness Test".
Fuente: M. Mago.

A continuaciòn en la tabla Nº 6 se muestran los resultados obtenidos:

Tabla Nº 6. Mediciones de Dureza.

REGIONES	TIPOS DE FALLAS	MEDICIÓN (DK)
REGION ANTIOQUIA	TERMICA	222,2
	DESCARGA PARCIAL	211,45
	ARCO ELECTRICO	207,8
REGION CALDAS	TERMICA	207,8
	ARCO ELECTRICO	200,4
	ARCO	213,2

	ELECTRICO/TERMICA	
	DESCARGA PARCIAL	213,35
REGION CUNDINAMARCA	TERMICA	212,55
REGION BOGOTA	ARCO ELECTRICO/TERMICA	236,25
	ARCO ELECTRICO	272,6
	DESCARGA PARCIAL	225,35
	TERMICA	212,35
REGION PACIFICO	TERMICA/ARCO ELECTRICO	209,35
	ARCO ELECTRICO	197,45
	DESCARGA PARCIAL	209,35
PATRON DE REFERENCIA		212

Nota. Fuente: M. Mago (2012)

3.2.5 Análisis Químico.

En el anexo Nº 4, se muestran los resultados obtenidos del análisis químico realizado en los Laboratorios de Metalografía de la Universidad Nacional de Colombia (sede Bogotá) con el Equipo Spectrovac, Marca Baird indicado en el gráfico 75 el cual se muestra a continuación:

Gráfico 75. Equipo para realizar anàlisis quìmico.
Fuente: M. Mago.

Esta evaluación incluye dos mediciones y el valor promedio verificando los contenidos de Hierro (Fe), Carbono (C), Manganeso (Mn), Fosforo (P), Azufre (S), Silicio (Si), Cobre (Cu), Niquel (Ni), Cromo (Cr), Vanadio (V), Molibdeno(Mo), Wolframio o Tusgteno (W), Cobalto (Co), Titanio (Ti), Estaño(Sn), Aluminio (Al), Niobio(Nb), Boro (B), Plomo (Pb), Magnesio (Mg).

El porcentaje de carbono obtenido y comparado con el valor promedio mostrado en la tabla Nº 7, es el referente utilizado para determinar las propiedades físicas de las aleaciones de acero al silicio entre las cuales se encuentran: resistencia eléctrica y la fuerza coercitiva, conductibilidad térmica, inducción remanente y permeabilidad magnética. La determinación de estas características son fundamentales para el cálculo de las pérdidas totales del núcleo de los transformadores fallados.

Tabla Nº 7. Análisis Químico.

REGIONES	TIPOS DE FALLAS	CAUSAS	VALOR PROMEDIO DEL PORCENTAJE (%) DE CARBONO
REGION ANTIOQUIA	TERMICA	SOBRECARGA	0,193
	DESCARGA PARCIAL	SOBRETENSION	0,069
	ARCO ELECTRICO	CORTOCIRCUITO EXTERNO	0,010
REGION CALDAS	TERMICA	SOBRECARGA	0,067
	ARCO ELECTRICO	CORTOCIRCUITO EXTERNO	0,040
	ARCO ELECTRICO/TERMICA	SOBRECARGA	0,019
	DESCARGA PARCIAL	DEFECTO FABRICACION	0,014
REGION CUNDINAMARCA	TERMICA	SOBRECARGA	0,031
REGION BOGOTA	ARCO ELECTRICO/TERMICA	SOBRECARGA	0,105
	ARCO ELECTRICO	SOBRETENSION	0,093
	DESCARGA PARCIAL	SOBRETENSION	0,101
	TERMICA	SOBRECARGA	0,1735
REGION PACIFICO	TERMICA/ARCO ELECTRICO	SOBRECARGA	0,131
	ARCO ELECTRICO	CORTOCIRCUITO EXTERNO	0,002
	DESCARGA PARCIAL	SOBRETENSION	0,033
PATRON DE REFERENCIA			0,033

Nota. Fuente: M. Mago (2012)

En el gráfico 76 se muestra influencia del Carbono en las propiedades fìsicas del acero al silicio, mientras que en los gráficos 77 al 82 el porcentaje de Carbono versus cada propiedad en forma individual[33]:

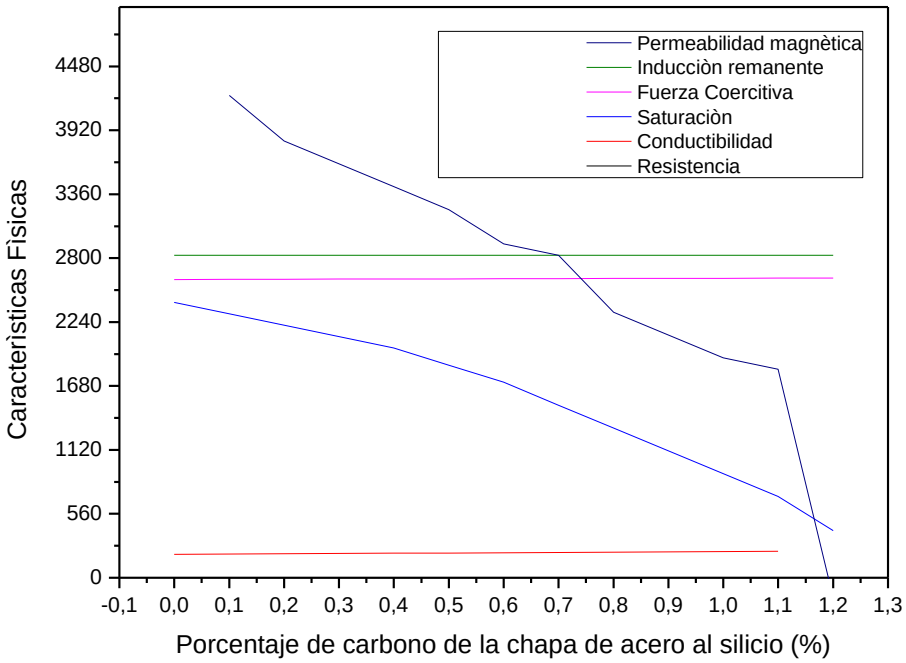


Gráfico 76. Influencia del Carbono en las propiedades físicas del acero. Fuente: M. Mago.

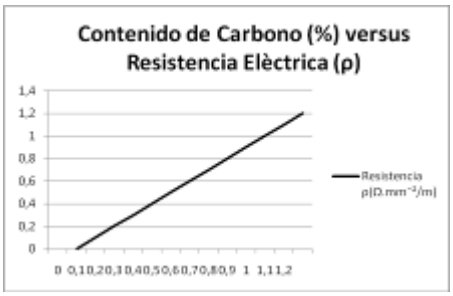


Gráfico 77. Porcentaje de Carbono versus Resistencia elèctrica. Fuente: M. Mago

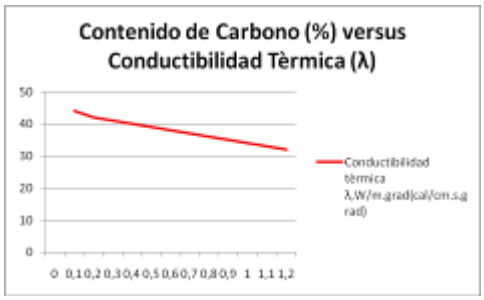


Gráfico 78. Porcentaje de Carbono versus Conductibilidad tèrmica. Fuente: M. Mago

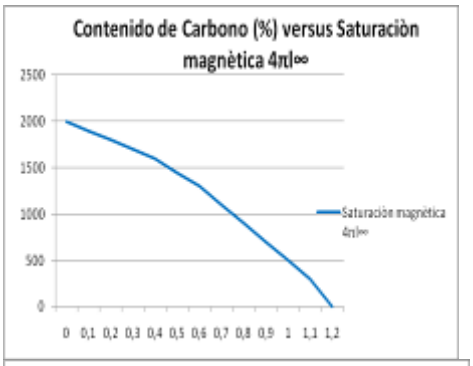


Gráfico 79. Porcentaje de Carbono versus Saturaciòn magnètica. Fuente: M. Mago

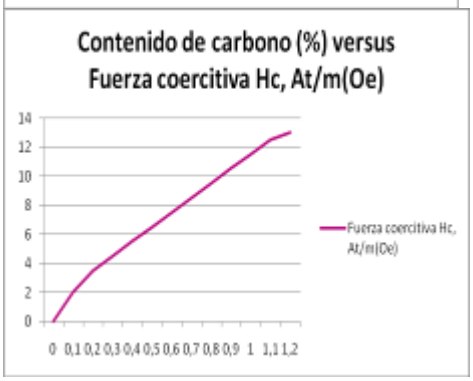


Gráfico 80. Porcentaje de Carbono versus Fuerza coercitiva. Fuente: M. Mago

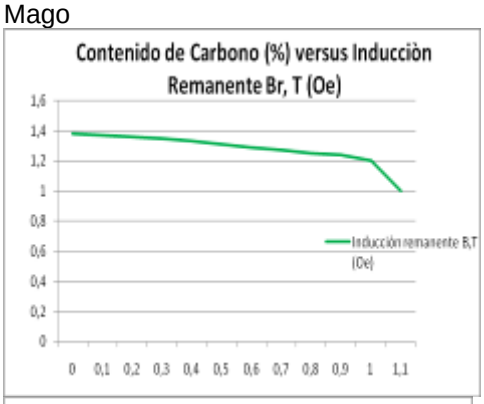


Gráfico 81. Porcentaje de Carbono versus

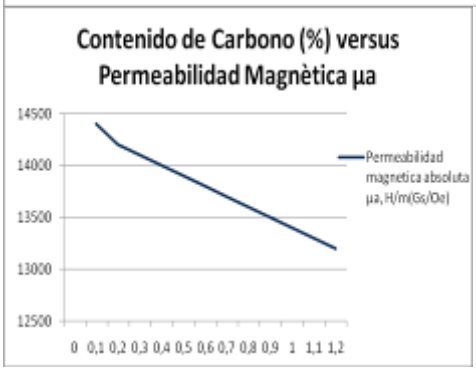


Gráfico 82. Porcentaje de Carbono versus

Inducciòn remanente. Fuente: M. Mago Permeabilidad magnètica absoluta. Fuente: M. Mago Fuente: M. Mago.

En el anexo Nº 5 se indican los script realizados con el programa Matlab aplicando métodos numéricos para aproximar las carácterísticas físicas, de acuerdo al porcentaje de carbono que presenta la muestra del equipo fallado[39]. A continuación los resultados obtenidos:

3.2.5.1 Contenido de Carbono (%) versus Resistencia Eléctrica.

1. Región Antioquia.

- **Falla: Térmica. Causa: Sobrecarga.**

```
>>X=[0.1 0.193 0.2];
>>Y=[0.1 0.109 0.11];
>>plot(X,Y)
>>n=3;
>>k=2;
>>newpoly(X,Y)
ans = 0.4608   -0.0382    0.0992
>>G=(0.4608*0.191^2)-0.0382*(0.191)+0.0992  = 0.1087
```

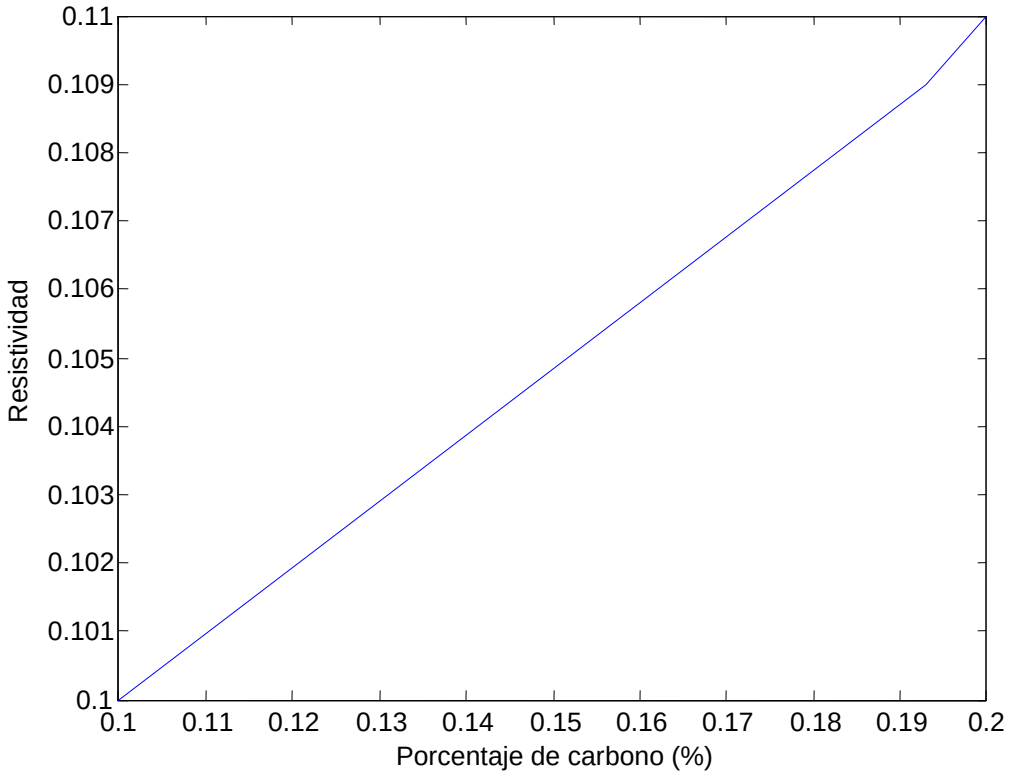


Gráfico 83. Cálculo de la resistividad. Región Antioquia. Falla Térmica.

Fuente: M. Mago.

- **Falla: Descarga Parcial. Causa: Sobretensión.**

  >> X=[0 0.069 0.1];
  >> Y=[0.097 0.0983 0.099];
  >> plot(X,Y)
  >> n=3;
  >> k=2;
  >> newpoly(X,Y)
  ans = 0.0374 0.0163 0.0970
  >> G=(0.0374*0.050^2)+0.0163*(0.050)+0.0970 = 0.0979

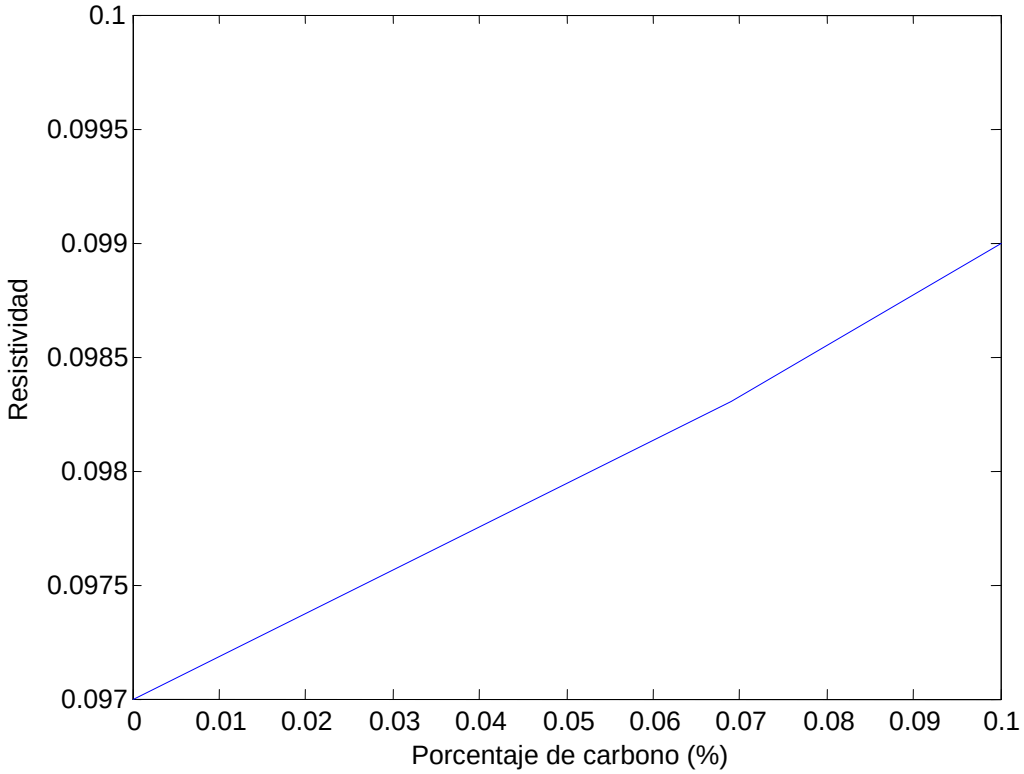


Gráfico 84. Cálculo de la resistividad. Región Antioquia. Falla Descarga Parcial
Fuente: M. Mago.

- **Falla: Arco Eléctrico. Causa: Cortocircuito Externo.**

  >> X=[0 0.010 0.1];
  >> Y=[0.098 0.0983 0.1];
  >> n=3;
  >> k=2;
  >> newpoly(X,Y)
  ans = -0.1111 0.0311 0.0980
  >> G=(-0.1111*0.009^2)+0.0311*(0.009)+0.0980 = 0.0983

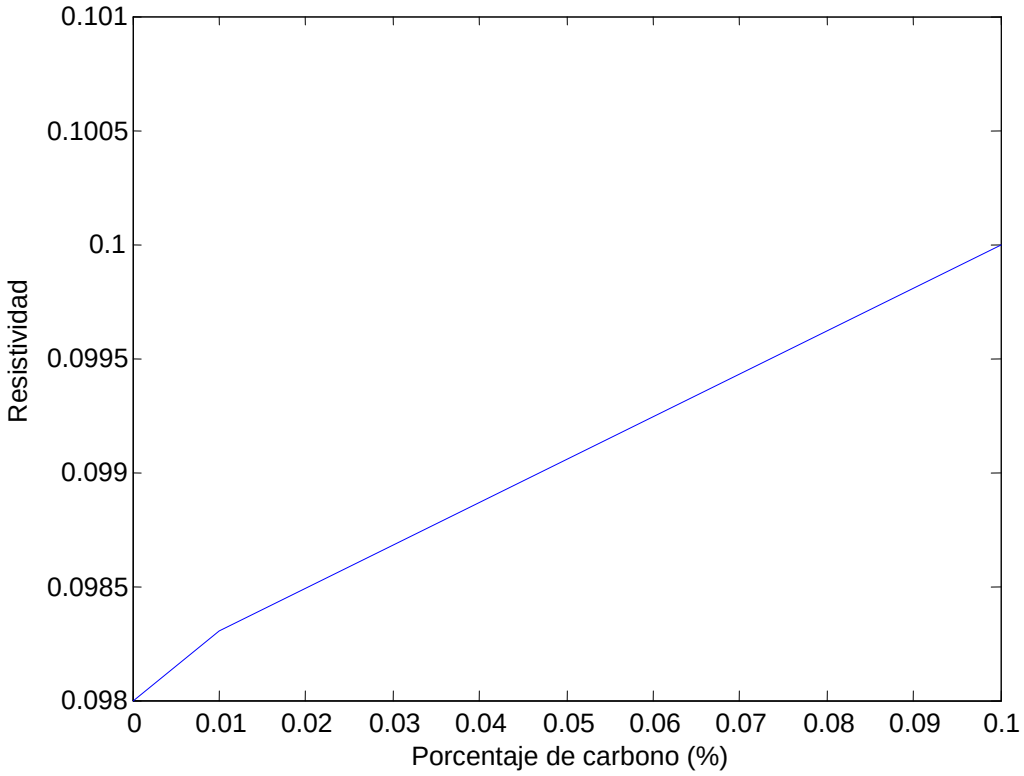


Gráfico 85. Cálculo de la resistividad. Región Antioquia. Falla Arco Eléctrico.
Fuente: M. Mago.

2. Región Caldas.

- **Tipo de Falla: Térmica. Causa: Sobrecarga.**

```
>> X=[0 0.067 0.1];
>> Y=[0.098 0.0992 0.1];
>> n=3;
>> k=2;
>> newpoly(X,Y)
ans =  0.0633    0.0137    0.0980
>> G=(0.0633*0.050^2)+0.0137*(0.050)+0.0980  = 0.0988
```

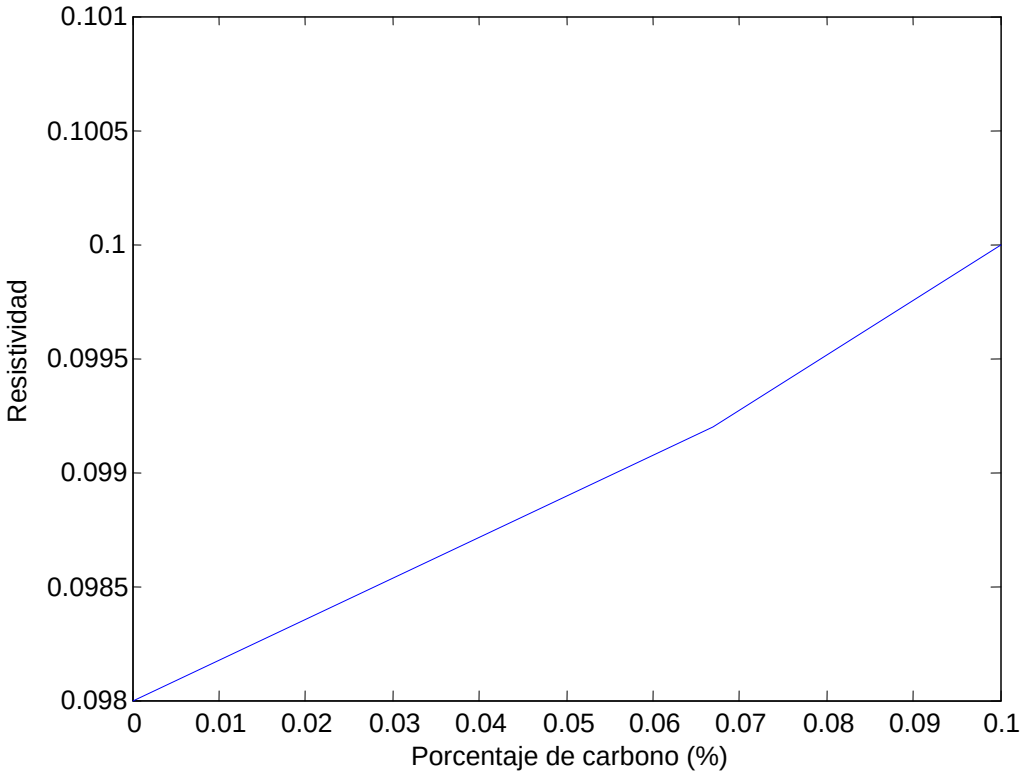


Gráfico 86. Cálculo de la resistividad. Región Caldas. Falla Térmica.
Fuente: M. Mago.

- **Tipo de Falla: Arco Eléctrico. Causa: Cortocircuito Externo.**
  >> X=[0 0.040 0.1];
  >> Y=[0.098 0.0986 0.1];
  >> n=3;
  >> k=2;
  >> newpoly(X,Y)
  ans = 0.0833 0.0117 0.0980
  >> G=(0.0833*0.030^2)+0.0117*(0.030)+0.0980 = 0.0984

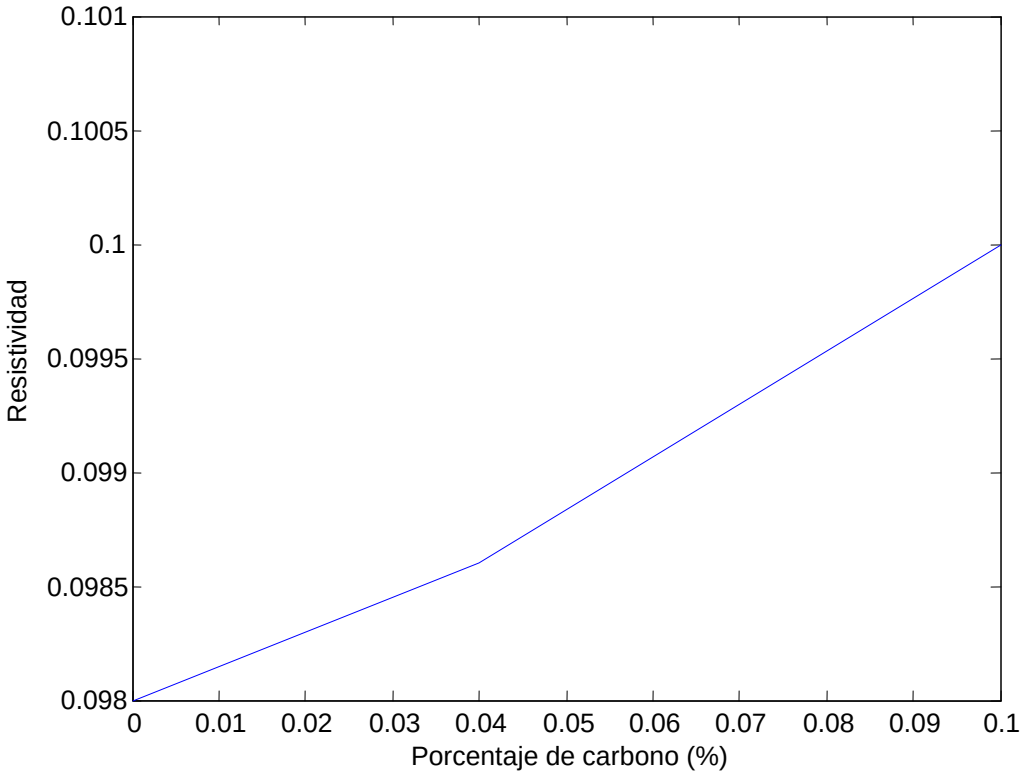


Gráfico 87. Cálculo de la resistividad. Región Caldas. Falla Arco Eléctrico.
Fuente: M. Mago.

- **Tipo de Falla: Arco Eléctrico/Térmica. Causa: Sobrecarga.**
  >> X=[0 0.019 0.1];
  >> Y=[0.098 0.0982 0.1];
  >> n=3;
  >> k=2;
  >> newpoly(X,Y)
  ans = 0.1170 0.0083 0.0980
  >> G=(0.1170*0.015^2)+0.0083*(0.015)+0.0980 = 0.0982

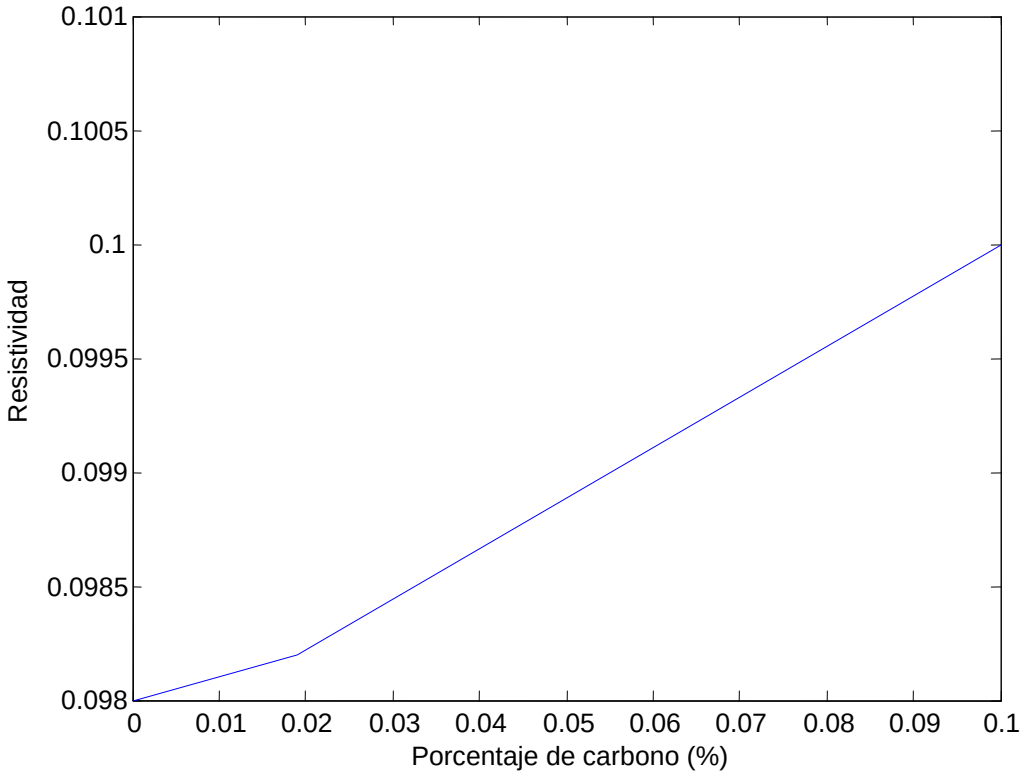


Gráfico 88. Cálculo de la resistividad. Región Caldas. Falla Arco Eléctrico/Térmica.
Fuente: M. Mago.

- **Tipo de Falla: Descarga Parcial. Causa: Defecto de Fabricación/Humedad.**
  >> X=[0 0.014 0.1];
  >> Y=[0.098 0.0982 0.1];
  >> n=3;
  >> k=2;
  >> newpoly(X,Y)
  ans = 0.0664 0.0134 0.0980
  >> G=(0.0664*0.010^2)+0.0134*(0.010)+0.0980 = 0.0981

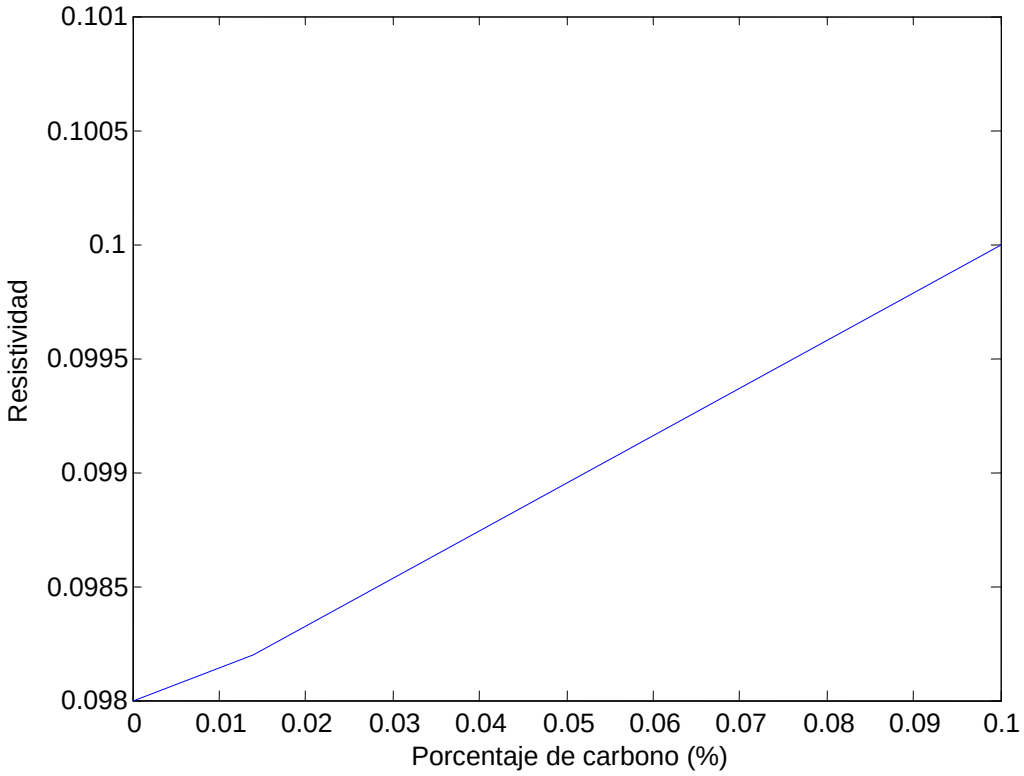


Gráfico 89. Cálculo de la resistividad. Región Caldas. Falla Descarga Parcial.
Fuente: M. Mago.

3. Región Pacífico.

- **Tipo de Falla: Térmica/Arco eléctrico. Causa: Sobrecarga.**
  >> X=[0.1 0.131 0.2];
  >> Y=[0.1 0.1035 0.11];
  >> n=3;
  >> k=2;
  >> newpoly(X,Y)
  ans = -0.1870 0.1561 0.0863
  >> G=(-0.1870*0.120^2)+0.1561*(0.120)+0.0863 = 0.1023

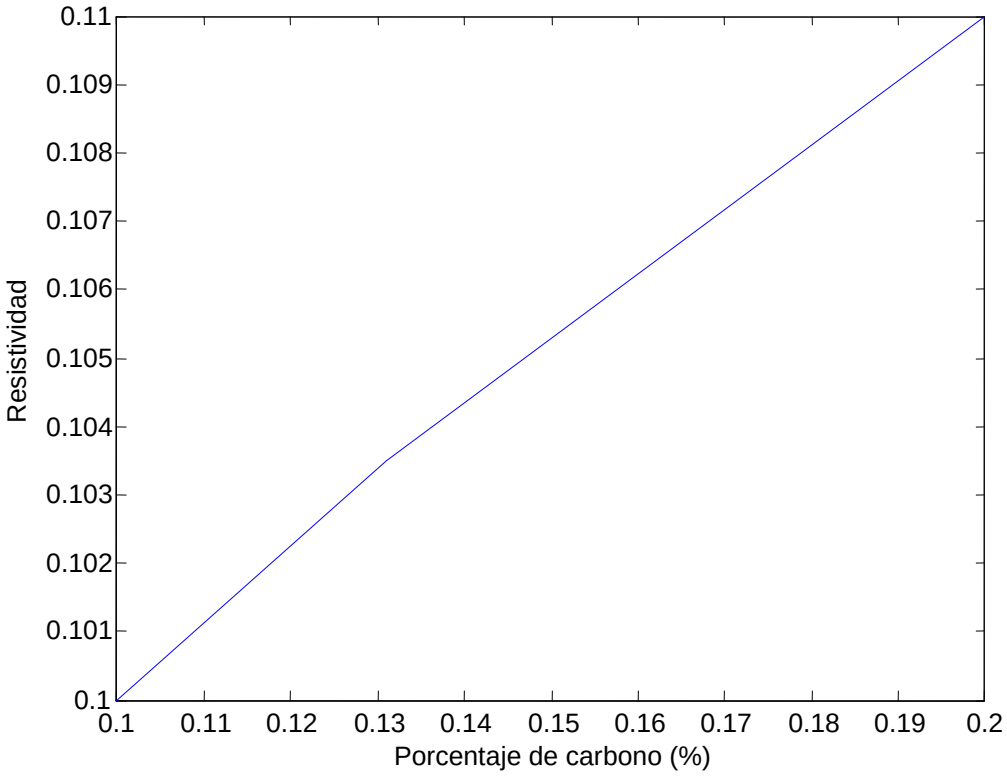


Gráfico 90. Cálculo de la resistividad. Región Pacífico. Falla Arco Eléctrico/Térmica.
Fuente: M. Mago.

- **Tipo de Falla: Arco Eléctrico. Causa: Cortocircuito Externo.**
  >> X=[0 0.002 0.1];
  >> Y=[0.098 0.0981 0.1];
  >> n=3;
  >> k=2;
  >> newpoly(X,Y)
  ans = -0.3061 0.0506 0.0980
  >> G=(-0.3061*0.001^2)+0.05061*(0.001)+0.0980 = 0.0981

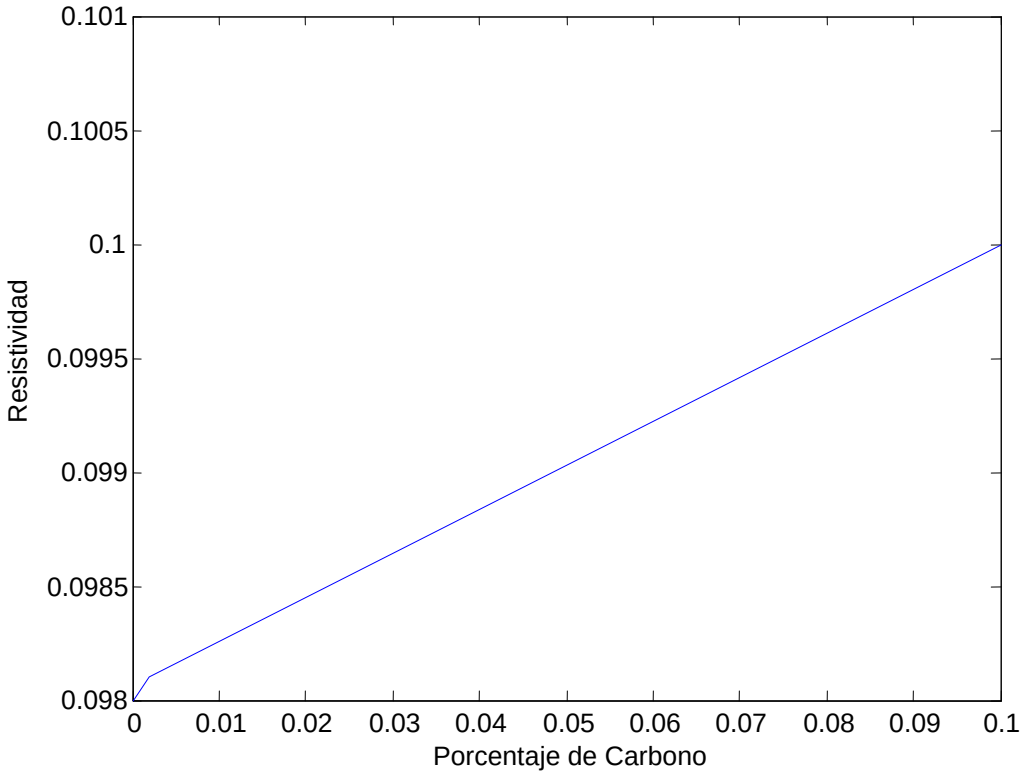


Gráfico 91. Cálculo de la resistividad. Región Pacífico. Falla Arco Eléctrico.
Fuente: M. Mago.

- **Tipo de Falla: Descarga parcial. Causa: Sobretensión.**
  >> X=[0 0.033 0.1];
  >> Y=[0.098 0.0985 0.1];
  >> n=3;
  >> k=2;
  >> newpoly(X,Y)
  ans = 0.0724 0.0128 0.0980
  >> G=(0.0724*0.020^2)+0.0128*(0.020)+0.0980 = 0.0983

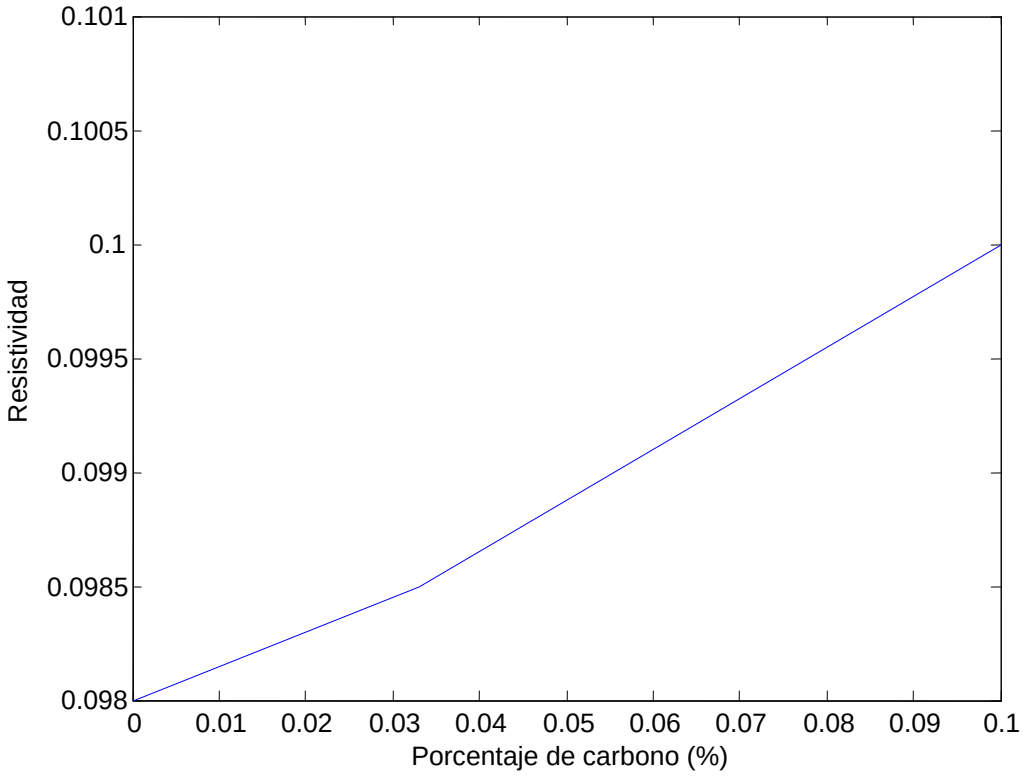


Gráfico 92. Cálculo de la resistividad. Región Pacífico. Falla Descarga Parcial.
Fuente: M. Mago.

4. Región Cundinamarca.

- **Tipo de Falla: Térmica. Causa: Sobrecarga.**

```
>> X=[0 0.031 0.1];
>> Y=[0.098 0.0985 0.1];
>> n=3;
>> k=2;
>> newpoly(X,Y)
ans = 0.0561    0.0144    0.0980
>> G=(0.0561*0.025^2)+0.0144*(0.025)+0.0980  = 0.0984
```

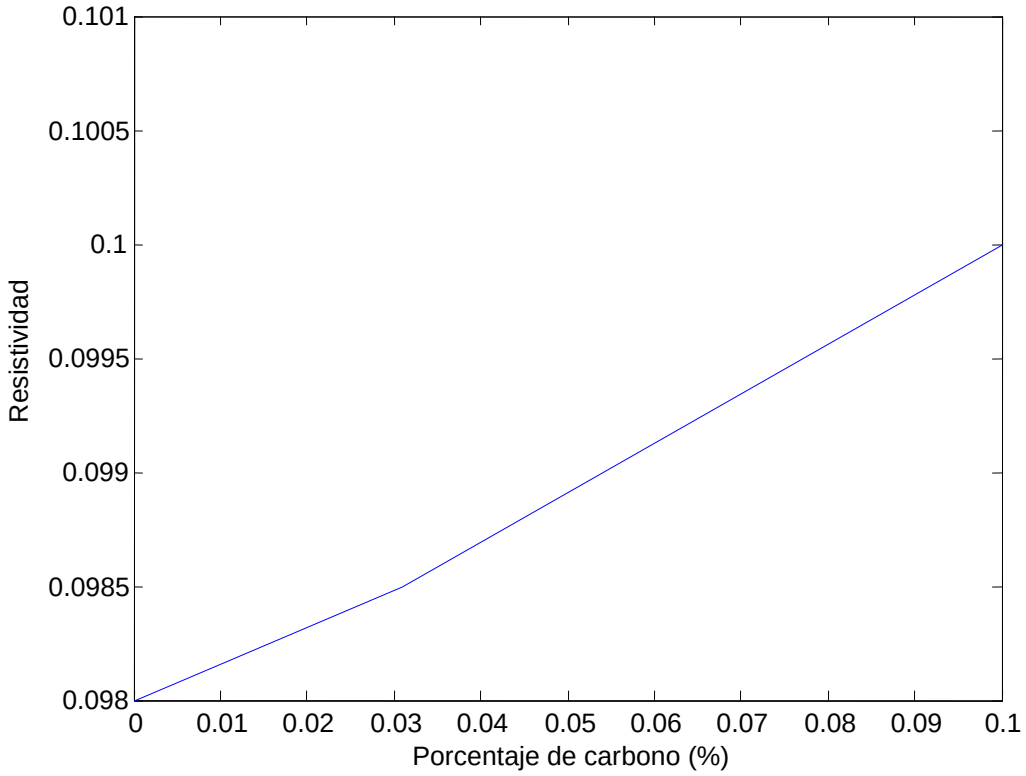


Gráfico 93. Cálculo de la resistividad. Región Cundinamarca. Falla Térmica.
Fuente: M. Mago.

5. Región Capital. Bogotá.

- **Tipo de Falla: Arco eléctrico/Térmica. Causa: Sobrecarga.**

```
>> X=[0.1 0.105 0.2];
>> Y=[0.1 0.101 0.11];
>> n=3;
>> k=2;
>> newpoly(X,Y)
ans =-1.0526    0.4158    0.0689
>> G=(-1.0526*0.100^2)+0.4158*(0.100)+0.0689  = 0.1000
```

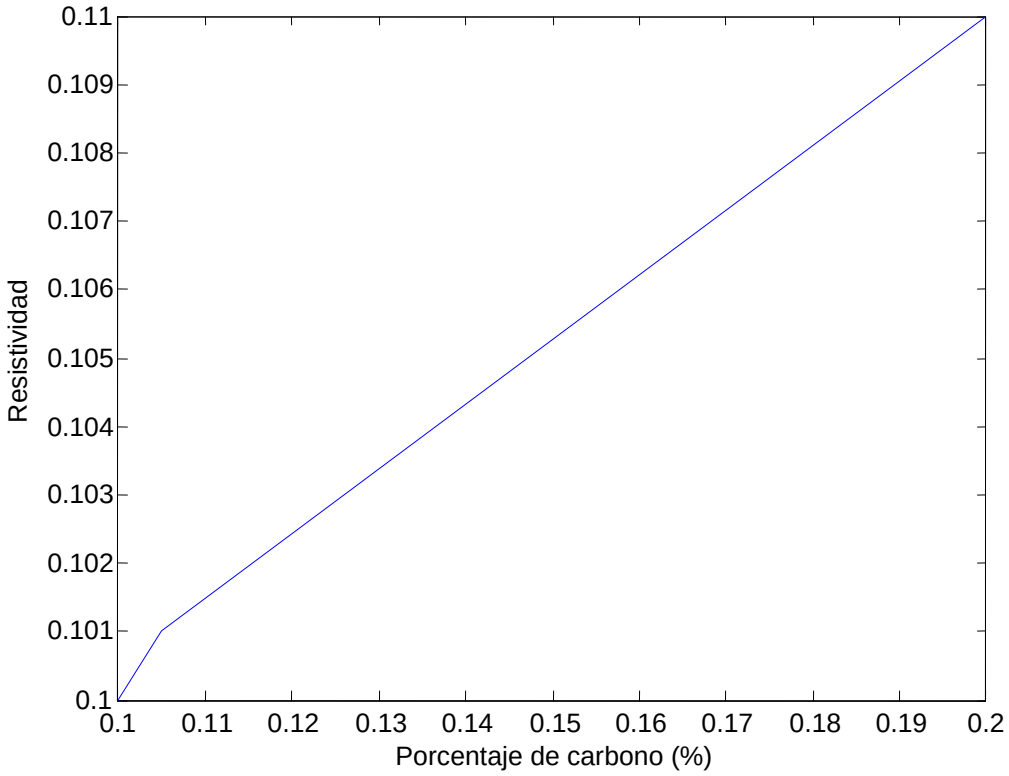


Gráfico 94. Cálculo de la resistividad. Región Bogotá. Falla Arco Eléctrico/Térmica.
Fuente: M. Mago.

- **Tipo de Falla: Arco Eléctrico. Causa: Sobretensión.**
  >> X=[0 0.093 0.1];
  >> Y=[0.098 0.0998 0.1];
  >> n=3;
  >> k=2;
  >> newpoly(X,Y)
  ans = 0.0922 0.0108 0.0980
  >> G=(0.0922*0.080^2)+0.0108*(0.080)+0.0980 = 0.0995

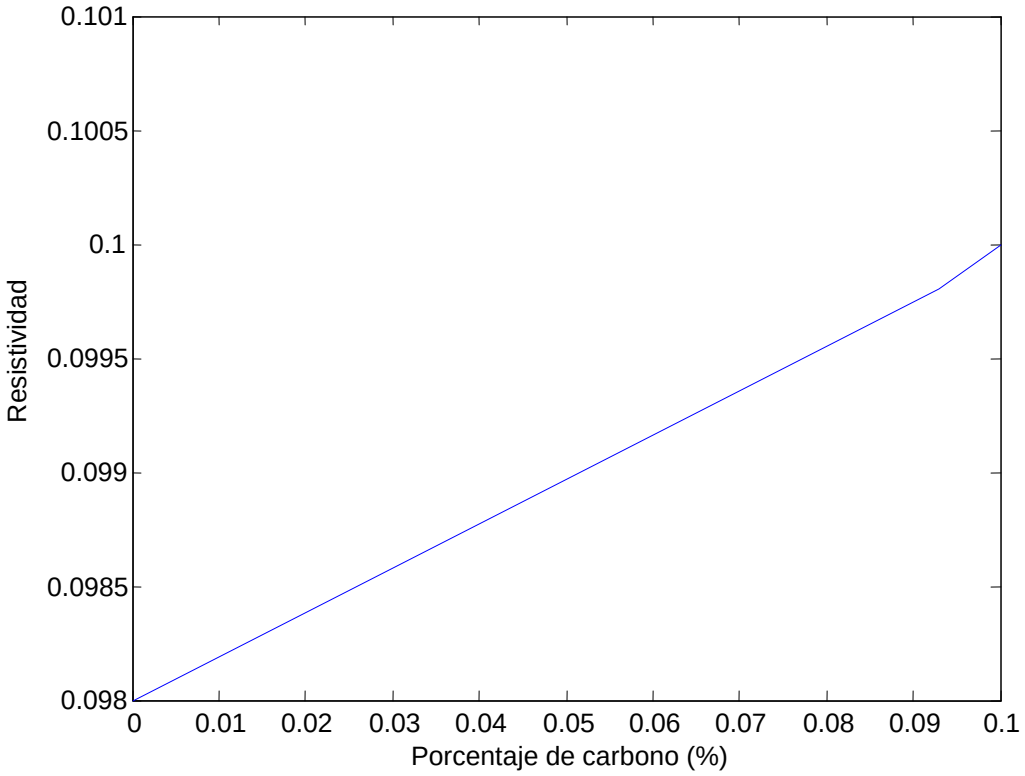


Gráfico 95. Cálculo de la resistividad. Región Bogotá. Falla Arco Eléctrico. Fuente: M. Mago.

- **Tipo de Falla: Descarga parcial. Causa: Sobretensión.**
  >> X=[0.1 0.101 0.2];
  >> Y=[0.0909 0.091 0.1];
  >> n=3;
  >> k=2;
  >> newpoly(X,Y)
  ans = -0.0909 0.1183 0.0800
  >> G=(-0.0909*0.09^2)+0.1183*(0.09)+0.0800 = 0.0899

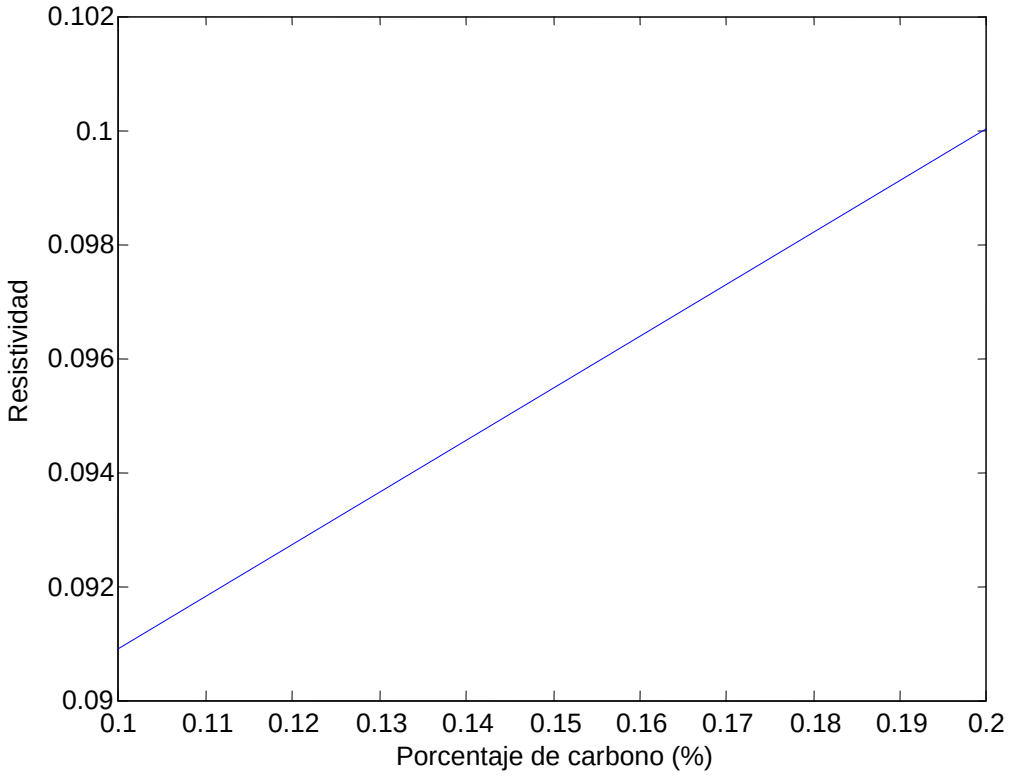


Gráfico 96. Cálculo de la resistividad. Región Bogotá. Falla Descarga Parcial. Fuente: M. Mago.

- **Tipo de Falla: Térmica. Causa: Sobrecarga.**
  >> X=[0.1 0.1735 0.2];
  >> Y=[0.1 0.107 0.11];
  >> n=3;
  >> k=2;
  >> newpoly(X,Y)
  ans = 0.1797 0.0461 0.0936
  >> G=(0.1797*0.15^2)+0.0461*(0.15)+0.0936 = 0.1046

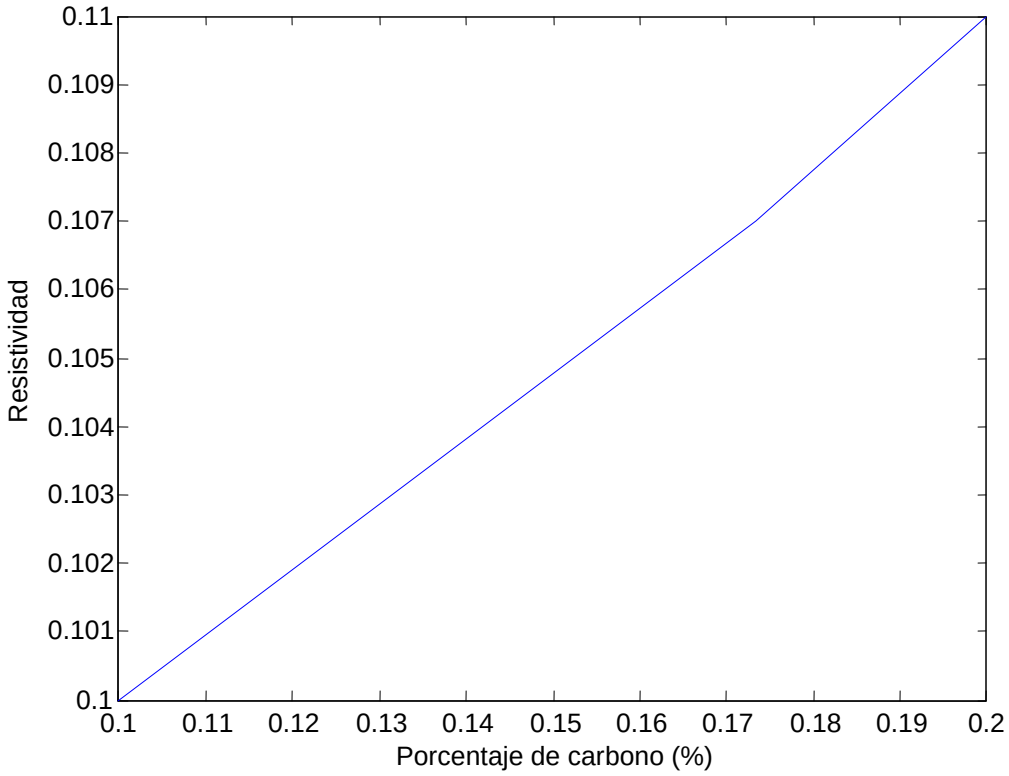


Gráfico 97. Cálculo de la resistividad. Región Bogotá. Falla Térmica. Fuente: M. Mago.

6. **Patrón de referencia. Equipo nuevo.**

```
>> X=[0 0.033 0.1];
>> Y=[0.098 0.0986 0.1];
>> plot(X,Y)
>> n=3;
>> k=2;
>> newpoly(X,Y)
ans = 0.0271    0.0173    0.0980
>> G=(0.0271*0.020^2)+0.0173*(0.020)+0.0980  = 0.0984
```

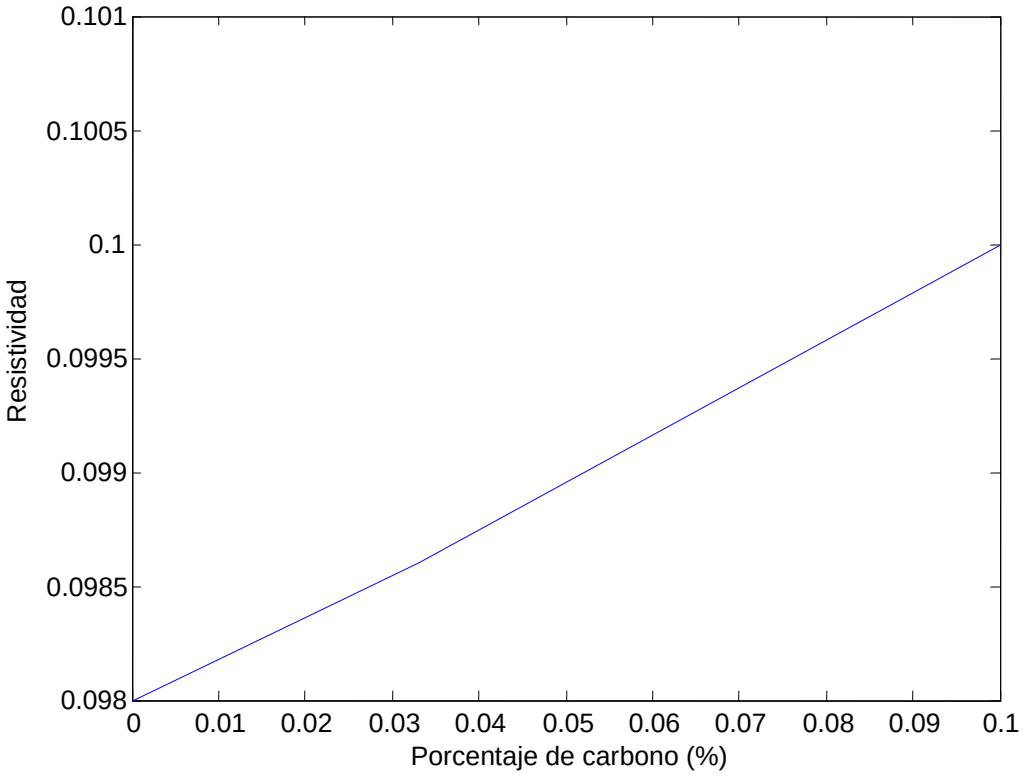


Gráfico 98. Cálculo de la resistividad. Muestra Patrón.
Fuente: M. Mago.

3.2.5.2 Contenido de Carbono (%) versus Conductibilidad Térmica.

1. Región Antioquia.

- **Tipo de Falla: Térmica. Causa: Sobrecarga**

  >>X=[0.1 0.191 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
  >>Y=[44 43 42 41 40 39 38 37 36 35 34 33 32];
  >> lsline(X,Y)
  ans = -10.5542
  >> sum(X) ans = 7.9910
  >> sum(Y) ans = 494
  >> G=(7.9910*(10.5542)+494)/13 = G = 44.4876
  >> plot(X,Y)

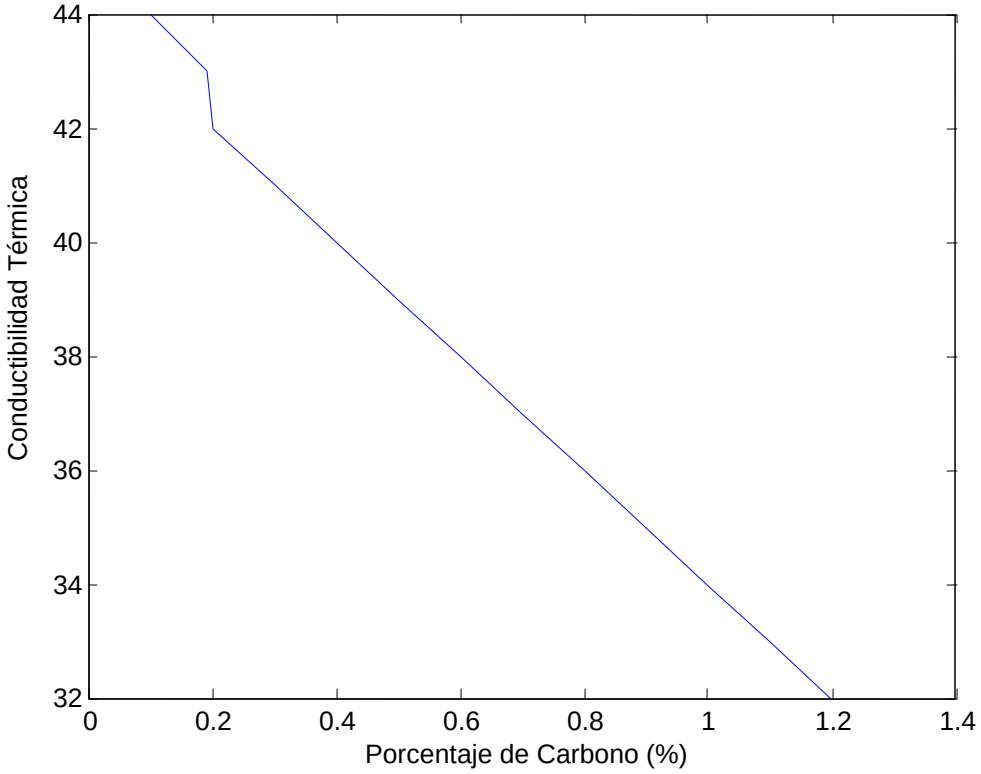


Gráfico 99. Cálculo de la conductibilidad. Región Antioquia. Falla Térmica
Fuente: M. Mago.

>> X=[0.1 0.193 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
>> Y=[44 43 42 41 40 39 38 37 36 35 34 33 32];
>> lsline(X,Y)
ans = -10.5590
>> sum(X) ans = 7.9930
>> sum(Y)ans = 494
>> G=(7.9930*(10.5590)+494)/13 = 44.4922
>> y=-10.5590*(0.191)+44.4922
y = 42.4754

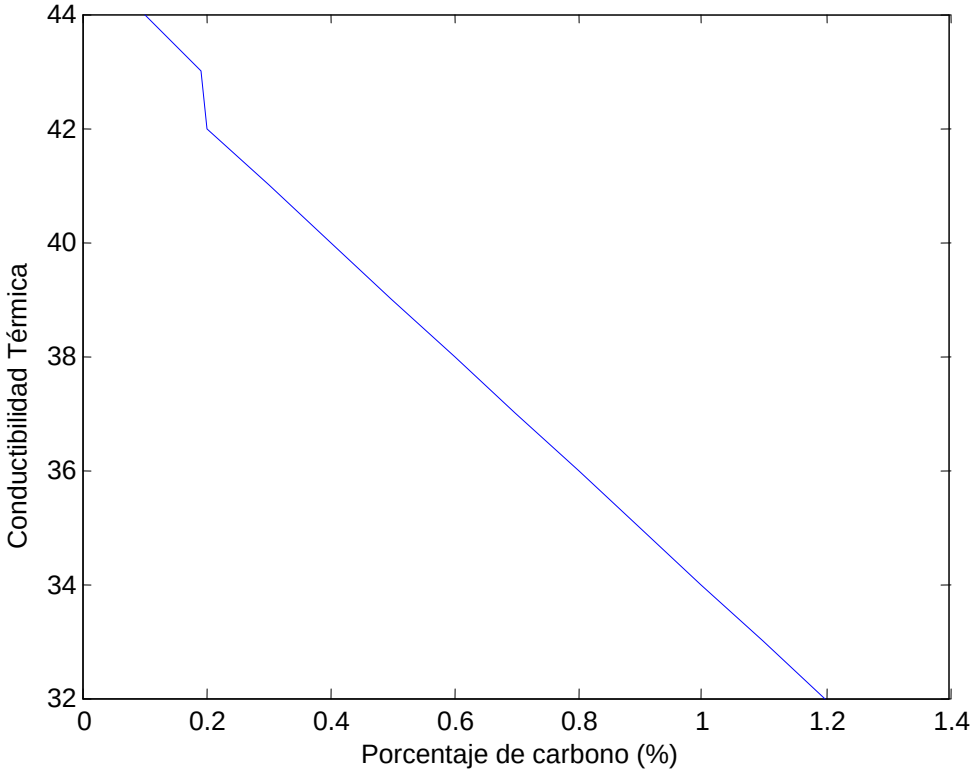


Gráfico 100. Cálculo de la conductibilidad. Región Antioquia. Falla Térmica. Fuente: M. Mago

- **Tipo de Falla: Descarga parcial. Causa: Sobretensión.**
  >> X=[0 0.069 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
  >> Y=[44 43 42 41 40 39 38 37 36 35 34 33 32 31];
  >> lsline(X,Y)
  ans = -10.4334
  >> sum(X) ans = 7.8690
  >> sum(Y) ans = 525
  >> G=(7.8690*(10.4344)+525)/14 = 43.3649
  >> y=-10.4334*(0.070)+43.3649
  y = 42.6346

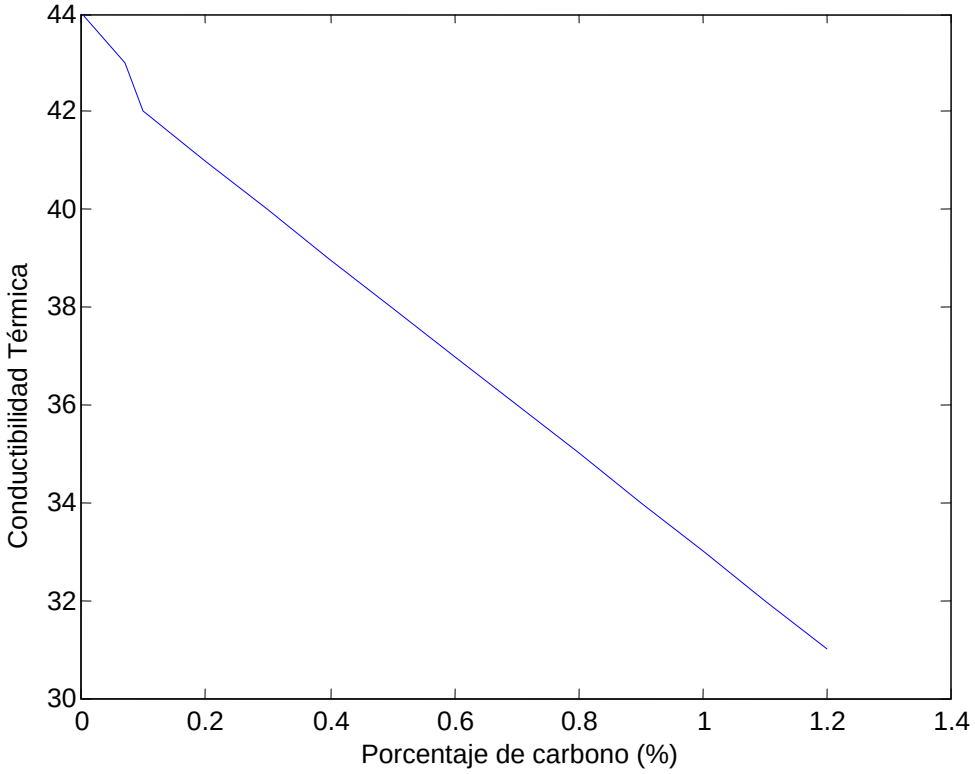


Gráfico 101. Cálculo de la conductibilidad. Región Antioquia. Falla Descarga Parcial.
Fuente: M. Mago

- **Tipo de Falla: Arco Eléctrico. Causa: Cortocircuito Externo.**
  >> X=[0 0.010 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
  >> Y=[44 43 42 41 40 39 38 37 36 35 34 33 32 31];
  >> lsline(X,Y)
  ans = -10.2858
  >> sum(X) ans = 7.8100
  >> sum(Y) ans = 525
  >> G=(7.8100*(10.2858)+525)/14 = 43.2380
  >> y=-10.2858*(0.0109)+43.2380
  y = 43.1259

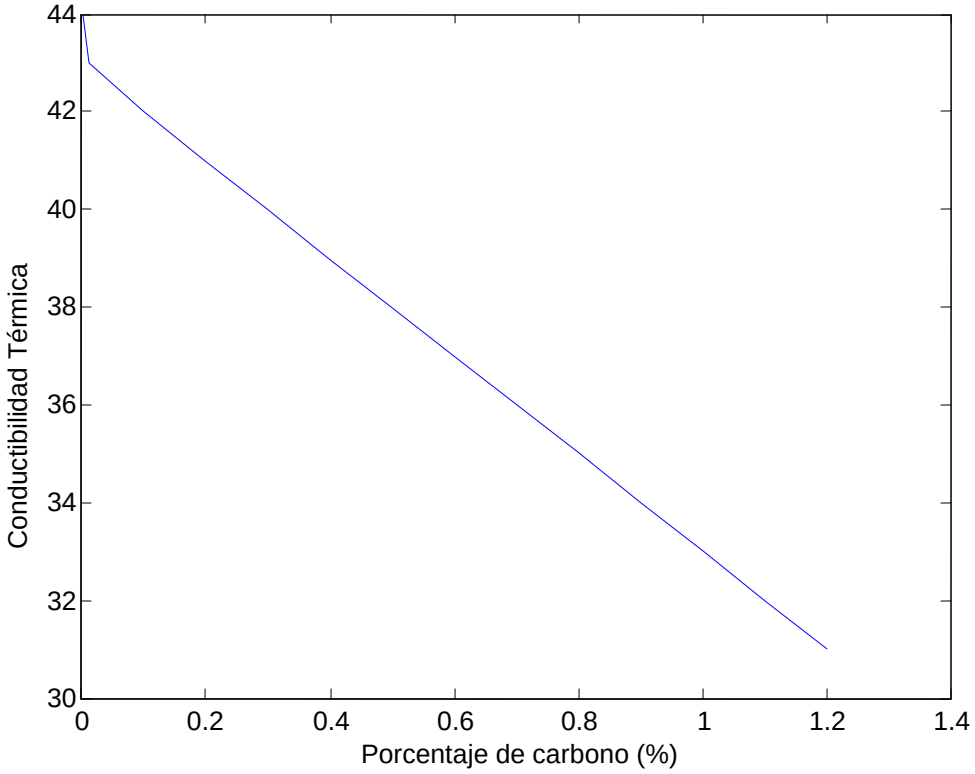


Gráfico 102. Cálculo de la conductibilidad. Región Antioquia. Falla Arco Eléctrico. Fuente: M. Mago

2. Región Caldas.

- **Tipo de Falla: Térmica. Causa: Sobrecarga.**
  >> X=[0 0.067 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
  >> Y=[44 43 42 41 40 39 38 37 36 35 34 33 32 31];
  >> lsline(X,Y)
  ans = -10.4288
  >> sum(X) ans = 7.8670
  >> sum(Y) ans = 525
  >> G=(7.8670*(10.4288)+525)/14 = 43.3602
  >> y=-10.4288*(0.070)+43.3602
  y = 42.6302

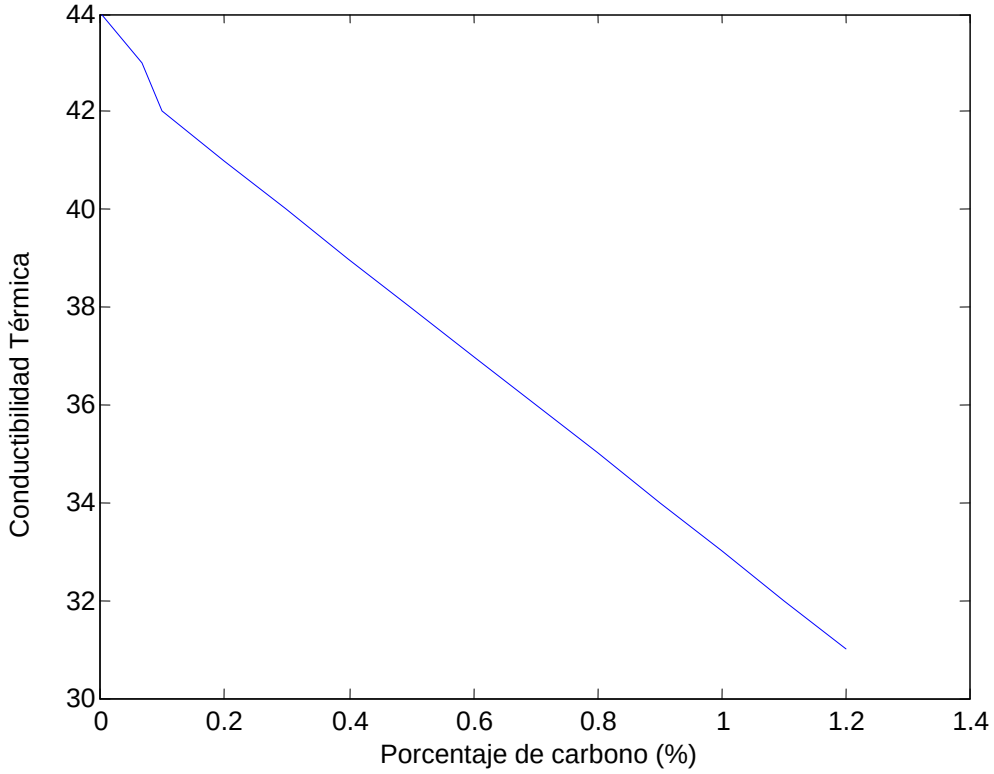


Gráfico 103. Cálculo de la conductibilidad. Región Caldas. Falla Térmica. Fuente: M. Mago

- **Tipo de Falla: Arco Eléctrico. Causa: Cortocircuito Externo.**
  >> X=[0 0.040 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
  >> Y=[44 43 42 41 40 39 38 37 36 35 34 33 32 31];
  >> lsline(X,Y)
  ans = -10.3638
  >> sum(X) ans = 7.8400
  >> sum(Y) ans = 525
  >> G=(7.8400*(10.3638)+525)/14 = 43.3037
  >> y=-10.3668*(0.050)+43.3037
  y = 42.7854

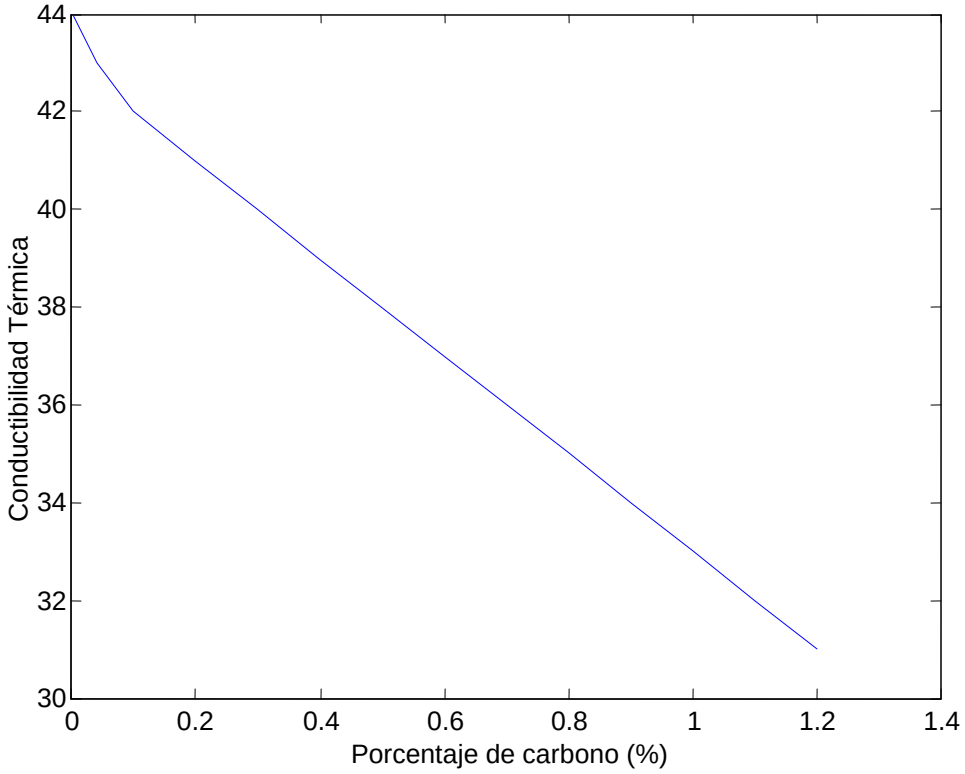


Gráfico 104. Cálculo de la conductibilidad. Región Caldas. Falla Arco Eléctrico. Fuente: M. Mago

- **Tipo de Falla: Arco Eléctrico/Térmica. Causa: Sobrecarga.**
  >> X=[0 0.019 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
  >> Y=[44 43 42 41 40 39 38 37 36 35 34 33 32 31];
  >> lsline(X,Y)
  ans = -10.3098
  >> sum(X) ans = 7.8190
  >> sum(Y) ans = 525
  >> G=((7.8190*10.3098)+525)/14 = 43.2580
  >> y=-10.3098*(0.1)+43.2580
  y = 42.2270
  >> y=-10.3098*(0.018)+43.2580
  y = 43.0724

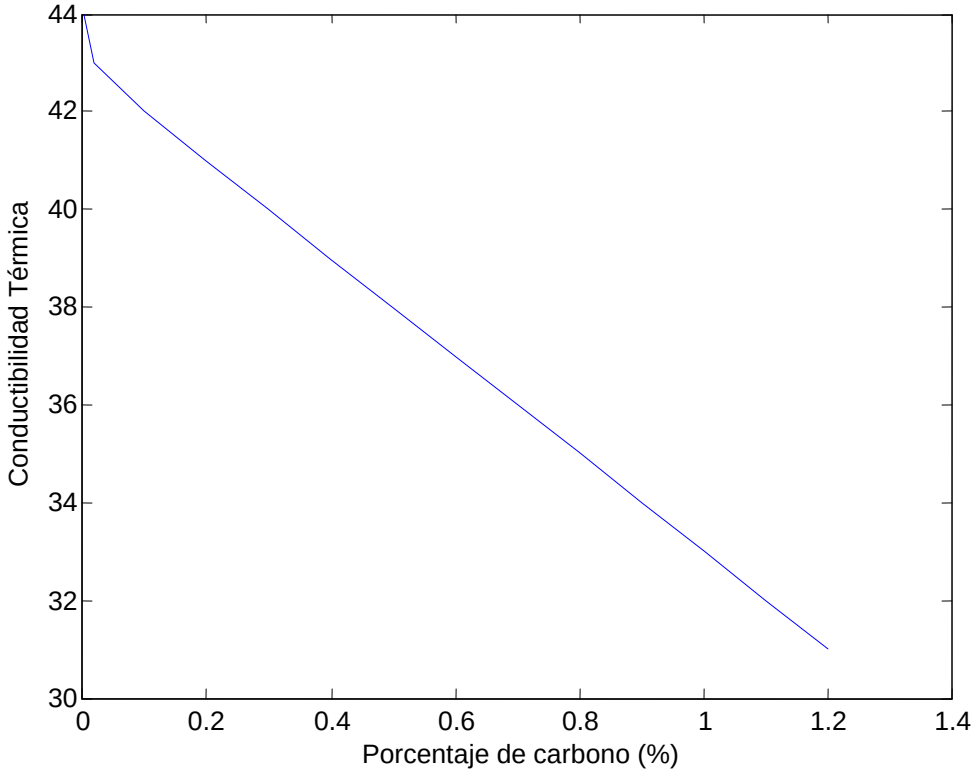


Gráfico 105. Cálculo de la conductibilidad. Región Caldas. Falla Arco Eléctrico/Térmica.
Fuente: M. Mago

- **Tipo de Falla: Descarga parcial. Causa: Defecto de Fabricación/Humedad.**
  >> X=[0 0.014 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
  >> Y=[44 43 42 41 40 39 38 37 36 35 34 33 32 31];
  >> lsline(X,Y)
  ans = -10.2966
  >> sum(X) ans = 7.8140
  >> sum(Y) ans = 525
  >> G=((7.8140*10.2966)+525)/14 = 43.2470
  >> y=-10.2966*(0.018)+43.2470
  y = 43.0617

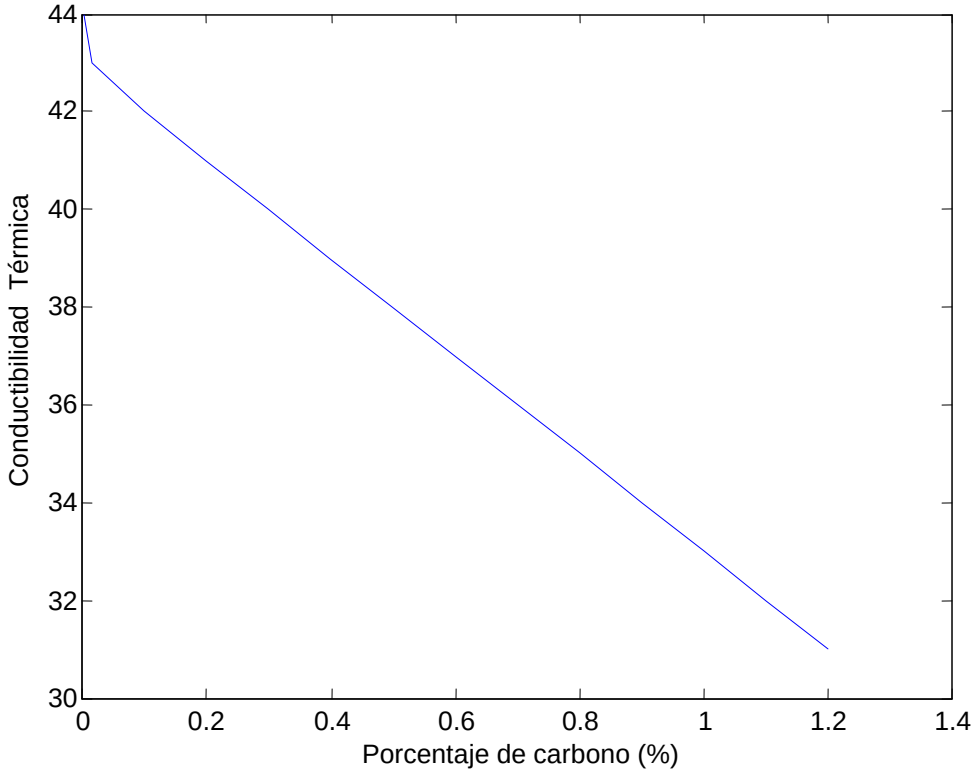


Gráfico 106. Cálculo de la conductibilidad. Región Caldas. Falla Descarga Parcial. Fuente: M. Mago

3. Región Pacífico.

- **Tipo de Falla: Térmica/Arco Eléctrico. Causa: Sobrecarga.**
  >> X=[0 0.1 0.131 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
  >> Y=[44 43 42 41 40 39 38 37 36 35 34 33 32 31];
  >> lsline(X,Y)
  ans = -10.5770
  >> sum(X) ans = 7.9310
  >> sum(Y) ans = 525
  >> G=((7.9310*10.5770)+525)/14 = 43.4919
  >> y=-10.5770*(0.150)+43.4919
  y = 41.9053

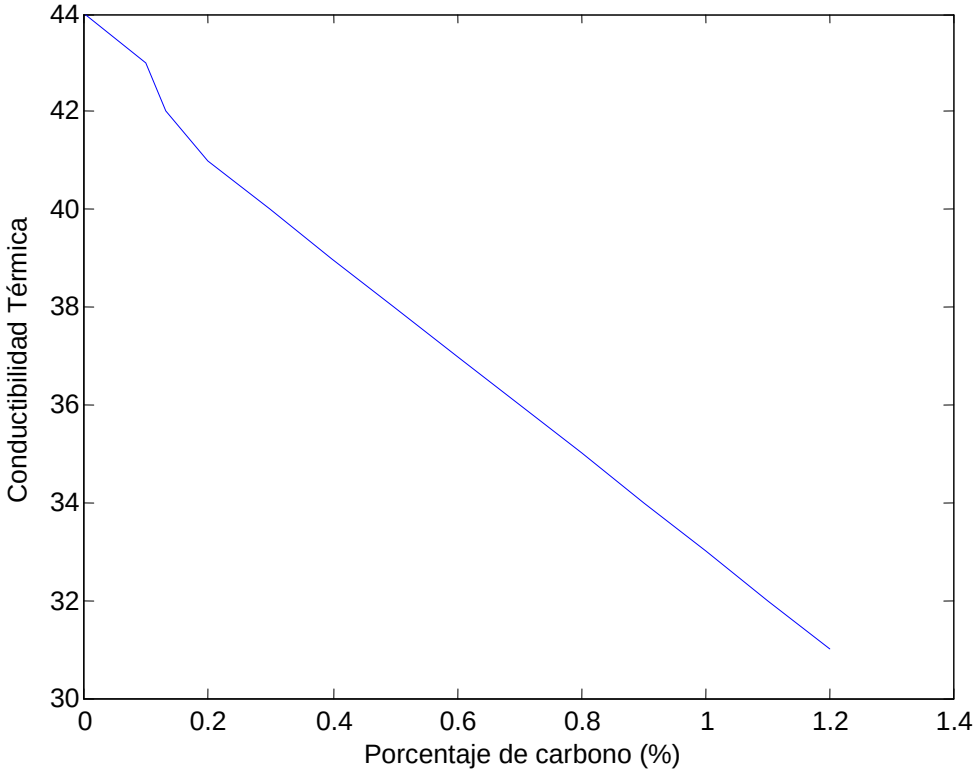


Gráfico 107. Cálculo de la conductibilidad. Región Pacífico. Falla Térmica. Fuente: M. Mago

- **Tipo de Falla: Arco Eléctrico. Causa: Cortocircuito Externo.**
  >> X=[0 0.002 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
  >> Y=[44 43 42 41 40 39 38 37 36 35 34 33 32 31];
  >> lsline(X,Y)
  ans = -10.2641
  >> sum(X) ans = 7.8020
  >> sum(Y) ans = 525
  >> G=((7.8020*10.2641)+525)/14 = 43.2200
  >> y=-10.2641*(0.007)+43.2200
  y =43.1482

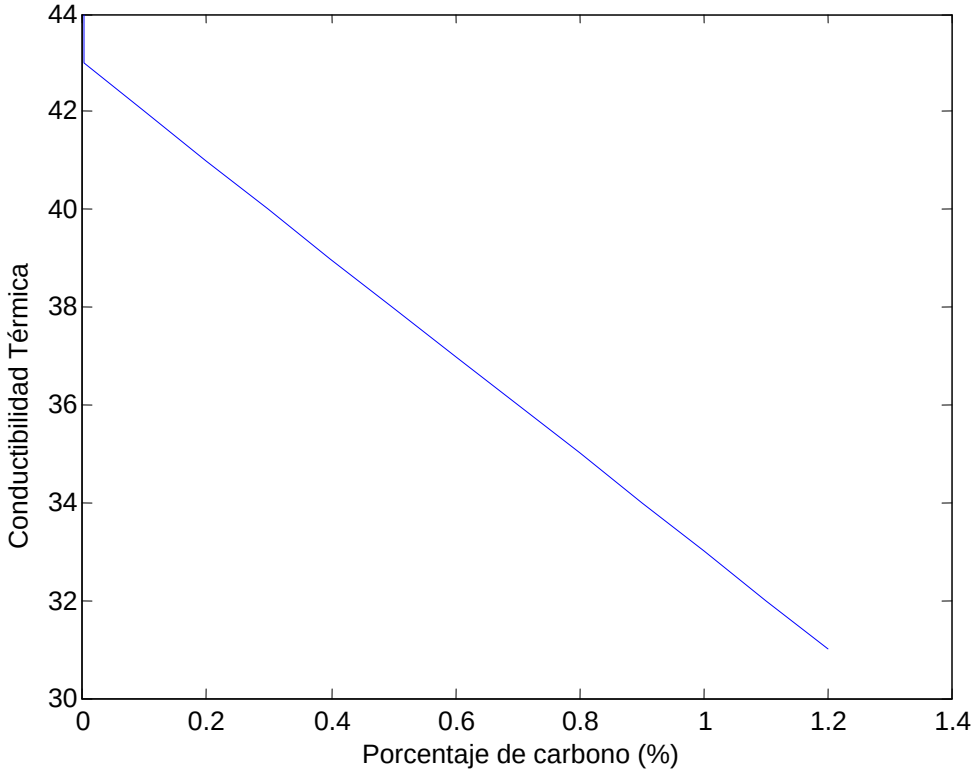


Gráfico 108. Cálculo de la conductibilidad. Región Pacífico. Falla Arco Eléctrico. Fuente: M. Mago

- **Tipo de Falla: Descarga parcial. Causa: Sobretensión.**
  >> X=[0 0.033 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
  >> Y=[44 43 42 41 40 39 38 37 36 35 34 33 32 31];
  >> lsline(X,Y)
  ans = -10.3461
  >> sum(X) ans = 7.8330
  >> sum(Y) ans = 525
  >> G=((7.8330*10.3461)+525)/14 = 43.2886
  >> y=-10.3461*(0.050)+43.2886
  y = 42.7713

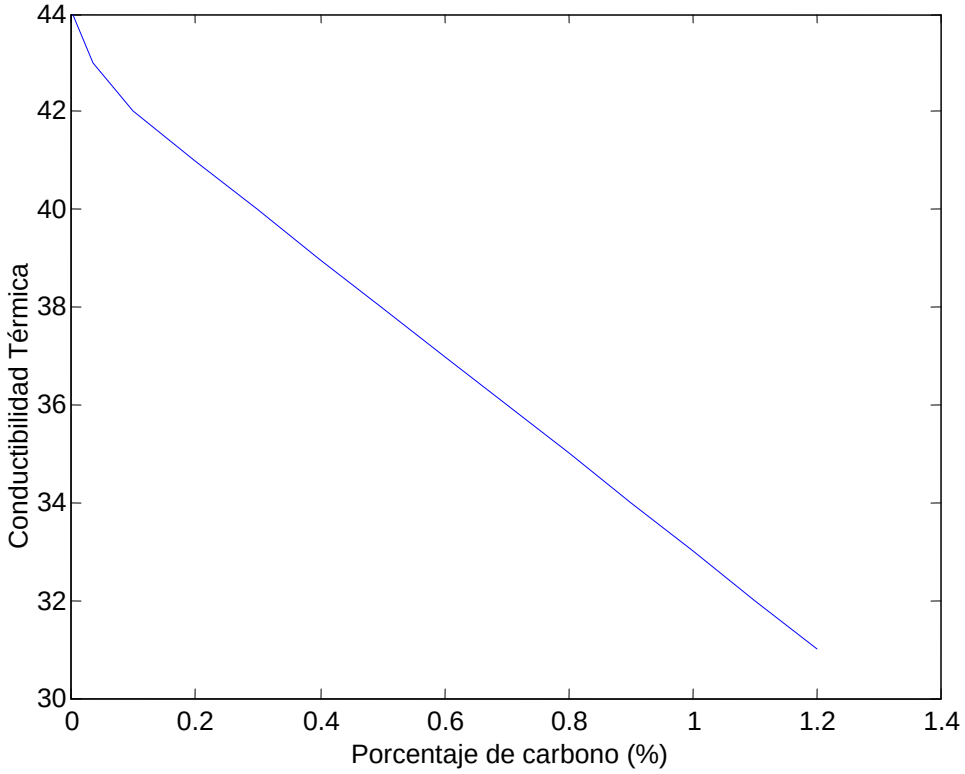


Gráfico 109. Cálculo de la conductibilidad. Región Pacífico. Falla Descarga Parcial.
Fuente: M. Mago

4. Región Cundinamarca.

- **Tipo de Falla: Térmica. Causa: Sobrecarga.**
  >> X=[0 0.031 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
  >> Y=[44 43 42 41 40 39 38 37 36 35 34 33 32 31];
  >> lsline(X,Y)
  ans = -10.3410
  >> sum(X) ans = 7.8310
  >> sum(Y) ans = 525
  >> G=((7.8310*10.3410)+525)/14 = 43.2843
  >> y=-10.3410*(0.040)+43.2843
  y = 42.8707

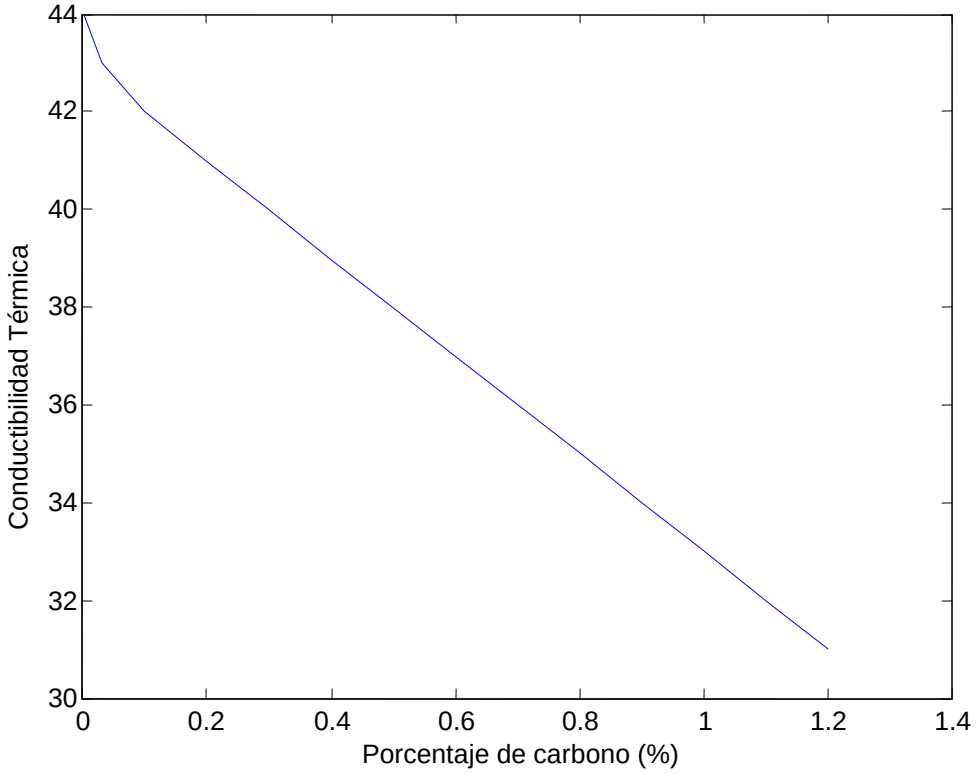


Gráfico 110. Cálculo de la conductibilidad. Región Cundinamarca. Falla Térmica. Fuente: M. Mago

5. Región Bogotá.

- **Tipo de Falla: Arco Eléctrico/Térmica. Causa: Sobrecarga.**
  >> X=[0 0.1 0.105 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
  >> Y=[44 43 42 41 40 39 38 37 36 35 34 33 32 31];
  >> lsline(X,Y)
  ans = -10.5139
  >> sum(X) ans = 7.9050
  >> sum(Y) ans = 525
  >> G=((7.9050*10.5139)+525)/14 = 43.4366
  >> y=-10.5139*(0.109)+43.4366
  y = 42.2906

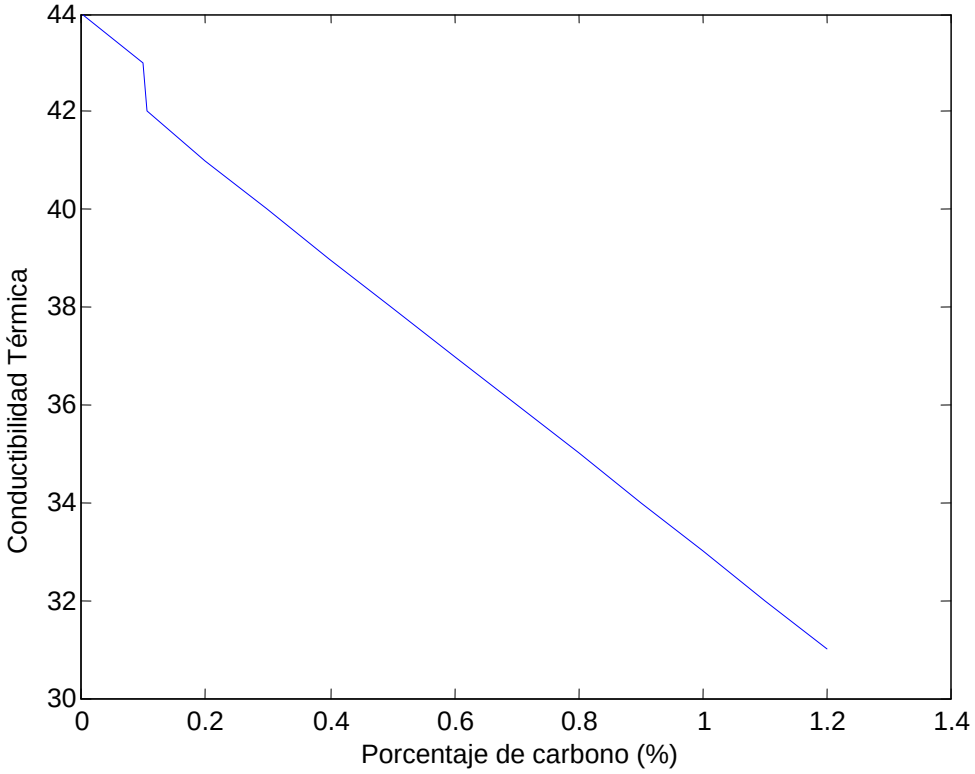


Gráfico 111. Cálculo de la conductibilidad. Región Bogotá. Falla Arco Eléctrico/Térmica.
Fuente: M. Mago

- **Tipo de Falla: Arco Eléctrico. Causa: Sobretensión.**
  >> X=[0 0.093 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
  >> Y=[44 43 42 41 40 39 38 37 36 35 34 33 32 31];
  >> lsline(X,Y)
  ans = -10.4865
  >> sum(X) ans = 7.8930
  >> sum(Y) ans = 525
  >> G=((7.8930*10.4865)+525)/14 = 43.4121
  >> y=-10.4865*(0.098)+43.4121
  y = 42.3844

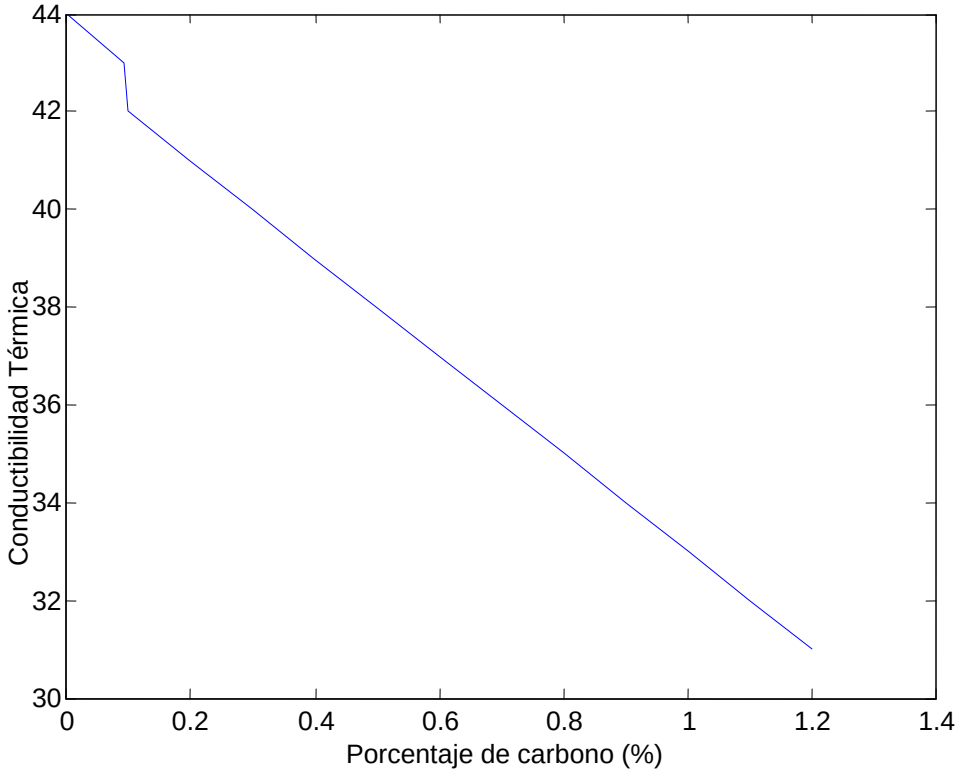


Gráfico 112. Cálculo de la conductibilidad. Región Bogotá. Falla Arco Eléctrico. Fuente: M. Mago

- **Tipo de Falla: Descarga parcial. Causa: Sobretensión.**
  >> X=[0.1 0.101 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
  >> Y=[44 42 41 40 39 38 37 36 35 34 33 32 31];
  >> lsline(X,Y)
  ans = -10.5975
  >> sum(X) ans = 7.9010
  >> sum(Y) ans = 482
  >> G=((7.9010*10.5975)+482)/13 = 43.5178
  >> y=-10.5975*(0.109)+43.5178
  y = 42.3627

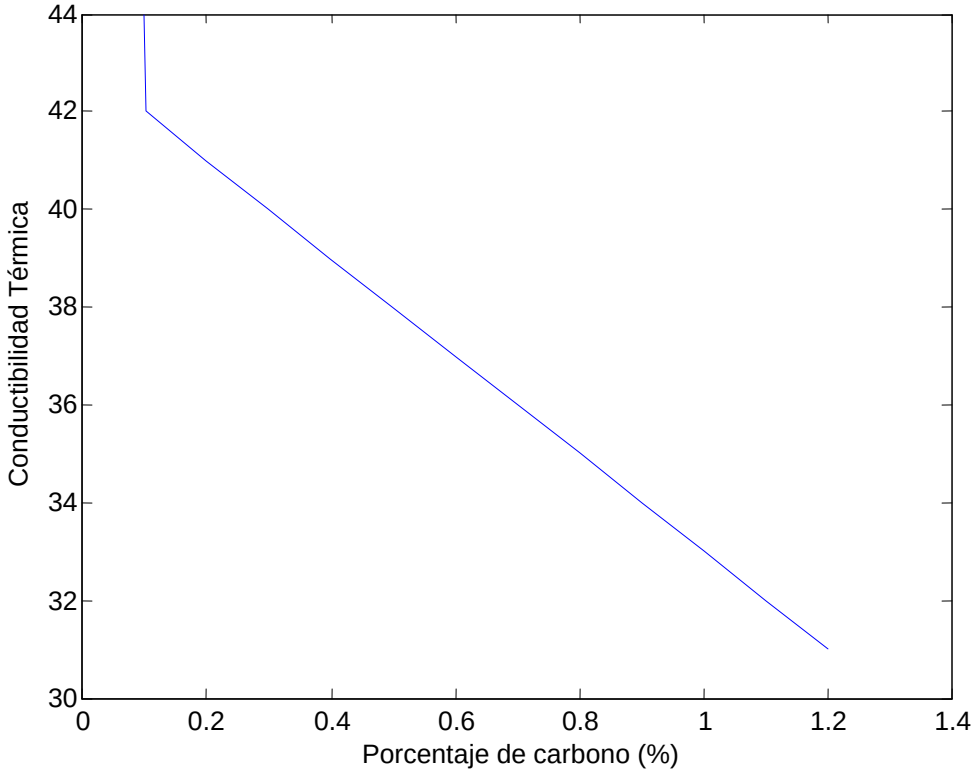


Gráfico 113. Cálculo de la conductibilidad. Región Bogotá. Falla Descarga Parcial. Fuente: M. Mago

- **Tipo de Falla: Térmica. Causa: Sobrecarga.**
  >> X=[0.1 0.1735 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
  >> Y=[44 42 41 40 39 38 37 36 35 34 33 32 31];
  >> lsline(X,Y)
  ans = -10.8234
  >> sum(X) ans = 7.9735
  >> sum(Y) ans = 482
  >> G=((7.9735*10.8234)+482)/13 = 43.7154
  >> y=-10.8234*(0.18)+43.7154
  y = 41.7672

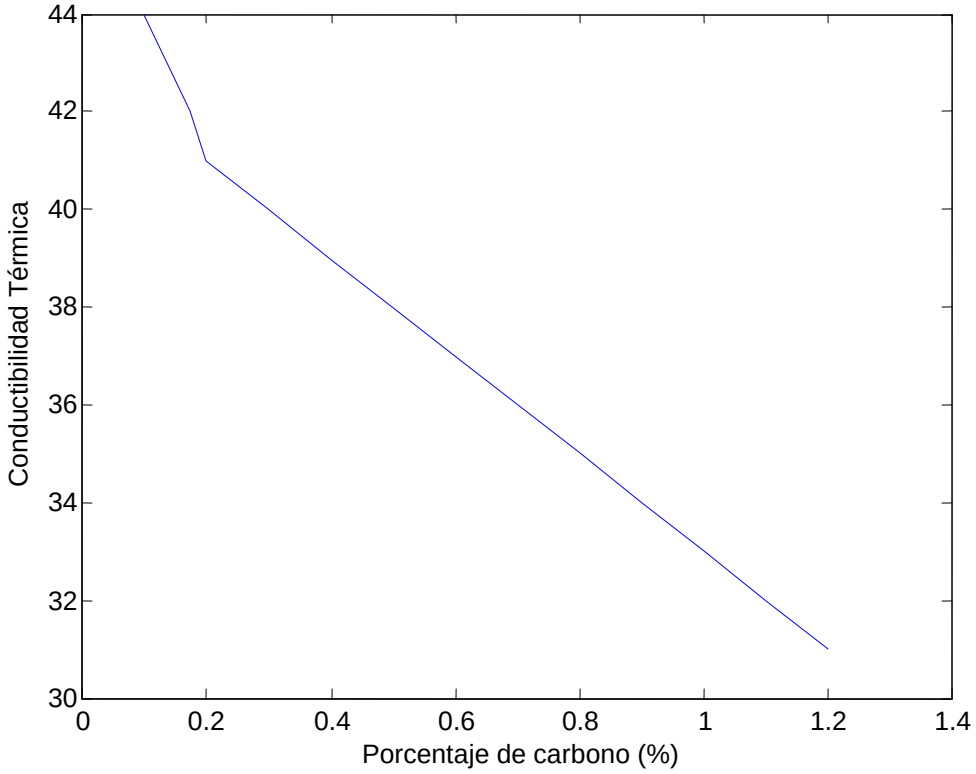


Gráfico 114. Cálculo de la conductibilidad. Región Bogotá. Falla Térmica. Fuente: M. Mago

6. **Patrón de referencia. Equipo nuevo.**

>> X=[0 0.033 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
>> Y=[44 43 42 41 40 39 38 37 36 35 34 33 32 31];
>> lsline(X,Y)
ans = -10.3461
>> sum(X) ans = 7.8330
>> sum(Y) ans = 525
>> G=((7.8330*10.3461)+525)/14 = 43.2886
>> y=-10.3461*(0.050)+43.2886
y = 42.7713

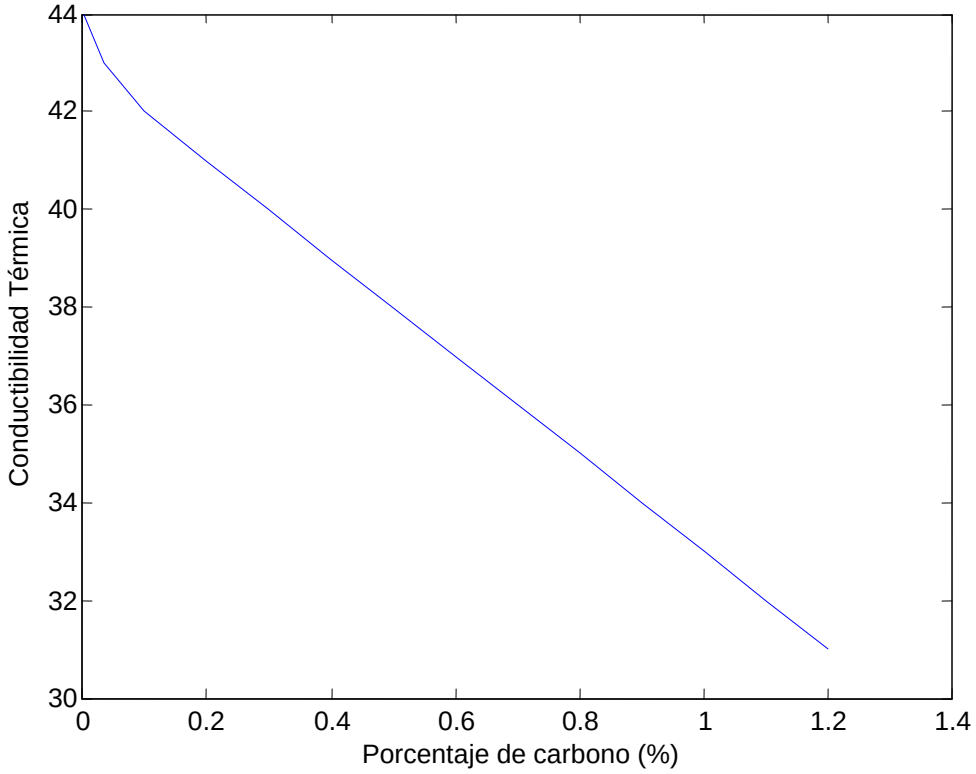


Gráfico 115. Cálculo de la conductibilidad. Muestra Patrón.
Fuente: M. Mago

3.2.5.3 Contenido de Carbono (%) versus Saturación Magnética.

1. **Región Antioquia.**
   - **Tipo de Falla: Térmica. Causa: Sobrecarga.**

```
>> X=[0 0.1 0.191 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
>> Y=[2000 1900 1850 1800 1700 1600 1450 1300 1100 900 700 500 300 0];
>> lsline(X,Y)

ans =  -1.6463e+003
>> sum(X) ans =  7.9910
>> sum(Y) ans = 17100
>> G=((-7.9910*-1.6463e+003)+17100)/(14) =  2.1611e+003
>> y=(-1.6463e+003*(0.193))+2.1611e+003  = 1.8434e+003
```

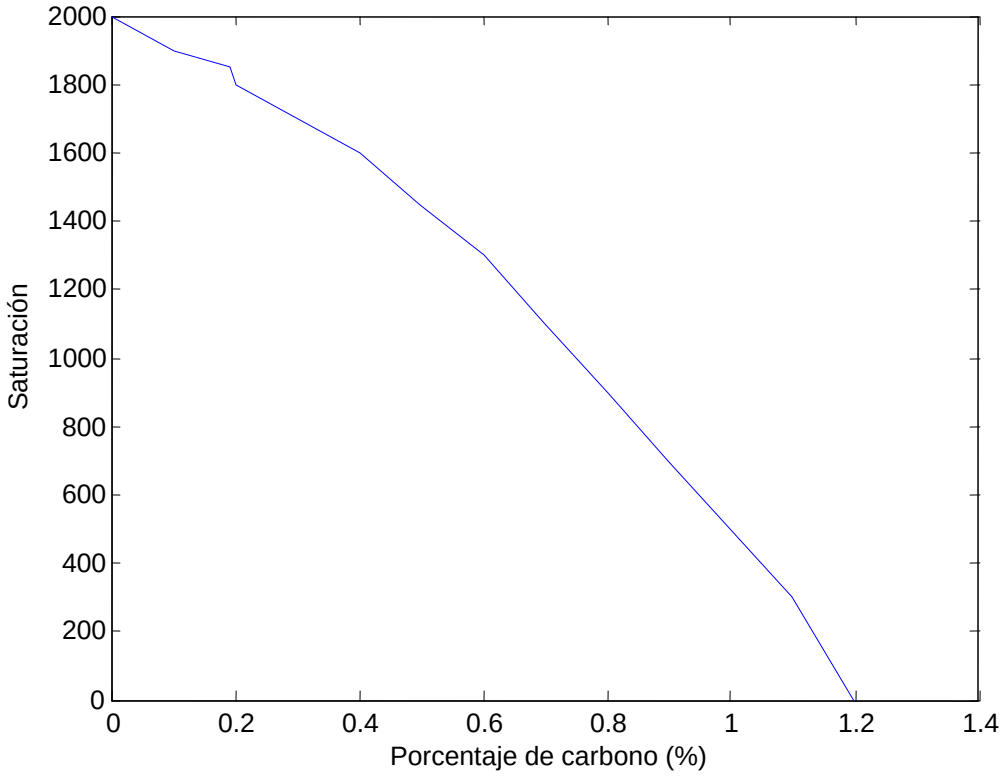


Gráfico 116. Cálculo de la saturación magnética. Región Antioquia. Falla Térmica. Fuente: M. Mago

- **Tipo de Falla: Descarga parcial. Causa: Sobretensión.**
  >> X=[0 0.059 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
  >> Y=[2000 1900 1850 1800 1700 1600 1450 1300 1100 900 700 500 300 0];
  >> lsline(X,Y)

  ans = -1.5953e+003
  >> sum(X) = 7.8590
  >> sum(Y) = 17100
  >> G=((-7.8590*-1.5953e+003)+17100)/(14) = 2.1170e+003
  >> y =(-1.5953e+003*0.069)+2.1170e+003 = 2.0069e+003

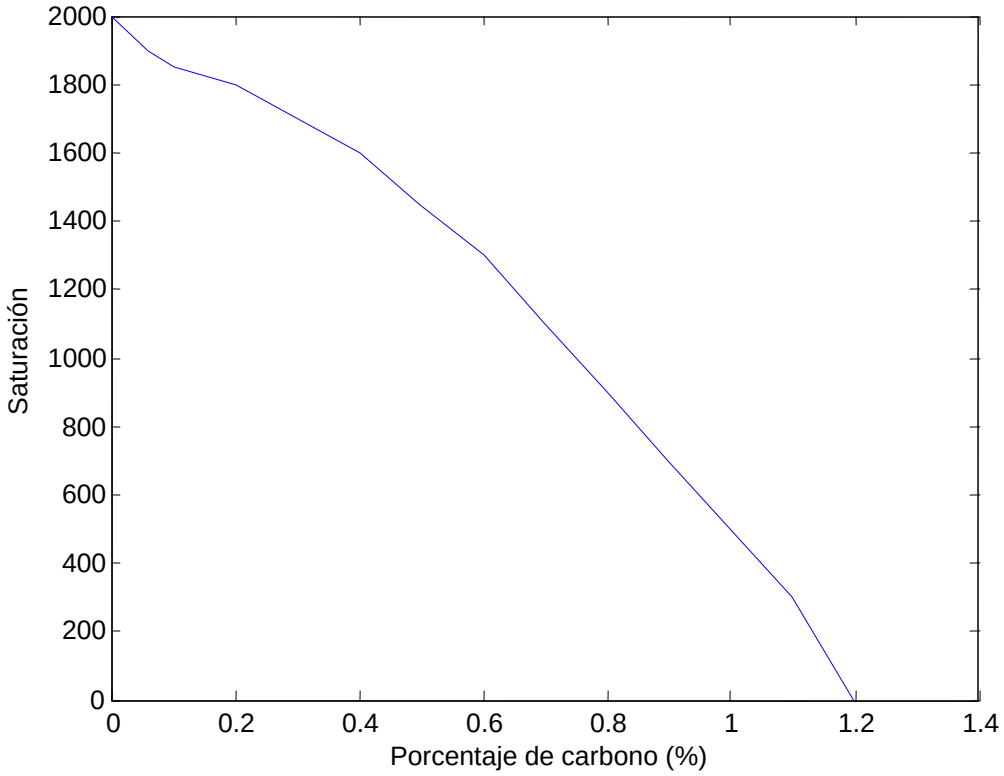


Gráfico 117. Cálculo de la saturación magnética. Región Antioquia. Falla Descarga Parcial.
Fuente: M. Mago

- **Tipo de Falla: Arco eléctrico. Causa: Cortocircuito externo.**
  >> X=[0 0.009 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
  >> Y=[2000 1900 1850 1800 1700 1600 1450 1300 1100 900 700 500 300 0];
  >> lsline(X,Y)

  ans = -1.5721e+003
  >> sum(X) = 7.8090
  >> sum(Y) = 17100
  >> G=((-7.8090*-1.5721e+003)+17100)/14 = 2.0983e+003
  >> y=(-1.5721e+003*0.010)+2.0983e+003 = 2.0826e+003

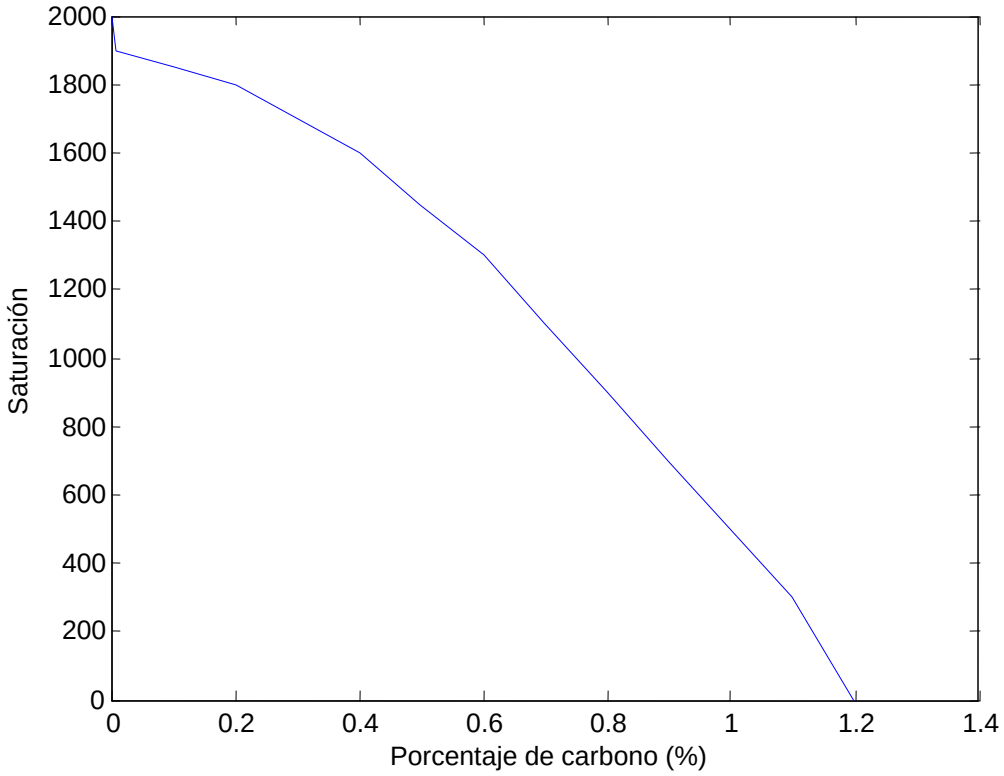


Gráfico 118. Cálculo de la saturación magnética. Región Antioquia. Falla Arco Eléctrico.
Fuente: M. Mago

2. **Región Caldas.**
   - **Tipo de Falla: Térmica. Causa: Sobrecarga.**

>> X=[0 0.050 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
>> Y=[2000 1900 1850 1800 1700 1600 1450 1300 1100 900 700 500 300 0];
>> lsline(X,Y)

ans = -1.5913e+003
>> sum(X) = 7.8500
>> sum(Y) = 17100
>> G=((-7.8500*-1.5913e+003)+17100)/14 = 2.1137e+003
>> y=(-1.5913e+003*0.067)+2.1137e+003 = 2.0071e+003

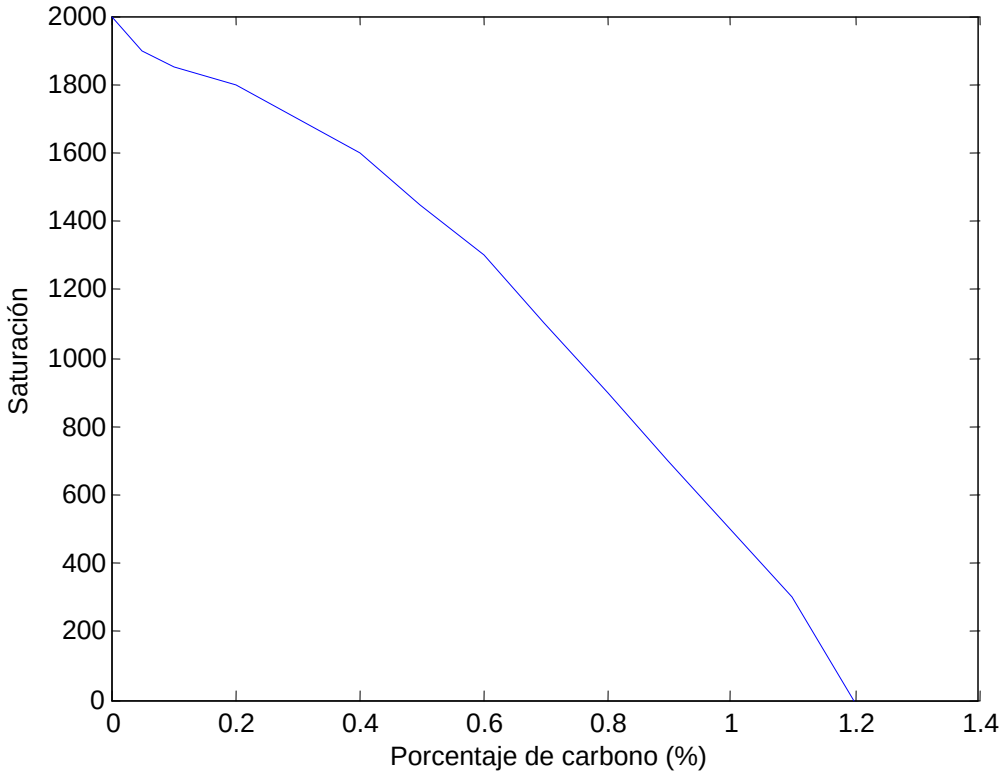


Gráfico 119. Cálculo de la saturación magnética. Región Caldas. Falla Térmica. Fuente: M. Mago

- **Tipo de Falla: Arco eléctrico. Causa: Cortocircuito Externo.**
  >> X=[0 0.030 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
  >> Y=[2000 1900 1850 1800 1700 1600 1450 1300 1100 900 700 500 300 0];
  >> lsline(X,Y)

  ans = -1.5821e+003
  >> sum(X) = 7.8300
  >> sum(Y) = 17100
  >> G=((-7.8300*-1.5821e+003)+17100)/14 = 2.1063e+003
  >> y=(-1.5821e+003*0.040)+2.1063e+003 = 2.0430e+003

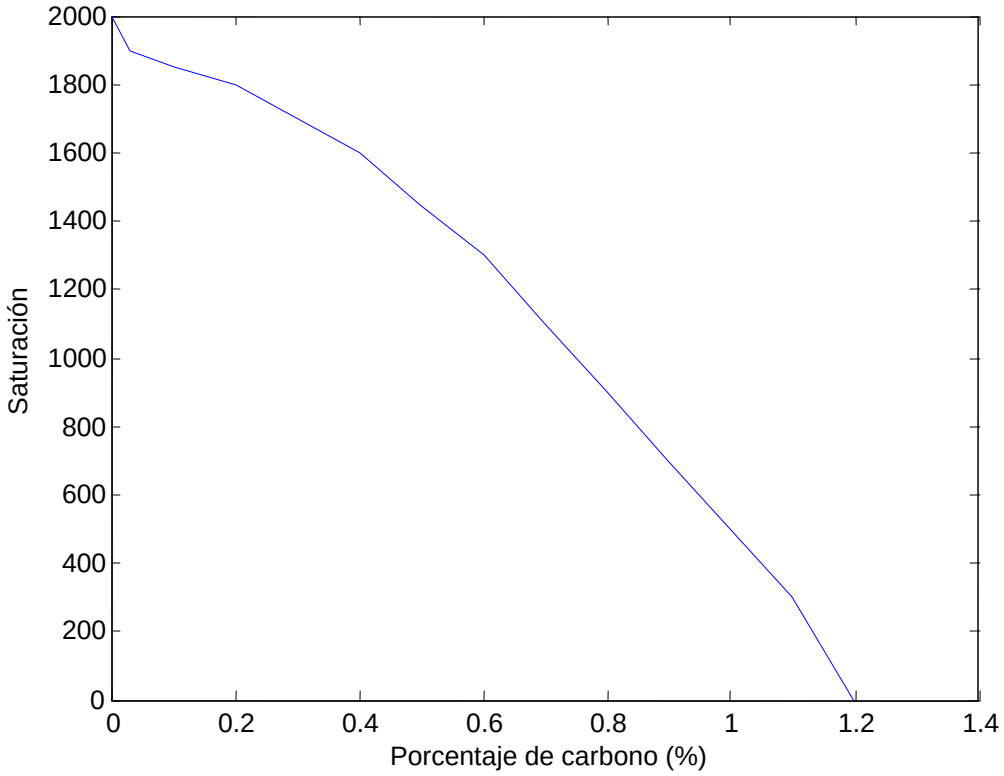


Gráfico 120. Cálculo de la saturación magnética. Región Caldas. Falla Arco Eléctrico.
Fuente: M. Mago

- **Tipo de Falla. Arco eléctrico/térmica. Causa. Sobrecarga.**

  >> X=[0 0.015 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
  >> Y=[2000 1900 1850 1800 1700 1600 1450 1300 1100 900 700 500 300 0];
  >> lsline(X,Y)

  ans = -1.5750e+003
  >> sum(X) ans = 7.8150
  >> sum(Y) ans = 17100
  >> G=((-7.8150*-1.5750e+003)+17100)/14 = 2.1006e+003
  >> y=(-1.5750e+003*0.019)+2.1006e+003 = 2.0707e+003

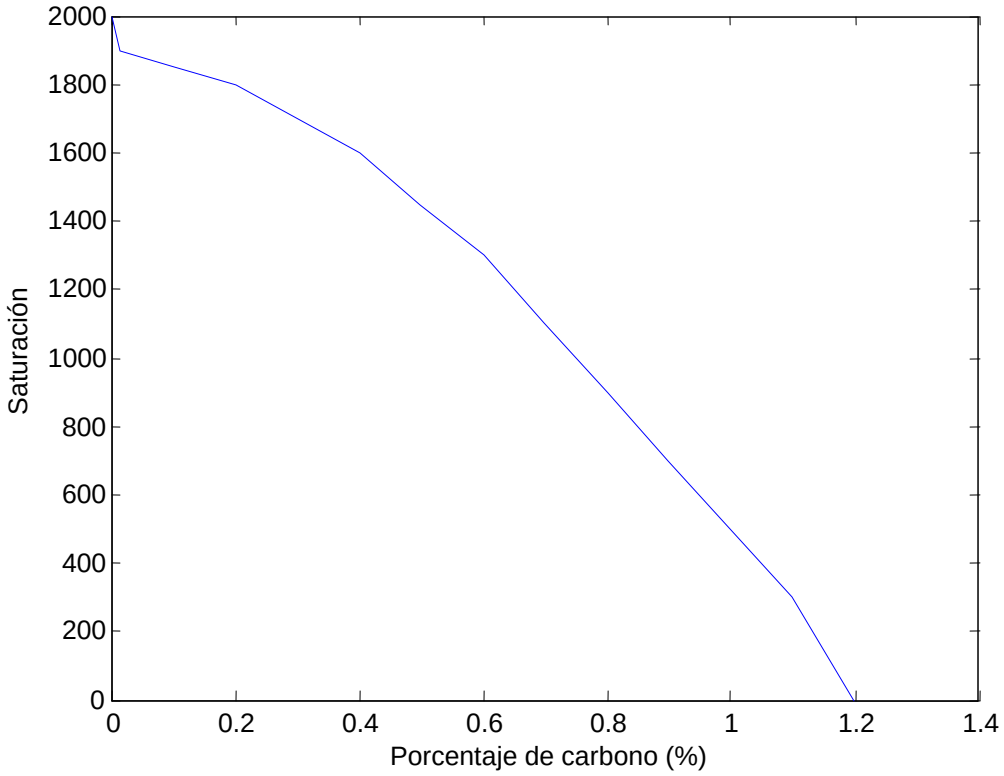


Gráfico 121. Cálculo de la saturación magnética. Región Caldas. Falla Arco Eléctrico/Térmica.
Fuente: M. Mago

- **Tipo de Falla: Descarga parcial. Causa: Defecto de fabricación/Humedad.**

  >> X=[0 0.010 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
  >> Y=[2000 1900 1850 1800 1700 1600 1450 1300 1100 900 700 500 300 0];
  >> lsline(X,Y)

  ans = -1.5726e+003
  >> sum(X) ans = 7.8100
  >> sum(Y) ans = 17100
  >> G=((-7.8100*-1.5726e+003)+17100)/14 = 2.0987e+003
  >> y=(-1.5726e+003*0.014)+2.0987e+003 = 2.0767e+003

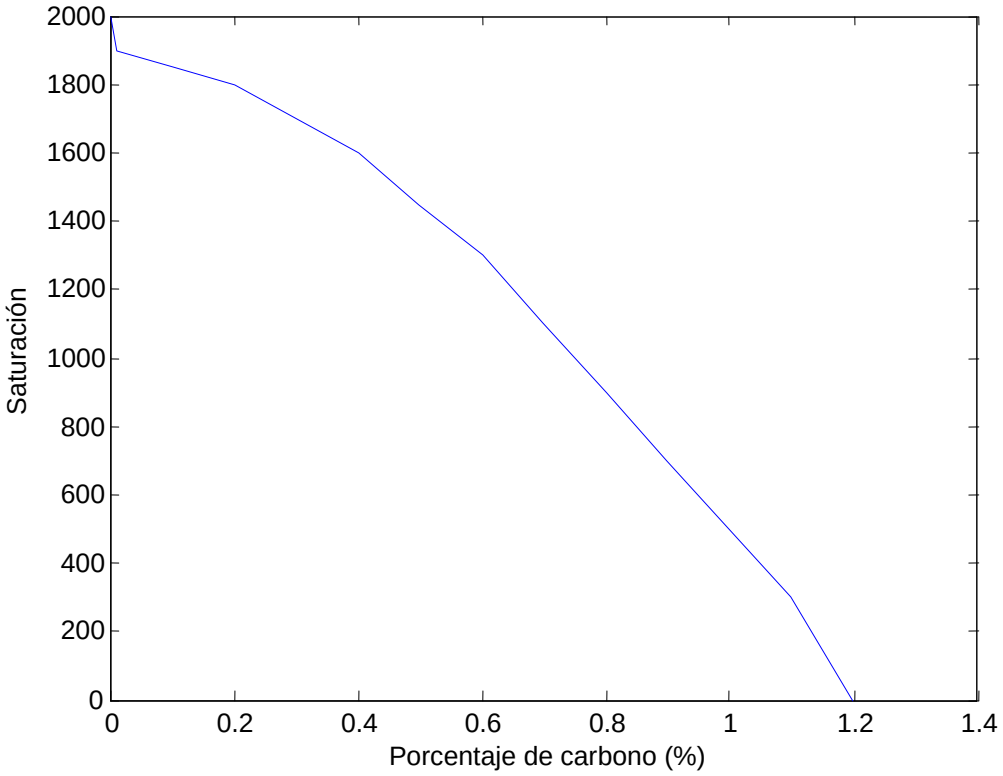


Gráfico 122. Cálculo de la saturación magnética. Región Caldas. Falla Descarga Parcial.
Fuente: M. Mago

3. **Región Pacifico.**
   - **Tipo de Falla: Térmica/Arco eléctrico. Causa: Sobrecarga.**

     >> X=[0 0.1 0.12 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
     >> Y=[2000 1900 1850 1800 1700 1600 1450 1300 1100 900 700 500 300 0];
     >> lsline(X,Y)

     ans = -1.6208e+003
     >> sum(X) ans = 7.9200
     >> sum(Y) ans = 17100
     >> G=((-7.9200*-1.6208e+003)+17100)/14 = 2.1383e+003
     >> y=(-1.6208e+003*0.131)+2.1383e+003 = 1.9260e+003

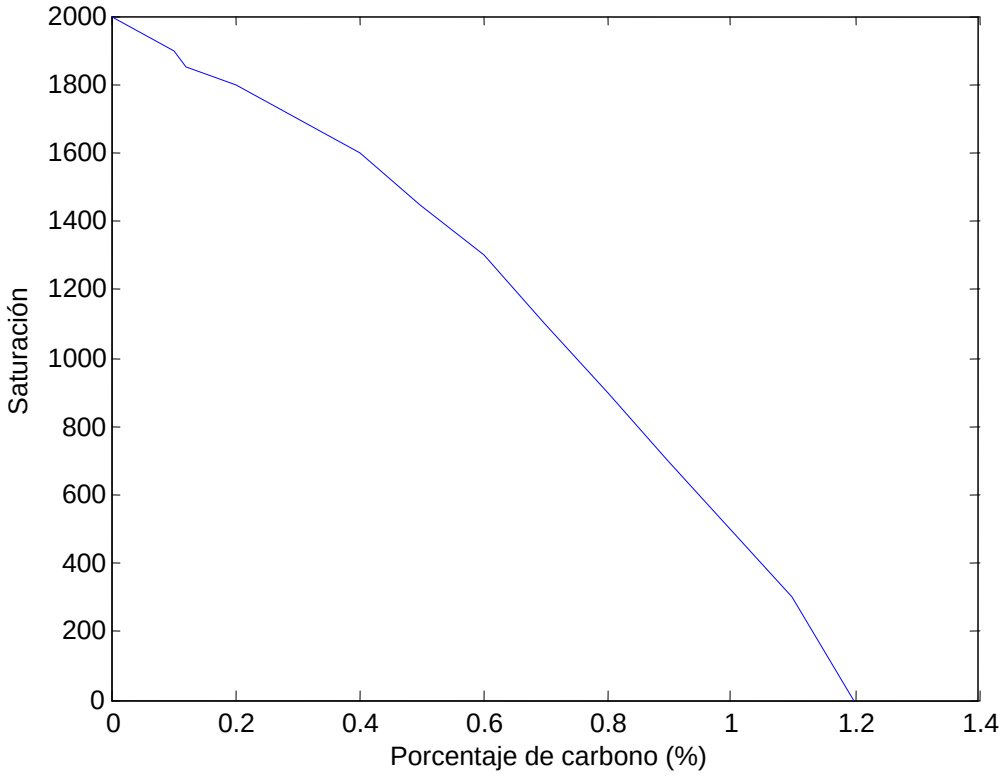


Gráfico 123. Cálculo de la saturación magnética. Región Pacífico. Falla Térmica/Arco Eléctrico.
Fuente: M. Mago

- **Tipo de Falla: Arco eléctrico. Causa: Cortocircuito externo.**
  >> X=[0 0.001 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
  >> Y=[2000 1900 1850 1800 1700 1600 1450 1300 1100 900 700 500 300 0];
  >> lsline(X,Y)

  ans = -1.5681e+003
  >> sum(X) ans = 7.8010
  >> sum(Y) ans = 17100
  >> G=((-7.8010*-1.5681e+003)+17100)/14 = 2.0952e+003
  >> y=(-1.5681e+003*0.002)+2.0952e+003 = 2.0921e+003

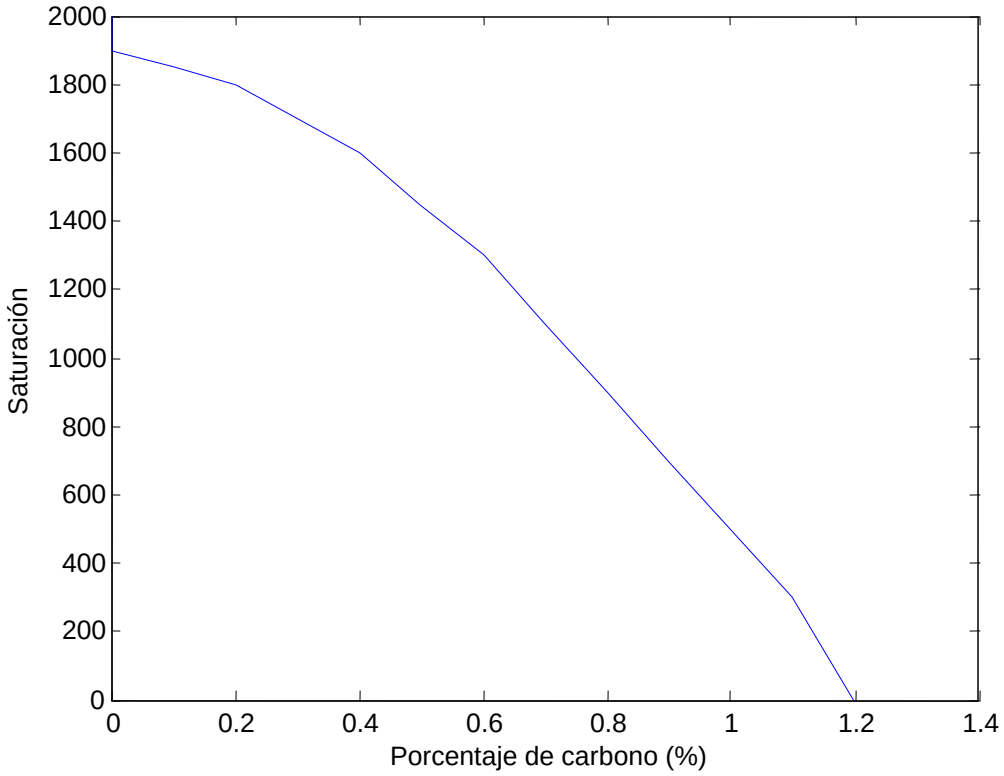


Gráfico 124. Cálculo de la saturación magnética. Región Pacífico. Falla Arco Eléctrico.
Fuente: M. Mago

- **Tipo de Falla: Descarga parcial. Causa: Sobretensión.**
  >> X=[0 0.020 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
  >> Y=[2000 1900 1850 1800 1700 1600 1450 1300 1100 900 700 500 300 0];
  >> lsline(X,Y)

  ans = -1.5774e+003
  >> sum(X) ans = 7.8200
  >> sum(Y) ans = 17100
  >> G=((-7.8200*-1.5774e+003)+17100)/14 = 2.1025e+003
  >> y=(-1.5774e+003*0.033)+2.1025e+003 = 2.0504e+003

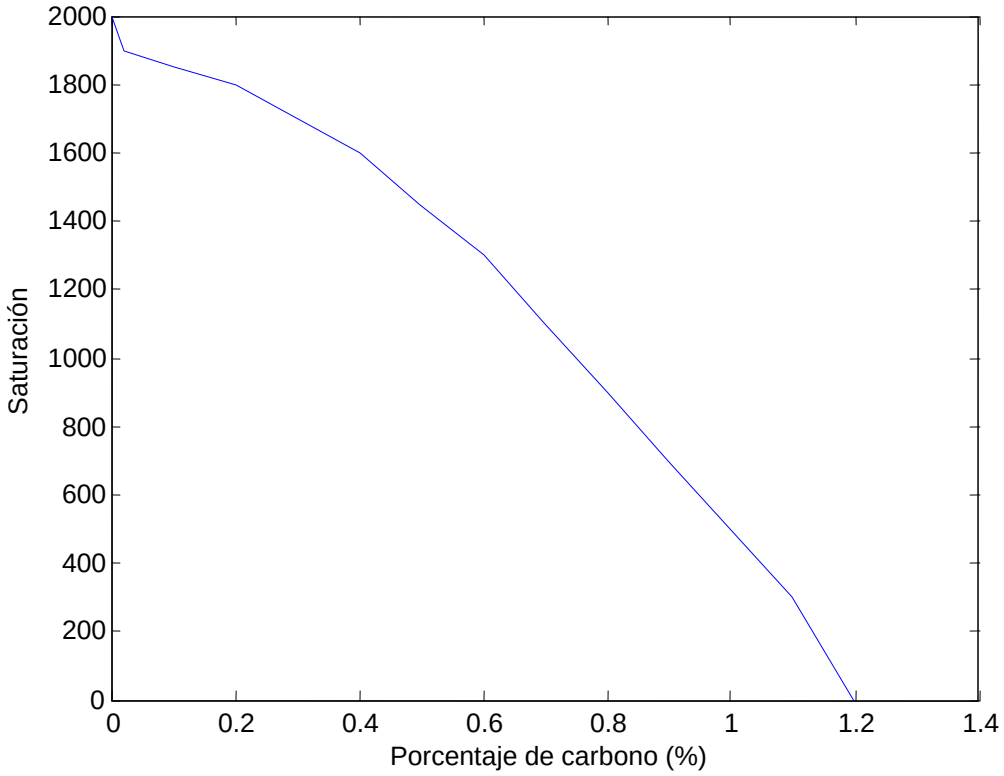


Gráfico 125. Cálculo de la saturación magnética. Región Pacífico. Falla Descarga Parcial.
Fuente: M. Mago

4. **Cundinamarca.**
   - **Tipo de Falla: Térmica. Causa: Sobrecarga.**

     >> X=[0 0.020 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
     >> Y=[2000 1900 1850 1800 1700 1600 1450 1300 1100 900 700 500 300 0];
     >> lsline(X,Y)

     ans = -1.5774e+003
     >> sum(X) ans = 7.8200
     >> sum(Y) ans = 17100
     >> G=((-7.8200*-1.5774e+003)+17100)/14 = 2.1025e+003
     >> y=(-1.5774e+003*0.031)+2.1025e+003 = 2.0536e+003

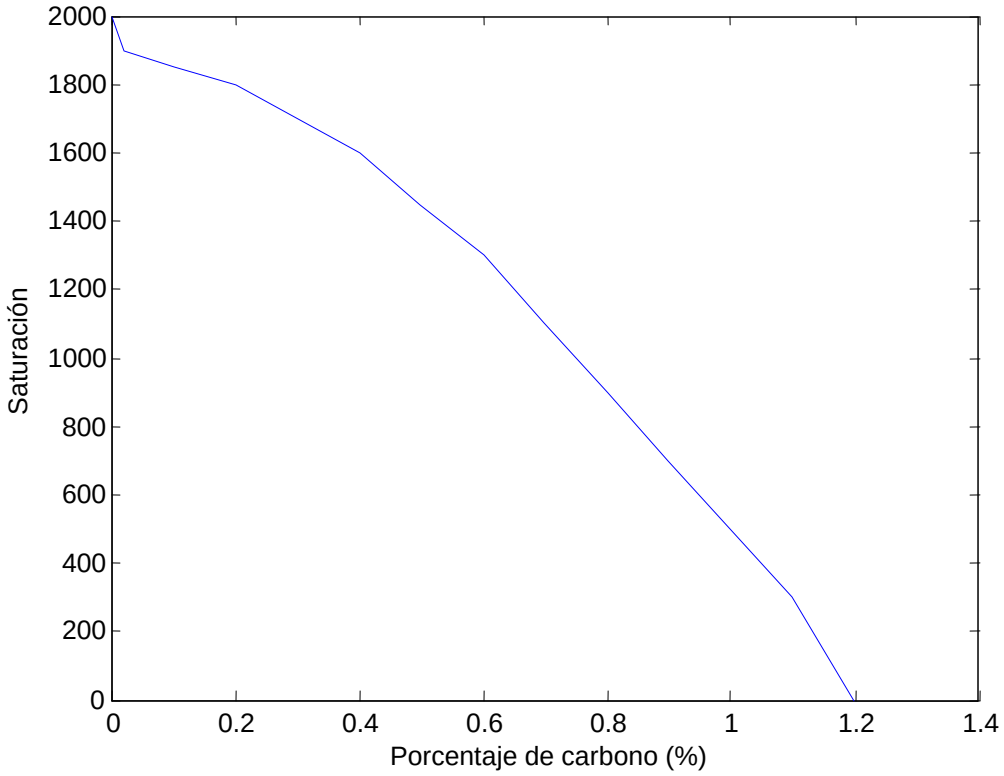


Gráfico 126. Cálculo de la saturación magnética. Región Cundinamarca. Falla Descarga Parcial.
Fuente: M. Mago

5. **Región Bogotá.**
   - **Tipo de Falla: Arco eléctrico/Térmica. Causa: Sobrecarga.**

     >> X=[0 0.1 0.102 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
     >> Y=[2000 1900 1850 1800 1700 1600 1450 1300 1100 900 700 500 300 0];
     >> lsline(X,Y)

     ans = -1.6134e+003
     >> sum(X) ans = 7.9020
     >> sum(Y) ans = 17100
     >> G=((-7.9020*-1.6134e+003)+17100)/14 = 2.1321e+003
     >> y=(-1.6134e+003*0.105)+2.1321e+003 = 1.9627e+003

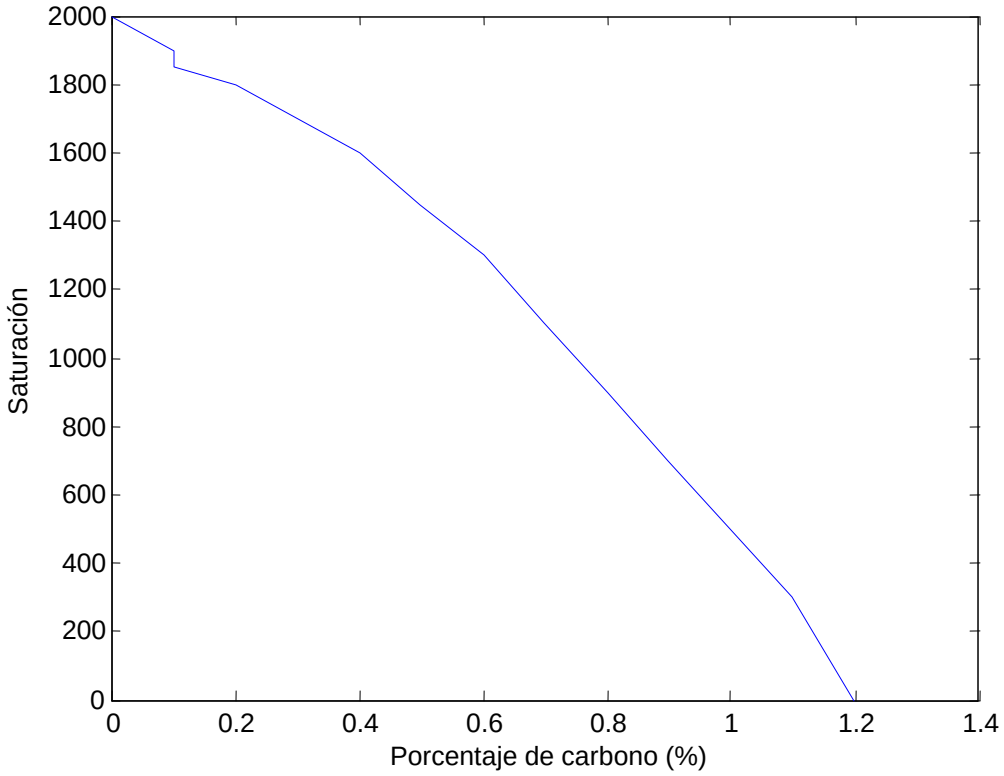


Gráfico 127. Cálculo de la saturación magnética. Región Bogotá. Falla Arco Eléctrico/Térmica.
Fuente: M. Mago

- **Tipo de Falla: Arco Eléctrico. Causa: Sobretensión.**
  >> X=[0 0.08 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
  >> Y=[2000 1900 1850 1800 1700 1600 1450 1300 1100 900 700 500 300 0];
  >> lsline(X,Y)

  ans = -1.6044e+003
  >> sum(X) ans = 7.8800
  >> sum(Y) ans = 17100
  >> G=((-7.8800*-1.6044e+003)+17100)/14 = 2.1245e+003
  >> y=(-1.6044e+003*0.093)+2.1245e+003 = 1.9753e+003

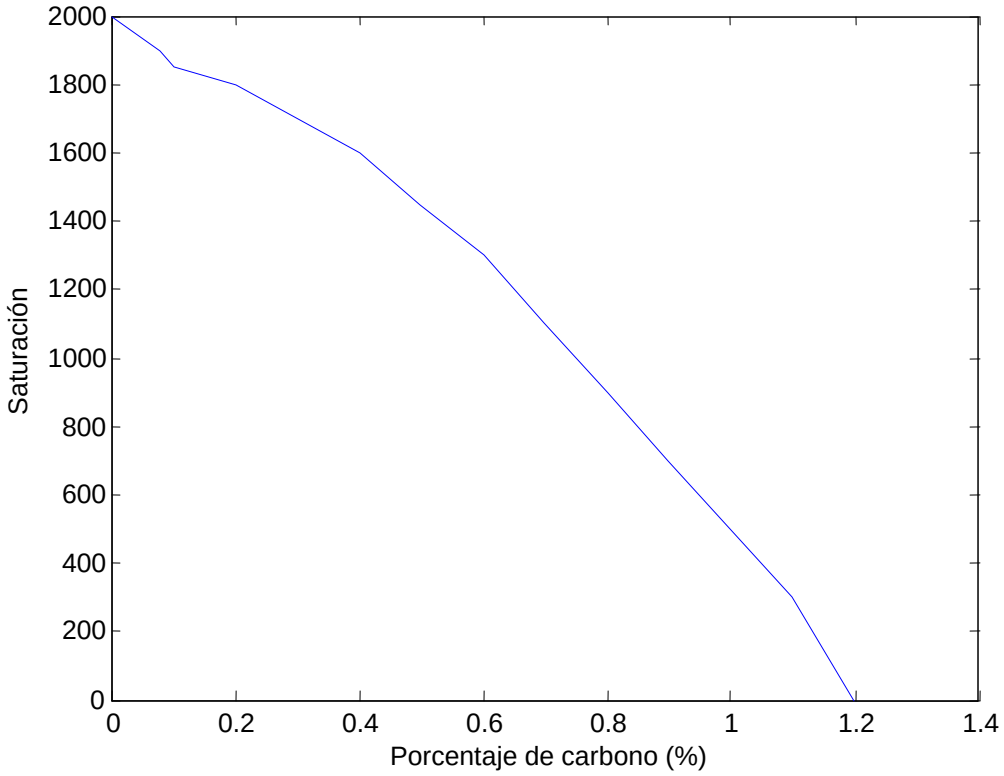


Gráfico 128. Cálculo de la saturación magnética. Región Bogotá. Falla Arco Eléctrico.
Fuente: M. Mago

- **Tipo de Falla: Arco eléctrico. Causa: Cortocircuito externo.**
  >> X=[0 0.062 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
  >> Y=[2000 1900 1850 1800 1700 1600 1450 1300 1100 900 700 500 300 0];
  >> lsline(X,Y)

  ans = -1.5967e+003
  >> sum(X) ans = 7.8620
  >> sum(Y) ans = 17100
  >> G=((-7.8620*-1.5967e+003)+17100)/14 = 2.1181e+003
  >> y=(-1.5967e+003*0.062)+2.1181e+003 = 2.0191e+003

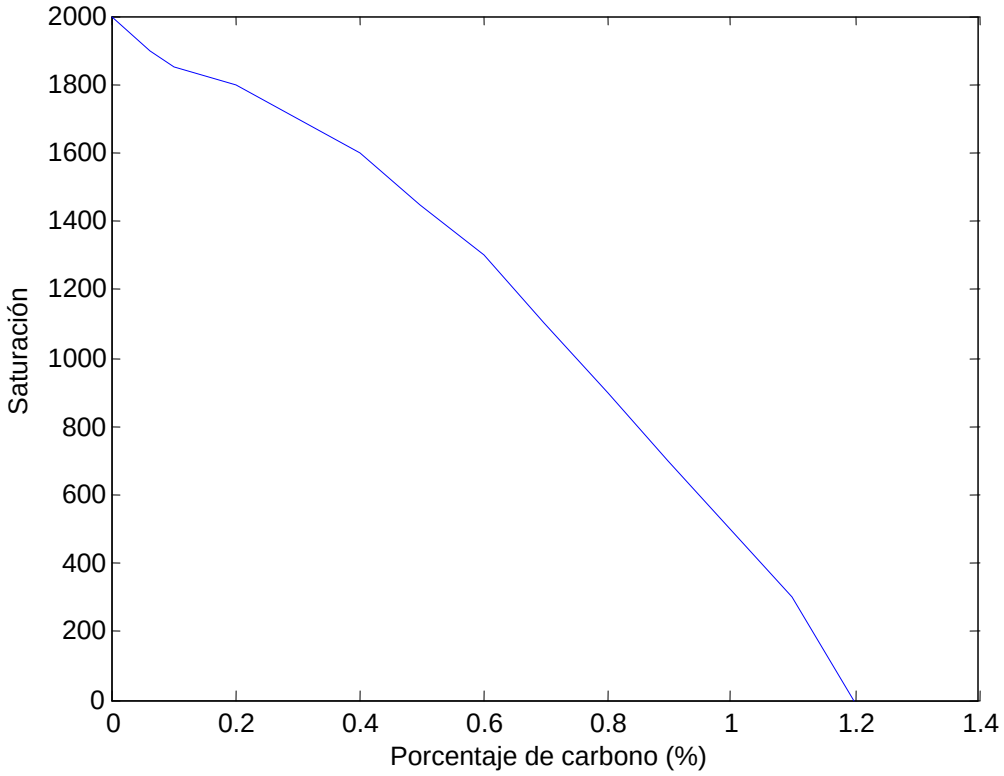


Gráfico 129. Cálculo de la saturación magnética. Región Bogotá. Falla Arco Eléctrico.
Fuente: M. Mago

- **Tipo de Falla: Descarga parcial. Causa: Sobretensión.**
  >> X=[0 0.009 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
  >> Y=[2000 1900 1850 1800 1700 1600 1450 1300 1100 900 700 500 300 0];
  >> lsline(X,Y)

  ans = -1.5721e+003
  >> sum(X) ans = 7.8090
  >> sum(Y) ans = 17100
  >> G=((-7.8090*-1.5721e+003)+17100)/14 = 2.0983e+003
  >> y=(-1.5721e+003*0.101)+2.0983e+003 = 1.9395e+003

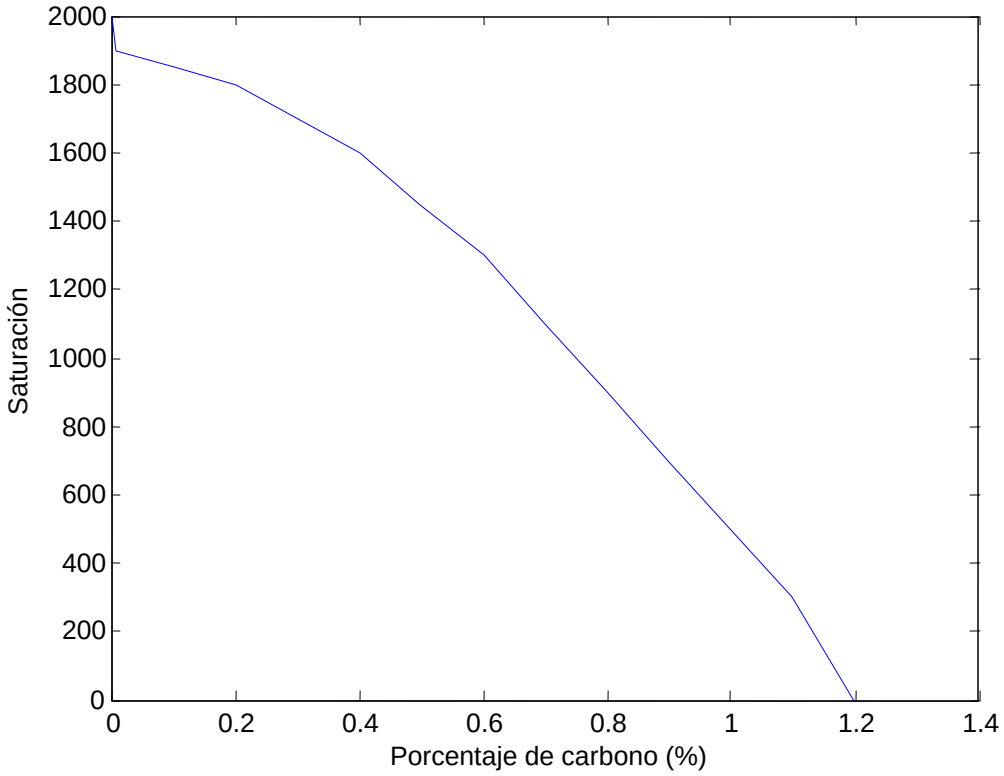


Gráfico 130. Cálculo de la saturación magnética. Región Bogotá. Falla Descarga Parcial.
Fuente: M. Mago

- **Tipo de Falla: Térmica. Causa: Sobrecarga.**
  >> X=[0 0.1 0.15 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
  >> Y=[2000 1900 1850 1800 1700 1600 1450 1300 1100 900 700 500 300 0];
  >> lsline(X,Y)

  ans = -1.6324e+003
  >> sum(X) ans = 7.9500
  >> sum(Y) ans = 17100
  >> G=((-7.9500*-1.6324e+003)+17100)/14 = 2.1484e+003
  >> y=(-1.6324e+003*0.1735)+2.1484e+003 = 1.8652e+003

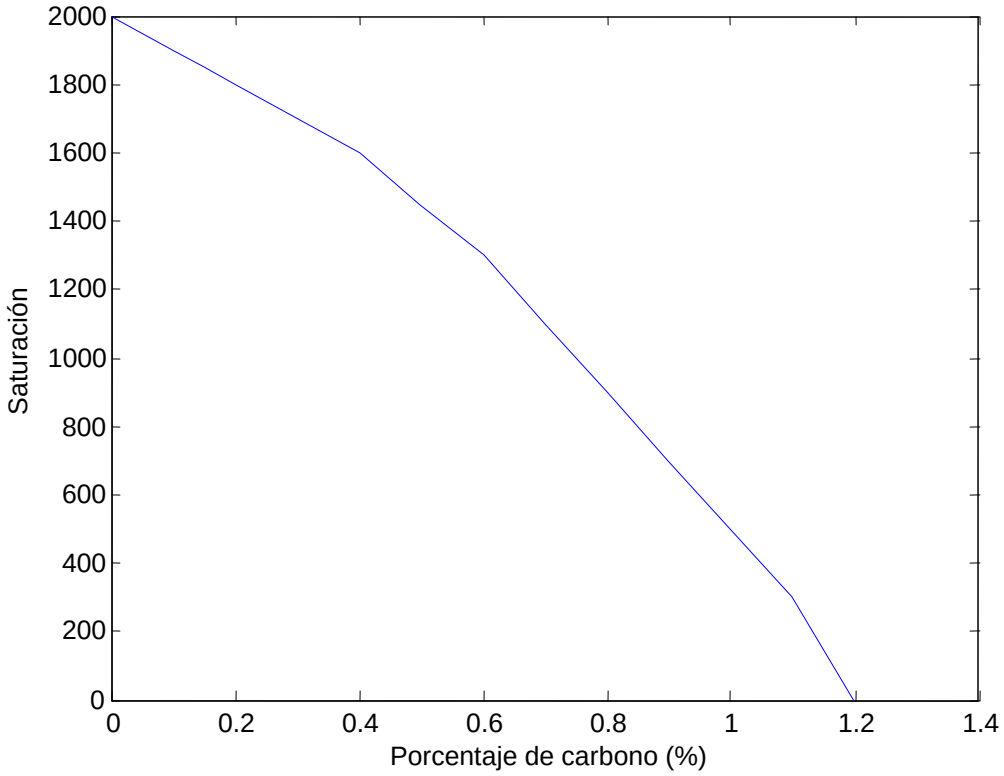


Gráfico 131. Cálculo de la saturación magnética. Región Bogotá. Falla Térmica. Fuente: M. Mago

6. Patrón de referencia. Equipo nuevo.

>> X=[0 0.02 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
>> Y=[2000 1900 1850 1800 1700 1600 1450 1300 1100 900 700 500 300 0];
>> lsline(X,Y)

ans = -1.5774e+003
>> sum(X) ans = 7.8200
>> sum(Y) ans = 17100
>> G=((-7.8200*-1.5774e+003)+17100)/14 = 2.1025e+003
>> y=(-1.5774e+003*0.033)+2.1025e+003 = 2.0504e+003

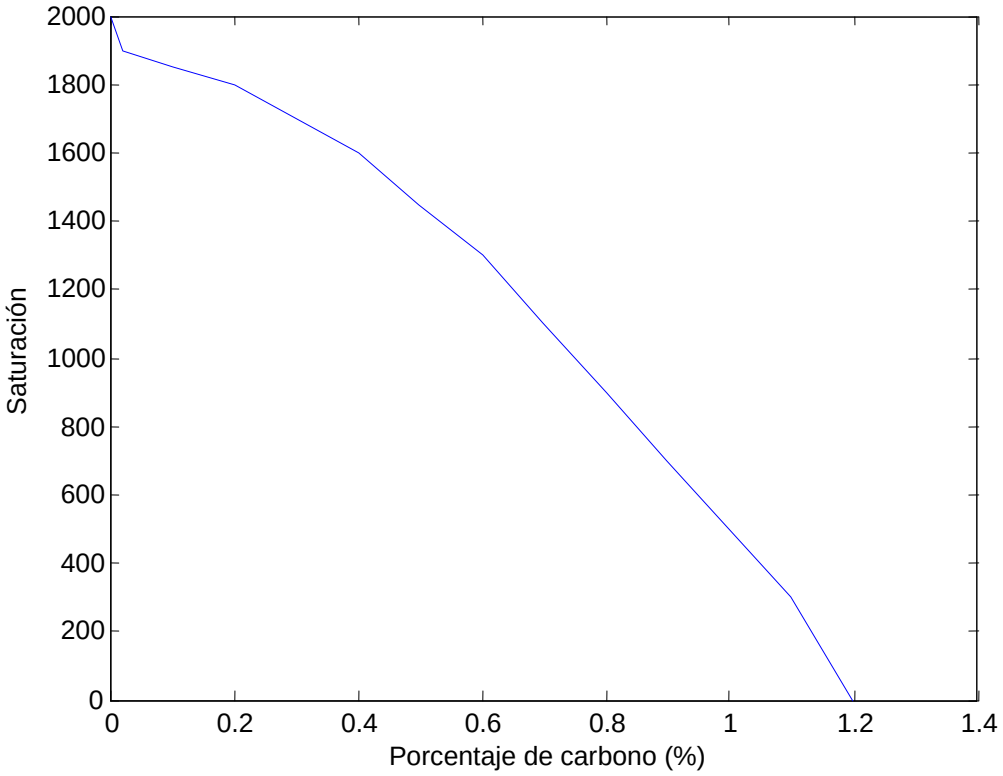


Gráfico 132. Cálculo de la saturación magnética. Muestra Patrón.

3.2.5.4 Contenido de Carbono (%) versus Fuerza Coercitiva.

1. **Región Antioquia.**
   - **Tipo de Falla: Térmica. Causa: Sobrecarga.**

```
>> X=[0.1 0.193 0.2];
>> Y=[2 3.4 3.5];
>> n=3;
>> k=2;
>> newpoly(X,Y)
ans = -7.6805   17.3041    0.3464

>> G=(-7.6805*0.191^2)+17.3041*(0.191)+0.3464 = 3.3713
```

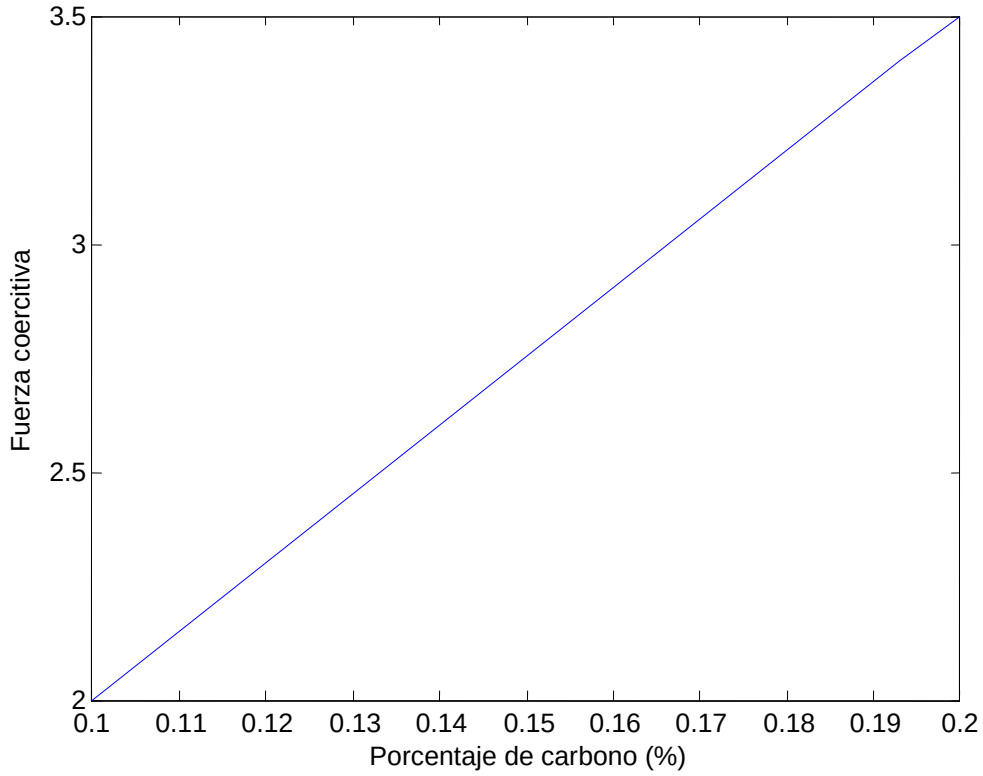


Gráfico 133. Cálculo de la fuerza coercitiva. Región Antioquia. Falla Térmica. Fuente: M. Mago

- **Tipo de Falla: Descarga Parcial. Causa: Sobretensión.**

  >> X=[0 0.069 0.1];
  >> Y=[0 1.5 2];
  >> n=3;
  >> k=2;
  >> newpoly(X,Y)
  ans = -56.1010 25.6101 0

  >> G=(-56.1010*0.070^2)+25.6101*(0.070)+0 = 1.5178

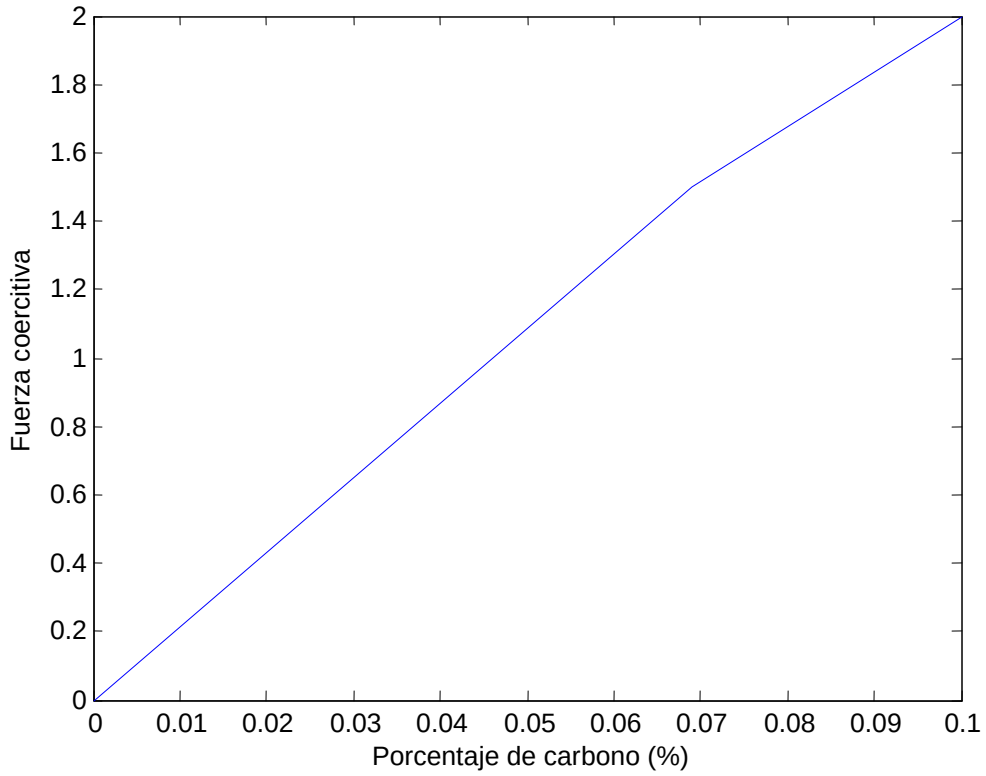


Gráfico 134. Cálculo de la fuerza coercitiva. Región Antioquia. Falla Descarga Parcial.
Fuente: M. Mago

- **Tipo de Falla: Arco Eléctrico. Causa: Cortocircuito externo.**

  >> X=[0 0.010 0.1];
  >> Y=[0 0.2 1.9];
  >> n=3;
  >> k=2;
  >> newpoly(X,Y)
  ans = -11.1111 20.1111 0

  >> G=(-11.1111*0.009^2)+20.1111*(0.009)+0 = 0.1801

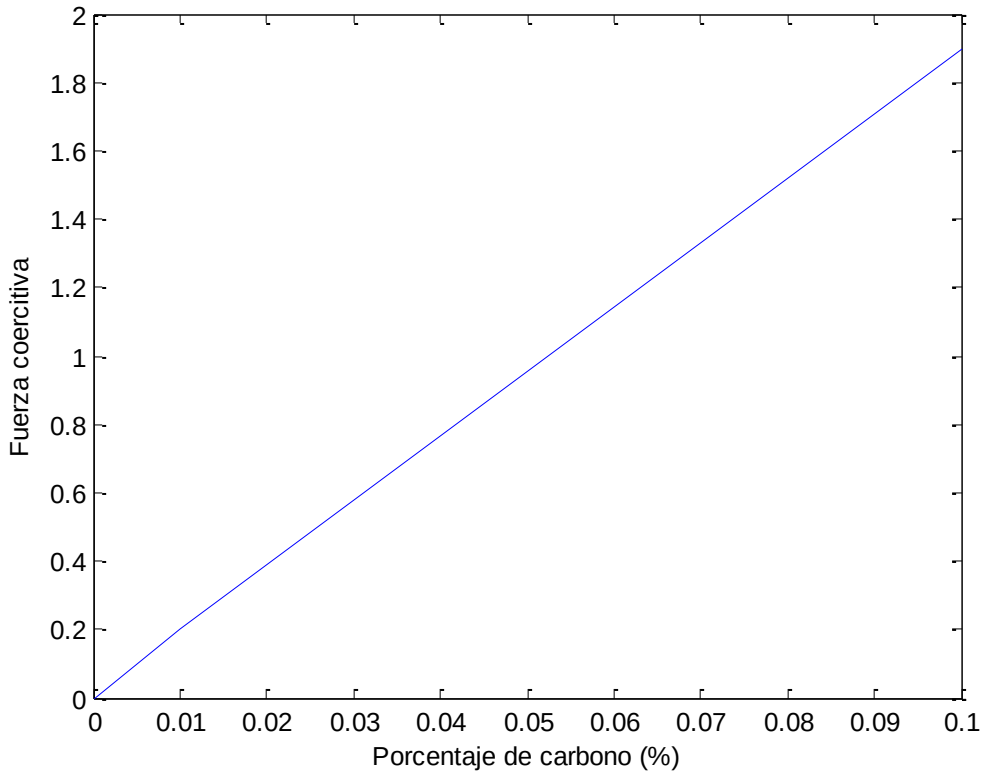


Gráfico 135. Cálculo de la fuerza coercitiva. Región Antioquia. Falla Arco Eléctrico.
Fuente: M. Mago

2. Región Caldas.

- **Tipo de Falla: Térmica. Causa: Sobrecarga.**

```
>> X=[0 0.069 0.1];
>> Y=[0 1.5 2];
>> n=3;
>> k=2;
>> newpoly(X,Y)

ans =  -56.1010   25.6101         0

>> G=(-56.1010*0.060^2)+25.6101*(0.060)+0  = 1.3346
```

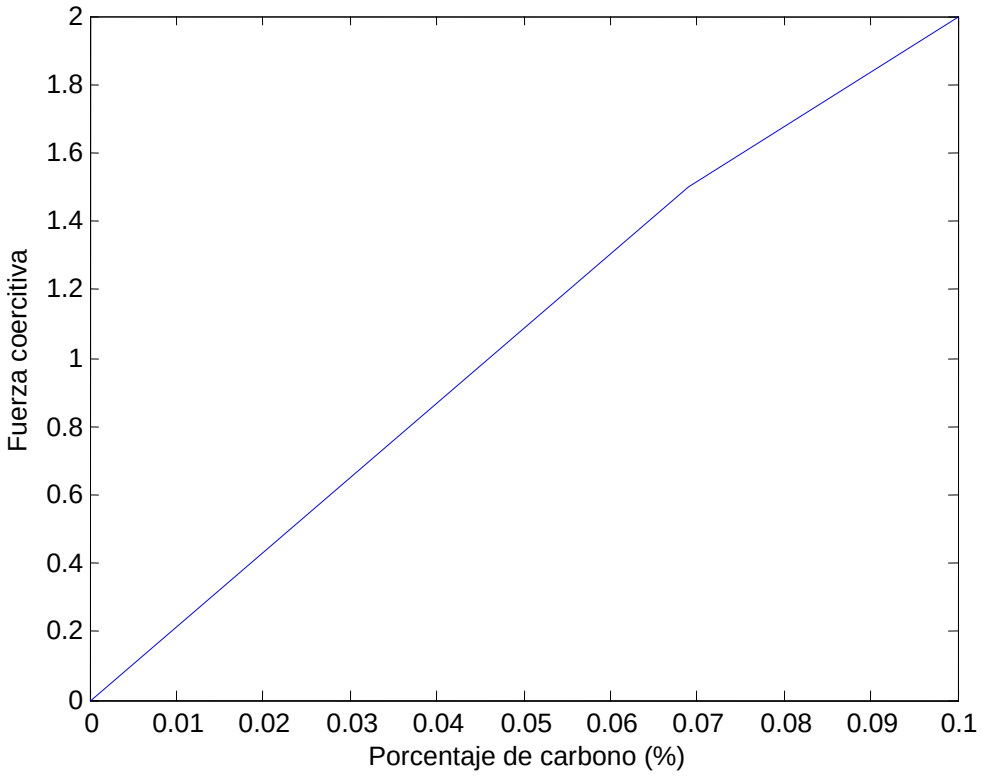


Gráfico 136. Cálculo de la fuerza coercitiva. Región Caldas. Falla Térmica. Fuente: M. Mago

- **Tipo de Falla: Arco Eléctrico. Causa: Cortocircuito Externo.**

  >> X=[0 0.040 0.1];
  >> Y=[0 0.8 2];
  >> n=3;
  >> k=2;
  >> newpoly(X,Y)

  ans = -0.0000 20.0000 0

  >> G=(-0.0000*0.030^2)+20.0000*(0.030)+0 = 0.6000

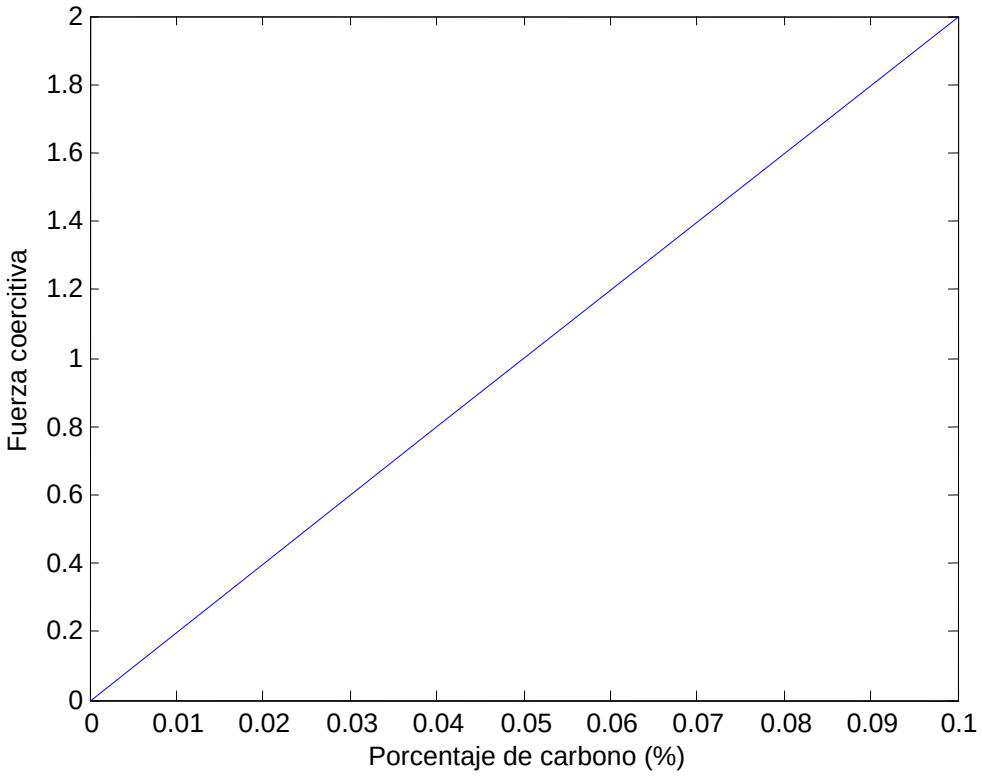


Gráfico 137. Cálculo de la fuerza coercitiva. Región Caldas. Falla Arco Eléctrico. Fuente: M. Mago

- **Tipo de Falla: Arco Eléctrico/Térmica. Causa: Sobrecarga.**

  >> X=[0 0.019 0.1];
  >> Y=[0 0.5 2];
  >> n=3;
  >> k=2;
  >> newpoly(X,Y)

  ans = -77.9727 27.7973 0

  >> G=(-77.9727*0.010^2)+27.7973*(0.010)+0 = 0.2702

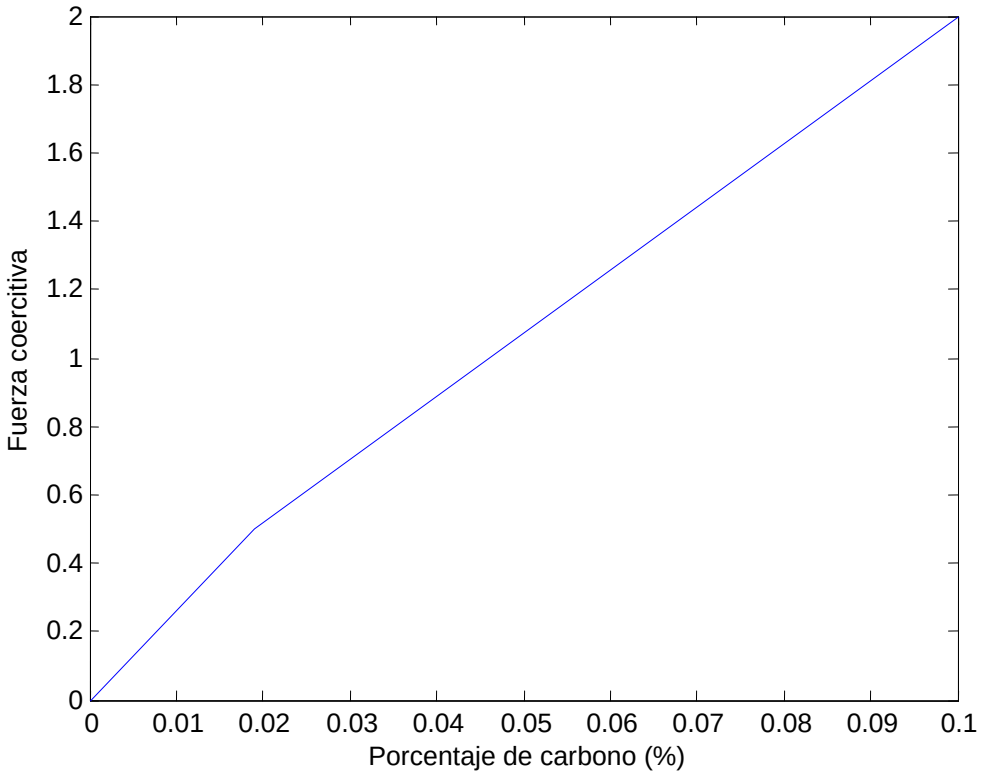


Gráfico 138. Cálculo de la fuerza coercitiva. Región Caldas. Falla Arco Eléctrico/Térmica.
Fuente: M. Mago

- **Tipo de Falla: Descarga Parcial. Causa: Defecto de fabricación/Humedad.**

```
>> X=[0 0.014 0.1];
>> Y=[0 0.3 2];
>> n=3;
>> k=2;
>> newpoly(X,Y)

ans =  -16.6113   21.6611         0

>> G=(-16.6113*0.010^2)+21.6611*(0.010)+0  = 0.2149
```

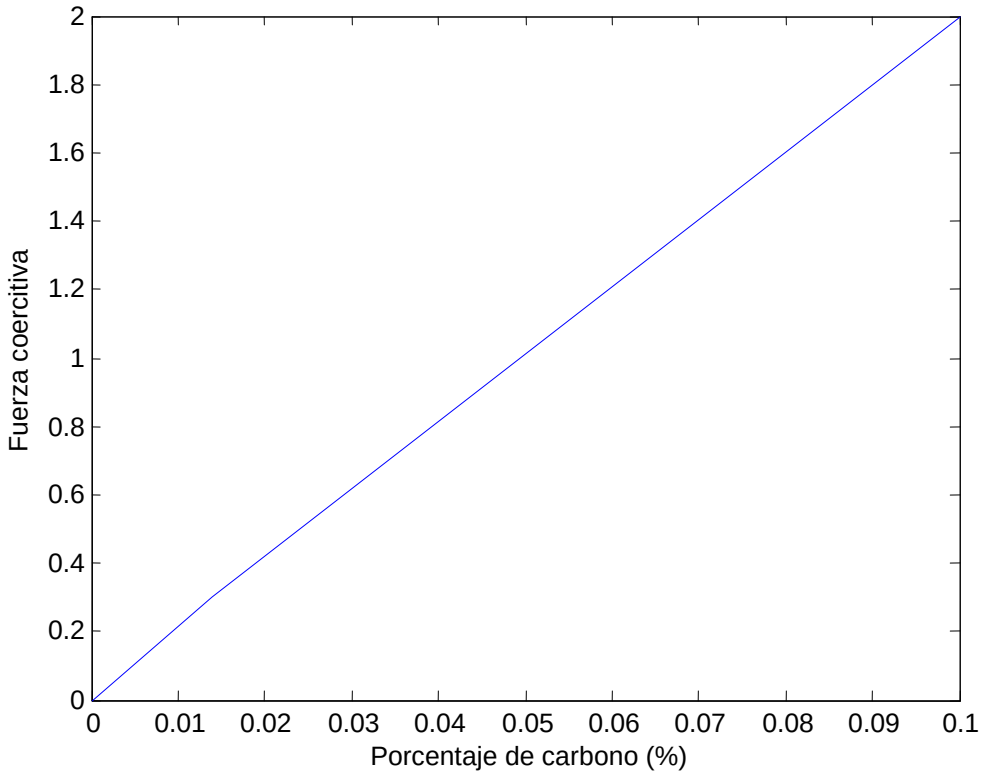


Gráfico 139. Cálculo de la fuerza coercitiva. Región Caldas. Falla Descarga Parcial.
Fuente: M. Mago

3. **Región Pacífico.**

- **Tipo de Falla: Térmica/Arco Eléctrico. Causa: Sobrecarga.**

  >> X=[0.1 0.131 0.2];
  >> Y=[2 2.5 3.5];
  >> n=3;
  >> k=2;
  >> newpoly(X,Y)

  ans = -16.3628 19.9088 0.1727

  >> G=(-16.3628*0.100^2)+19.9088*(0.100)+0.1727 = 2.0000

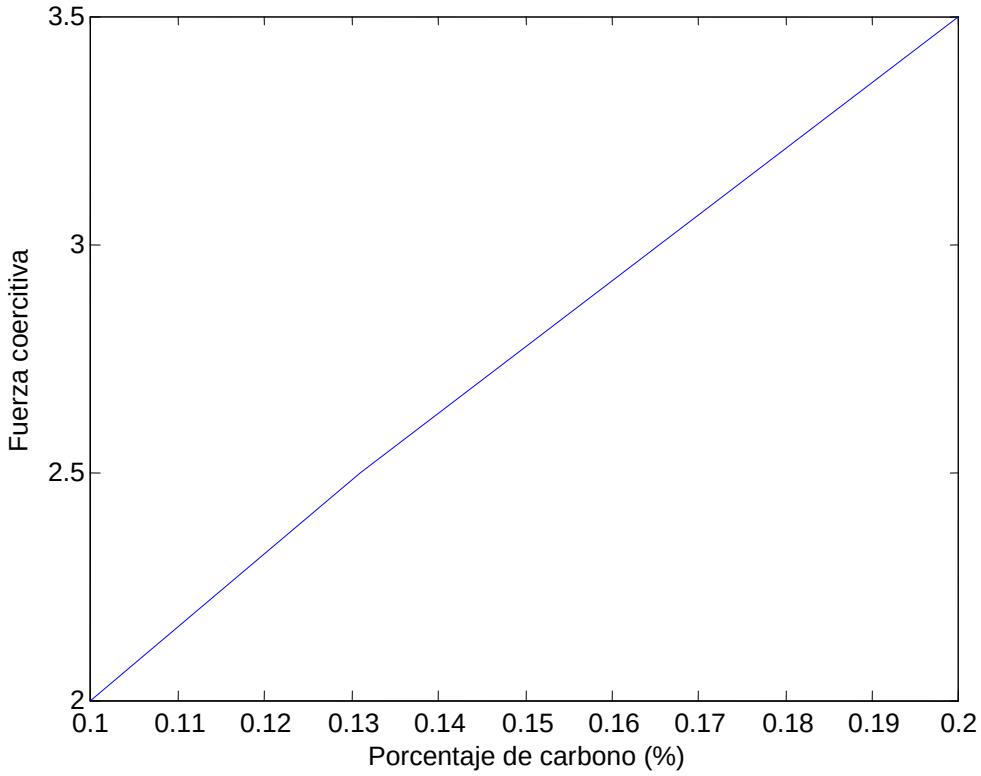


Gráfico 140. Cálculo de la fuerza coercitiva. Región Pacífico. Falla Descarga Parcial. Fuente: M. Mago

- **Tipo de Falla: Arco Eléctrico. Causa: Cortocircuito externo.**

```
>> X=[0 0.002 0.1];
>> Y=[0 0.1 2];
>> n=3;
>> k=2;
>> newpoly(X,Y)

ans = -306.1224   50.6122         0

>> G=(-306.1224*0.001^2)+50.6122*(0.001)+0  = 0.0503
```

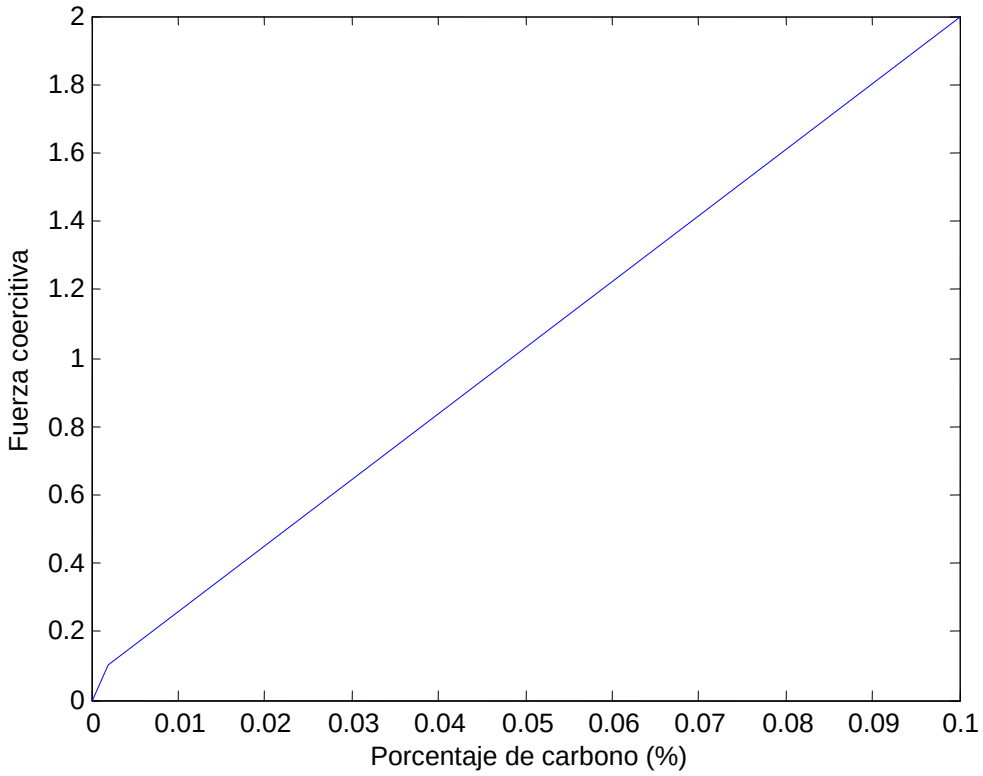


Gráfico 141. Cálculo de la fuerza coercitiva. Región Pacífico. Falla Arco Eléctrico. Fuente: M. Mago

- **Tipo de Falla: Descarga Parcial. Causa: Sobretensión.**

```
>> X=[0 0.033 0.1];
>> Y=[0 0.6 2];
>> n=3;
>> k=2;
>> newpoly(X,Y)

ans = 27.1370   17.2863         0

>> G=(27.1370*0.020^2)+17.2863*(0.020)+0  = 0.3566
```

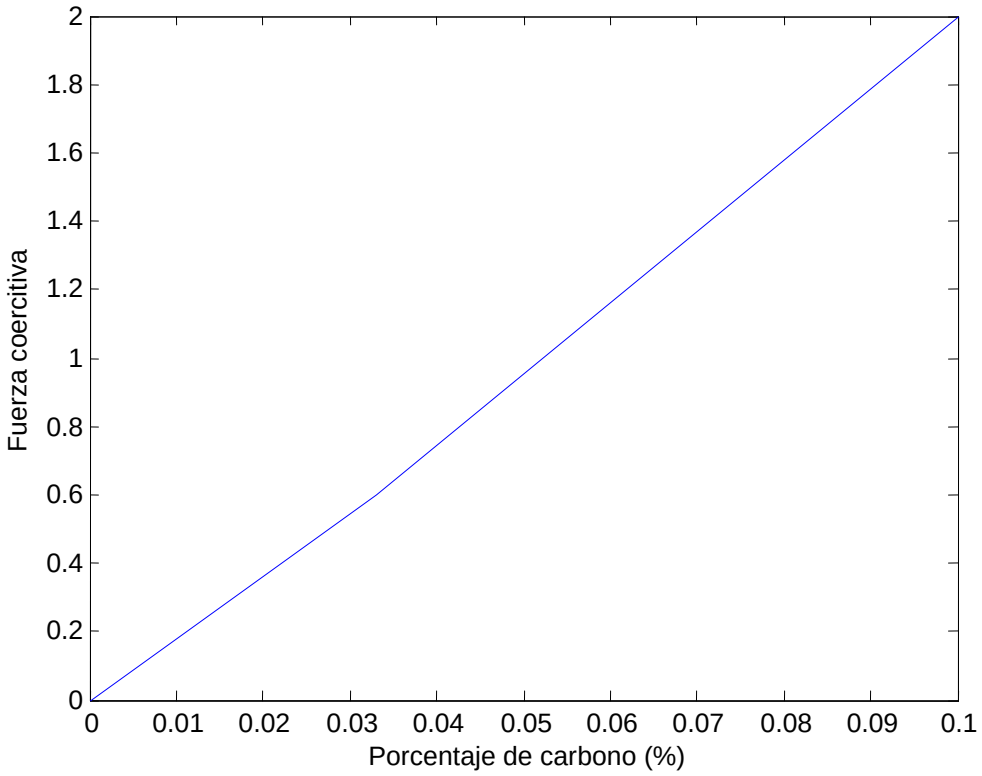


Gráfico 142. Cálculo de la fuerza coercitiva. Región Pacífico. Falla Descarga Parcial. Fuente: M. Mago

4. Cundinamarca.

- **Tipo de Falla: Térmica. Causa: Sobrecarga.**

```
>> X=[0 0.031 0.1];
>> Y=[0 0.6 2];
>> n=3;
>> k=2;
>> newpoly(X,Y)

ans = 9.3502   19.0650         0

>> G=(9.3502*0.020^2)+19.0650*(0.020)+0  = 0.3850
```

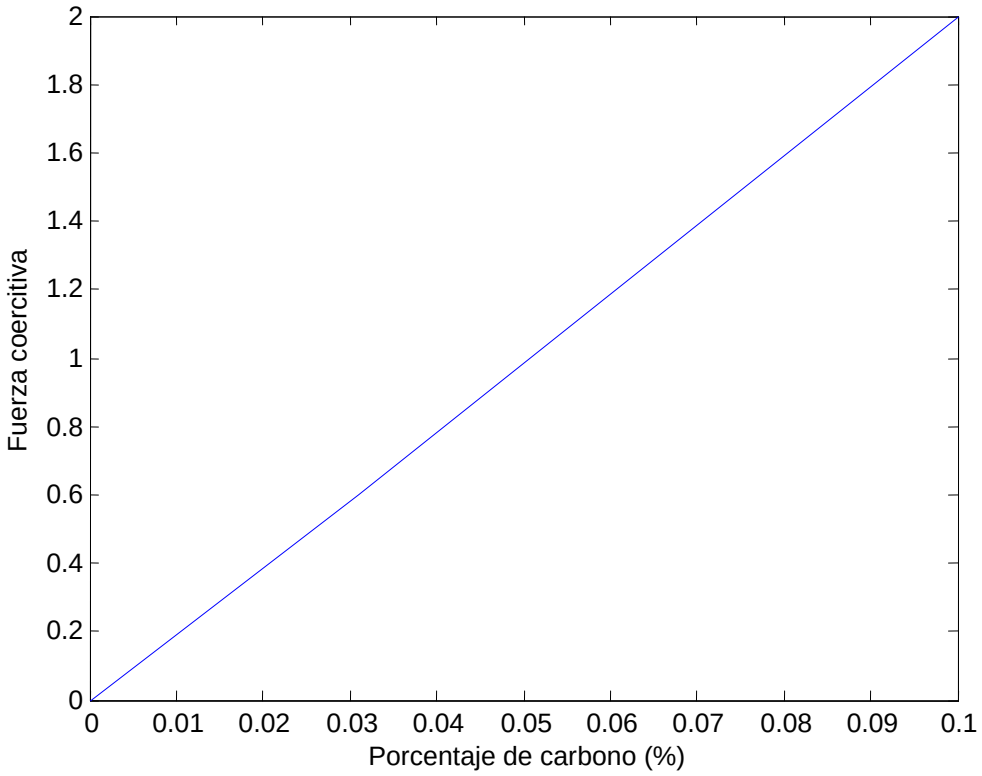


Gráfico 143. Cálculo de la fuerza coercitiva. Región Cundinamarca. Falla Térmica.
Fuente: M. Mago

5. Región Capital. Bogotá.

- **Tipo de Falla: Arco Eléctrico/Térmica. Causa: Sobrecarga.**

```
>> X=[0.1 0.105 0.2];
>> Y=[2 2.1 3.5];
>> n=3;
>> k=2;
>> newpoly(X,Y)

ans = -52.6316   30.7895   -0.5526

>> G=(-52.6316*0.090^2)+30.7895*(0.090)-0.5526  = 1.7921
```

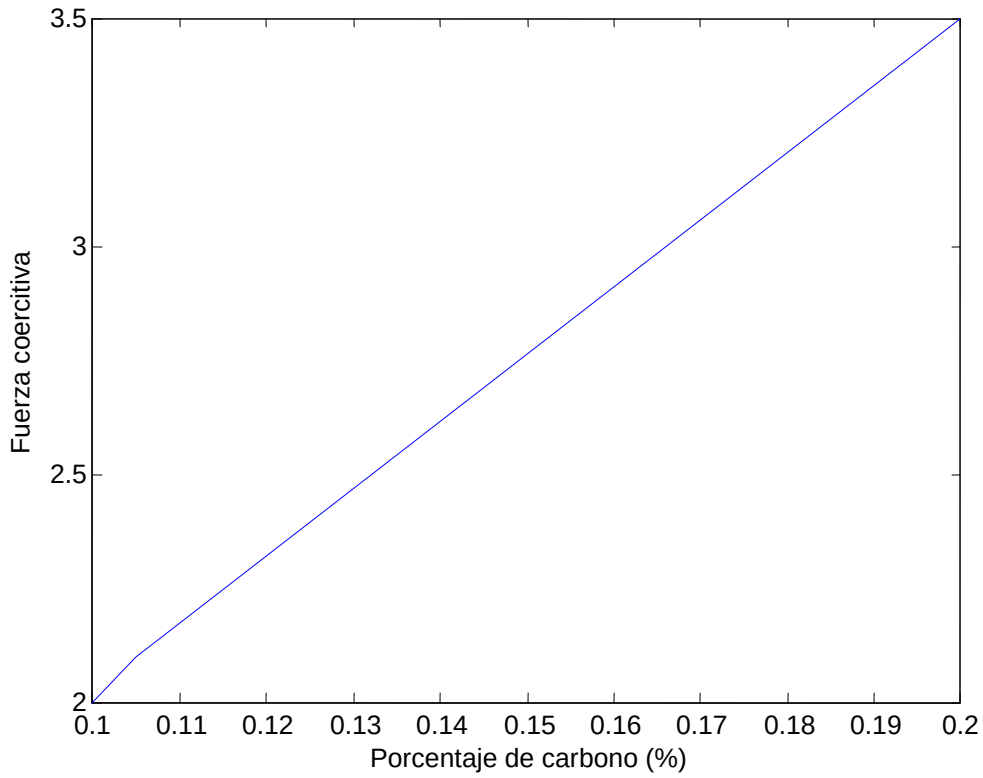


Gráfico 144. Cálculo de la fuerza coercitiva. Región Bogotá. Falla Arco Eléctrico/Térmica.
Fuente: M. Mago

- **Tipo de Falla: Arco Eléctrico. Causa: Sobretensión.**

```
>> X=[0 0.093 0.1];
>> Y=[0 1.8 2];
>> plot(X,Y)
>> n=3;
>> k=2;
>> newpoly(X,Y)

ans = 92.1659   10.7834         0

>> G=(92.1659*0.090^2)+10.7834*(0.090)+0  = 1.7170
```

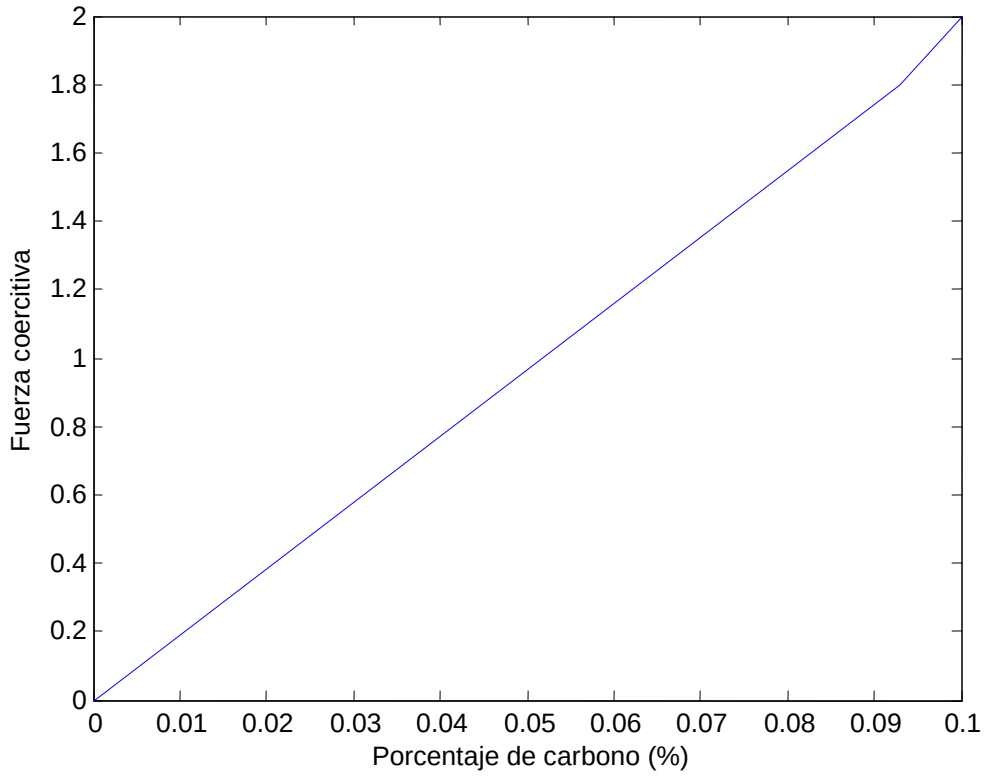


Gráfico 145. Cálculo de la fuerza coercitiva. Región Bogotá. Falla Arco Eléctrico. Fuente: M. Mago

- **Falla: Arco Eléctrico. Causa: Cortocircuito externo.**

  >> X=[0 0.062 0.1];
  >> Y=[0 1.3 2];
  >> n=3;
  >> k=2;
  >> newpoly(X,Y)

  ans = -25.4669 22.5467 0

  >> G=(-25.4669*0.050^2)+22.5467*(0.050)+0 = 1.0637

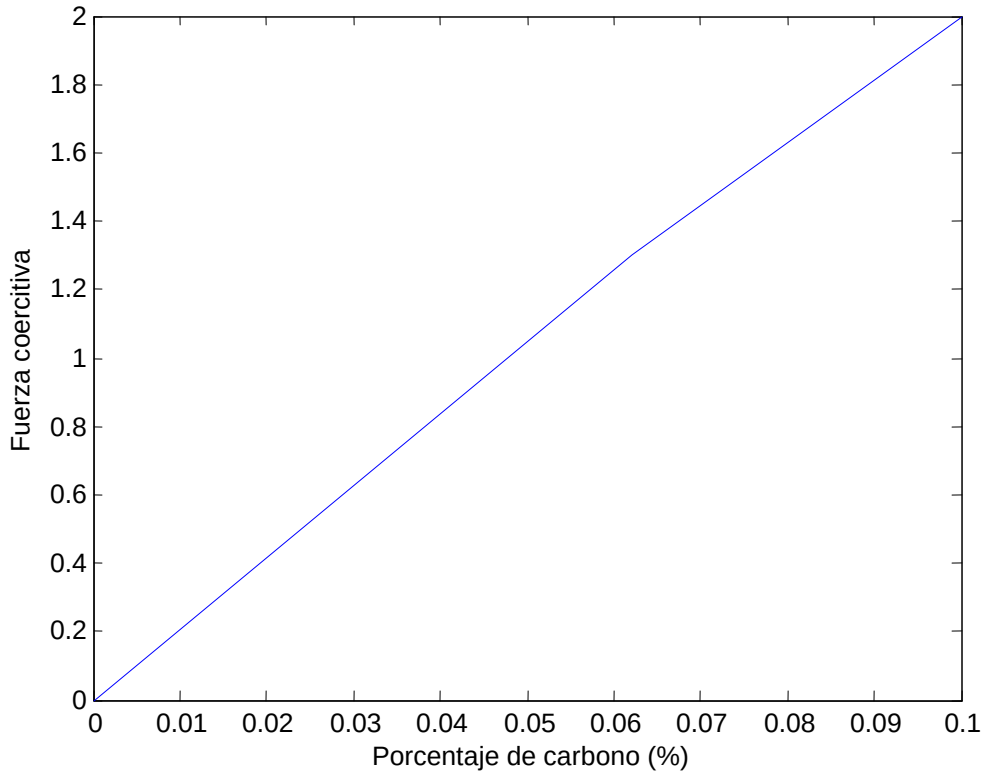


Gráfico 146. Cálculo de la fuerza coercitiva. Región Bogotá. Falla Arco Eléctrico. Fuente: M. Mago

- **Tipo de Falla: Descarga parcial. Causa: Sobretensión.**

  >> X=[0.1 0.101 0.2];
  >> Y=[2 2.1 3.5];
  >> n=3;
  >> k=2;
  >> newpoly(X,Y)

  ans = -858.5859 272.5758 -16.6717

  >> G=(-858.5859*0.090^2)+272.5758*(0.090)-16.6717 = 0.9056

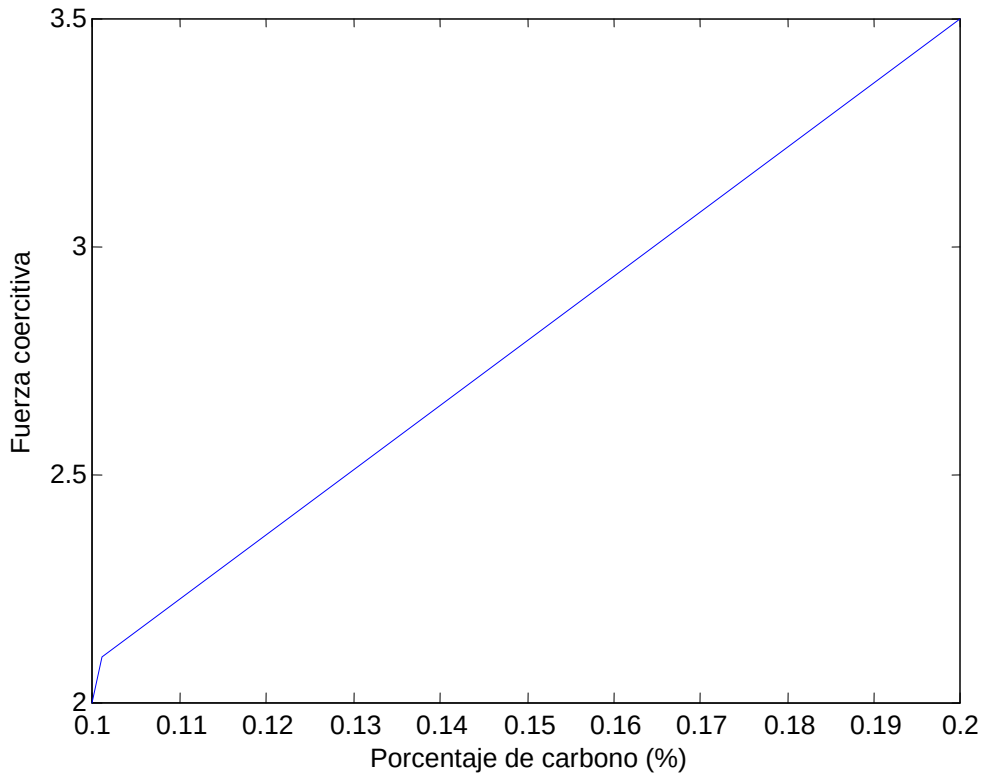


Gráfico 147. Cálculo de la fuerza coercitiva. Región Bogotá. Falla Descarga Parcial.
Fuente: M. Mago

- **Tipo de Falla: Térmica. Causa: Sobrecarga.**

```
>> X=[0.1 0.1735 0.2];
>> Y=[2 3 3.5];
>> n=3;
>> k=2;
>> newpoly(X,Y)

ans = 52.6248   -0.7874    1.5525

>> G=(52.6248*0.15^2)-0.7874*(0.15)+1.5525 = 2.6184
```

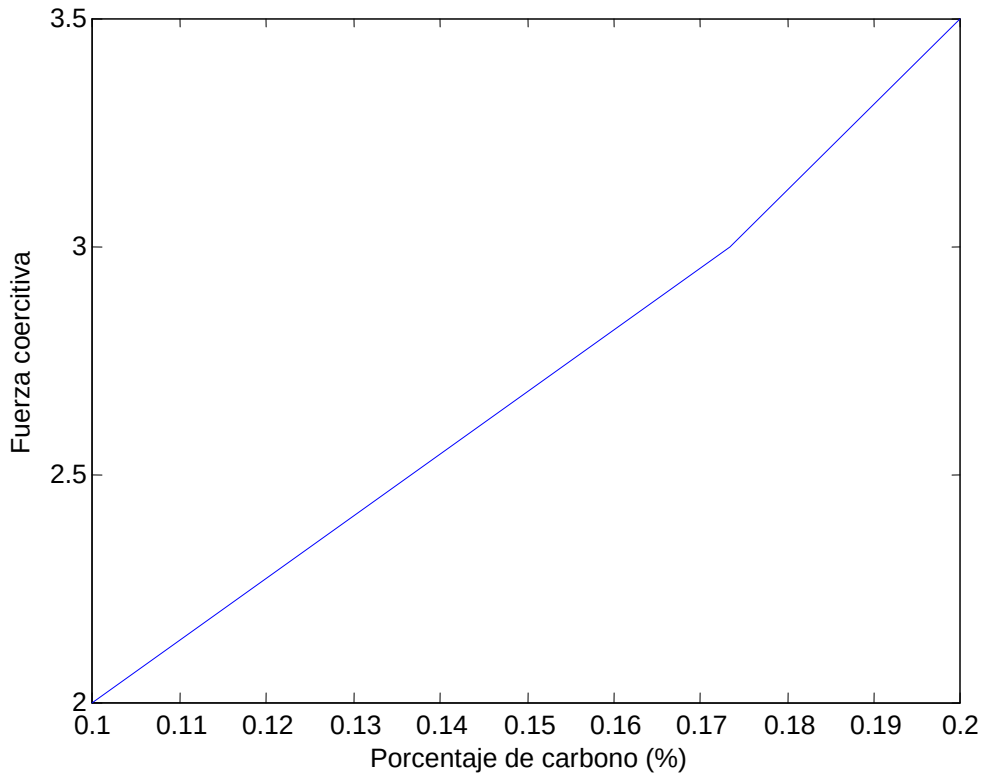


Gráfico 148. Cálculo de la fuerza coercitiva. Región Bogotá. Falla Térmica.

6. Patrón de referencia. Equipo nuevo.

```
>> X=[0 0.033 0.1];
>> Y=[0 0.7 2];
>> n=3;
>> k=2;
>> newpoly(X,Y)

ans = -18.0914   21.8091         0

>> G=(-18.0914*0.020^2)+21.8091*(0.020)+0  = 0.4289
```

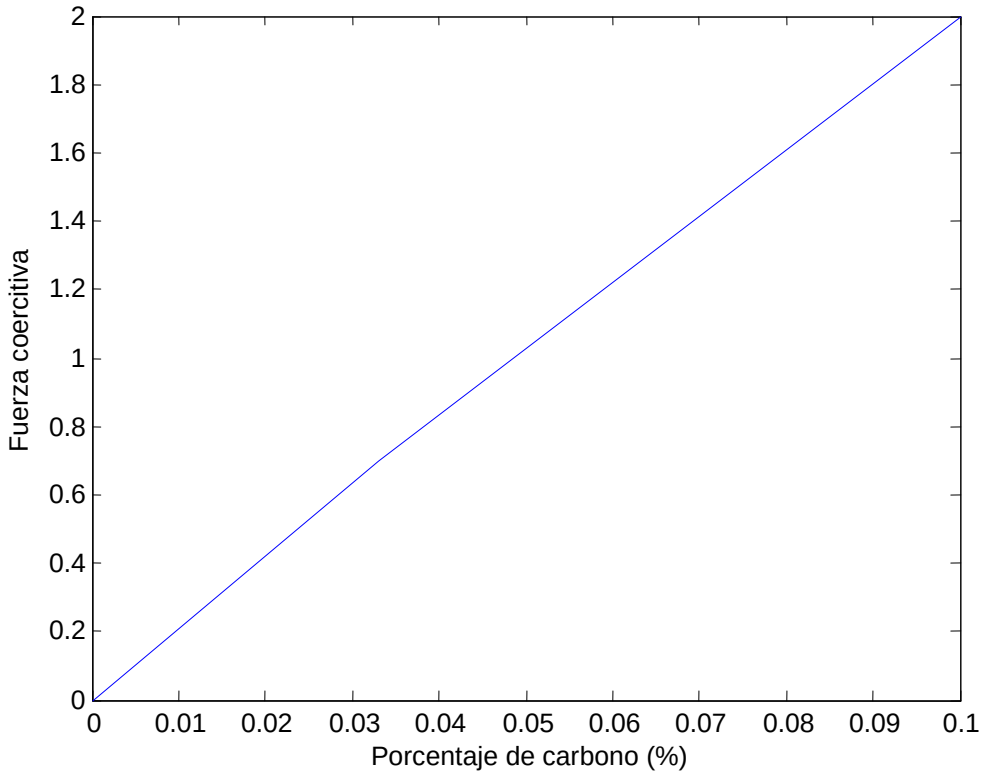


Gráfico 149. Cálculo de la fuerza coercitiva. Muestra Patrón.
Fuente: M. Mago

3.2.5.5 Contenido de Carbono (%) versus Inducción Remanente.

1. **Región Antioquia.**
   - **Tipo de Falla. Térmica. Causa. Sobrecarga.**

```
>> X=[0 0.1 0.193 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
>> Y=[1.39 1.38 1.37 1.36 1.35 1.33 1.31 1.29 1.27 1.25 1.24 1.23 1.2 1];
>> M=1;
>> lspoly(X,Y,M)

ans =
-0.2352
1.4178
```

>> y=(-0.2352*0.193)+1.4178 = 1.3724

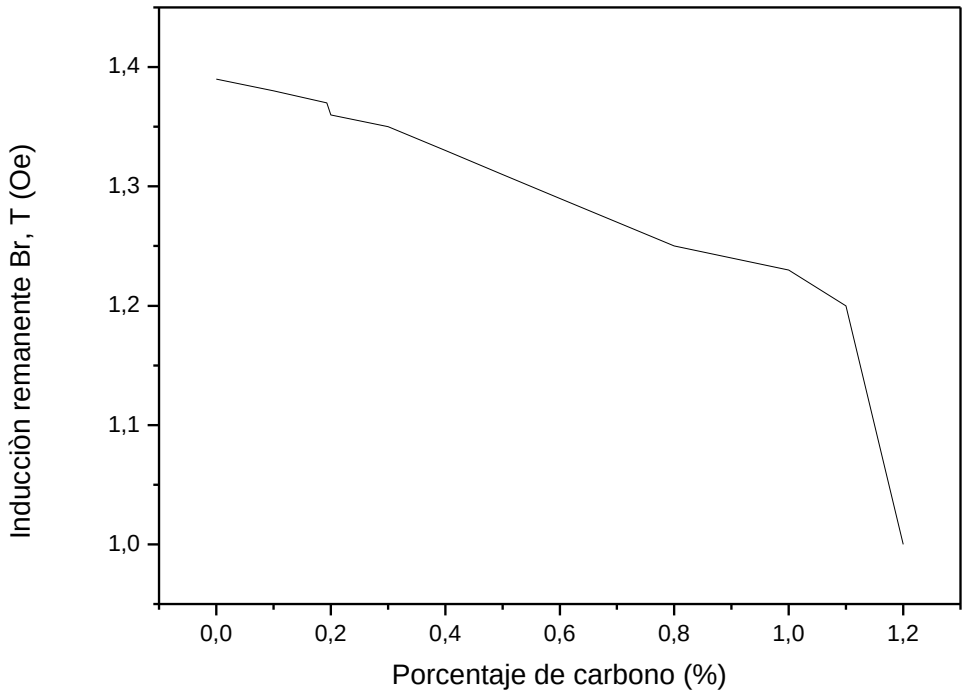


Gráfico 150. Cálculo de la inducción remanente. Región Antioquia. Falla Térmica. Fuente: M. Mago

- **Tipo de Falla. Descarga parcial. Causa. Sobretensión.**
  >> X=[0 0.069 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
  >> Y=[1.39 1.38 1.37 1.36 1.35 1.33 1.31 1.29 1.27 1.25 1.24 1.23 1.2 1];
  >> lspoly(X,Y,M)

  ans =

  -0.2283
  1.4119

  >> y=(-0.2283*(0.059))+1.4119 = 1.3984

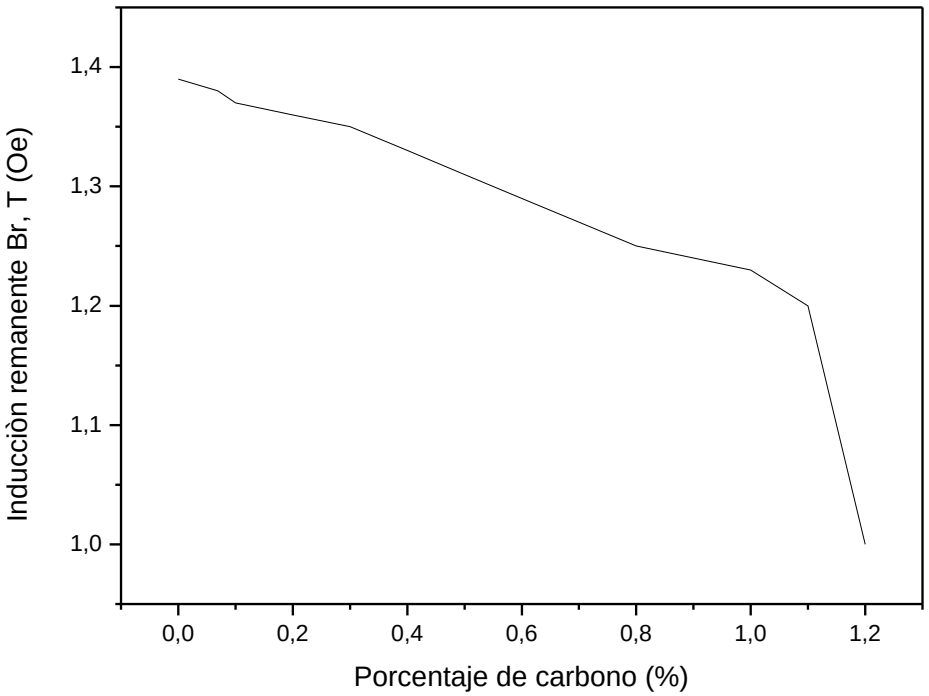


Gráfico 151. Cálculo de la inducción remanente. Región Antioquia. Falla Descarga Parcial.
Fuente: M.Mago

- **Tipo de Falla: Arco Eléctrico. Causa. Cortocircuito externo.**
  >> X=[0 0.010 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
  >> Y=[1.39 1.38 1.37 1.36 1.35 1.33 1.31 1.29 1.27 1.25 1.24 1.23 1.2 1];
  >> M=1;
  >> lspoly(X,Y,M)

  ans =

  -0.2244
  1.4087

  >> y=(-0.2244*(0.009))+1.4087 = 1.4067

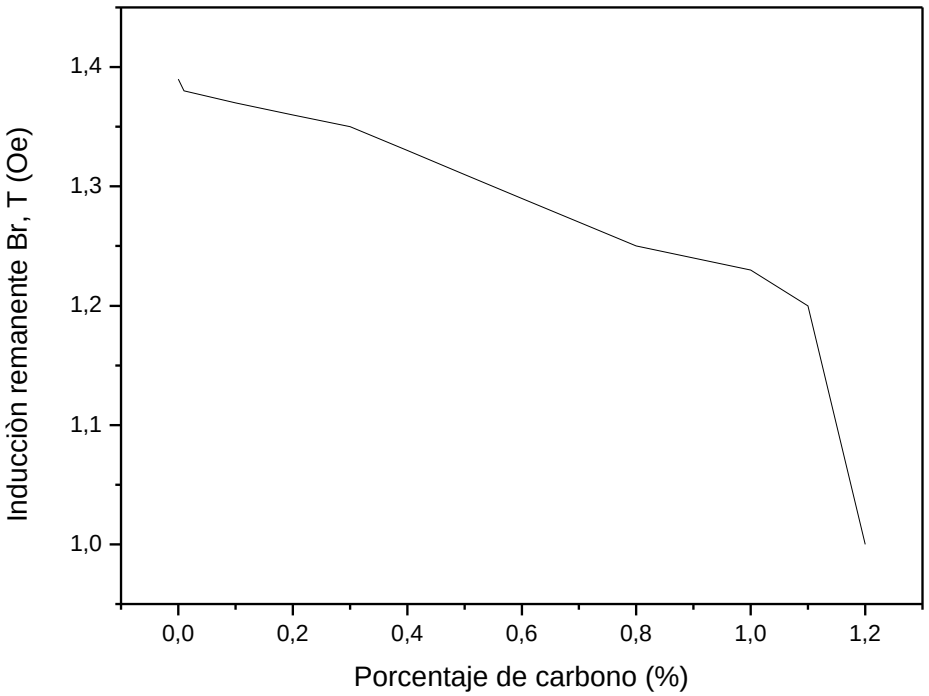


Gráfico 152. Cálculo de la inducción remanente. Región Antioquia. Falla Arco Eléctrico.
Fuente: M. Mago

2. **Región Caldas.**
   - **Tipo de Falla. Térmica. Causa. Sobrecarga.**

```
>> X=[0 0.067 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
>> Y=[1.39 1.38 1.37 1.36 1.35 1.33 1.31 1.29 1.27 1.25 1.24 1.23 1.2 1];
>> M=1;
>> lspoly(X,Y,M)

ans =

-0.2281
1.4118
```

>> y=(-0.2281*0.050)+1.4118 = 1.4004

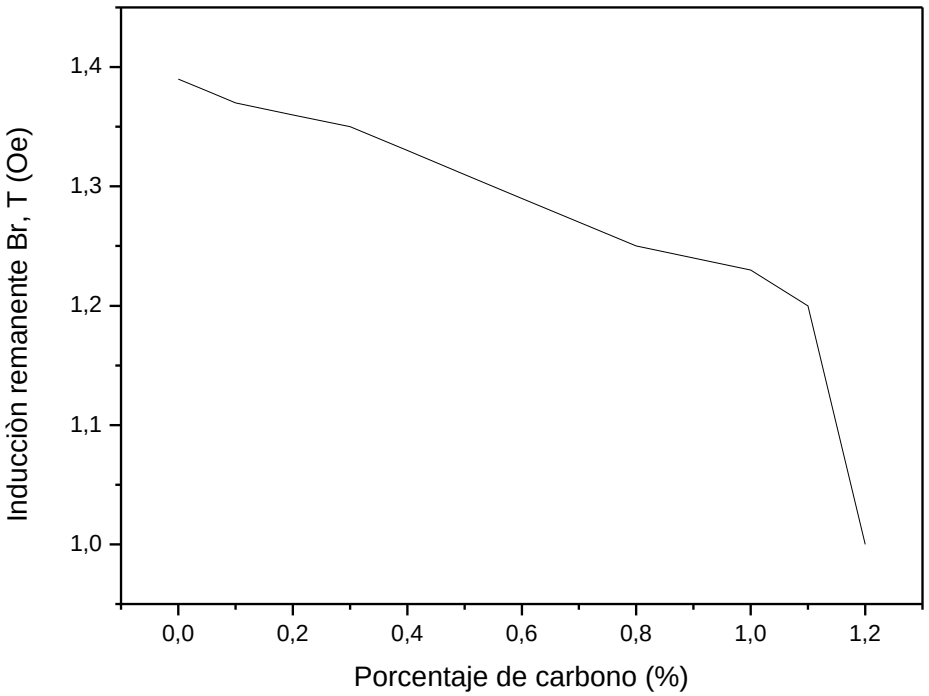


Gráfico 153. Cálculo de la inducción remanente. Región Caldas. Falla Térmica. Fuente: M. Mago

- **Tipo de Falla. Arco Eléctrico. Causa. Cortocircuito Externo.**
  >> X=[0 0.040 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
  >> Y=[1.39 1.38 1.37 1.36 1.35 1.33 1.31 1.29 1.27 1.25 1.24 1.23 1.2 1];
  >> M=1;
  >> lspoly(X,Y,M)

  ans =

  -0.2264
  1.4104

  >> y=(-0.2264*0.030)+1.4104 = 1.4036

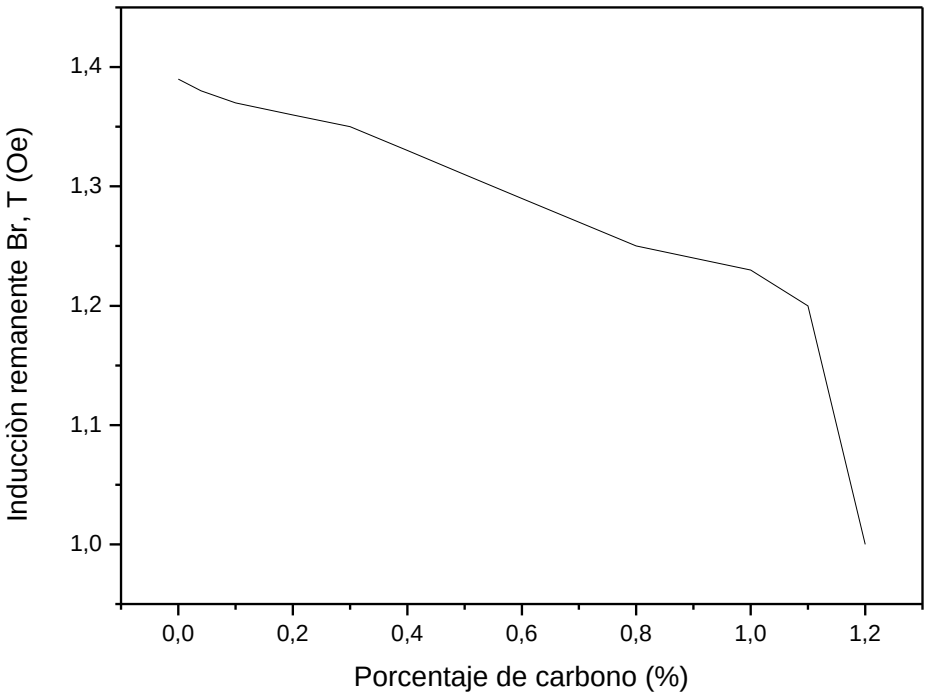


Gráfico 154. Cálculo de la inducción remanente. Región Caldas. Falla Arco Eléctrico.
Fuente: M. Mago

- **Tipo de Falla. Arco Eléctrico/Térmica. Causa. Sobrecarga.**
  >> X=[0 0.019 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
  >> Y=[1.39 1.38 1.37 1.36 1.35 1.33 1.31 1.29 1.27 1.25 1.24 1.23 1.2 1];
  >> M=1;
  >> lspoly(X,Y,M)

  ans =

  -0.2250
  1.4092

  >> y=(-0.2250*0.015)+1.4092 = 1.4058

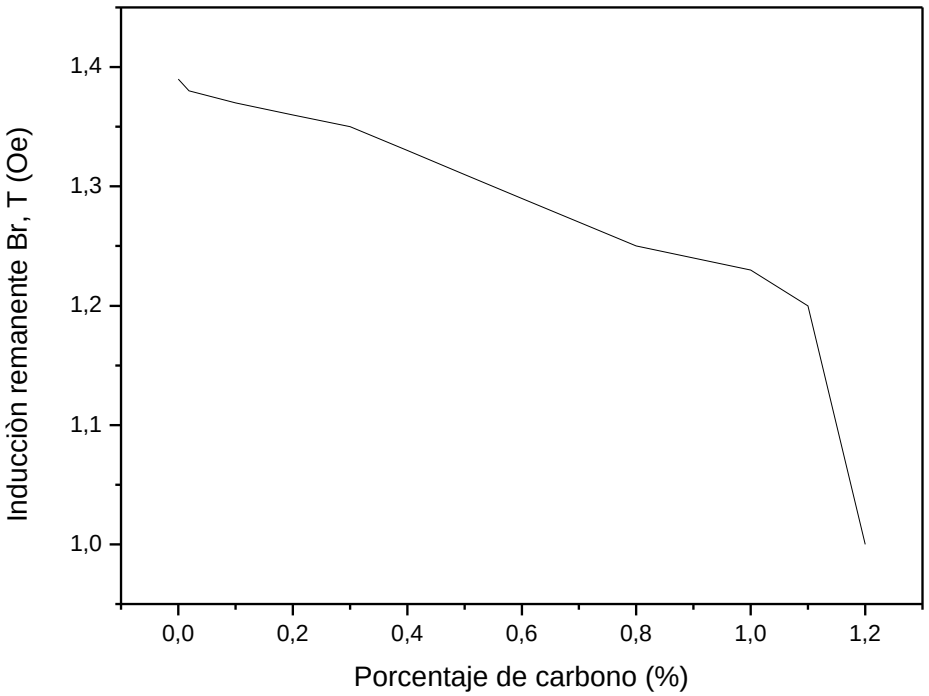


Gráfico 155. Cálculo de la inducción remanente. Región Caldas. Falla Arco Eléctrico/Térmica.
Fuente: M. Mago

- **Tipo de Falla: Descarga parcial. Causa: Defecto de fabricación/Humedad.**

```
>> X=[0 0.014 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
>> Y=[1.39 1.38 1.37 1.36 1.35 1.33 1.31 1.29 1.27 1.25 1.24 1.23 1.2 1];
>> M=1;
>> lspoly(X,Y,M)

ans =

 -0.2247
1.4090

>> y=(-0.2247*0.010)+1.4090  = 1.4068
```

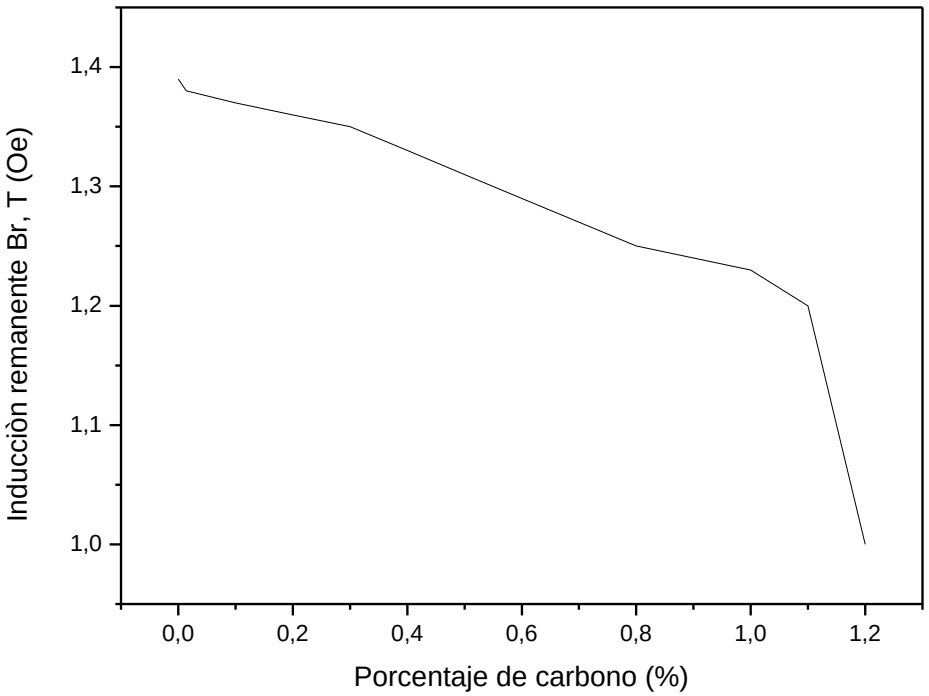


Gráfico 156. Cálculo de la inducción remanente. Región Caldas. Falla Descarga Parcial.
Fuente: M. Mago

3. **Región Pacífico.**
   - **Tipo de Falla: Térmica/Arco eléctrico. Causa: Sobrecarga.**

```
>> X=[0 0.1 0.131 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
>> Y=[1.39 1.38 1.37 1.36 1.35 1.33 1.31 1.29 1.27 1.25 1.24 1.23 1.2 1];
>> M=1;
>> lspoly(X,Y,M)

ans =

 -0.2320
1.4150
```

>> y=(-0.2320*0.100)+1.4150 = 1.3918

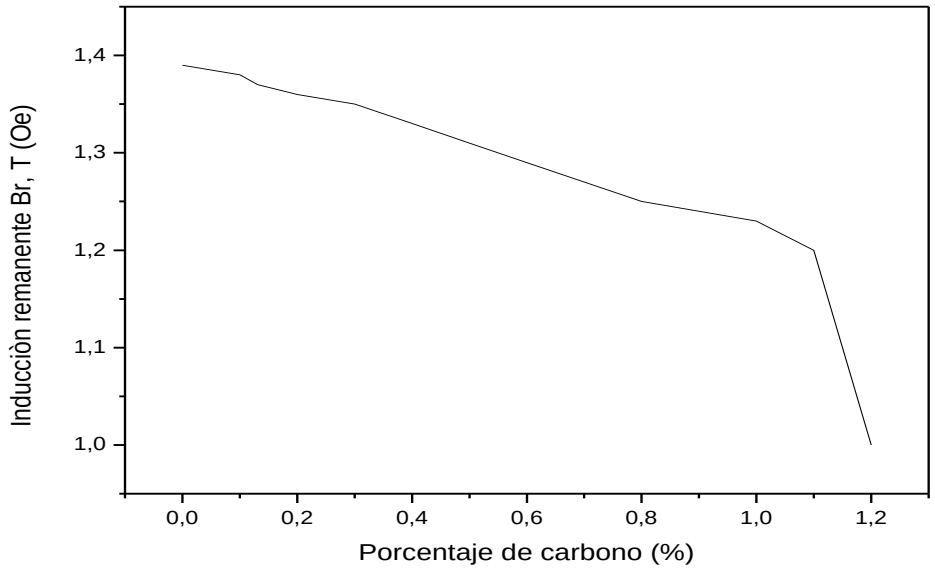


Gráfico 157. Cálculo de la inducción remanente. Región Pacífico. Falla Térmica/Arco Eléctrico.
Fuente: M. Mago

- **Tipo de Falla: Arco Eléctrico. Causa: Cortocircuito externo.**

  >> X=[0 0.002 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
  >> Y=[1.39 1.38 1.37 1.36 1.35 1.33 1.31 1.29 1.27 1.25 1.24 1.23 1.2 1];
  >> M=1;
  >> lspoly(X,Y,M)

  ans =

  -0.2238
  1.4083

  >> y=(-0.2238*0.001)+1.4083 = 1.4081

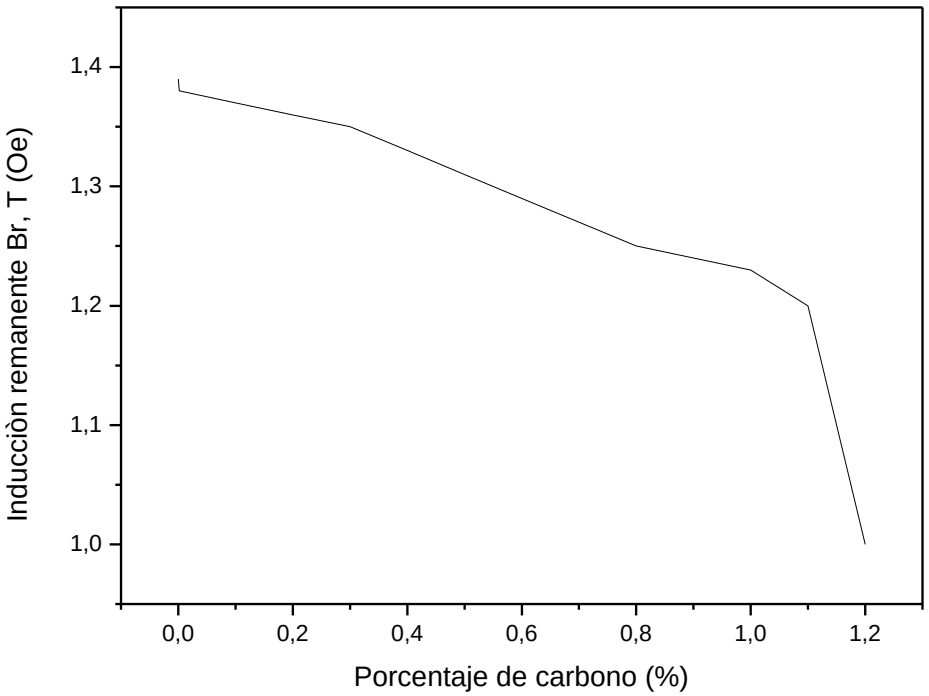


Gráfico 158. Cálculo de la inducción remanente. Región Pacífico. Falla Arco Eléctrico.
Fuente: M. Mago

- **Tipo de Falla: Descarga parcial. Causa: Sobretensión.**

```
>> X=[0 0.033 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
>> Y=[1.39 1.38 1.37 1.36 1.35 1.33 1.31 1.29 1.27 1.25 1.24 1.23 1.2 1];
>> M=1;
>> lspoly(X,Y,M)

ans =

-0.2259
1.4100

>> y=(-0.2259*0.020)+1.4100  = 1.4055
```

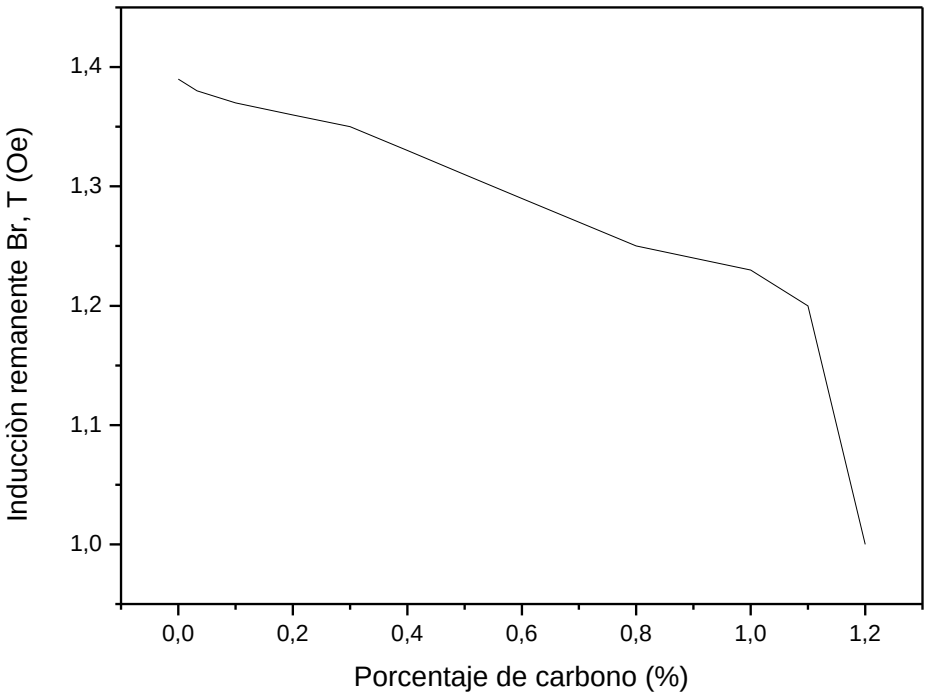


Gráfico 159. Cálculo de la inducción remanente. Región Pacífico. Falla Descarga Parcial.
Fuente: M. Mago

4. **Cundinamarca.**
   - **Tipo de Falla: Térmica. Causa: Sobrecarga.**

```
>> X=[0 0.033 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
>> Y=[1.39 1.38 1.37 1.36 1.35 1.33 1.31 1.29 1.27 1.25 1.24 1.23 1.2 1];
>> M=1;
>> lspoly(X,Y,M)

ans =

-0.2259
1.4100

>> y=(-0.2259*0.030)+1.4100  = 1.4032
```

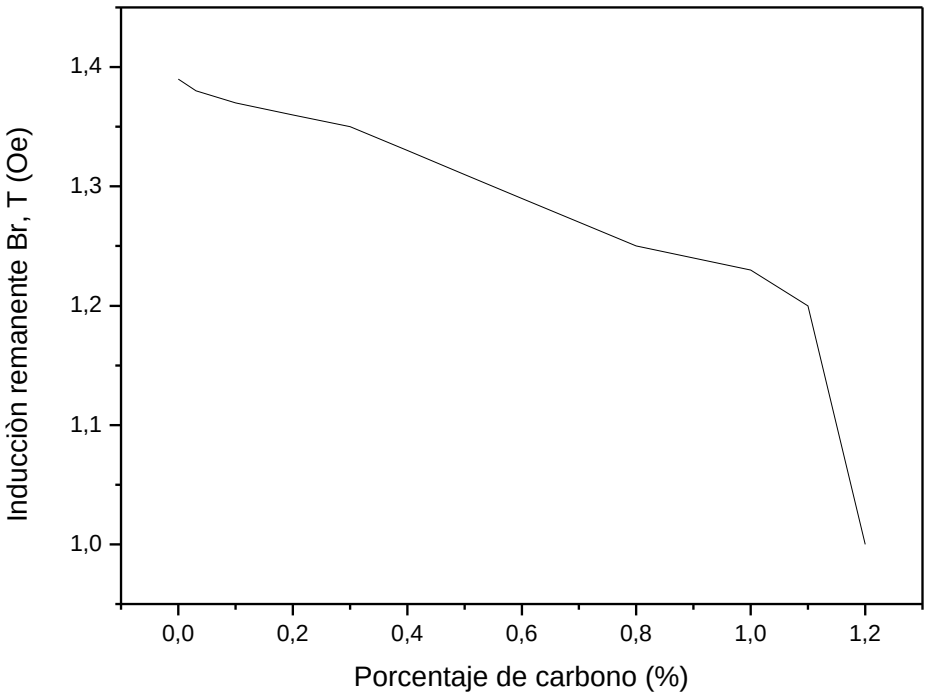


Gráfico 160. Cálculo de la inducción remanente. Región Cundinamarca. Falla Térmica.
Fuente: M. Mago

5. **Región Bogotá.**
   - **Tipo de Falla: Arco eléctrico/Térmica. Causa: Sobrecarga.**

```
>> X=[0 0.1 0.105 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
>> Y=[1.39 1.38 1.37 1.36 1.35 1.33 1.31 1.29 1.27 1.25 1.24 1.23 1.2 1];
>> M=1;
>> lspoly(X,Y,M)

ans =

-0.2304
1.4137

>> y=(-0.2304*0.100)+1.4137  = 1.3907
```

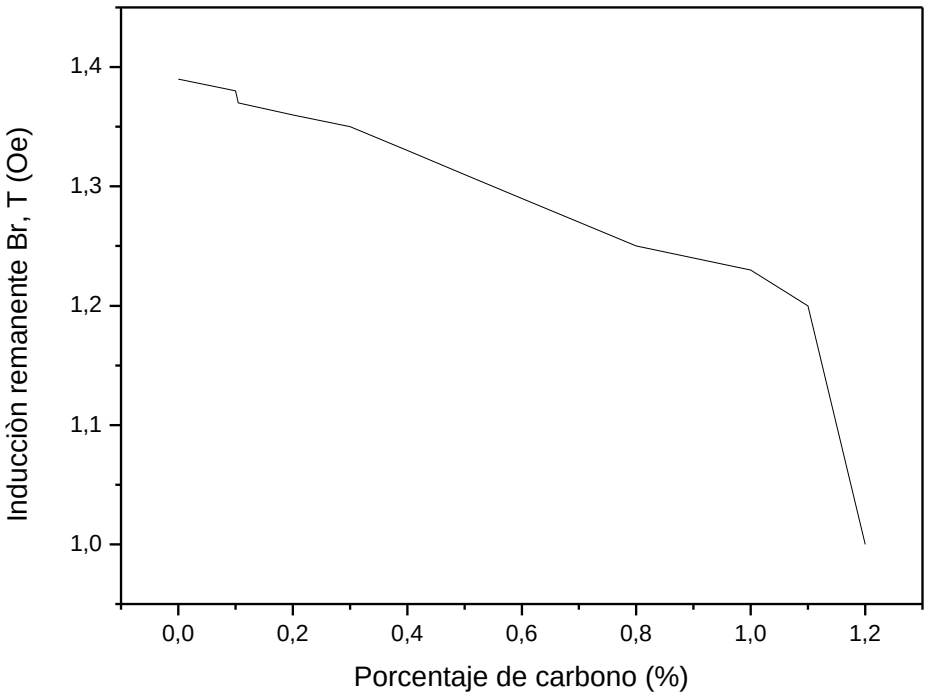


Gráfico 161. Cálculo de la inducción remanente. Región Bogotá. Falla Arco Eléctrico/Térmica.
Fuente: M. Mago

- **Tipo de Falla: Arco Eléctrico. Causa: Sobretensión.**
  >> X=[0 0.093 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
  >> Y=[1.39 1.38 1.37 1.36 1.35 1.33 1.31 1.29 1.27 1.25 1.24 1.23 1.2 1];
  >> M=1;
  >> lspoly(X,Y,M)

  ans =

  -0.2297
  1.4131

  >> y=(-0.2297*0.080)+1.4131 = 1.3947

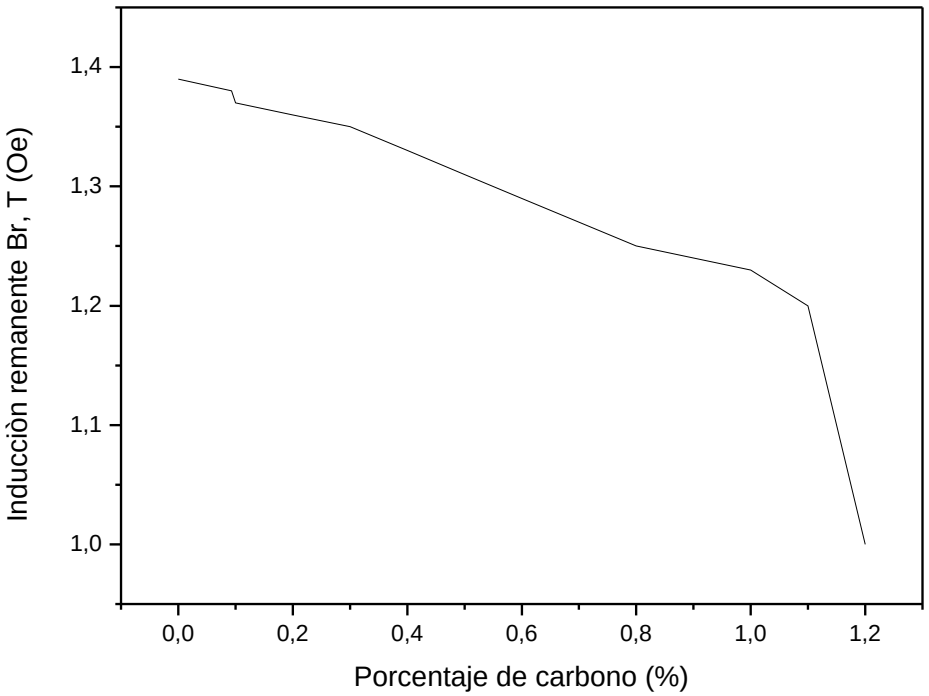


Gráfico 162. Cálculo de la inducción remanente. Región Bogotá. Falla Arco Eléctrico.
Fuente: M. Mago

- **Tipo de Falla: Arco Eléctrico. Causa: Cortocircuito externo.**

```
>> X=[0 0.062 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
>> Y=[1.39 1.38 1.37 1.36 1.35 1.33 1.31 1.29 1.27 1.25 1.24 1.23 1.2 1];
>> M=1;
>> lspoly(X,Y,M)

ans =

-0.2278
1.4115

>> y=(-0.2278*0.050)+1.4115  = 1.4001
```

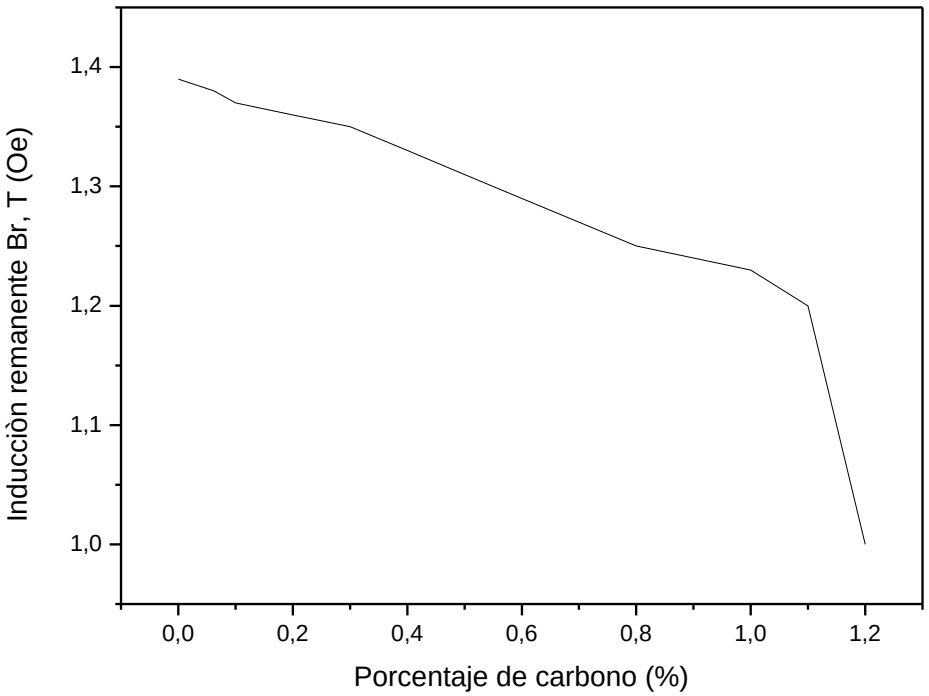


Gráfico 163. Cálculo de la inducción remanente. Región Bogotá. Falla Arco Eléctrico.
Fuente: M. Mago

- **Tipo de Falla: Descarga parcial. Causa: Sobretensión.**

```
>> X=[0 0.1 0.101 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
>> Y=[1.39 1.38 1.37 1.36 1.35 1.33 1.31 1.29 1.27 1.25 1.24 1.23 1.2 1];
>> M=1;
>> lspoly(X,Y,M)

ans =

-0.2302
1.4135

>> y=(-0.2302*0.090)+1.4135  = 1.3928
```

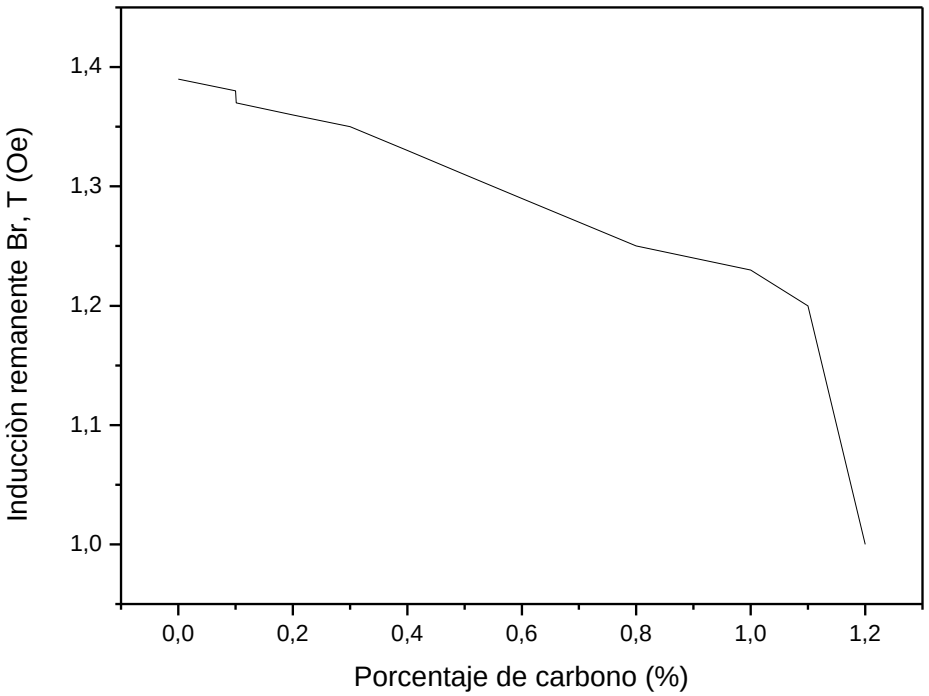


Gráfico 164. Cálculo de la inducción remanente. Región Bogotá. Falla Descarga Parcial.
Fuente: M. Mago

- **Tipo de Falla: Térmica. Causa: Sobrecarga.**

```
>> X=[0 0.1 0.1735 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
>> Y=[1.39 1.38 1.37 1.36 1.35 1.33 1.31 1.29 1.27 1.25 1.24 1.23 1.2 1];
>> M=1;
>> lspoly(X,Y,M)

ans =

-0.2342
1.4170
```

>> y=(-0.2342*0.15)+1.4170 = 1.3819

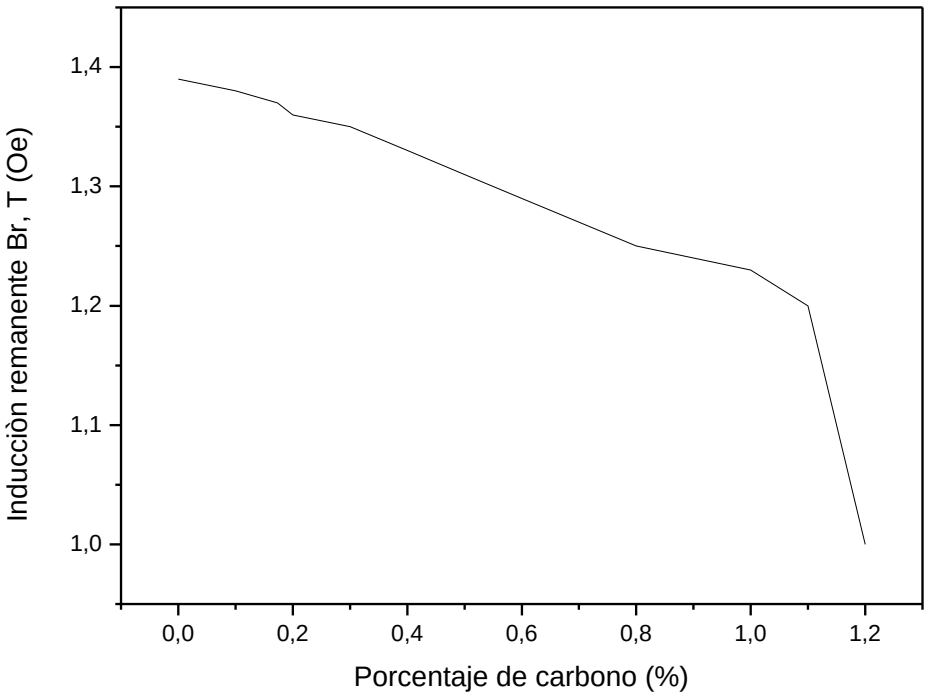


Gráfico 165. Cálculo de la inducción remanente. Región Bogotá. Falla Térmica. Fuente: M. Mago

6. Patrón de referencia. Equipo nuevo.

```
>> X=[0 0.033 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
>> Y=[1.39 1.38 1.37 1.36 1.35 1.33 1.31 1.29 1.27 1.25 1.24 1.23 1.2 1];
>> M=1;
>> lspoly(X,Y,M)

ans =

 -0.2259
1.4100
```

>> y=(-0.2259*0.030)+1.4100 = 1.4032

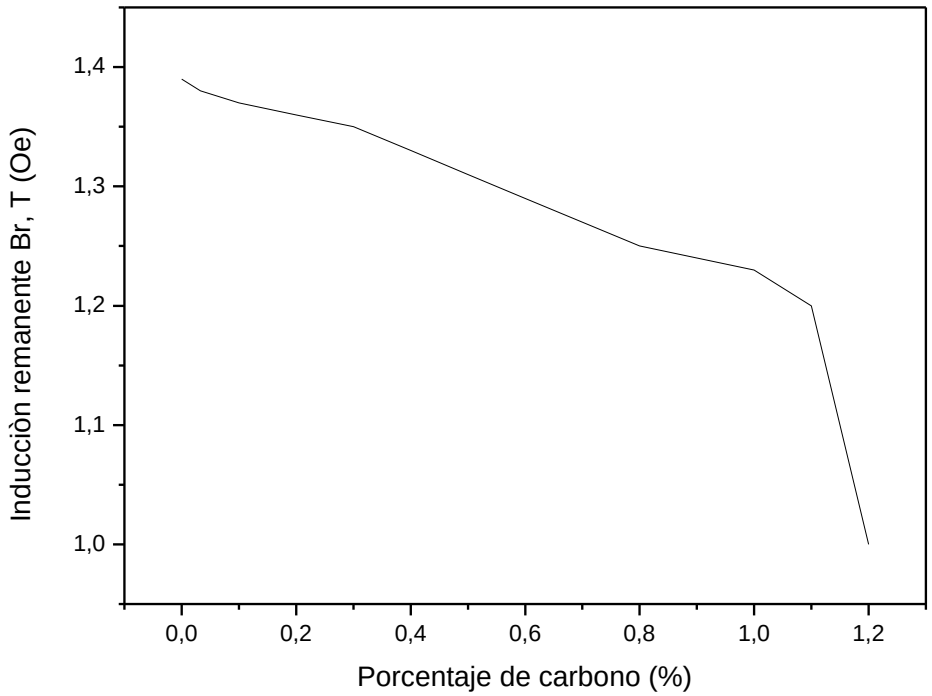


Gráfico 166. Cálculo de la inducción remanente. Muestra Patrón.
Fuente: M. Mago

3.2.5.6 Contenido de Carbono (%) versus Permeabilidad Magnética Absoluta.

1. **Región Antioquia.**
   - **Tipo de Falla: Térmica. Causa: Sobrecarga.**

     >> X=[0 0.1 0.193 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
     >> Y=[14600 14400 14200 14100 14000 13900 13800 13700 13600 13500 13400 13300 13250 13200];
     >> lsline(X,Y)

     ans = -1.1070e+003

     >> sum(X) = 7.9930

     >> sum(Y) = 192950

     >> G=((-7.9930*-1.1070e+003)+192950)/(14) = 1.4414e+004

     >> y=(-1.1070e+003*0.191)+1.4414e+004 = 1.4203e+004

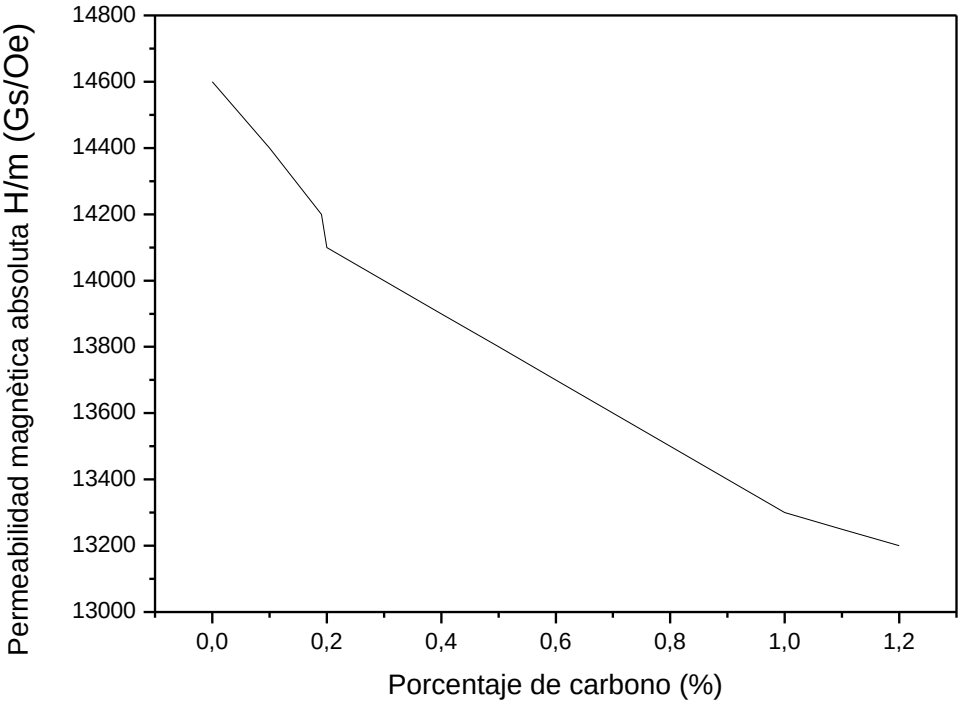


Gráfico 167. Cálculo de la permeabilidad magnética absoluta. Región Antioquia. Falla Térmica.
Fuente: M. Mago

- **Tipo de Falla: Descarga parcial. Causa: Sobretensión.**
  >> X=[0 0.069 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
  >> Y=[14600 14400 14200 14100 14000 13900 13800 13700 13600 13500 13400 13300 13250 13200];
  >> lsline(X,Y)

  ans = -1.0775e+003

  >> sum(X) = 7.8690

  >> sum(Y) = 192950

  >> G=((-7.8690*-1.0775e+003)+192950)/(14) = 1.4388e+004

  >> y=(-1.0775e+003*0.050)+1.4388e+004 = 1.4334e+004

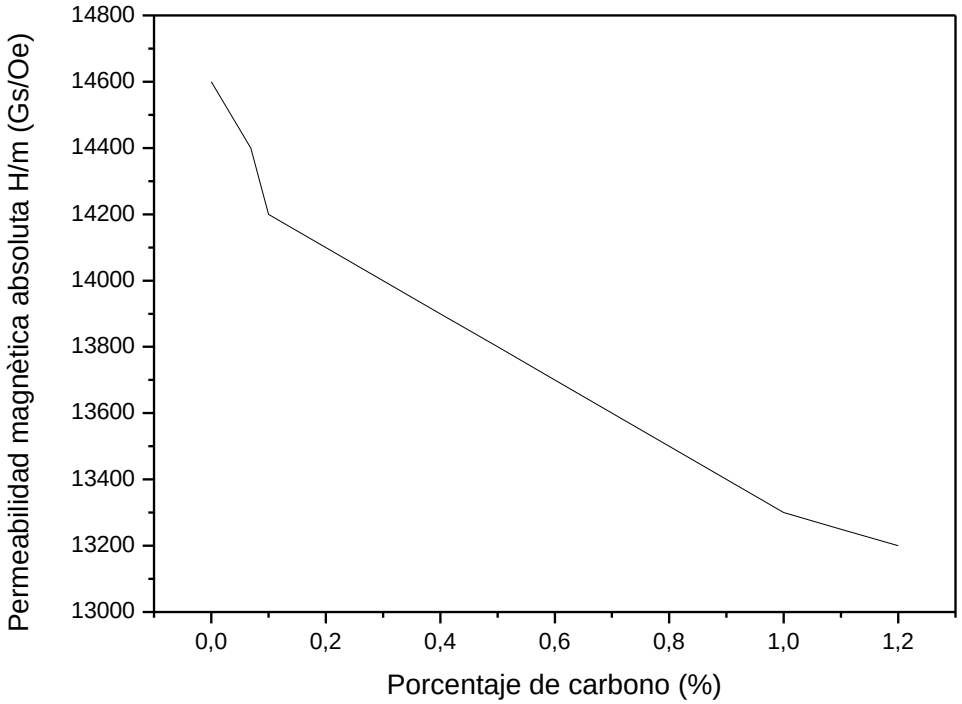


Gráfico 168. Cálculo de la permeabilidad magnética absoluta. Región Antioquia. Falla Descarga Parcial. Fuente: M. Mago

- **Tipo de Falla: Arco eléctrico. Causa: Cortocircuito externo.**
  >> X=[0 0.010 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
  >> Y=[14600 14400 14200 14100 14000 13900 13800 13700 13600 13500 13400 13300 13250 13200];
  >> lsline(X,Y)

  ans = -1.0636e+003

  >> sum(X) = 7.8100

  >> sum(Y) = 192950

  >> G=((-7.8100*-1.0636e+003)+192950)/(14) = 1.4375e+004

  >> y=(-1.0636e+003*0.009)+1.4375e+004 = 1.4365e+004

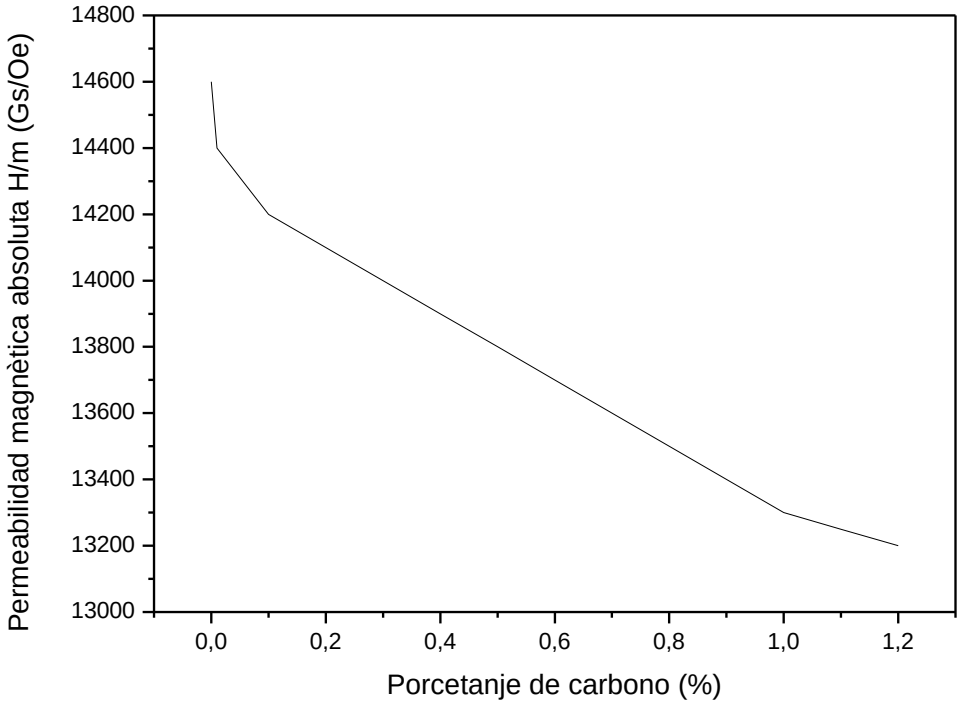


Gráfico 169. Cálculo de la permeabilidad magnética absoluta. Región Antioquia. Falla Arco Eléctrico. Fuente: M. Mago

2. **Región Caldas.**
   - **Tipo de Falla: Térmica. Causa: Sobrecarga.**

     >> X=[0 0.067 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
     >> Y=[14600 14400 14200 14100 14000 13900 13800 13700 13600 13500 13400 13300 13250 13200];
     >> lsline(X,Y)

     ans = -1.0770e+003

     >> sum(X) = 7.8670

     >> sum(Y) = 192950

     >> G=((-7.8670*-1.0770e+003)+192950)/(14) = 1.4387e+004

     >> y=(-1.0770e+003*0.050)+1.4387e+004 = 1.4333e+004

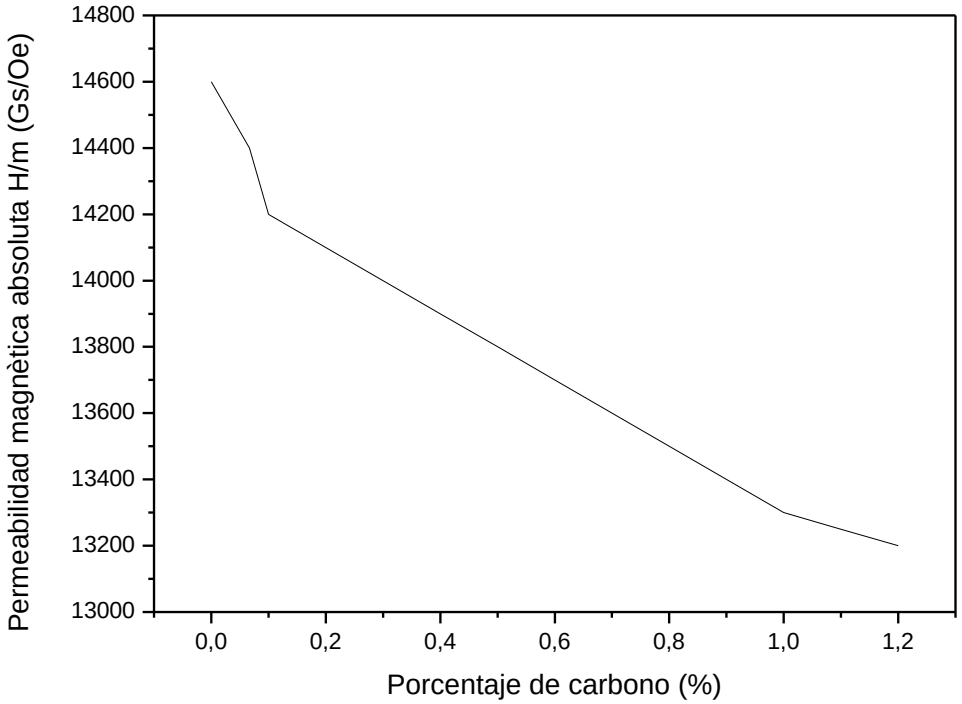


Gráfico 170. Cálculo de la permeabilidad magnética absoluta. Región Caldas. Falla Térmica.
Fuente: M. Mago

- **Tipo de Falla: Arco eléctrico. Causa: Cortocircuito externo.**
  >> X=[0 0.040 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
  >> Y=[14600 14400 14200 14100 14000 13900 13800 13700 13600 13500 13400 13300 13250 13200];
  >> lsline(X,Y)

  ans = -1.0710e+003

  >> sum(X) = 7.8400

  >> sum(Y) = 192950

  >> G=((-7.8400*-1.0710e+003)+192950)/(14) = 1.4382e+004

  >> y=(-1.0710e+003*0.030)+1.4382e+004 = 1.4350e+004

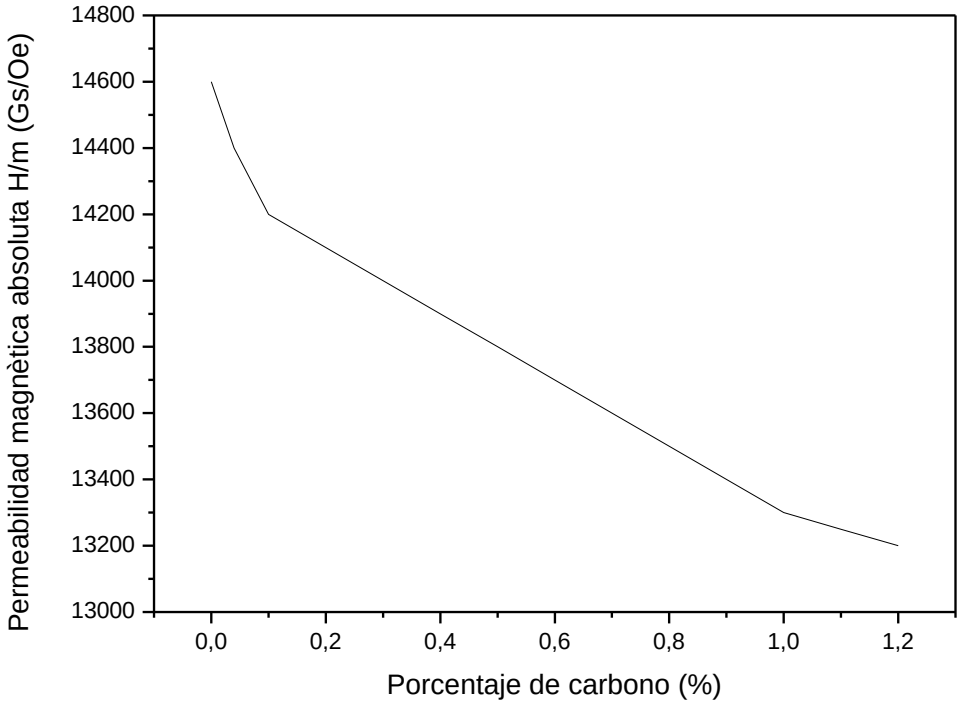


Gráfico 171. Cálculo de la permeabilidad magnética absoluta. Región Caldas. Falla Arco Eléctrico.
Fuente: M. Mago

- **Tipo de Falla: Arco eléctrico/térmica. Causa: Sobrecarga.**
  >> X=[0 0.019 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
  >> Y=[14600 14400 14200 14100 14000 13900 13800 13700 13600 13500 13400 13300 13250 13200];
  >> lsline(X,Y)

  ans = -1.0659e+003

  >> sum(X) = 7.8190

  >> sum(Y) = 192950

  >> G=((-7.8190*-1.0659e+003)+192950)/(14) = 1.4377e+004

  >> y=(-1.0659e+003*0.010)+1.4377e+004 = 1.4366e+004

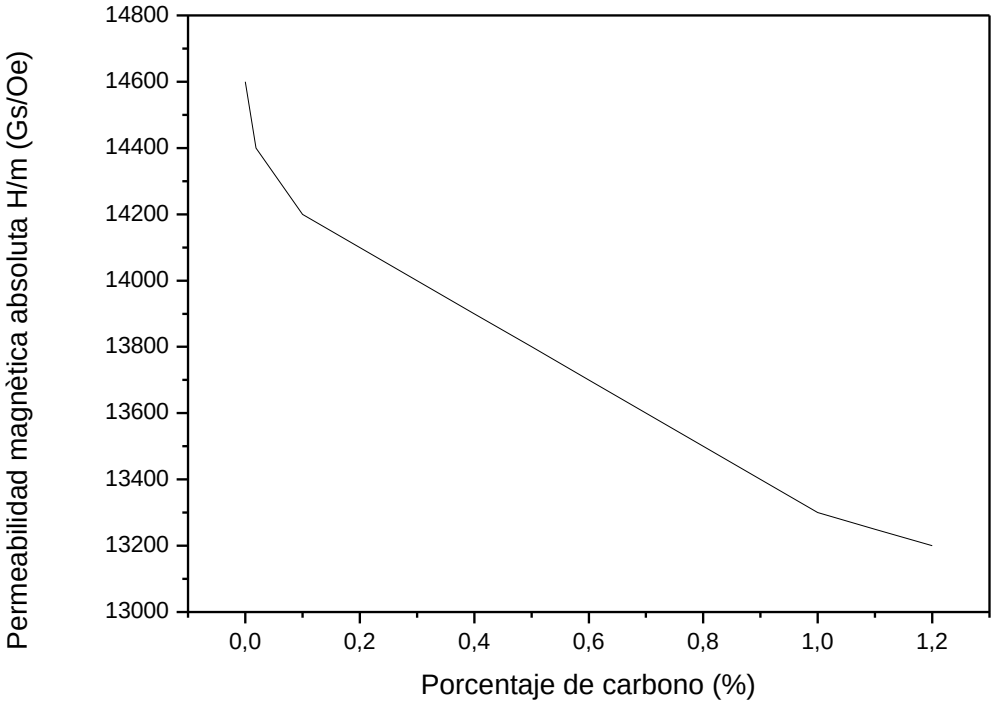


Gráfico 172. Cálculo de la permeabilidad magnética absoluta. Región Caldas. Falla Arco Eléctrico/Térmica. Fuente: M. Mago

- **Tipo de Falla: Descarga parcial. Causa: Defecto de fabricación/Humedad.**
  >> X=[0 0.014 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
  >> Y=[14600 14400 14200 14100 14000 13900 13800 13700 13600 13500 13400 13300 13250 13200];
  >> lsline(X,Y)

  ans = -1.0646e+003

  >> sum(X) = 7.8140

  >> sum(Y) = 192950

  >> G=((-7.8140*-1.0646e+003)+192950)/(14) = 1.4376e+004

  >> y=(-1.0646e+003*0.010)+1.4376e+004 = 1.4365e+004

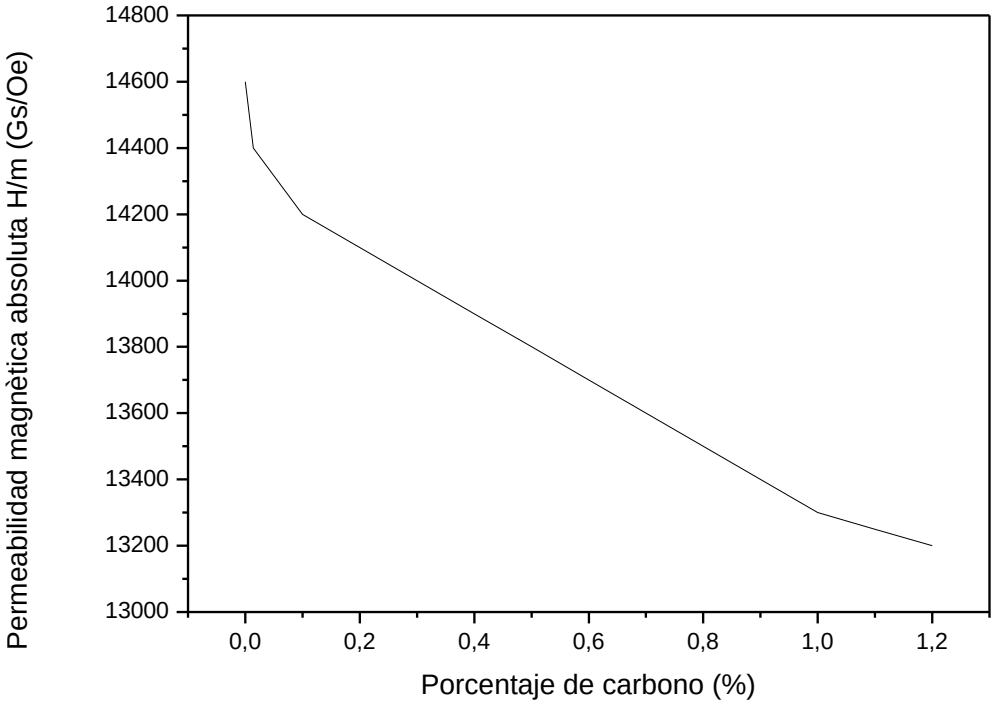


Gráfico 173. Cálculo de la permeabilidad magnética absoluta. Región Caldas. Falla Descarga Parcial. Fuente: M. Mago

3. **Región Pacifico.**
   - **Tipo de Falla: Térmica/Arco eléctrico. Causa: Sobrecarga.**

     >> X=[0 0.1 0.131 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
     >> Y=[14600 14400 14200 14100 14000 13900 13800 13700 13600 13500 13400 13300 13250 13200];
     >> lsline(X,Y)

     ans = -1.0922e+003

     >> sum(X) = 7.9310

     >> sum(Y) = 192950

     >> G=((-7.9310*-1.0922e+003)+192950)/(14) = 1.4401e+004

     >> y=(-1.0922e+003*0.100)+1.4401e+004 = 1.4292e+004

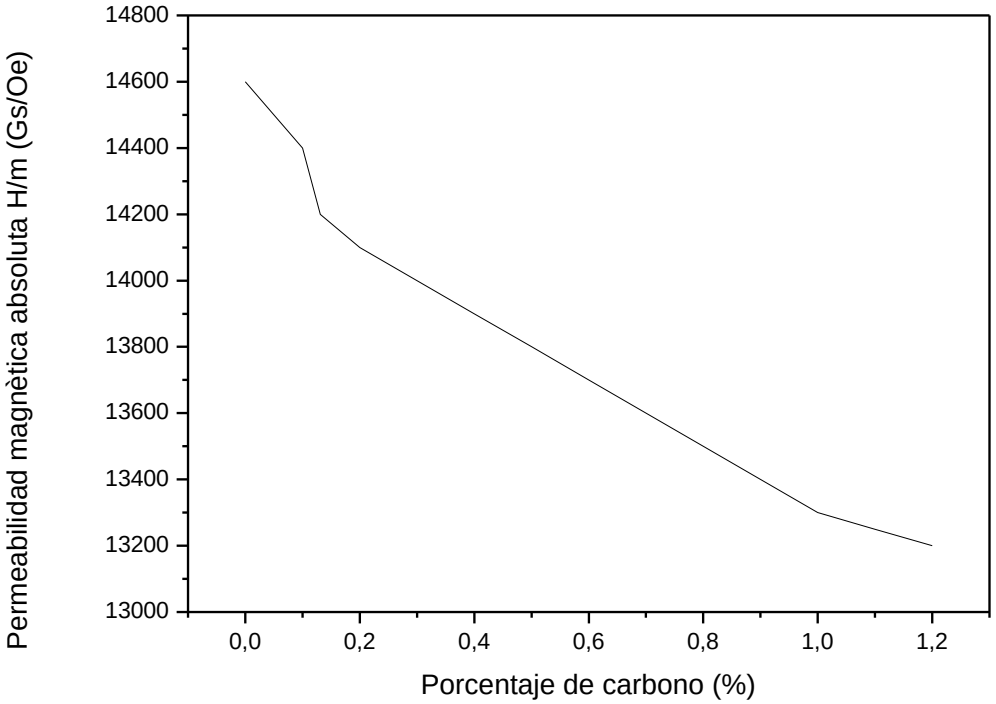


Gráfico 174. Cálculo de la permeabilidad magnética absoluta. Región Pacífico. Falla Térmica/Arco Eléctrico. Fuente: M. Mago

- **Tipo de Falla: Arco eléctrico. Causa: Cortocircuito externo.**
  >> X=[0 0.002 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
  >> Y=[14600 14400 14200 14100 14000 13900 13800 13700 13600 13500 13400 13300 13250 13200];
  >> lsline(X,Y)

  ans = -1.0615e+003

  >> sum(X) = 7.8020

  >> sum(Y) = 192950

  >> G=((-7.8020*-1.0615e+003)+192950)/(14) = 1.4374e+004

  >> y=(-1.0615e+003*0.001)+1.4374e+004 = 1.4373e+004

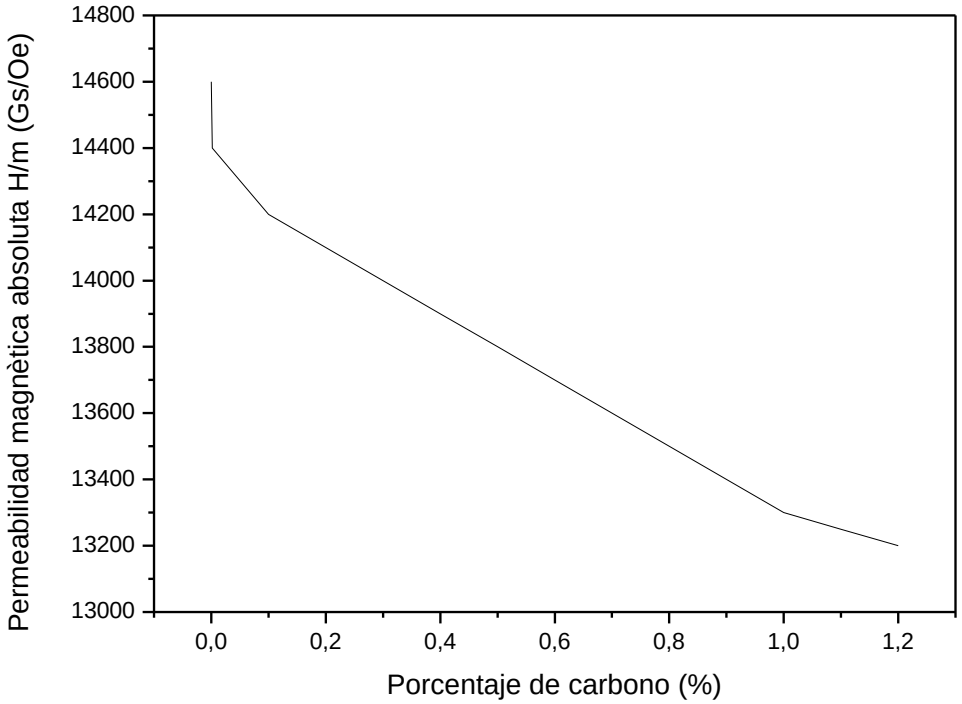


Gráfico 175. Cálculo de la permeabilidad magnética absoluta. Región Pacífico. Falla Arco Eléctrico.
Fuente: M. Mago

- **Tipo de Falla: Descarga parcial. Causa: Sobretensión.**
  >> X=[0 0.033 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
  >> Y=[14600 14400 14200 14100 14000 13900 13800 13700 13600 13500 13400 13300 13250 13200];
  >> lsline(X,Y)

  ans = -1.0693e+003

  >> sum(X) = 7.8330

  >> sum(Y) = 192950

  >> G=((-7.8330*-1.0693e+003)+192950)/(14) = 1.4380e+004

  >> y=(-1.0693e+003*0.020)+1.4380e+004 = 1.4359e+004

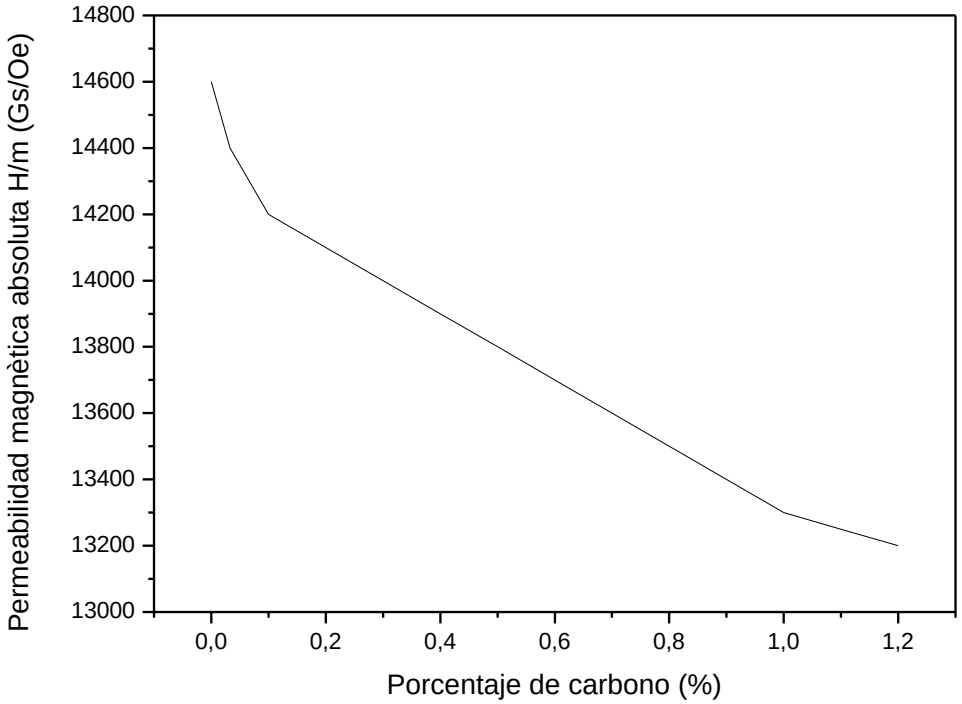


Gráfico 176. Cálculo de la permeabilidad magnética absoluta. Región Pacífico. Falla Descarga Parcial. Fuente: M. Mago

4. **Cundinamarca.**
   - **Tipo de Falla: Térmica. Causa: Sobrecarga.**

     >> X=[0 0.031 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
     >> Y=[14600 14400 14200 14100 14000 13900 13800 13700 13600 13500 13400 13300 13250 13200];
     >> lsline(X,Y)

     ans = -1.0688e+003

     >> sum(X) = 7.8310

     >> sum(Y) = 192950

     >> G=((-7.8310*-1.0688e+003)+192950)/(14) = 1.4380e+004

     >> y=(-1.0688e+003*0.020)+1.4380e+004 = 1.4359e+004

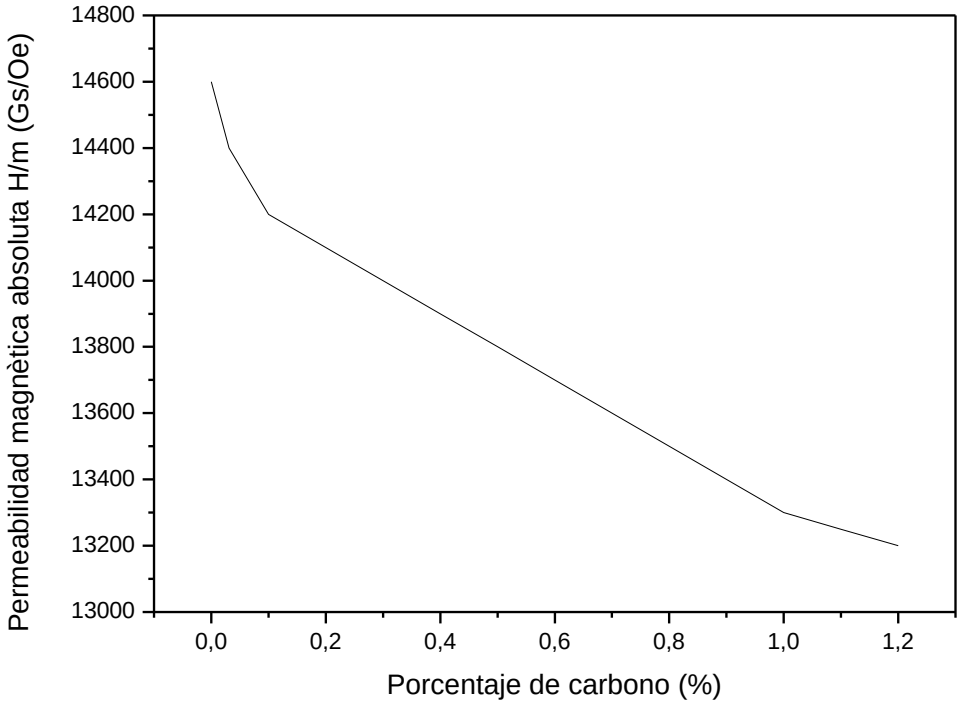


Gráfico 177. Cálculo de la permeabilidad magnética absoluta. Región Cundinamarca. Falla Térmica.
Fuente: M. Mago

5. **Región Bogotá.**
   - **Tipo de Falla: Arco eléctrico/Térmica. Causa: Sobrecarga.**

     >> X=[0 0.1 0.105 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
     >> Y=[14600 14400 14200 14100 14000 13900 13800 13700 13600 13500 13400 13300 13250 13200];
     >> lsline(X,Y)

     ans = -1.0851e+003

     >> sum(X) = 7.9050

     >> sum(Y) = 192950

     >> G=((-7.9050*-1.0851e+003)+192950)/(14) = 1.4395e+004

     >> y=(-1.0851e+003*0.100)+1.4395e+004 = 1.4286e+004

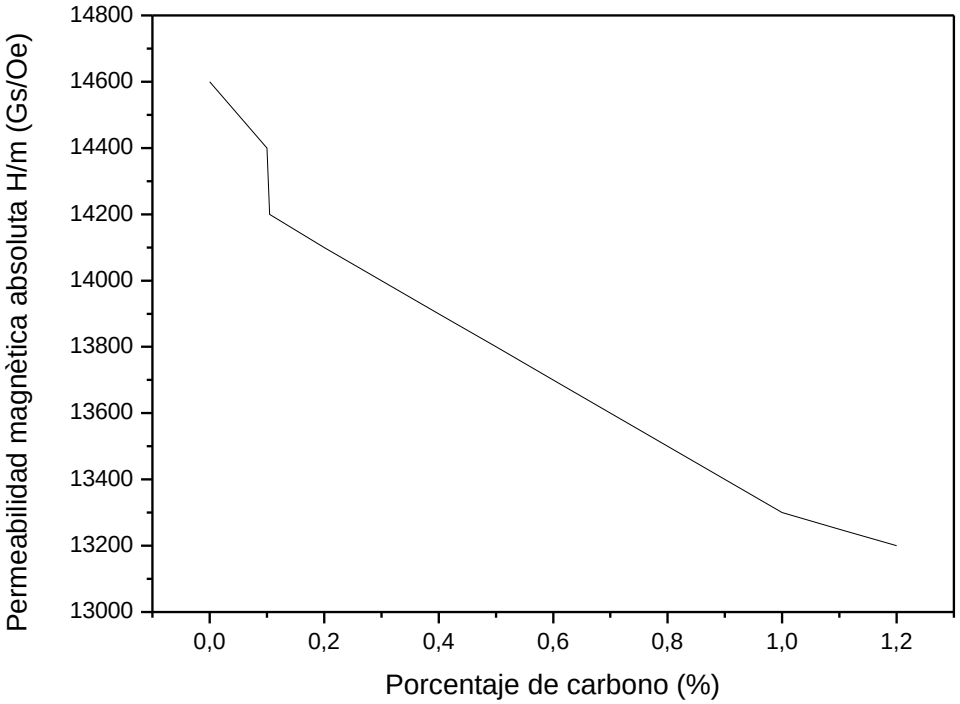


Gráfico 178. Cálculo de la permeabilidad magnética absoluta. Región Bogotá. Falla Arco Eléctrico/Térmica. Fuente: M. Mago

- **Tipo de Falla: Arco Eléctrico. Causa: Sobretensión.**
  >> X=[0 0.093 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
  >> Y=[14600 14400 14200 14100 14000 13900 13800 13700 13600 13500 13400 13300 13250 13200];
  >> lsline(X,Y)

  ans = -1.0824e+003

  >> sum(X) = 7.8930

  >> sum(Y) = 192950

  >> G=((-7.8930*-1.0824e+003)+192950)/(14) = 1.4392e+004

  >> y=(-1.0824e+003*0.080)+1.4392e+004 = 1.4305e+004

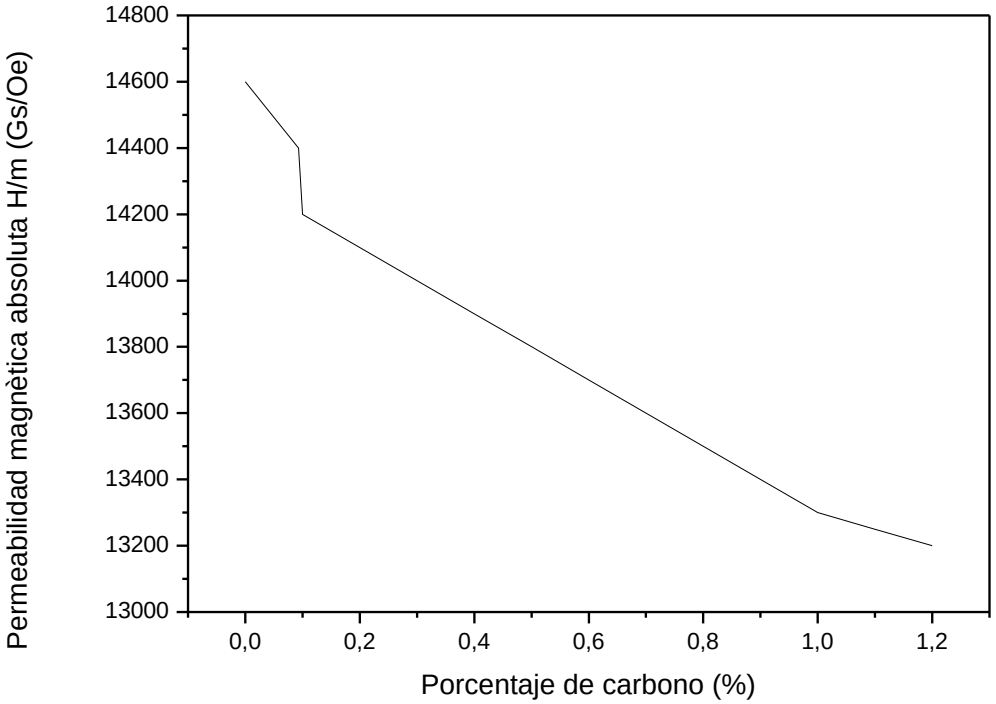


Gráfico 179. Cálculo de la permeabilidad magnética absoluta. Región Bogotá. Falla Arco Eléctrico.
Fuente: M. Mago

- **Tipo de Falla: Arco eléctrico. Causa: Cortocircuito externo.**
  >> X=[0 0.062 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
  >> Y=[14600 14400 14200 14100 14000 13900 13800 13700 13600 13500 13400 13300 13250 13200];
  >> lsline(X,Y)

  ans = -1.0759e+003

  >> sum(X) = 7.8620

  >> sum(Y) = 192950

  >> G=((-7.8620*-1.0759e+003)+192950)/(14) = 1.4386e+004

  >> y=(-1.0759e+003*0.050)+1.4386e+004 = 1.4332e+004

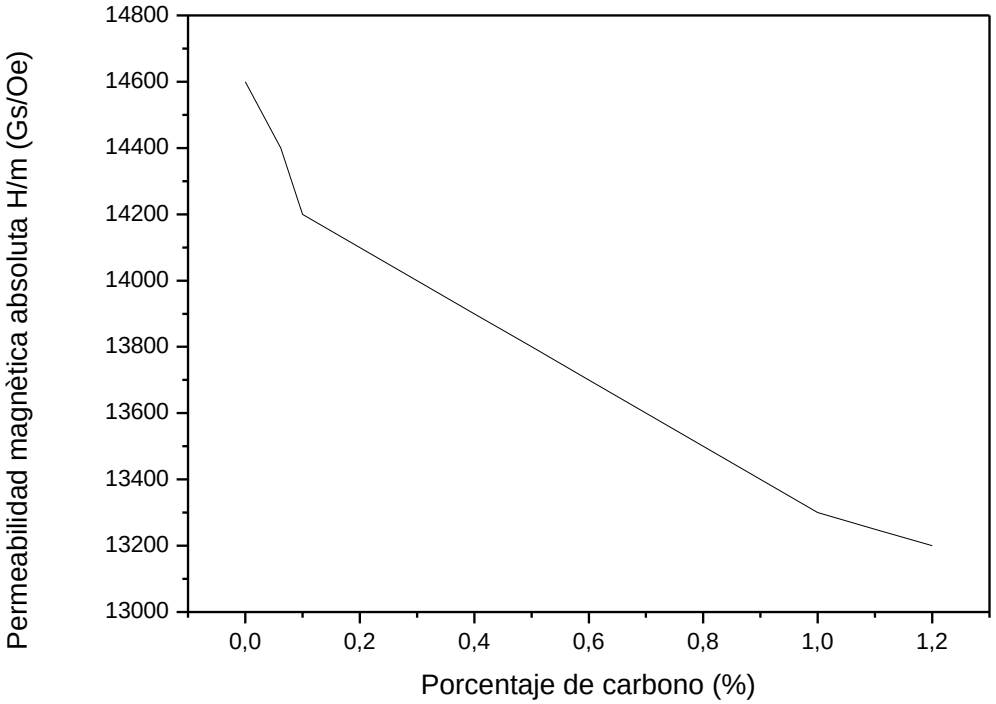


Gráfico 180. Cálculo de la permeabilidad magnética absoluta. Región Bogotá. Falla Arco Eléctrico.
Fuente: M. Mago

- **Tipo de Falla: Descarga parcial. Causa: Sobretensión.**
  >> X=[0 0.1 0.101 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
  >> Y=[14600 14400 14200 14100 14000 13900 13800 13700 13600 13500 13400 13300 13250 13200];
  >> lsline(X,Y)

  ans = -1.0840e+003

  >> sum(X) = 7.9010

  >> sum(Y) = 192950

  >> G=((-7.9010*-1.0840e+003)+192950)/(14) = 1.4394e+004

  >> y=(-1.0840e+003*0.090)+1.4394e+004 = 1.4296e+004

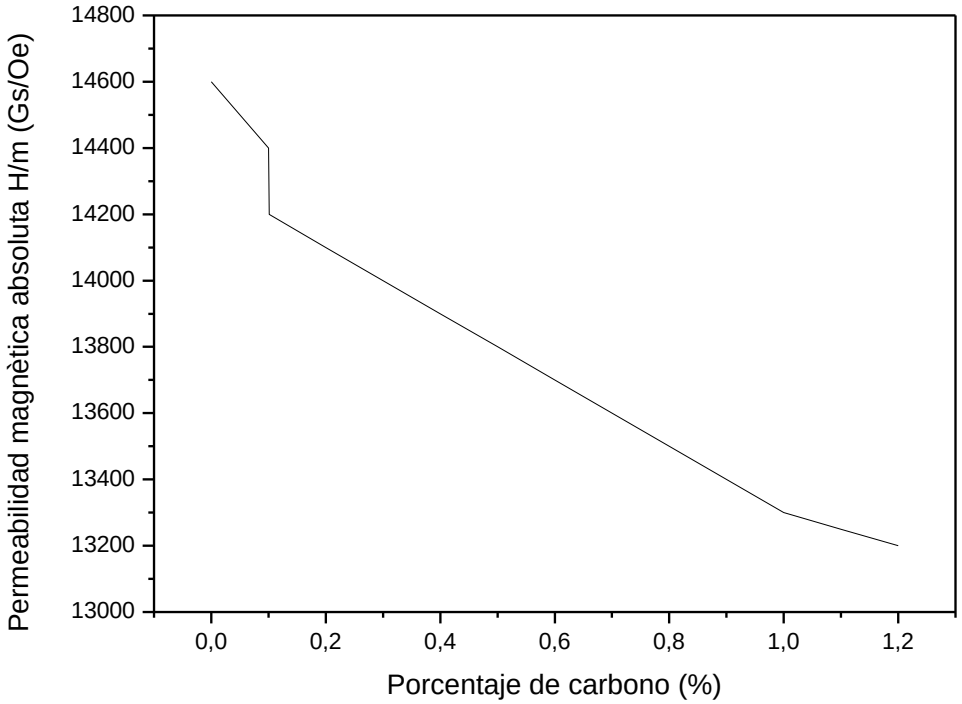


Gráfico 181. Cálculo de la permeabilidad magnética absoluta. Región Bogotá. Falla Descarga Parcial. Fuente: M. Mago

- **Tipo de Falla: Térmica. Causa: Sobrecarga.**
  >> X=[0 0.1 0.1735 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
  >> Y=[14600 14400 14200 14100 14000 13900 13800 13700 13600 13500 13400 13300 13250 13200];
  >> lsline(X,Y)

  ans = -1.1027e+003

  >> sum(X) = 7.9735

  >> sum(Y) = 192950

  >> G=((-7.9713*-1.1027e+003)+192950)/(14) = 1.4410e+004

  >> y=(-1.1027e+003*0.100)+1.4410e+004 = 1.4300e+004

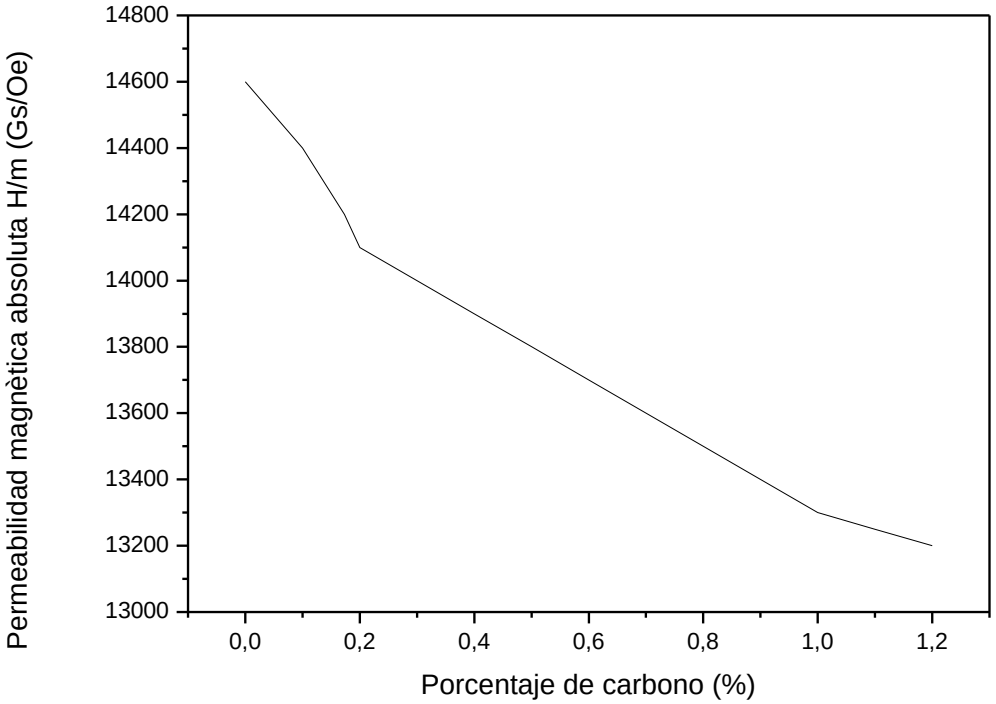


Gráfico 182. Cálculo de la permeabilidad magnética absoluta. Región Bogotá. Falla Térmica.
Fuente: M. Mago

6. Patrón de referencia. Equipo nuevo.

>> X=[0 0.033 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];
>> Y=[14600 14400 14200 14100 14000 13900 13800 13700 13600 13500 13400 13300 13250 13200];
>> lsline(X,Y)

ans = -1.0693e+003

>> sum(X) = 7.8330

>> sum(Y) = 192950

>> G=((-7.8330*-1.0693e+003)+192950)/(14) = 1.4380e+004

>> y=(-1.0693e+003*0.020)+1.4380e+004 = 1.4359e+004

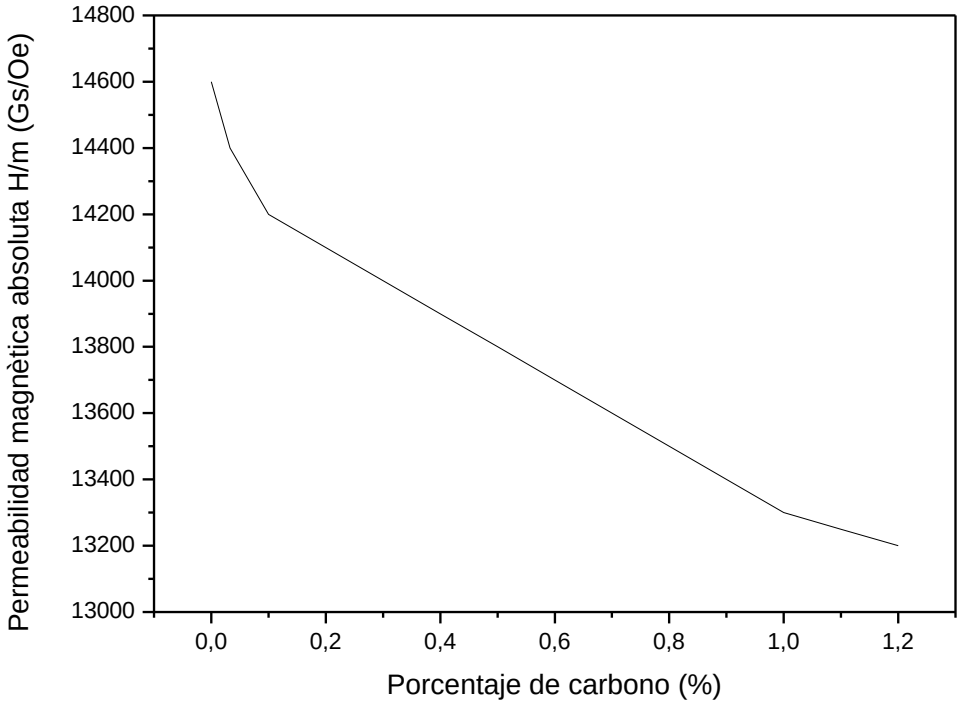


Gráfico 183. Cálculo de la permeabilidad magnética absoluta. Muestra Patrón. Fuente: M. Mago

3.2.6 Microscopia Electrónica de Barrido en Ambiente.

Se utilizo para esta prueba un (01) Microscopio Electrónico de Barrido Ambiental (ESEM) de última generación que admite el análisis de muestras en estado natural o bajo condiciones ambientales naturales, sin necesidad de usar técnicas convencionales de preparación a las mismas. Además, de recurrir a un régimen de alto vacío de forma similar a los microscopios SEM convencionales. Este equipo consta de un filamento W que emite electrones los cuales son enfocados en un haz que bombardea la muestra haciendo que esta emita electrones secundarios electrodispersados y con esta información de adquiere una imagen de morfología y aplicando el sensor de rayos X se realizan además, análisis elementales y mapeos químicos. A continuación en el gráfico 184 se indica imagen del equipo, el cual pertenece al laboratorio de Física del Plasma de la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales:

Gráfico 184. Microscopio Electrónico de Barrido en Ambiente marca Phillips modelo XL 30 ESEM TMP. Fuente: M. Mago

Los resultados obtenidos de estas pruebas se muestran en los gráficos 185 hasta 200:

1. **Región Antioquia.**

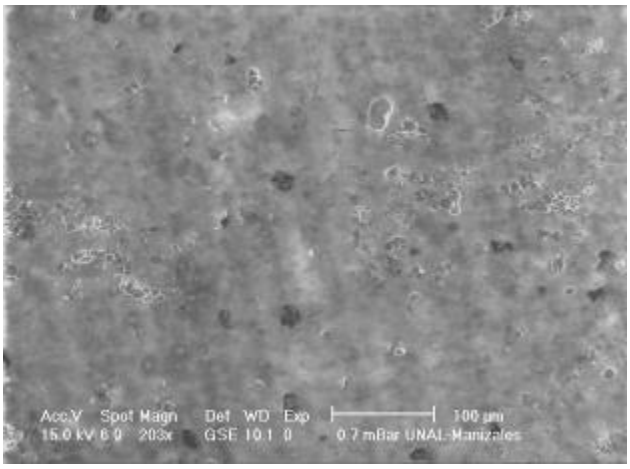


Gráfico 185. Microscopia Electrónica de Barrido Muestra Región Antioquia. Falla: Térmica.

Fuente: Laboratorio Física del Plasma Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales

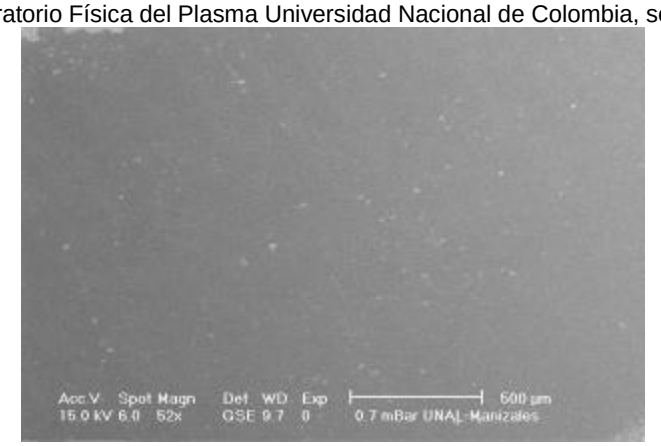


Gráfico 186. Microscopia Electrónica de Barrido Muestra Región Antioquia. Falla: Descarga Parcial.

Fuente: Laboratorio Física del Plasma Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales

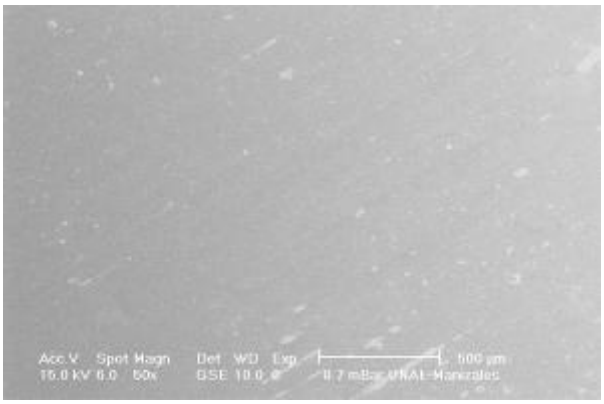


Gráfico 187. Microscopia Electrónica de Barrido Muestra Región Antioquia. Falla: Arco Eléctrico.

Fuente: Laboratorio Física del Plasma Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales

2. Región Caldas.

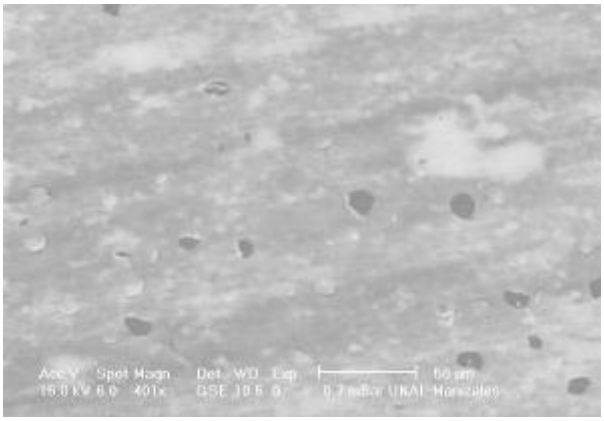


Gráfico 188. Microscopia Electrónica de Barrido Muestra Región Caldas. Falla: Térmica.

Fuente: Fuente: Laboratorio Física del Plasma Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales

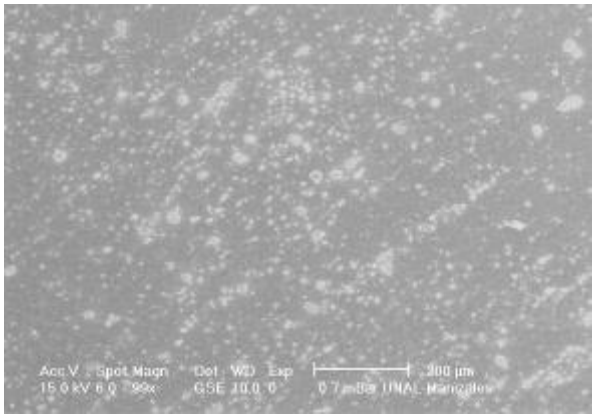


Gráfico 189. Microscopia Electrónica de Barrido Muestra Región Caldas. Falla: Arco Eléctrico.

Fuente: Laboratorio Física del Plasma Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales

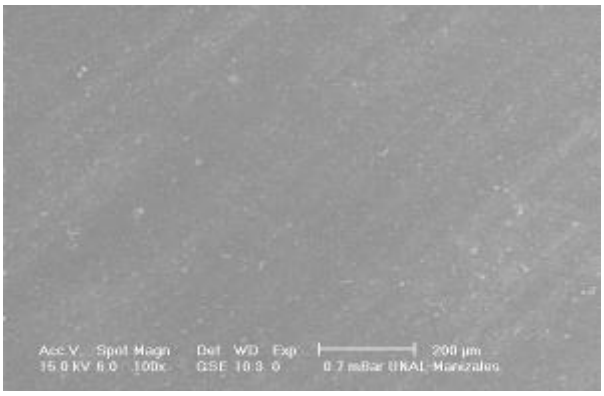


Gráfico 190. Microscopia Electrónica de Barrido Muestra Región Caldas. Falla: Arco Eléctrico/Térmica. Fuente: Laboratorio Física del Plasma Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales

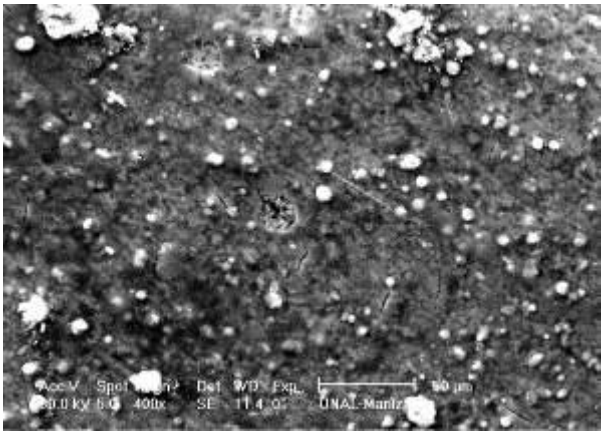


Gráfico 191. Microscopia Electrónica de Barrido Muestra Región Caldas. Falla: Descarga Parcial.

Fuente: Laboratorio Física del Plasma Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales

3. Región Pacífico.

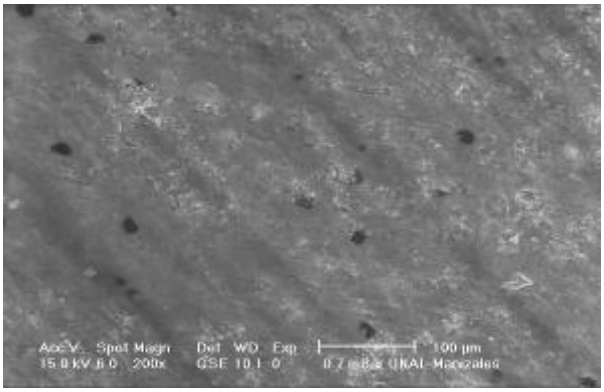


Gráfico 192. Microscopia Electrónica de Barrido Muestra Región Pacífico. Falla: Térmica/Arco Eléctrico. Fuente: Laboratorio Física del Plasma Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales

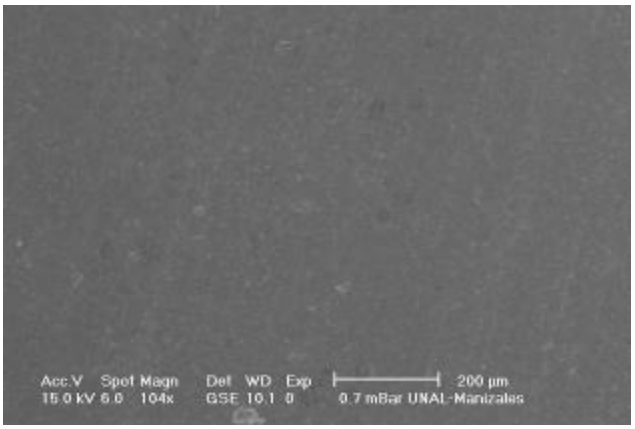


Gráfico 193. Microscopia Electrónica de Barrido Muestra Región Pacífico. Falla: Arco Eléctrico.

Fuente: Laboratorio Física del Plasma Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales

Gráfico 194. Microscopia Electrónica de Barrido Muestra Región Pacífico. Falla: Descarga Parcial.

Fuente: Laboratorio Física del Plasma Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales

4. Región Cundinamarca.

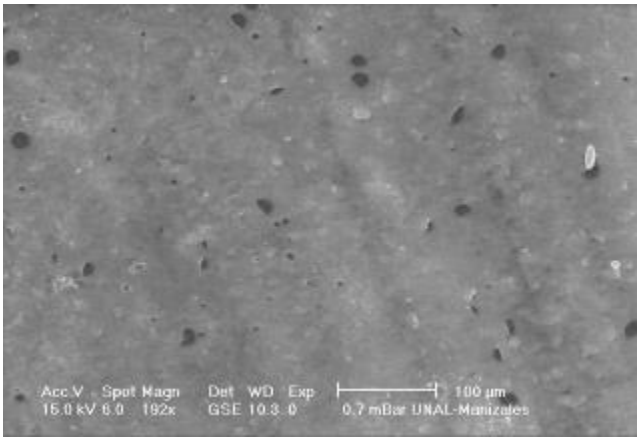


Gráfico 195. Microscopia Electrónica de Barrido Muestra Región Cundinamarca. Falla: Térmica.

Fuente: Laboratorio Física del Plasma Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales

5. Región Bogotá.

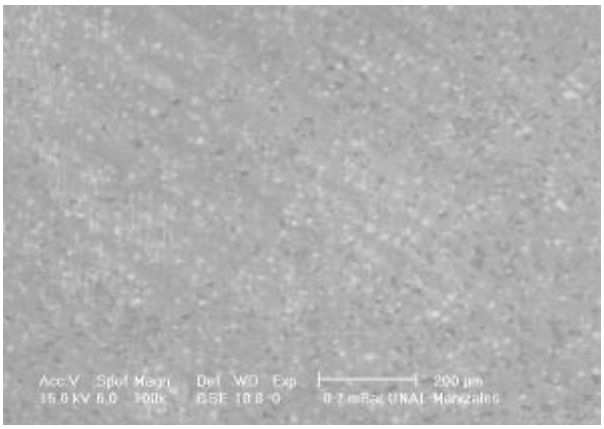


Gráfico 196. Microscopia Electrónica de Barrido Muestra Región Bogotá. Falla: Arco Eléctrico/Térmica. Fuente: Laboratorio Física del Plasma Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales

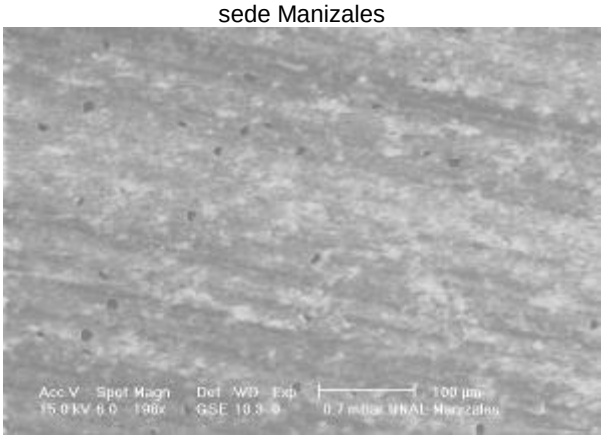


Gráfico 197. Microscopia Electrónica de Barrido Muestra Región Bogotá. Falla: Arco Eléctrico.
Fuente: Laboratorio Física del Plasma Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales

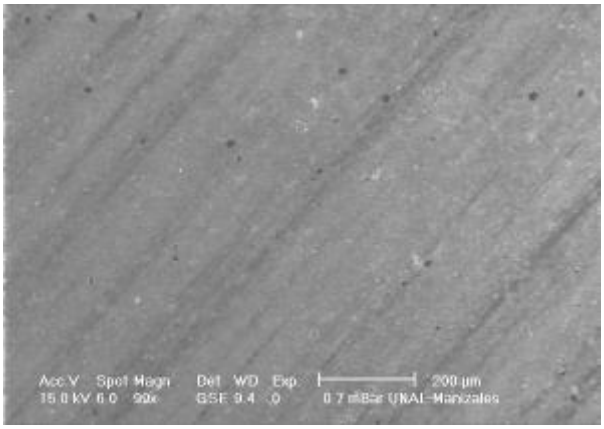


Gráfico 198. Microscopia Electrónica de Barrido Muestra Región Bogotá. Falla: Descarga Parcial.

Fuente: Laboratorio Física del Plasma Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales

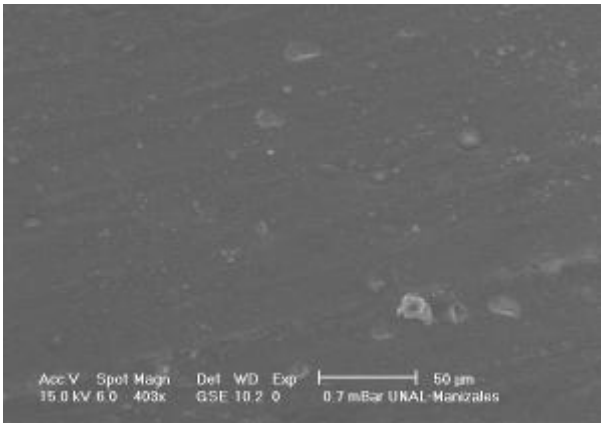


Gráfico 199. Microscopia Electrónica de Barrido Muestra Región Bogotá. Falla: Térmica.

Fuente: Laboratorio Física del Plasma Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales

6. Muestra Patrón.

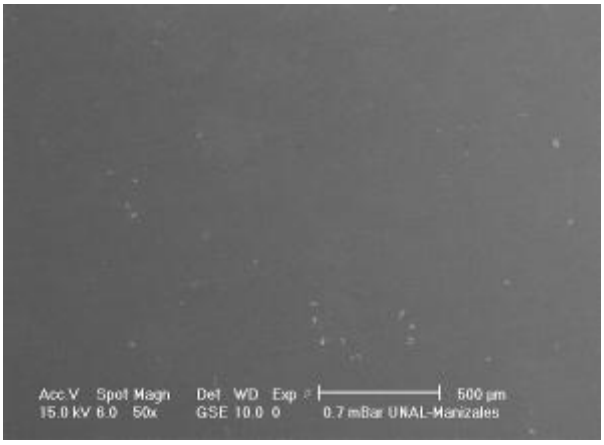


Gráfico 200. Microscopia Electrónica de Barrido Muestra Patrón.

Fuente: Laboratorio Física del Plasma Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales

3.2.7 Difracción de Rayos X (XRD).

Se utilizó para esta prueba un (01) Difractómetro de Rayos X "RIGAKU, MINIFLEX II, Operado a temperatura ambiente, equipado con una fuente de radiación de Cu Kα (λ= 1.540562 Å), fuente de rayos X a 30 kV y 15 mA, geometría Bragg-Brentano, en el gráfico 201 se muestra imagen del equipo, el cual pertenece al laboratorio de Materiales Nanoestructurados y Funcionales de la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales:

Gráfico 201. Difractómetro de Rayos X "RIGAKU, MINIFLEX II

Tabla Nº 8. Especificaciones para las pruebas XRD

Factor Geometrico (esferas)	0,9
lamda de Cobre (nm)	0,1540562
FWHM del Si (º)	0,173
FWHM del Si (Rad.)	0,00302
FWHM del Si (Rad.) al Cuadrado	0,00001
FWHM de la Muestra (Rad)	0,00599
FWHM del Muestra (Rad.) al Cuadrado	0,00004
Raiz de (FWHM) (Muestra-Estandar)	0,00517
Cos ((2Theta)/2)	0,929
VARIABLES DE ENTRADA PARA MUESTRA	
FWHM de la Muestra (º)	**0,343**
2 Theta de la Muestra	**43,578**
Particle Size (nm)=	**28,89**
Particle Size (Å)=	**288,9**

Nota. Fuente: Arias. N (2012).

Los resultados obtenidos de estas pruebas se muestran en los gráficos 202 hasta 217:

1. **Región Antioquia.**

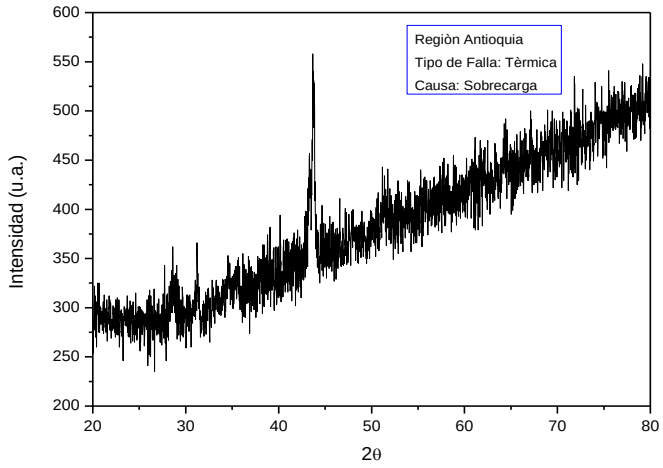


Gráfico 202. XRD Muestra Región Antioquia. Falla: Térmica.
Fuente: Laboratorio de Materiales Nanoestructurados Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales

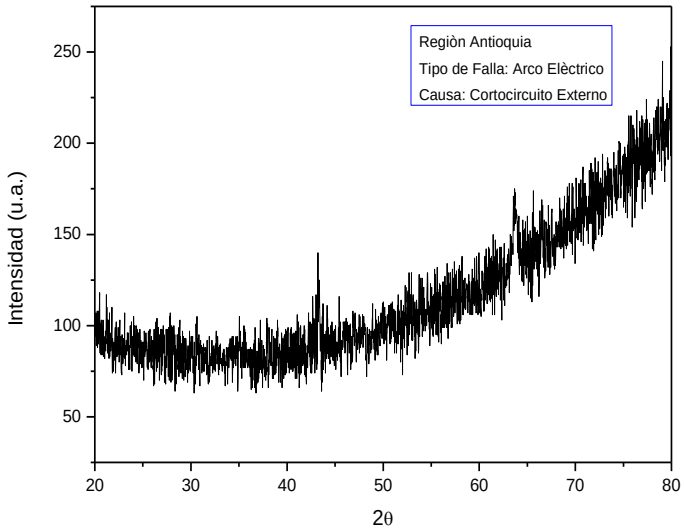


Gráfico 203. XRD Muestra Región Antioquia. Falla: Arco Eléctrico.
Fuente: Laboratorio de Materiales Nanoestructurados Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales

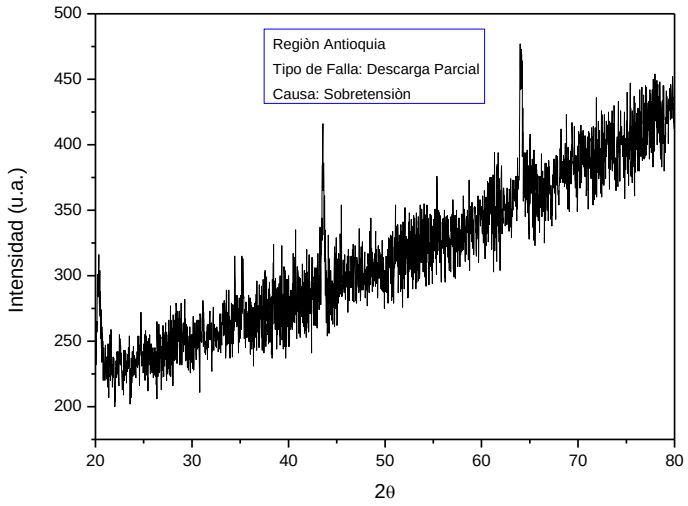


Gráfico 204. XRD Muestra Región Antioquia. Falla: Descarga Parcial.
Fuente: Laboratorio de Materiales Nanoestructurados Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales

2. Región Caldas.

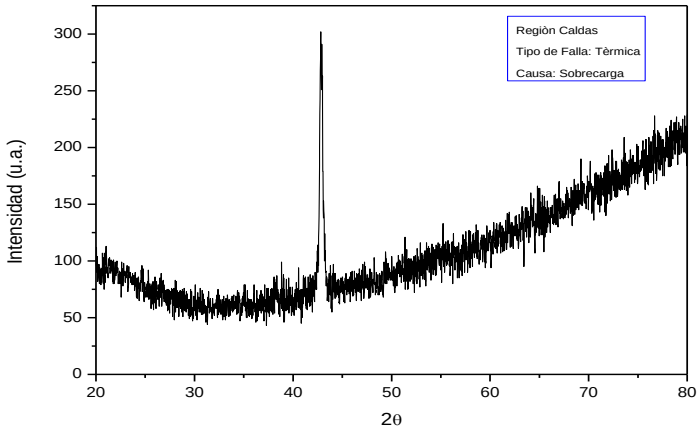


Gráfico 205. XRD Muestra Región Caldas. Falla: Térmica.
Fuente: Laboratorio de Materiales Nanoestructurados Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales

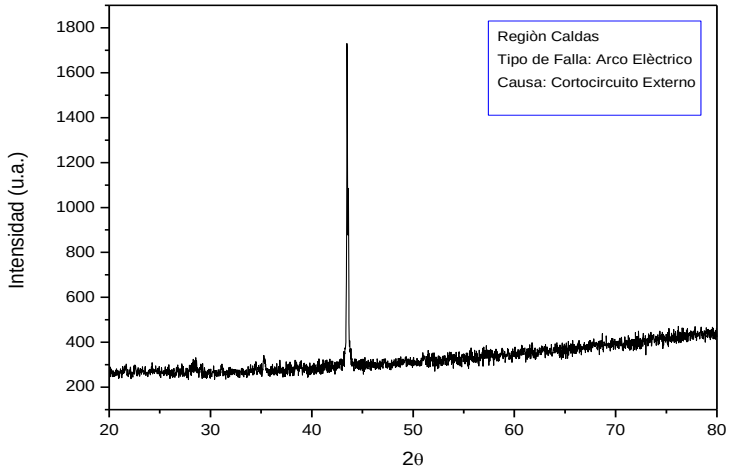


Gráfico 206. XRD Muestra Región Caldas. Falla: Arco Eléctrico.
Fuente: Laboratorio de Materiales Nanoestructurados Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales

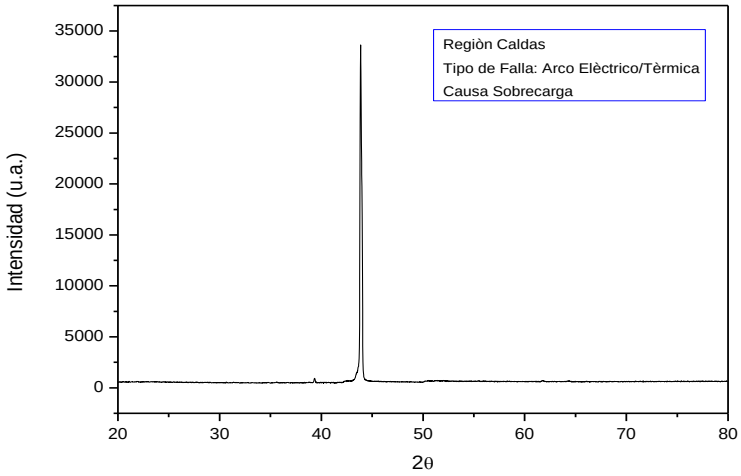


Gráfico 207. XRD Muestra Región Caldas. Falla: Arco Eléctrico/Térmica.
Fuente: Laboratorio de Materiales Nanoestructurados Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales

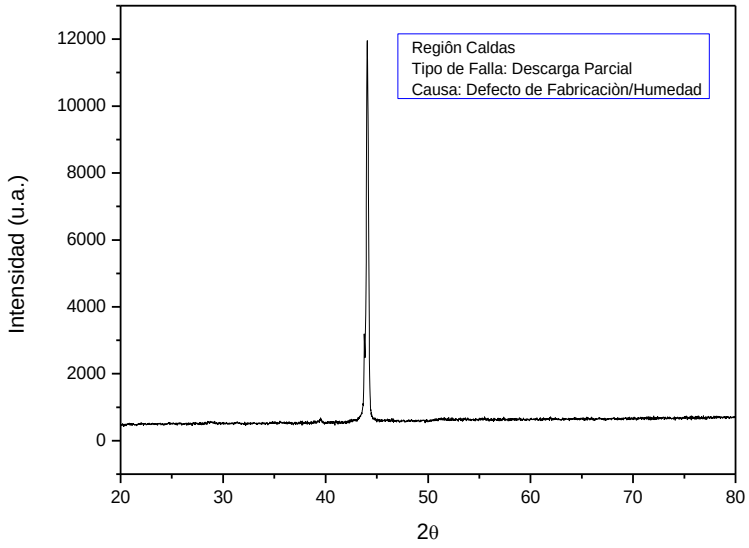


Gráfico 208. XRD Muestra Región Caldas. Falla: Descarga Parcial.
Fuente: Laboratorio de Materiales Nanoestructurados Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales

3. Región Pacífico.

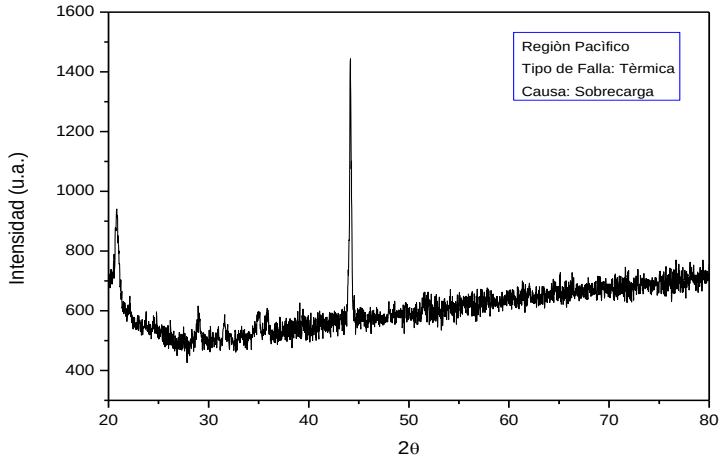


Gráfico 209. XRD Muestra Región Pacífico. Falla: Térmica.
Fuente: Laboratorio de Materiales Nanoestructurados Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales

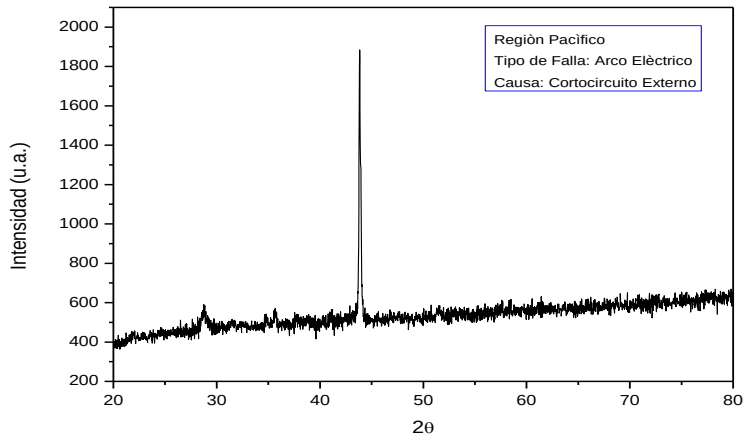


Gráfico 210. XRD Muestra Región Pacífico. Falla: Arco Eléctrico.
Fuente: Laboratorio de Materiales Nanoestructurados Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales

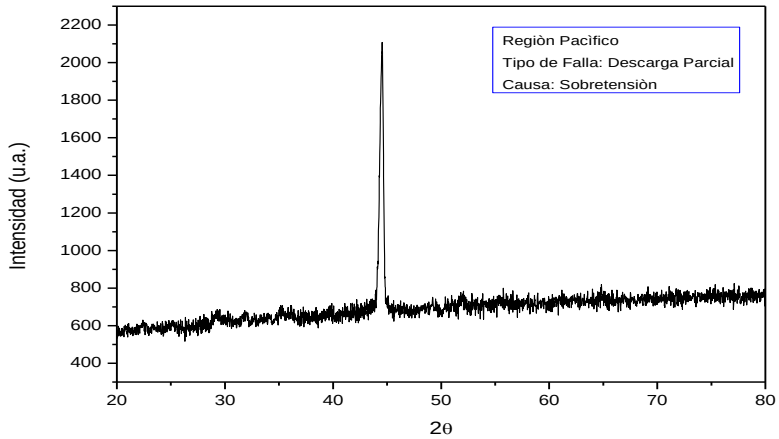


Gráfico 211. XRD Muestra Región Pacífico. Falla: Descarga Parcial.
Fuente: Laboratorio de Materiales Nanoestructurados Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales

4. Región Cundinamarca.

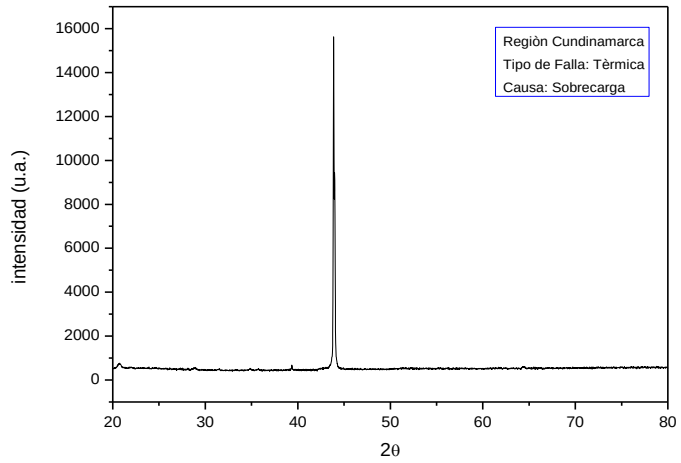


Gráfico 212. XRD Muestra Región Cundinamarca. Falla: Térmica.
Fuente: Laboratorio de Materiales Nanoestructurados Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales

5. Región Bogotá.

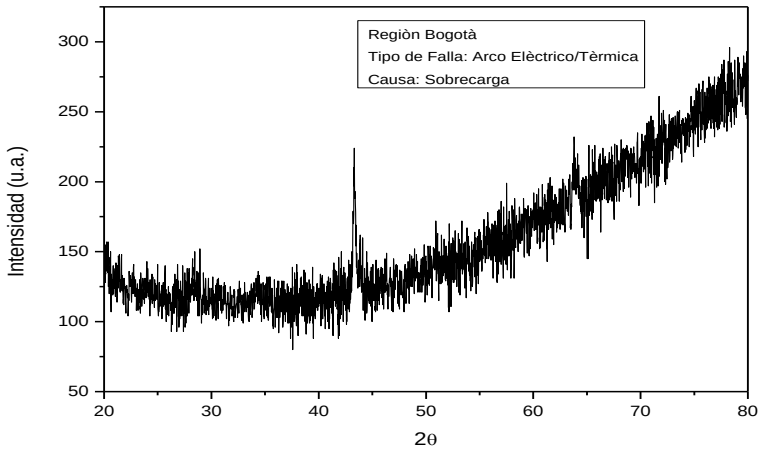


Gráfico 213. XRD Muestra Región Bogotá. Falla: Arco Eléctrico/Térmica.
Fuente: Laboratorio de Materiales Nanoestructurados Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales

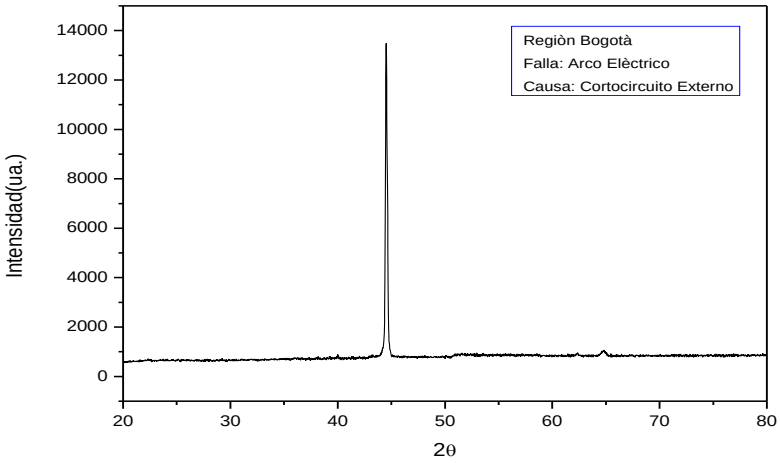


Gráfico 214. XRD Muestra Región Bogotá. Falla: Arco Eléctrico.
Fuente: Laboratorio de Materiales Nanoestructurados Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales

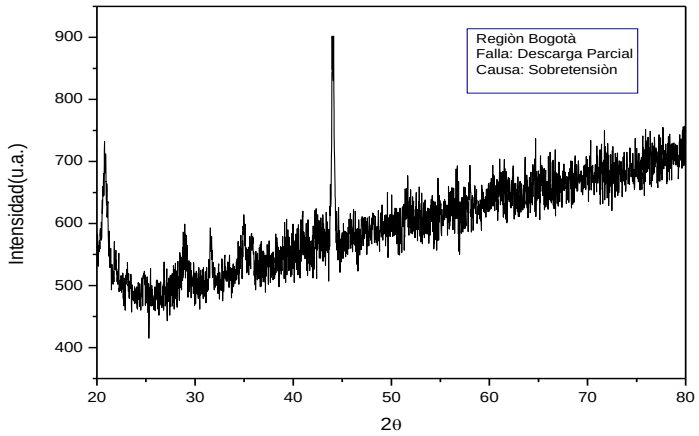


Gráfico 215. XRD Muestra Región Bogotá. Falla: Descarga Parcial.
Fuente: Laboratorio de Materiales Nanoestructurados Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales

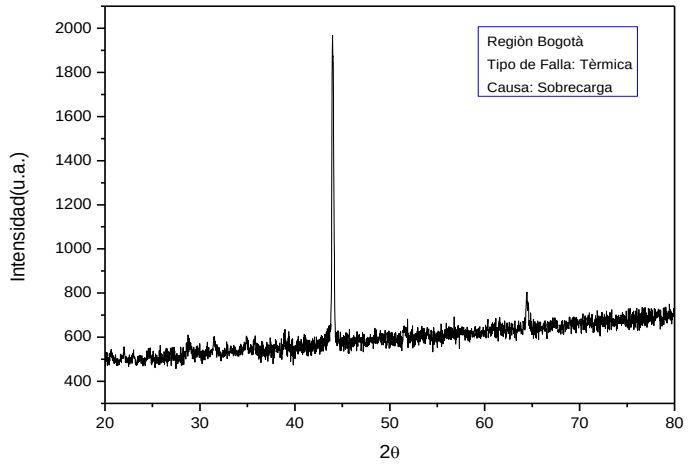


Gráfico 216. XRD Muestra Región Bogotá. Falla: Térmica.
Fuente: Laboratorio de Materiales Nanoestructurados Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales

6. Muestra Patrón.

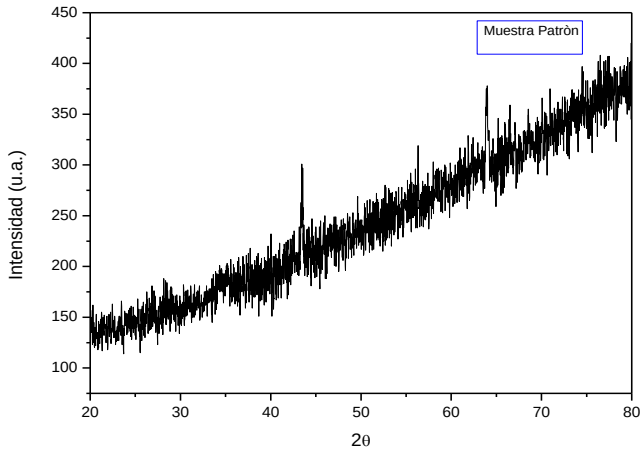


Gráfico 217. XRD Muestra Patrón. Fuente: N. Arias
Fuente: Laboratorio de Materiales Nanoestructurados Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales

Aplicando la ecuación *Debye-Scherrer (30)*, se determina el tamaño del cristal (*crystal size*) cuyos resultados se muestran en la tabla Nº 9 [19].

$$ECUACION$$

$$T = \frac{C\lambda}{(FWHM)_{m,s}\cos\theta} = \frac{C\lambda}{\sqrt{(FWHM_M^2 - FWHM_S^2)} * \cos\theta} \qquad \textbf{(30)}$$

Muestra en estudio	FWHM	2 theta	Tamaño de cristal (grano) en (nm)

Región Antioquia. Falla Térmica	0,651	43,742	13,64
Región Antioquia. Falla Descarga Parcial	0,68	43,583	13,01
Región Antioquia. Falla Arco Eléctrico	1,704	43,672	5,05
Región Caldas. Falla Térmica	0,501	42,871	18,15
Región Caldas. Falla Arco Eléctrico	0,144	43,505	
Región Caldas. Falla Arco Eléctrico/Térmica	0,248	43,892	48,2
Región Caldas. Falla Descarga Parcial	0,248	44,09	48,23
Región Pacífico. Falla Térmica	0,384	44,149	25,01
Región Pacífico. Falla Arco Eléctrico	0,271	43,875	41,06
Región Pacífico. Falla Descarga Parcial	0,573	44,464	15,71
Región Cundinamarca. Falla Térmica	0,228	43,938	57,68
Región Bogotá. Falla Arco Eléctrico/Térmica	0,296	43,318	35,59
Región Bogotá. Falla Arco Eléctrico	0,234	43,888	54,36
Región Bogotá. Falla Descarga Parcial	0,553	44,045	16,31
Región Bogotá. Falla Térmica	0,293	44,009	36,23
Patrón	0,652	43,459	13,6

Nota. Fuente: Arias. N (2012)

3.2.8 Pruebas Magnéticas.

Utilizando un (01) Magnetómetro de muestra vibrante convencional indicado en el grafico 218 perteneciente al Laboratorio de Magnetismo de la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales se evaluaron las muestras de equipos fallados a temperaturas entre 297.5 y 373 ºK para Región de Antioquia, 290.3 y 373 ºK para la Región Caldas, 293º y 373 para la Región Pacífico, 286º, 296º y 373ºK para la Región Cundinamarca y Región Bogotá, y por ultimo 300ºK a la muestra Patrón aplicando campos magnéticos hasta 0.7 tesla obteniendo los resultados indicados a continuación en los gráficos 219 hasta 234:

Gráfico 218. Magnetómetro Convencional.
Fuente: M. Mago

1. **Región Antioquia.**

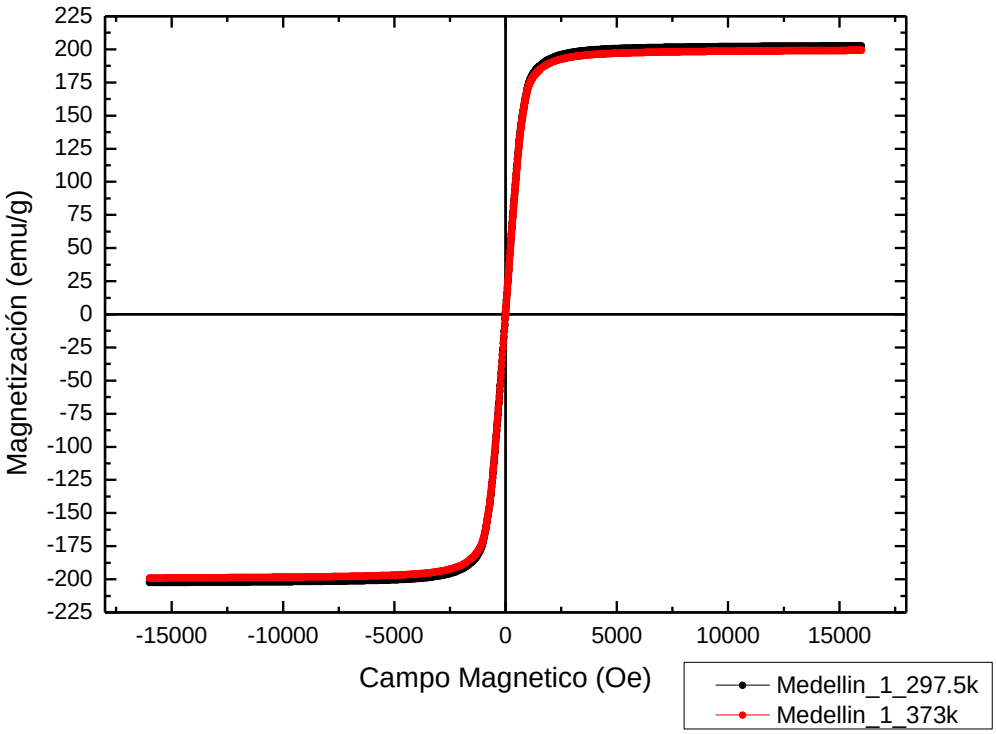


Gráfico 219. Prueba Magnética Muestra Región Antioquia. Falla: Térmica.
Fuente: Laboratorio de Magnetismo Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales

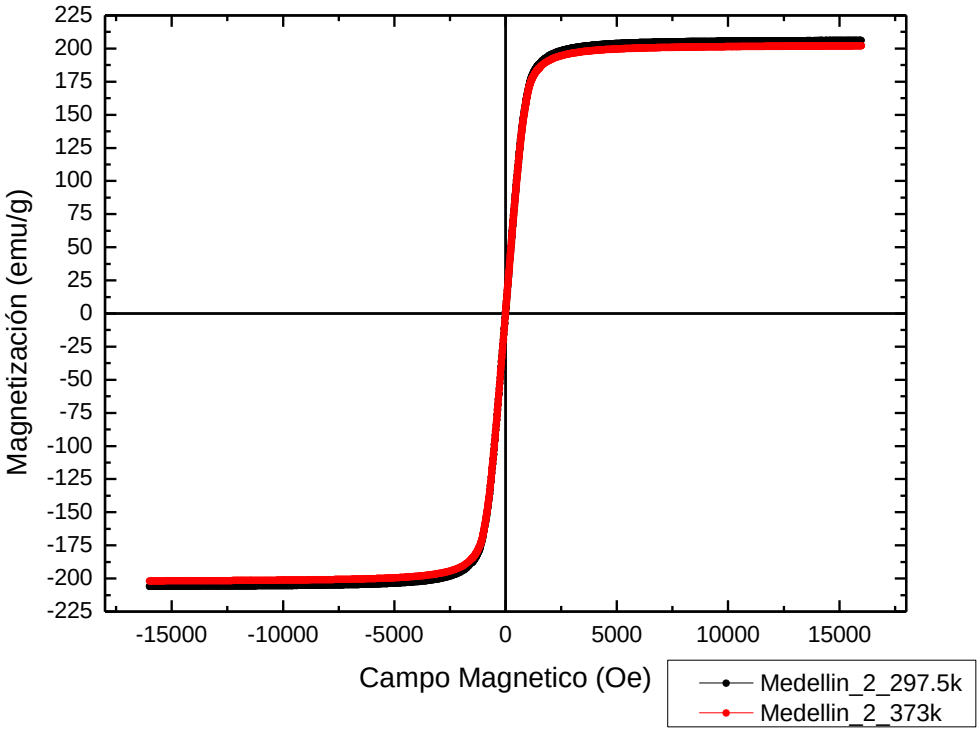


Gráfico 220. Prueba Magnética Muestra Región Antioquia. Falla: Descarga Parcial.

Fuente: Laboratorio de Magnetismo Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales

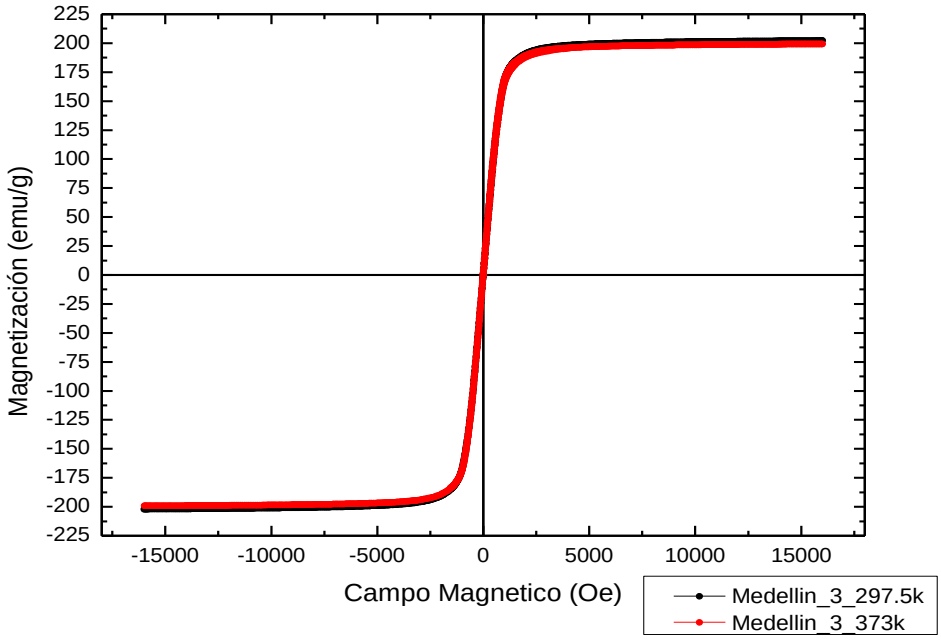


Gráfico 221. Prueba Magnética Muestra Región Antioquia. Falla: Cortocircuito Externo.

Fuente: Laboratorio de Magnetismo Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales

2. Región Caldas.

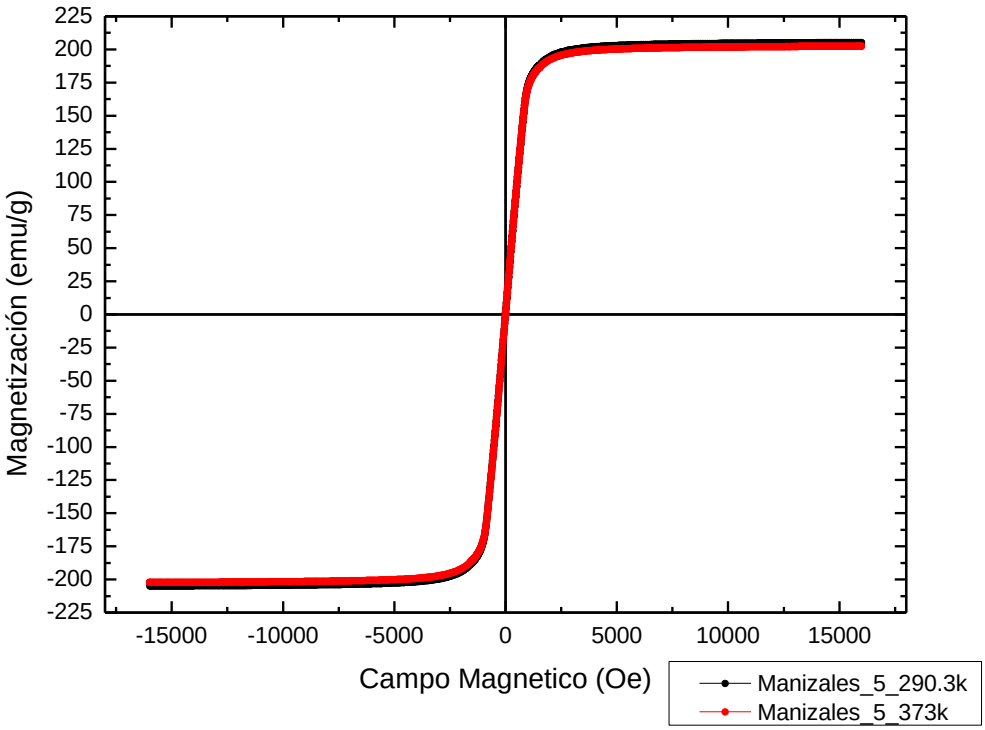


Gráfico 222. Prueba Magnética Muestra Región Caldas. Falla: Térmica.

Fuente: Laboratorio de Magnetismo Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales

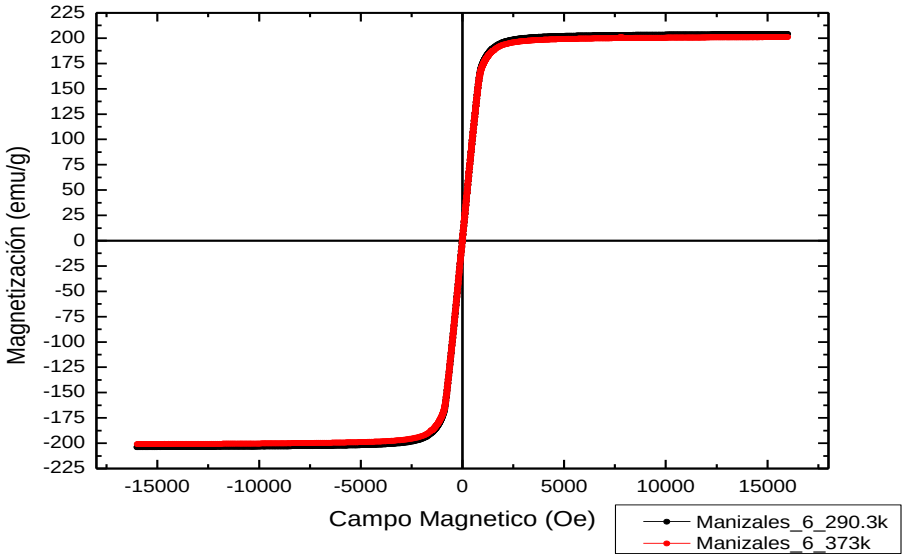


Gráfico 223. Prueba Magnética Muestra Región Caldas. Falla: Arco Eléctrico.
Fuente: Laboratorio de Magnetismo Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales

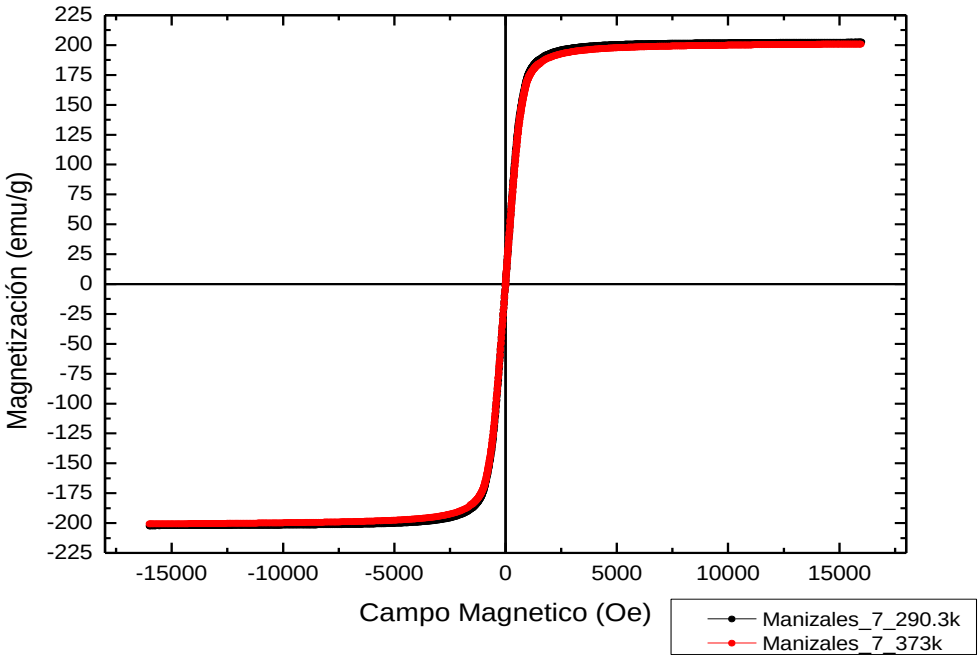


Gráfico 224. Prueba Magnética Muestra Región Caldas. Falla: Arco Eléctrico/Térmica.
Fuente: Laboratorio de Magnetismo Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales

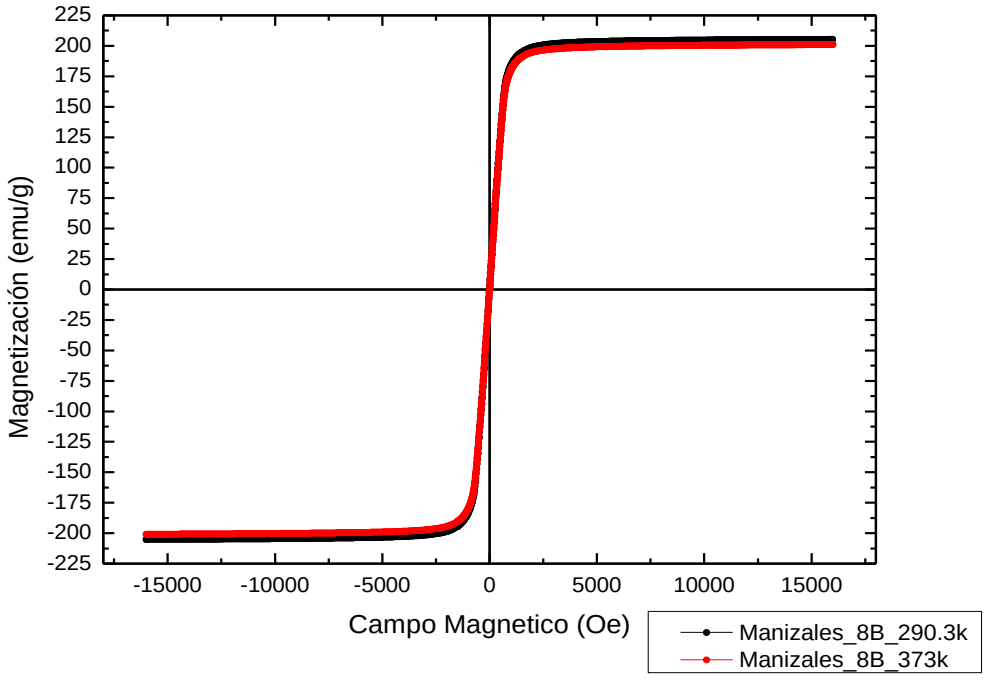


Gráfico 225. Prueba Magnética Muestra Región Caldas. Falla: Descarga Parcial.
Fuente: Laboratorio de Magnetismo Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales

3. Región Pacífico.

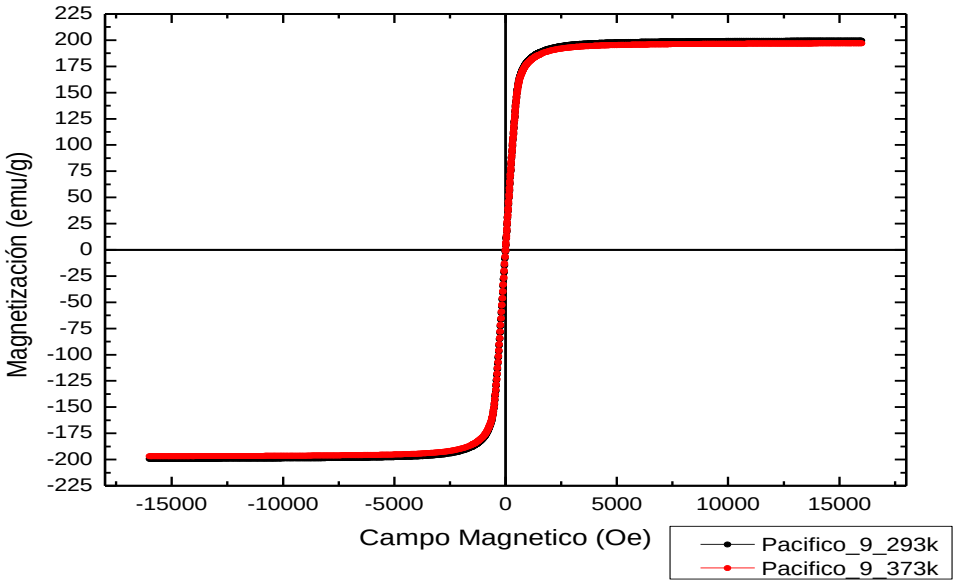


Gráfico 226. Prueba Magnética Muestra Región Pacífico. Falla: Térmica/Arco Eléctrico.
Fuente: Laboratorio de Magnetismo Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales

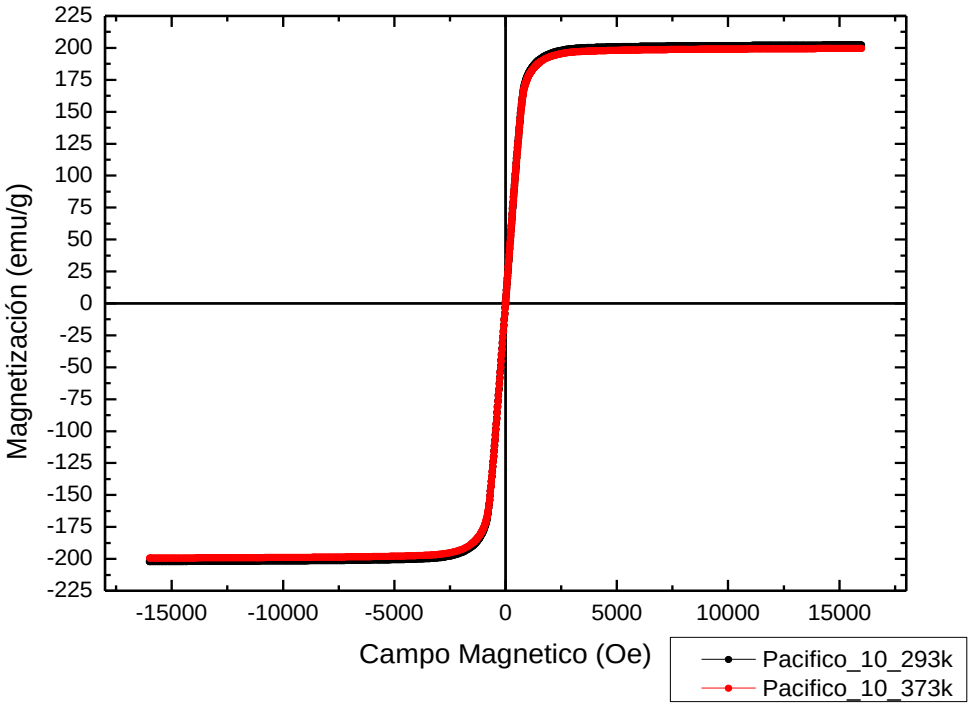


Gráfico 227. Prueba Magnética Muestra Región Pacífico. Falla: Arco Eléctrico.
Fuente: Laboratorio de Magnetismo Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales

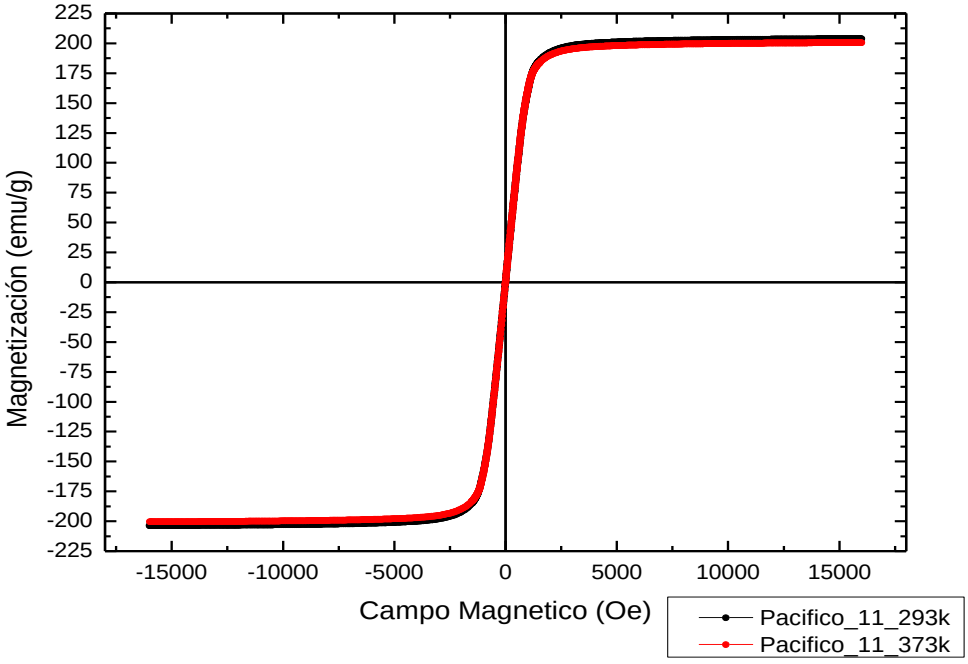


Gráfico 228. Prueba Magnética Muestra Región Pacífico. Falla: Descarga Parcial.
Fuente: Laboratorio de Magnetismo Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales

4. Región Cundinamarca.

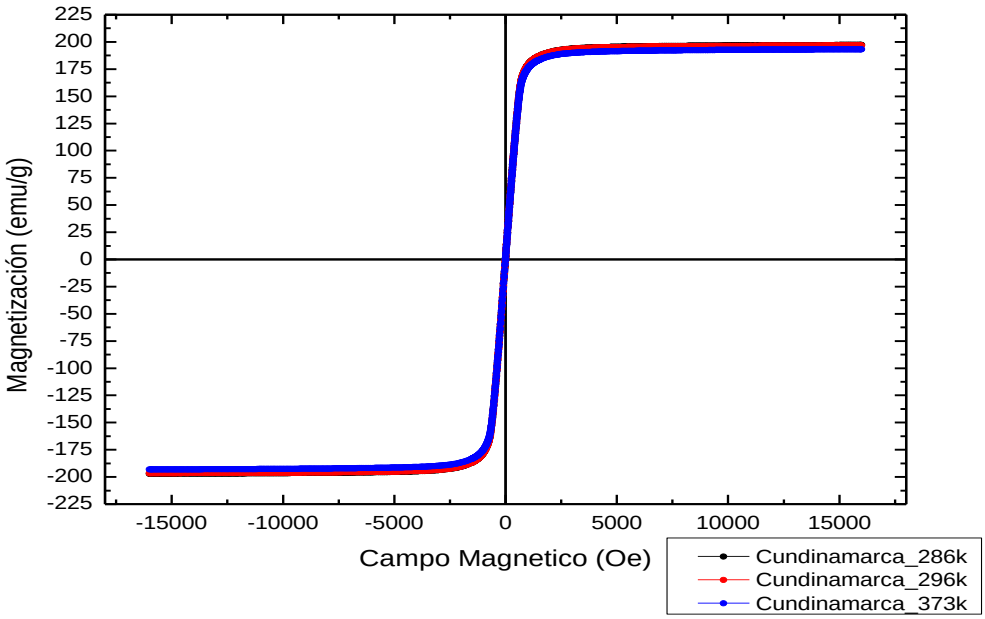


Gráfico 229. Prueba Magnética Muestra Región Cundinamarca. Falla: Térmica.
Fuente: Laboratorio de Magnetismo Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales

5. Región Bogotá.

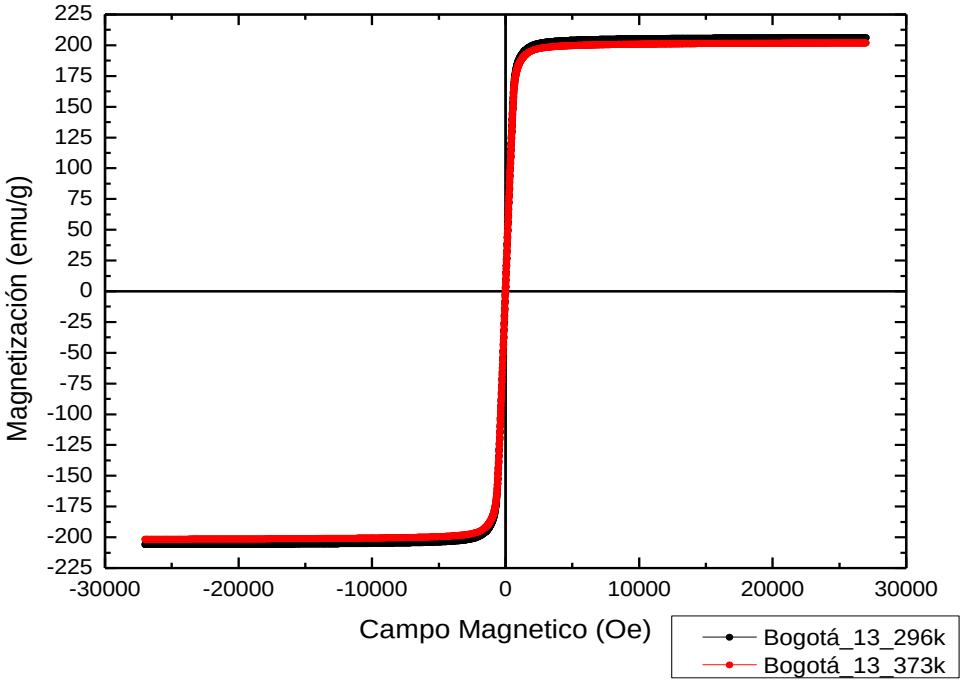


Gráfico 230. Prueba Magnética Muestra Región Bogotá. Falla: Térmica/Arco Eléctrico.

Fuente: Laboratorio de Magnetismo Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales

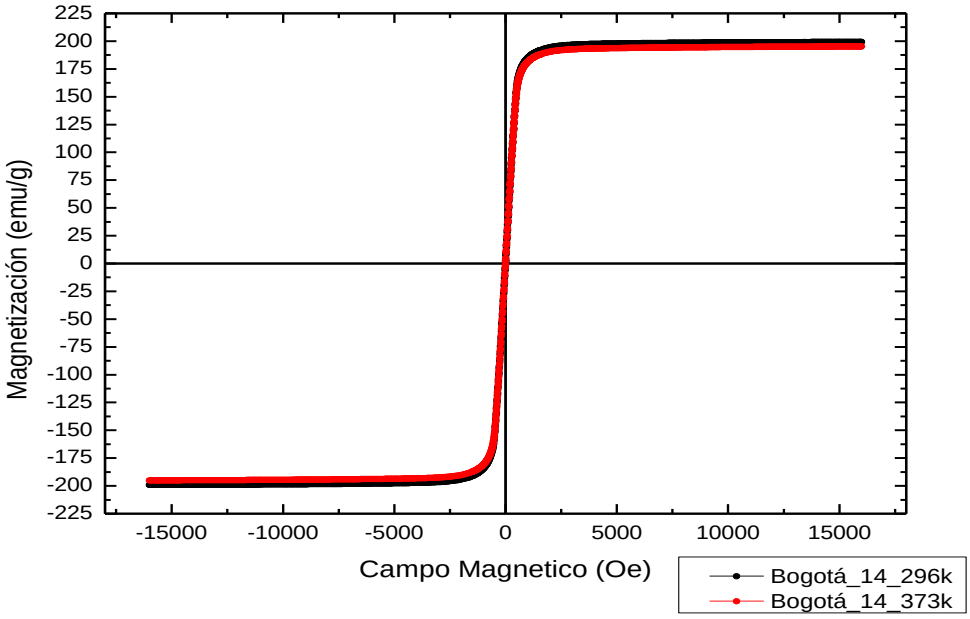


Gráfico 231. Prueba Magnética Muestra Región Bogotá. Falla: Arco Eléctrico.

Fuente: Laboratorio de Magnetismo Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales

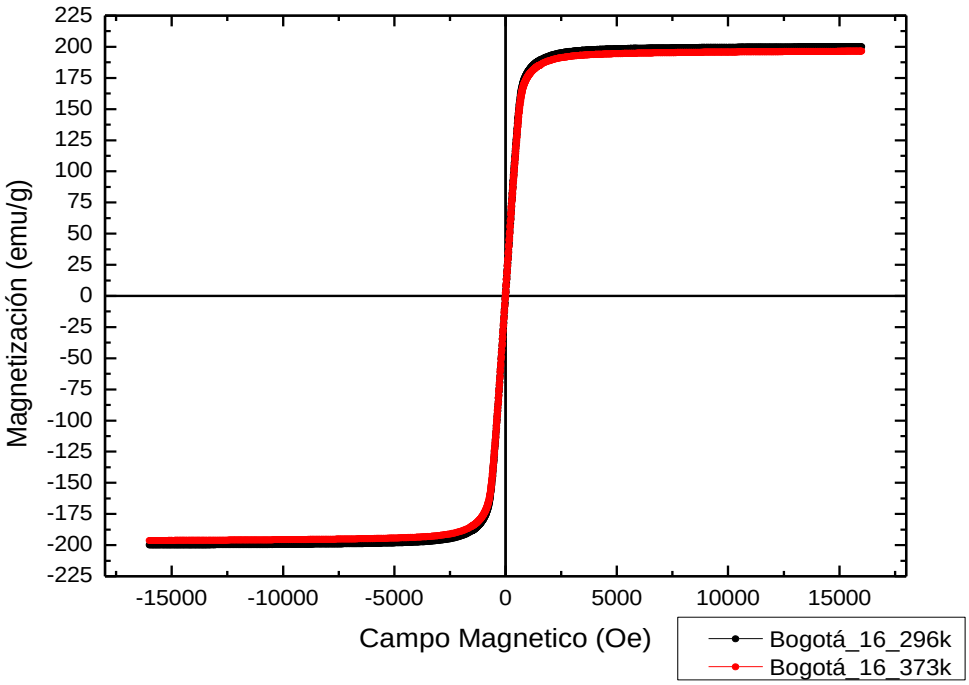


Gráfico 232. Prueba Magnética Muestra Región Bogotá. Falla: Descarga Parcial.
Fuente: Laboratorio de Magnetismo Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales

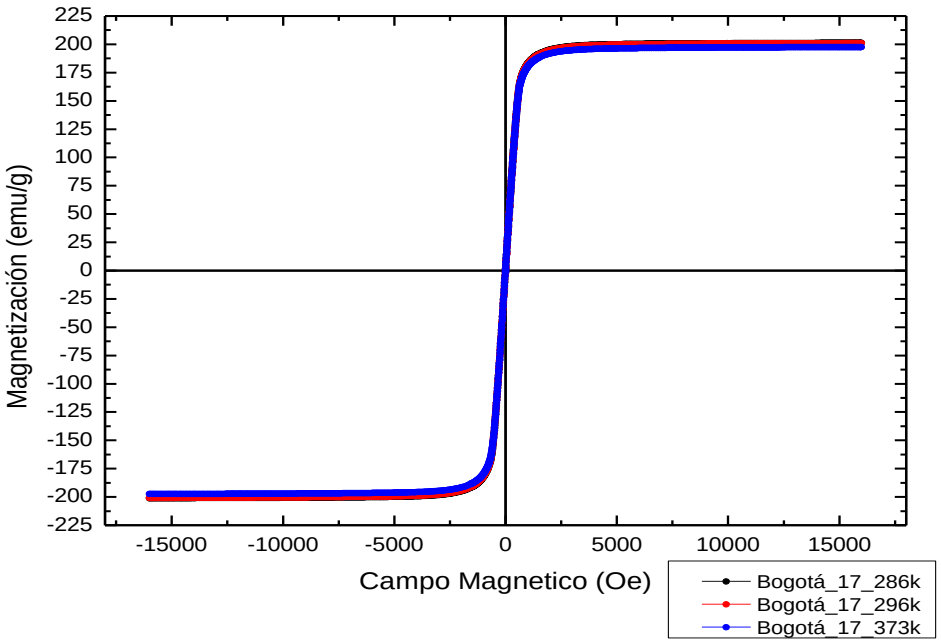


Gráfico 233. Prueba Magnética Muestra Región Bogotá. Falla: Térmica.
Fuente: Laboratorio de Magnetismo Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales

6. Muestra Patrón.

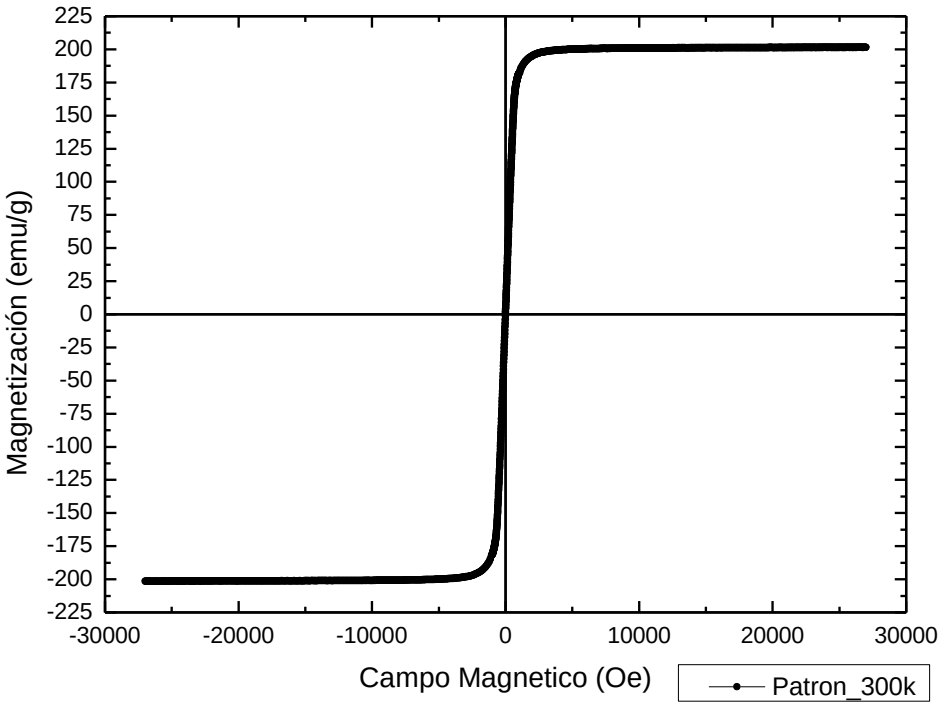


Gráfico 234. Prueba Magnética Muestra Patrón.
Fuente: Laboratorio de Magnetismo Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales

3.2.9 Pruebas de Tensión al Papel Aislante.

El papel aislante utilizado en la fabricación de estos equipos, posee características técnicas bastante especificas, sin embargo, cuando es sometido a un proceso de falla por distintas causas es significativo evaluar el cambio en algunas de sus propiedades entre las cuales se encuentra la *"Resistencia a la tensión"*, que consiste en una prueba de estiramiento del papel que sirve de muestra, cuya probeta ha sido preparada previamente según indica el Standard Test Method for Tensile Properties of Paper and Paperboard Using Constant-Rate-of-Elongation Apparatus (ASTM D-828) de las propiedades del papel aislante para transformadores, analizando cada uno de los fenómenos que se producen al ir incrementado la fuerza aplicada al cuerpo para alargarlo hasta producir su ruptura. Este ensayo se realiza en una maquina marca Autograph, perteneciente al laboratorio de Deformación Plástica de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. El ensayo realizado a las probetas preparadas de papel aislante de los transformadores fallados indicó los resultados de la deformación versus el esfuerzo utilizando el método del 0.2%. A continuación en la gráfica 235 se muestra la curva característica utilizada para este ensayo:

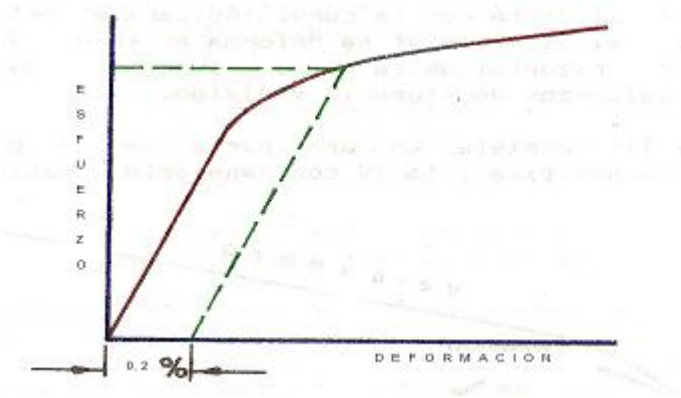


Gráfico 235. Determinación del punto de fluencia por el método del 0.2%.
Fuente: M. Mago

Gráfico 236. Máquina Autograph para realizar Pruebas de Tensiòn.
Fuente: M. Mago

Gráfico 237. Analizador de la Máquina Auto-Graph.
Fuente: M. Mago

Tabla Nº 10. Especificaciones de las Probetas para las Pruebas de Tensión al Papel Aislante

Region	Falla	Espesor	Anchura	Longitud calibrada
1. Antioquia	Tèrmica	0.4000	24.7000	100.0000
2. Antioquia	Descarga Parcial	0.5000	22.2000	100.0000
3. Antioquia	Arco Elèctrico	0.7000	26.7000	100.0000
5. Caldas	Tèrmica	0.6000	27.4000	100.0000
6. Caldas	Arco Elèctrico	0.8000	20.9000	100.0000
7. Caldas	Arco Elèctrico/Tèrmica	0.6000	25.7000	100.0000
8. Caldas	Descarga Parcial	0.2500	26.0000	100.0000
9. Pacìfico	Tèrmica/Arco Elèctrico	0.2500	26.5000	100.0000
10. Pacìfico	Arco Elèctrico	0.8000	24.3000	100.0000
11. Pacìfico	Descarga Parcial	0.5000	26.3000	100.0000
12. Cundinamarca	Tèrmica	0.3500	24.6000	100.0000
13. Bogotà	Arco Elèctrico/Tèrmica	0.2000	25.7000	100.0000
14. Bogotà	Arco Elèctrico	0.4500	24.4000	100.0000
16. Bogotà	Descarga Parcial	0.3500	26.0000	100.0000
17. Bogotà	Tèrmica	0.2500	23.5000	100.0000
18. Patròn		0.2500	26.8000	100.0000

Nota. Fuente: M. Mago (2012).

Tabla Nº 11. Resultados Obtenidos de las Pruebas de Tensión al Papel Aislante.

Regiòn	Max._Carga (N)	Max._Despl (mm)	Max._Esfuerzo(kPa)	Max._Deformacion (%)
1. Antioquia	465.313	1.97200	47096.4	1.97200
2. Antioquia	513.906	1.91400	46297.9	1.91400
3. Antioquia	408.594	6.87100	21861.6	6.87100
5. Caldas	753.438	2.29000	45829.5	2.29000
6. Caldas	456.719	1.79800	27315.7	1.79800
7. Caldas	1314.22	4.23100	85228.2	4.23100
8. Caldas	285.313	2.18800	43894.2	2.18800
9. Pacifico	37.188	2.25500	50896.2	2.25500
10. Pacifico	1008.12	3.90500	51858.3	3.90500
11. Pacìfico	885.000	3.23100	67300.4	3.23100
12. Cundinam	427.500	3.67900	49651.6	3.67900
13. Bogotà	314.375	2.19800	61162.4	2.19800
14. Bogotà	622.969	2.54500	56736.7	2.54500
16. Bogotà	465.781	2.65500	51184.8	2.65500
17. Bogota	324.219	2.96500	55186.2	2.96500
18. Patròn	492.031	3.61700	73437.5	3.61700

Nota. Fuente: M.Mago (2012).

1. Región Antioquia versus Muestra Patrón:

Las probetas de papel aislante fueron preparadas y marcadas en forma numérica para su identificación utilizando la leyenda siguiente: Muestra Patrón *identificada* 18, Muestra de papel aislante de transformador que presentó falla térmica debido a una sobrecarga *identificada* 1, Muestra de papel aislante de transformador que presentó falla por descarga parcial debido a una sobretensión *identificada* 2 y Muestra de papel aislante de transformador que presentó falla por arco eléctrico debido a cortocircuito externo *identificada* 3.

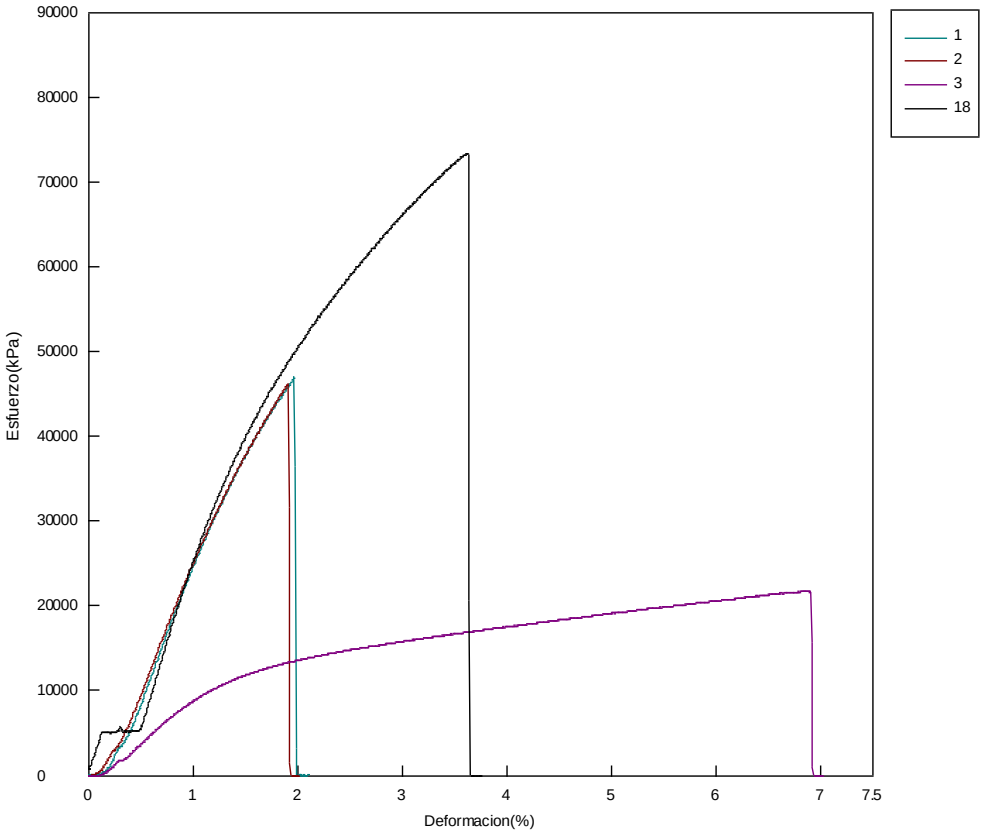


Gráfico 238. Resultados de las Pruebas de Tensión de las Muestras de la Región Antioquia versus Muestra Patrón.
Fuente: Laboratorio de Deformación Plástica Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá

De los resultados obtenidos en la gráfica 238 muestra que la falla por arco eléctrico *identificada* 3, es la que presenta mayor deformación y menor esfuerzo, es decir, menor vida útil.

2. Región Caldas versus Muestra Patrón:

Las probetas de papel aislante fueron preparadas y marcadas en forma numérica para su identificación utilizando la leyenda siguiente: Muestra Patrón *identificada* 18, Muestra de papel aislante de transformador que presentó falla térmica debido a una sobrecarga *identificada* 5, Muestra de papel aislante de transformador que presentó falla por arco eléctrico debido a un cortocircuito externo *identificada* 6, Muestra de papel aislante de transformador que presentó falla por arco eléctrico/térmica debido a una sobrecarga *identificada* 7 y Muestra de papel aislante de transformador que presentó falla por descarga parcial debido a defecto de fabricación/humedad *identificada* 8.

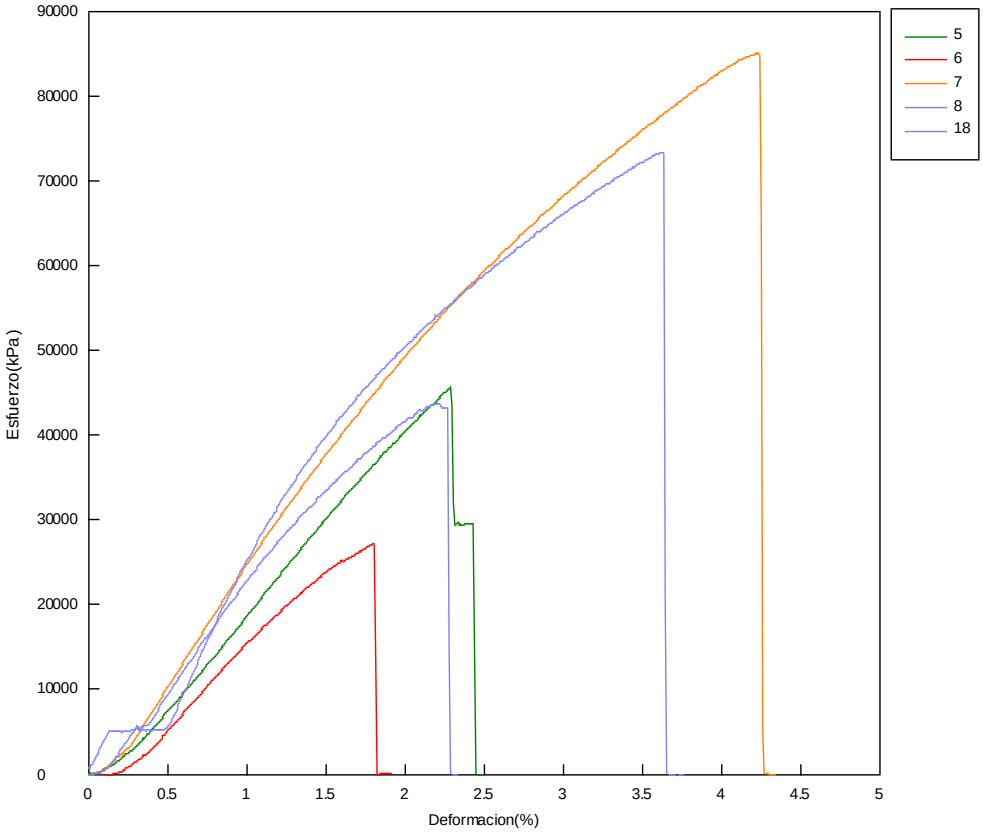


Gráfico 239. Resultados de las Pruebas de Tensión de las Muestras de la Región Caldas versus Muestra Patrón.

Fuente: Laboratorio de Deformación Plástica Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá

De los resultados obtenidos en la gráfica 239 muestra que la falla por arco eléctrico *identificada* 6 presenta menor deformación y esfuerzo, mientras que la falla por arco eléctrico/térmica *identificada* 7 mayor deformación y esfuerzo. No puede predecirse vida útil del equipo bajo esta condición.

3. Región Pacifico versus Muestra Patrón:

Las probetas de papel aislante fueron preparadas y marcadas en forma numérica para su identificación utilizando la leyenda siguiente: Muestra Patrón *identificada* 18, Muestra de papel aislante de transformador que presentó falla térmica/arco eléctrico debido a una sobrecarga *identificada* 9, Muestra de papel aislante de transformador que presentó falla por arco eléctrico debido a un cortocircuito externo *identificada* 10 y Muestra de papel aislante de transformador que presentó falla por descarga parcial debido a una sobretensión *identificada* 11.

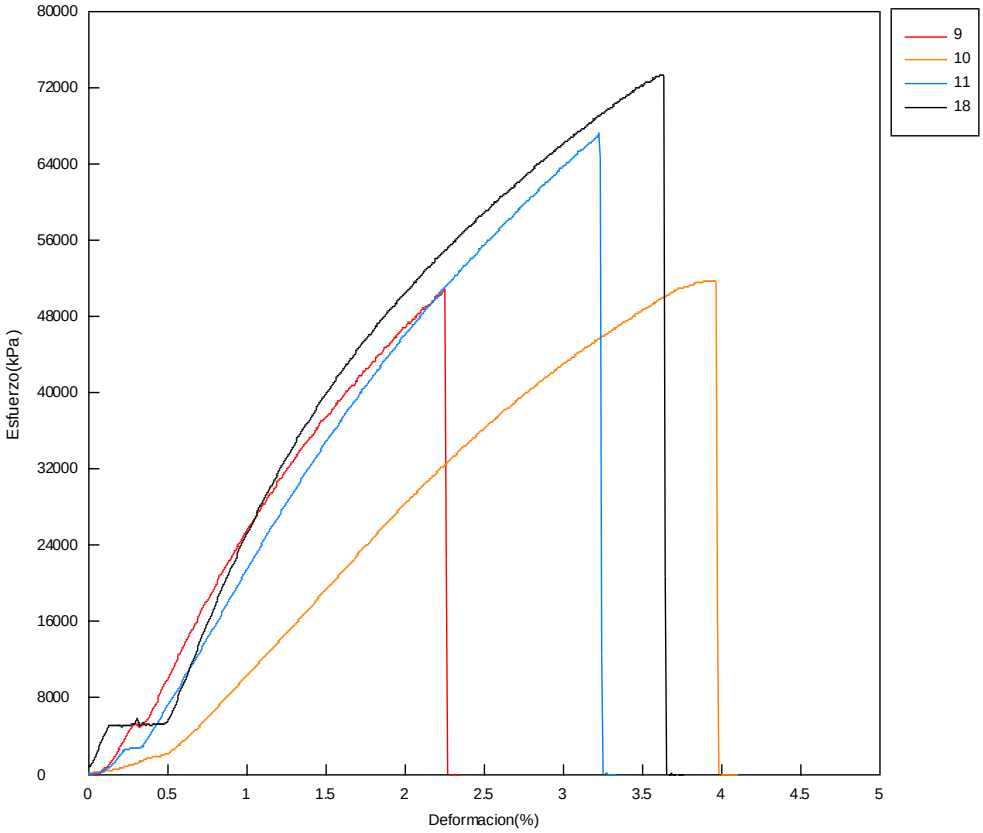


Gráfico 240. Resultados de las Pruebas de Tensión de las Muestras de la Región Pacífico versus Muestra Patrón.

Fuente: Laboratorio de Deformación Plástica Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá

De los resultados obtenidos en la gráfica 240 muestra que la falla por arco eléctrico *identificada* 10 presenta mayor deformación y menor esfuerzo, pudiendo afectar de manera importante la vida útil del equipo.

4. Región Cundinamarca versus Muestra Patrón:

Las probetas de papel aislante fueron preparadas y marcadas en forma numérica para su identificación utilizando la leyenda siguiente: Muestra Patrón *identificada* 18 y Muestra de papel aislante de transformador que presentó falla térmica debido a una sobrecarga *identificada* 12.

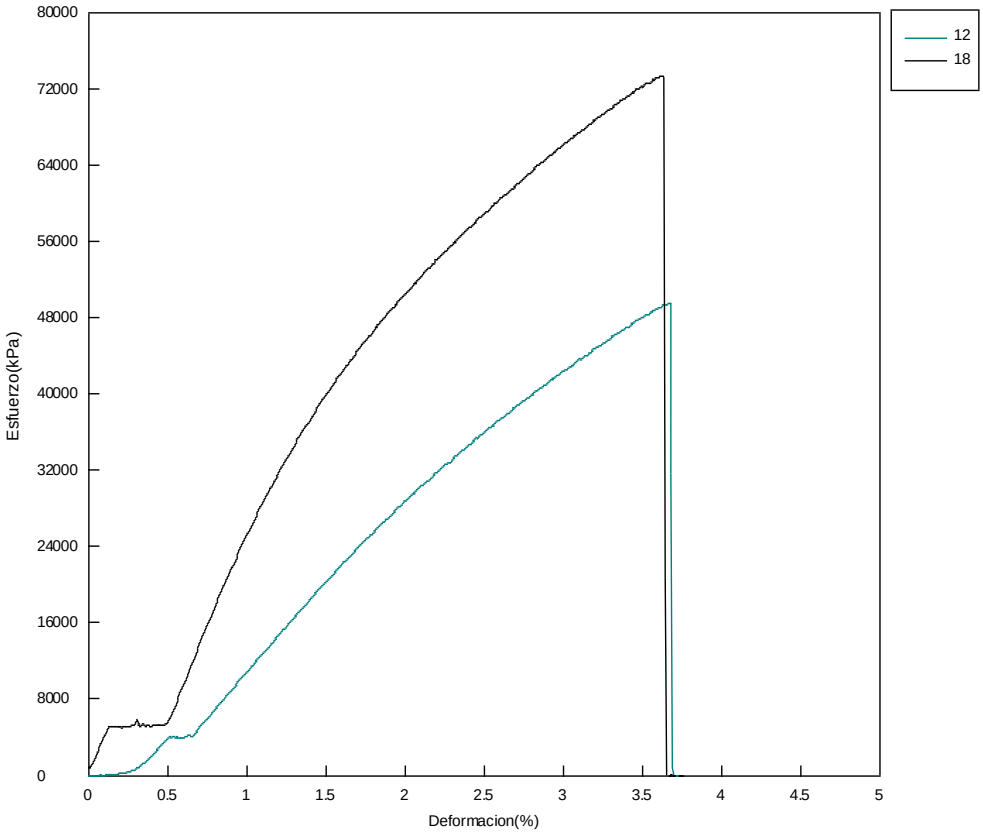


Gráfico 241. Resultados de las Pruebas de Tensión de la Muestra de la Región Cundinamarca versus Muestra Patrón.
Fuente: Laboratorio de Deformación Plástica Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá

De los resultados obtenidos en la gráfica 241 muestra que la falla por térmica *identificada* 12 presenta deformación similar a la muestra patrón, pero menor esfuerzo. Puede indicar esta condición cambios no representativos en la vida útil del equipo.

5. Región Bogotá versus Muestra Patrón:

Las probetas de papel aislante fueron preparadas y marcadas en forma numérica para su identificación utilizando la leyenda siguiente: Muestra Patrón *identificada* 18, Muestra de papel aislante de transformador que presentó falla arco eléctrico/térmica debido a una sobrecarga *identificada* 13, Muestra de papel aislante de transformador que presentó falla por arco eléctrico debido a una sobretensión *identificada* 14, Muestra de papel aislante de transformador que presentó falla por arco eléctrico debido a un cortocircuito externo *identificada* 15, Muestra de papel aislante de transformador que presentó falla por

descarga parcial debido a una sobretensión *identificada* 16 y Muestra de papel aislante de transformador que presentó falla térmica debido a una sobrecarga *identificada* 17.

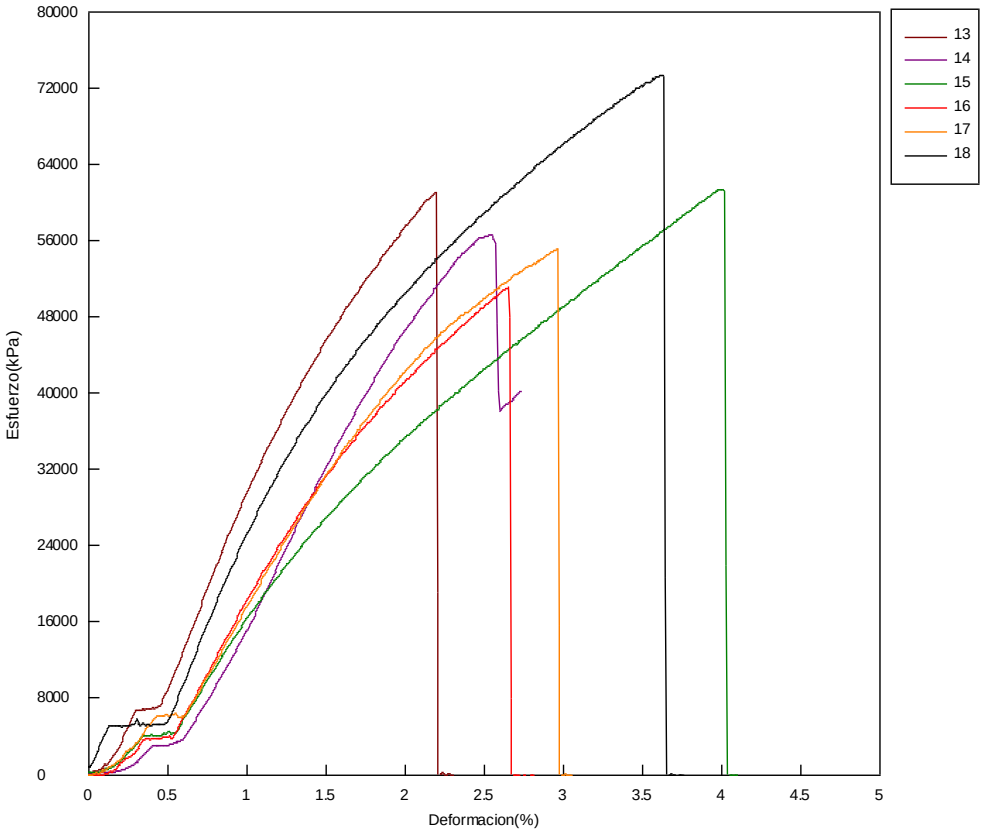


Gráfico 242. Resultados de las Pruebas de Tensión de las Muestras de la Región Bogotá versus Muestra Patrón.
Fuente: Laboratorio de Deformación Plástica Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá

De los resultados obtenidos en la gráfica 242 muestra que la falla por arco eléctrico/ térmica *identificada* 15 presenta mayor deformación y esfuerzo a la identificada 13 de menor. Pudiera indicar esta condición cambios no representativos en la vida útil del equipo.

6. Comparación de Falla Térmica presente en todas las Regiones versus Muestra Patrón.

Las probetas de papel aislante fueron preparadas y marcadas en forma numérica para su identificación utilizando la leyenda siguiente: Muestra Patrón *identificada* 18, Muestra de papel aislante del transformador de la Región Antioquia *identificada* 1, Muestra de papel aislante del transformador de la Región Caldas *identificada* 5, Muestra de papel

aislante del transformador de la Región Pacífico *identificada* 9, Muestra de papel aislante del transformador de la Región Cundinamarca *identificada* 12 y Muestra de papel aislante del transformador de la Región Bogotá *identificada* 17.

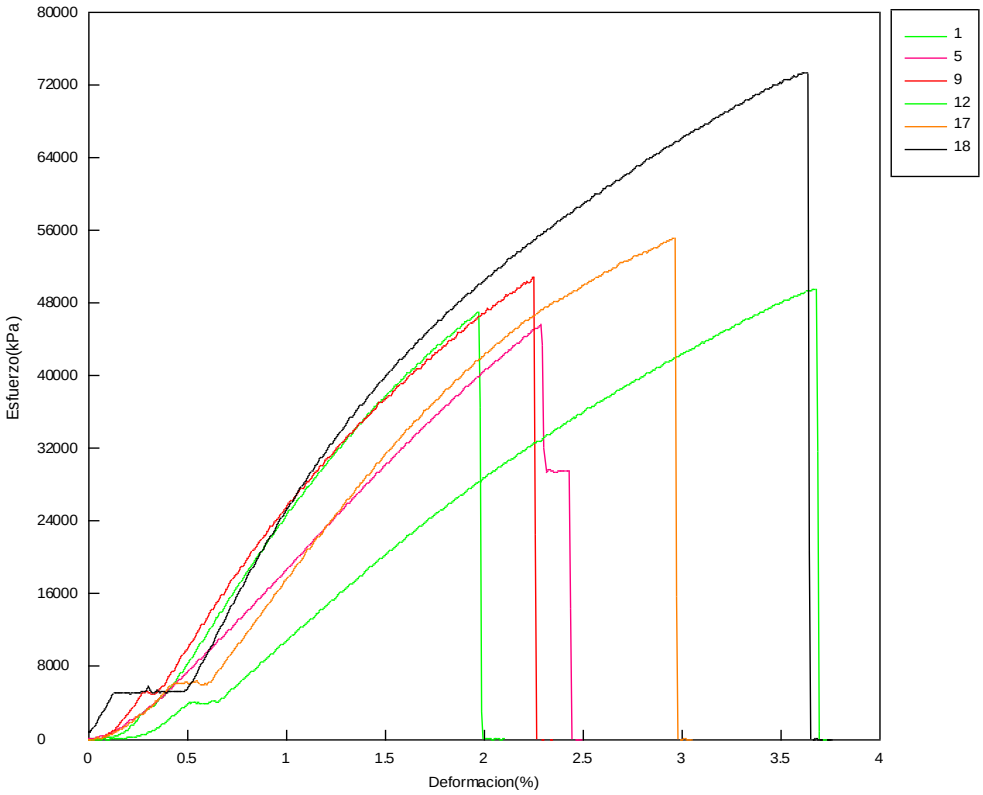


Gráfico 243. Comparación de las Pruebas de Tensión a las Muestras de Transformadores
que presentaron Fallas Térmicas en todas las Regiones versus Muestra Patrón.
Fuente: Laboratorio de Deformación Plástica Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá

De los resultados obtenidos se puede apreciar, que las Muestras utilizadas no indican característica para un alto soporte de carga, dado a los valores de esfuerzo obtenidos con respecto a la muestra patrón. Esto pudiera afectar la vida útil.

7. Comparación de Falla por Descarga Parcial presente en todas las Regiones versus Muestra Patrón.

Las probetas de papel aislante fueron preparadas y marcadas en forma numérica para su identificación utilizando la leyenda siguiente: Muestra Patrón *identificada* 18, Muestra de papel aislante del transformador de la Región Antioquia *identificada* 2, Muestra

de papel aislante del transformador de la Región Caldas *identificada* 8, Muestra de papel aislante del transformador de la Región Pacífico *identificada* 11 y Muestra de papel aislante del transformador de la Región Bogotá *identificada* 16.

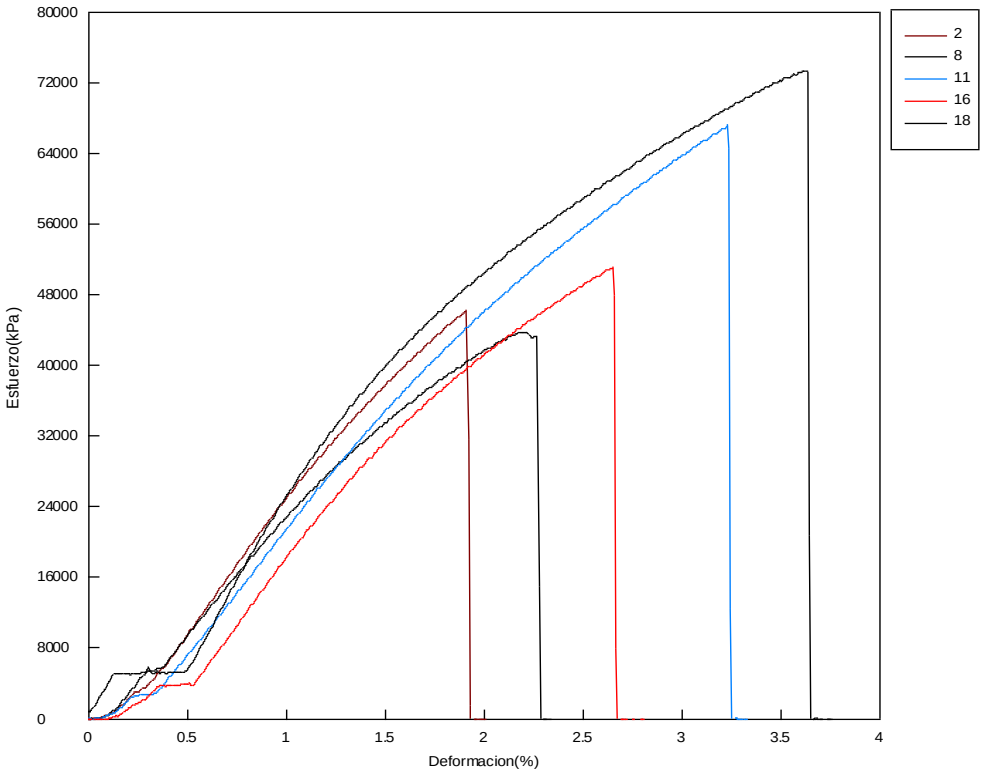


Gráfico 244. Comparación de las Pruebas de Tensión a las Muestras de Transformadores
que presentaron Fallas por Descarga Parcial en todas las regiones versus Muestra Patrón.
Fuente: Laboratorio de Deformación Plástica Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá

La muestra que presenta mayores cambios es la perteneciente a la Región Antioquia con menor deformación y esfuerzo, también se debe considerar a la de la Región Caldas. La de la Región Pacífico no presenta cambios significativos. En las primeras mencionadas pudiera afectarse la vida útil del equipo.

8. Comparación de Falla por Arco Eléctrico presente en todas las Regiones versus Muestra Patrón.

Las probetas de papel aislante fueron preparadas y marcadas en forma numérica para su identificación utilizando la leyenda siguiente: Muestra Patrón *identificada* 18,

Muestra de papel aislante del transformador de la Región Antioquia *identificada* 3, Muestra de papel aislante del transformador de la Región Caldas *identificada* 6, Muestra de papel aislante del transformador de la Región Pacífico *identificada* 10 y Muestra de papel aislante del transformador de la Región Bogotá *identificadas* 14 y 15.

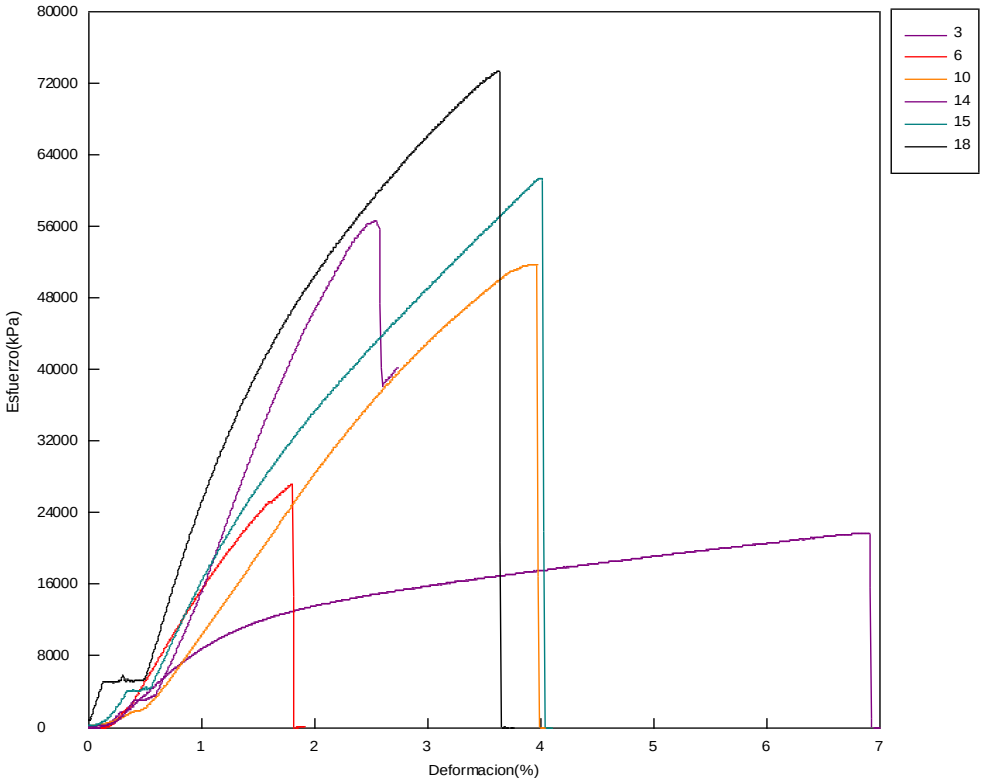


Gráfico 245. Comparación de las Pruebas de Tensión a las Muestras de Transformadores
que presentaron Fallas por Arco Eléctrico en todas las regiones versus Muestra Patrón.
Fuente: Laboratorio de Deformación Plástica Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá

La muestra que presenta mayores cambios es la perteneciente a la Región Antioquia con mayor deformación y menor esfuerzo, también se debe considerar a la de la Región Caldas. En la primera mencionada es significativo el cambio en la vida útil del equipo.

9. Comparación de Falla por Arco Eléctrico/Térmica presente en todas las Regiones versus Muestra Patrón.

Las probetas de papel aislante fueron preparadas y marcadas en forma numérica para su identificación utilizando la leyenda siguiente: Muestra Patrón *identificada* 18, Muestra de papel aislante del transformador de la Región Caldas *identificada* 7, Muestra de papel aislante del transformador de la Región Pacífico *identificada* 9 y Muestra de papel aislante del transformador de la Región Bogotá *identificada* 13.

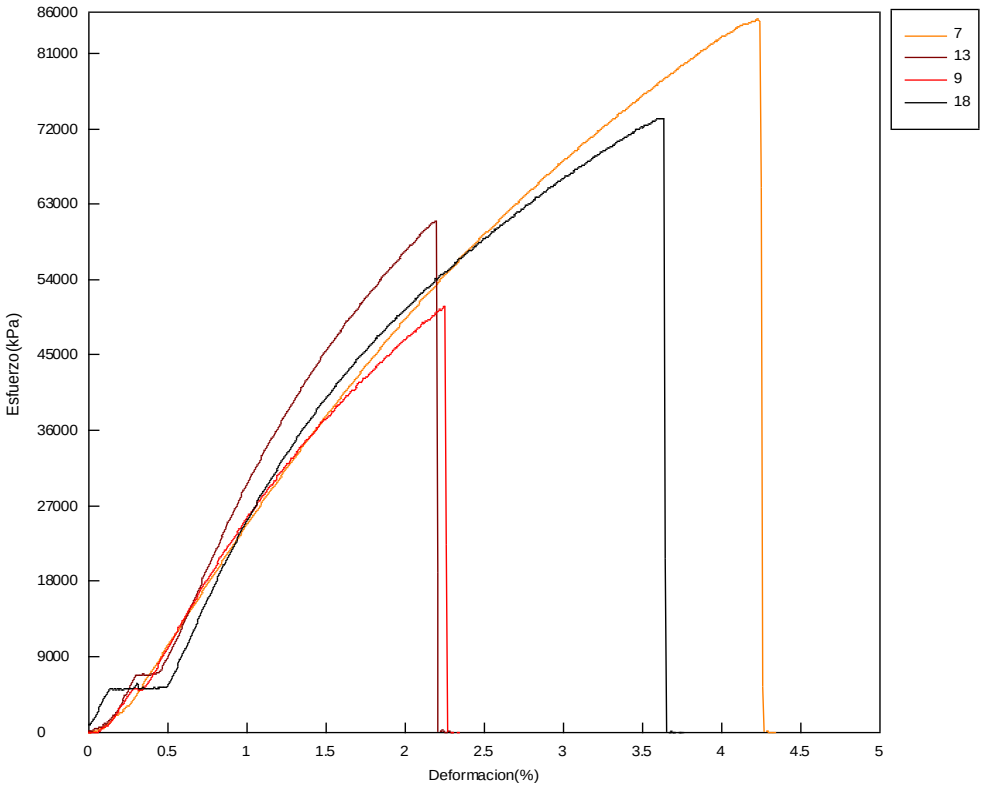


Gráfico 246. Comparación de las Pruebas de Tensión a las Muestras de Transformadores
que presentaron Fallas por Arco Eléctrico/Térmica en todas las regiones versus Muestra Patrón.
Fuente: Laboratorio de Deformación Plástica Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá

La muestra que presenta mayores cambios es la perteneciente a la Región Caldas con bastante mayor deformación y esfuerzo, sin embargo esto no representa cambios significativos hacia la vida útil del equipo.

3.2.10 Rigidez Dieléctrica en Muestras de Aceite de Transformadores Fallados.

La tensión de ruptura o "Constante Dieléctrica", utilizando el método ASTM D877 (ver anexo Nº 3) es el nivel máximo de la diferencia de voltaje alcanzada entre dos electrodos, que se encuentran sumergidos en aceite a una distancia predeterminada (una

décima de pulgada equivalente a 2.54 mm) hasta que se produce la chispa o descarga entre ellos. La tensión de ruptura del aceite utilizado para la prueba, es precisamente el voltaje que indica el voltímetro al producirse la chispa. Para este ensayo se utilizó un (01) Probador de Rigidez Dieléctrica de Aceites Aislantes, marca: HIPOTRONICS, modelo: OC90D-A, tensión de prueba 0-90 KV, equipado con kilovóltmetro digital con congelamiento de la lectura de rompimiento, con sistema automático para incremento de voltaje seleccionable en 3 rangos: 500/2000/3000 Volts/seg., montado en caja metálica con cubierta de protección y asidera perteneciente a la empresa venezolana TRANCECA, C.A. A continuación se muestran imágenes del equipo utilizado y en la tabla Nº 12 los resultados obtenidos en este ensayo:

Gráfico 247. Probador de Rigidez Dieléctrica
Fuente: M. Mago

Gráfico 248. Conjunto interno del chispómetro
Fuente: M. Mago

Tabla Nº 12. Resultados de la Rigidez Dieléctrica.

Region	Empresa	Serie	Marca	Potencia	Nivel de tensión	Año	BIL	Z%	Tipo de falla	Rigidez Dieléctrica (kV)
Antioquia	EPM	2008050481	Rymel	5 KVA	7620/240-120V	2005	95/30	1.12	Termica	31,8
Antioquia	EPM	2009050599	Rymel	5 KVA	7620/240-120V	2006	95/30	1.12	Descarga parcial	30,8
Antioquia	EPM	ID4607	Rymel	5 KVA	7620/240-120V	2004	95/30	1.12	Arco elèctrico	23
Caldas	CHEC	93844	Magnetron	5 KVA	7620/240-120V	2003	95/30		Tèrmica	45,8
Caldas	CHEC	268645	Siemens	5 KVA	7620/240-120V	2006	95/30		Arco elèctrico	
Caldas	CHEC	2008050274	Rymel	5 KVA	7620/240-120V	2008	95/30	1.12	Arco elèctrico/Tèrmica	42
Caldas	CHEC	105530	Magnetron	5 KVA	13200/240-120V	2005	95/30	2.6	Descarga parcial	23,4
Pacifico	CEO	164829	Magnetron	5 KVA	13200/240-120V	2008	95/30	2.3	Arco elèctrico/Tèrmica	44
Pacifico	CEO	316369	Siemens	5 KVA	13200/240-120V	2009	95/30	2.12	Arco elèctrico	26,4
Pacifico	CEO	206810	Magnetron	5 KVA	13200/240-120V	2010	95/30	2.8	Descarga parcial	31
Cundinamarca	EEC	89186	Magnetron	5 KVA	13200/240-120V	2003	95/30	2.70	Tèrmica	13,6
Bogota	Codensa	IN4444	Rymel	5 KVA	13200/240-120V	2007	95/30	2.6	Arco elèctrico/Tèrmica	21,8
Bogota	Codensa	189639	Magnetron	5 KVA	13200/240-120V	2009-12	95/30	2.43	Arco elèctrico	45,6
Bogota	Codensa	198938	Magnetron	5 KVA	13200/240-120V	2010-04	95/30	2.74	Descarga parcial	15,8
Bogota	Codensa	117105	Magnetron	5 KVA	13200/240-120V	2005-12	95/30	2.4	Tèrmica	

Nota. Fuente: M.Mago (2012).

3.3 Cálculo de Pérdidas Totales.

En un transformador se producen las pérdidas por corrientes de Foucault *(P_F)*, pérdidas por histéresis *(P_H)* y en el cobre del bobinado *(P_{cu})*.

3.3.1 Pérdidas por Corrientes de Foucault: se producen en cualquier material conductor cuando se encuentra sometido a una variación de flujo magnético. Se conocen también como pérdidas por corrientes parásitas y dependerán del material del que esté constituido el núcleo magnético. A continuación en la tabla Nº 13, están las características para la determinación de las pérdidas de potencia (W/kg).

Tabla Nº 13. Características para la Determinación de las Pérdidas de Potencia

Espesor	Tolerancia	Aleación % SI	1 Tesla (10^4 Gauss) W/kg(*)	1,5 Tesla $1.5*10^4$ Gauss W/kg
0,5	0,10	0,5 – 1	2,90	7,40
0,5	0,10	2,5	2,3	5,6
0,35	0,10	2,5	1,7	4

0,35	0,10	4	1,3	3,25
0,35	0,10	4,5	1,2	3
0,35	0,10	4,5	0,9	2,1

Nota. Fuente: M. Mago (2012).

aplicando la fórmula *(15)* donde las pérdidas en el hierro por las corrientes de Foucault son proporcionales al cuadrado de la inducción y al cuadrado de la frecuencia, cuyos resultados se muestran en la tabla Nº 8 :

$$P_F = \frac{2{,}2.\ f^2\ .\beta max^2.\Delta^2}{10^{11}} \qquad \textbf{(15)}$$

Tabla Nº 14. Pérdidas por corrientes de Foucault(*)

Región Antioquia		% Carbono	Pruebas	Magnétic
	Tipo de falla			
Muestra 1	Térmica	1,360861 93		1,009396 08
Muestra 2	Descarga parcial	1,398695 1		1,009396 08
Muestra 3	Arco eléctrico	1,416387 4		1,009396 08
Región Caldas				
Muestra 5	Térmica	1,398741 71		1,009396 08
Muestra 6	Arco eléctrico	1,407118		1,011376

		4	26
		1,413598	1,009396
Muestra 7	Arco eléctrico	85	08
		1,415004	1,013358
Muestra 8	Descarga parcial	52	38
Región Pacifico			
	Térmic	1,881542	1,444045
Muestra 9	a	58	68
			1,013358
Muestra 10	Arco eléctrico	1,418616	38
			1,013358
Muestra 11	Descarga parcial	1,408848	38
Región Cundinamarca			
	Térmic		1,212676
Muestra 12	a	1,653187	26
Región Bogotá			
	Arco	2,791587	2,244500
Muestra 13	eléctrico/Térmica	4	46
		1,391342	1,011376
Muestra 14	Arco eléctrico	6	26
		1,383036	1,011376
Muestra 16	Descarga parcial	2	26
	Térmic	1,365876	1,011376
Muestra 17	a	4	26
Patrón			
		2,820527	2,241550
Muestra 18		99	08

Nota. Fuente: M.Mago (2012)

3.3.2 Pérdidas por Histéresis Magnética: la histéresis magnética es el fenómeno que se produce cuando la imantación de los materiales ferromagnéticos no solo depende del valor del flujo sino también de los estados magnéticos anteriores. Las pérdidas por histéresis magnética dependen esencialmente del tipo de material, la inducción magnética dependerá del tipo de chapa. Aplicando la fórmula de Steinmentz *(16)* los resultados obtenidos se muestran en la tabla Nº 9:

$$P_H = K_F . f . B_{MAX}^{n} \qquad \textit{(16)}$$

Tabla Nº 15. Pérdidas por histéresis magnética.(*)

	%	Magnétic
Región Antioquia	Carbono	Prueba a

	Tipo de falla		
Muestra 1	Térmica	0,16831935	0,13554054
Muestra 2	Descarga parcial	0,17299878	0,13554054
Muestra 3	Arco eléctrico	0,17518707	0,13554054
Región Caldas			
Muestra 5	Térmica	0,17300454	0,13554054
Muestra 6	Arco eléctrico	0,17404062	0,135567 6
Muestra 7	Arco eléctrico	0,17484216	0,13554054
Muestra 8	Descarga parcial	0,17501602	0,13562171
Región Pacífico			
Muestra 9	Térmica	0,23272017	0,19504854
Muestra 10	Arco eléctrico	0,17546266	0,13559465
Muestra 11	Descarga parcial	0,17425457	0,13562171
Región Cundinamarca			
Muestra 12	Térmica	0,20447577	0,16388504
Región Bogotá			
Muestra 13	Arco eléctrico/Térmica	0,34527983	0,30460110
Muestra 14	Arco eléctrico	0,17208937	0,135567 6
Muestra 15	Arco eléctrico	0,17335052	0,135567 6
Muestra 16	Descarga parcial	0,17106199	0,13554054
Muestra 17	Térmica	0,16893957	0,13556760
Patrón			
Muestra 18		0,34885937	0,30456054

Nota. Fuente: M.Mago (2012)

3.3.3 Pérdidas Totales: las pérdidas de potencia en el hierro *(P_{FE})* o en el núcleo magnético son la suma correspondiente a las pérdidas por Foucault *(P_F)* y por histéresis

(P_H) como se indica a continuación en la fórmula *(17)* y cuyos resultados se muestran en la tabla Nº 10:

$$Pérdida\ Total\ en\ el\ Núcleo = (P_F) + (P_H) \qquad (17)$$

Tabla N° 16. Pérdidas Totales (W) tomando 75 kg para Transformador de 5 kVA

Región Antioquia			
	Tipo de falla		
Muestra 1	Térmica	114,688596	85,8702465
Muestra 2	Descarga parcial	117,877042	85,8702465
Muestra 3	Arco eléctrico	119,368088	85,8702465
Región Caldas			
Muestra 5	Térmica	117,880969	85,8702465
Muestra 6	Arco eléctrico	118,586927	86,020789
Muestra 7	Arco eléctrico	119,133076	85,8702465
Muestra 8	Descarga parcial	119,25154	86,173507
Región Pacífico			
Muestra 9	Térmica	158,569707	122,932067
Muestra 10	Arco eléctrico	119,555869	86,1714773
Muestra 11	Descarga parcial	118,732706	86,1735068
Región Cundinamarca			
Muestra 12	Térmica	139,324676	103,242098
Región Bogotá			
Muestra 13	Arco eléctrico/Térmica	235,265044	191,182617
Muestra 14	Arco eléctrico	117,257396	86,020789
Muestra 15	Arco eléctrico	118,116709	86,020789
Muestra 16	Descarga parcial	116,557365	86,0187599
Muestra 17	Térmica	115,111196	86,020789

Patrón		
Muestra 18	131,828066	98,5467465

Nota. Fuente: M. Mago (2014)

3.4 Desarrollo de la Metodología.

3.4.1 Análisis Estadístico Aplicando el Programa SPSS: Casos Venezuela y Colombia respectivamente.

Cuando se llevó a cabo el estudio estadístico en las empresas del sector eléctrico de Venezuela y Colombia, se identificaron los tipos, causas y consecuencias de fallas en los transformadores de distribución, tal y como se muestra en el procedimiento experimental del presente capítulo, sin embargo, a continuación se hace un resumen de estos resultados, dado que hay consideraciones del objeto estudio de la presente investigación doctoral, que fundamentan el desarrollo de la metodología planteada:

CASO VENEZUELA:

El mes de mayor reporte de transformadores fallados corresponde a Marzo con el 24,3%, el 27% tienen una capacidad de 25 kVA, el 54,1 % están ubicados en el Municipio Valencia. El alimentador con mayor ocurrencia de fallas es Cardenera I con el 8,1%. No se puede determinar el tipo de falla, ni causas y/o consecuencias, dado que la información suministrada por los operadores del sistema solo reporta transformador quemado. Tampoco se tuvo acceso a muestras de equipos fallados con la capacidad indicada, por lo tanto, no se pudieron realizar pruebas experimentales a estas chapas de acero al silicio.

CASO COLOMBIA:

El mes de mayor ocurrencia de fallas correspondió a Mayo con el 37,5% y muy similarmente en los meses de Abril y Agosto respectivamente. Los transformadores con capacidad de 5 kVA tienen una incidencia de fallas del 49,6 debido a arcos eléctricos

ocasionados por cortocircuitos externos con el 72,1%. Los transformadores que fueron reparados en el año 2007 han presentado fallas en un 36,4%.

Las pruebas experimentales cuyos resultados se muestran previamente en el presente capítulo, fueron realizadas con muestras de transformadores fallados de 5 kVA las cuales presentan los tres tipos de fallas: térmicas, por arco eléctrico y descargas parciales, procedentes de distintas regiones de Colombia suministradas a quien suscribe por la empresa colombiana FYR Ingenieros C.A durante la estancia de investigación doctoral. En cuanto a la determinación del Sistema Estocástico Unificado para la Predicción Confiable de Fallas por Condiciones Ambientales de la presente investigación doctoral, el análisis se focaliza hacia el tipo de falla por arco eléctrico en los transformadores con la capacidad indicada, dado que esta es la de mayor incidencia, dejando a otros grupos de investigación la continuación de estudios posteriores en esta área del conocimiento. En la tabla N° 17 se muestran características técnicas de los transformadores fallados por arco eléctrico utilizados de referencia en la presente investigación:

Tabla N° 17. Características Técnicas de Transformadores Fallados por Arco Eléctrico.

Procedencia	Codigo	Marca	Potencia	Nivel de tensión	BIL	Z%	Año
Antioquia	ID4607	Rymel	5 kVA	7620/240-120V	95/30	1.12	2004
Caldas	268645	Siemens	5 kVA	7620/240-120V	95/30		2006
Pacífico	316369	Siemens	5 kVA	13200/240-120V	95/30	2.12	2009
Bogotá	2009040765	Rymel	5 kVA	13200/240-120V	95/30		2009

Nota. Fuente: M. Mago (2011).

3.4.2 Análisis de la Falla por Arco Eléctrico Aplicando Programa ATP al Transformador Monofásico Caso Estudio.

A continuación, se muestran los resultados de la simulación con el programa de análisis transitorio (ATP/EMTP) para una condición de falla por arco eléctrico en un transformador monofásico de 5 kVA, cuyos parámetros del circuito equivalente se indican en el apéndice N°1 de la presente investigación doctoral, sin embargo, los mismos corresponden a uno (01) que será instalado en el laboratorio de Maquinas Eléctricas de la Universidad de Carabobo, el cual fue fabricado en Venezuela por la

empresa TRANCECA (ver plano en el anexo N° 5). Las mediciones de potencia y energía que presenta el transformador durante esta falla corresponden; tanto para el régimen transitorio, como el permanente:

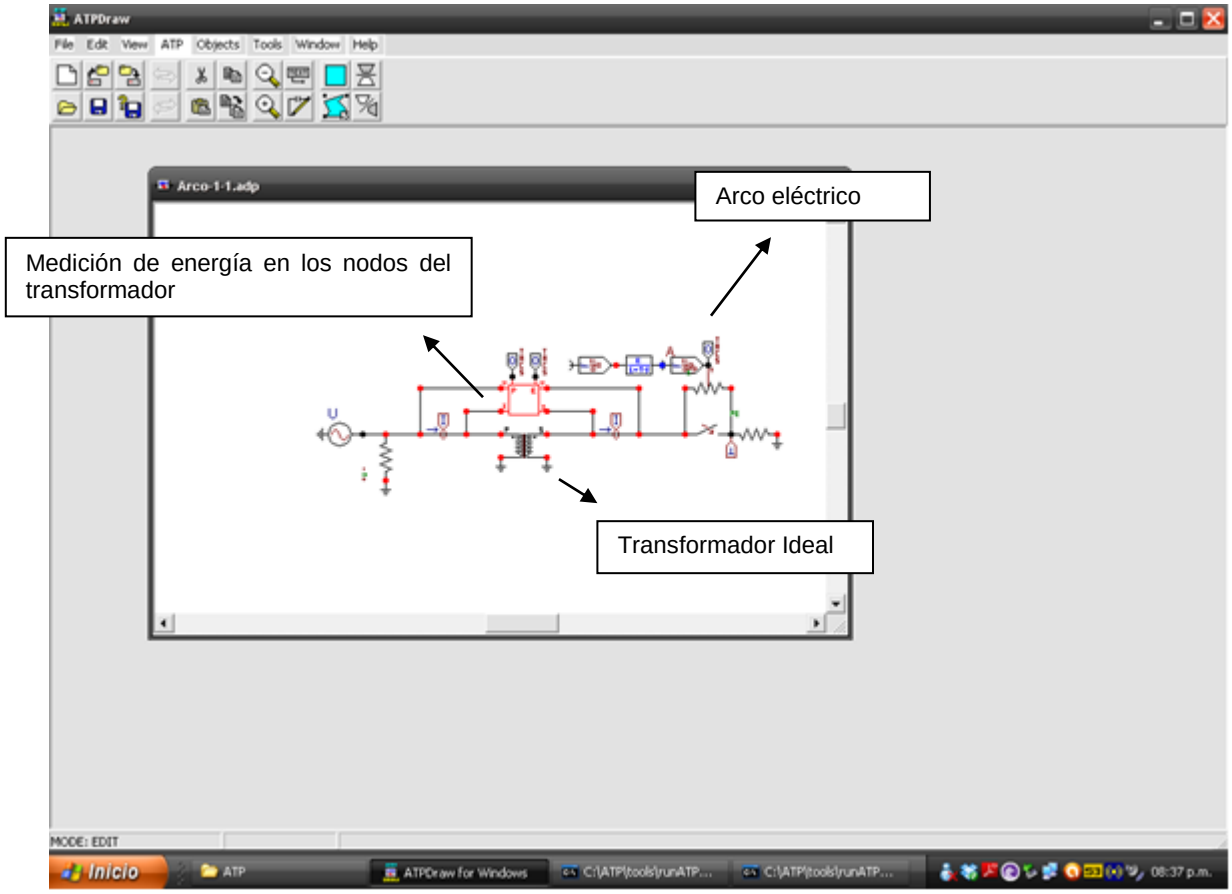


Gráfico 249. Modelo propuesto en el programa ATP.

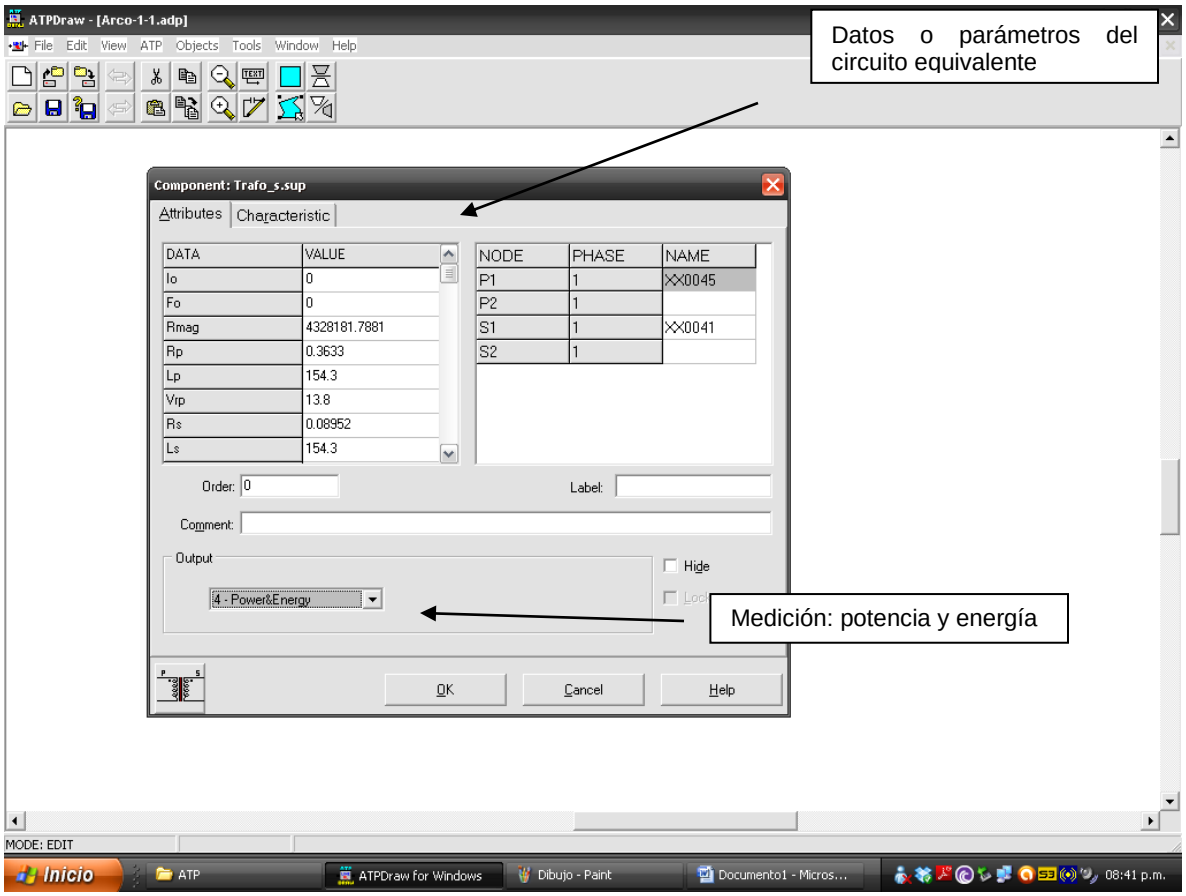


Gráfico 250. Atributos del circuito equivalente, para la medición de potencia y energía en el transformador.

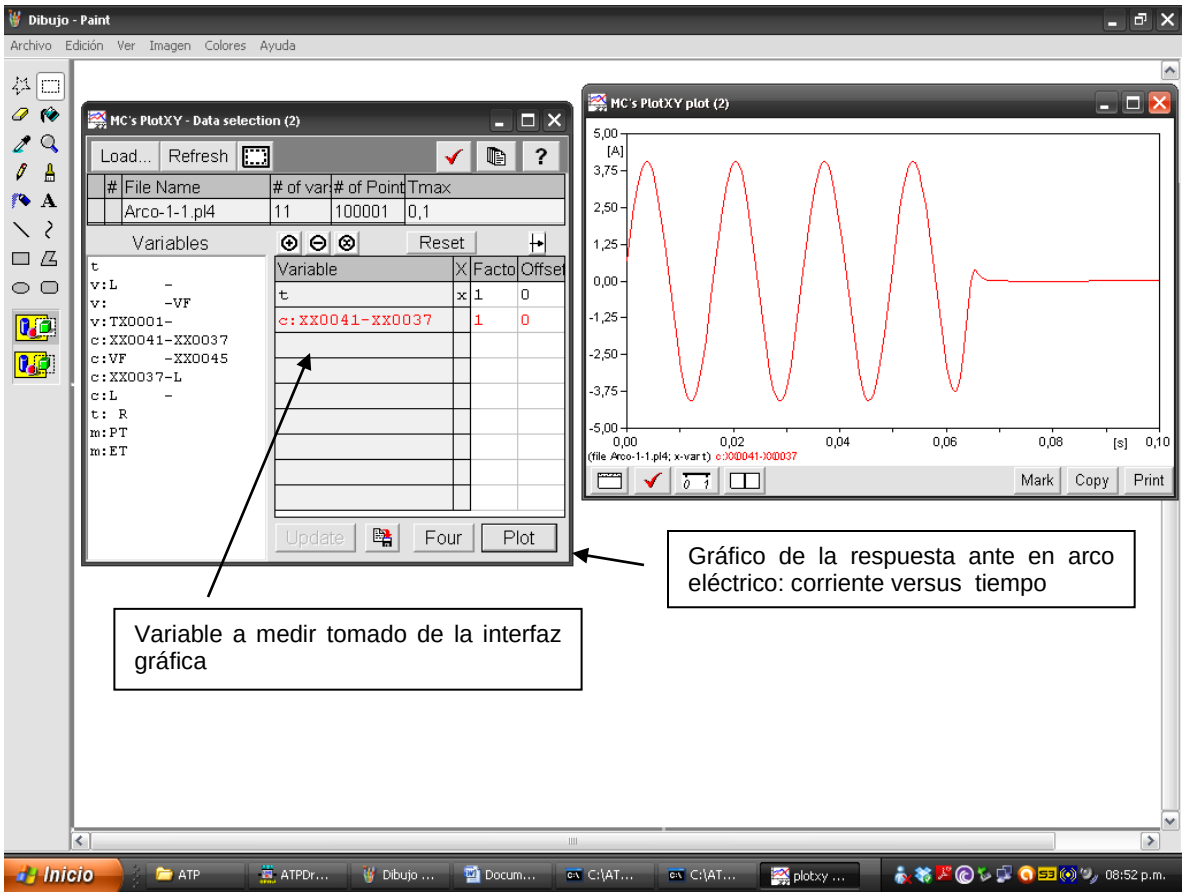


Gráfico 251. Respuesta en regimen transitorio y permanente cuando ocurre el arco electrico en el transformador

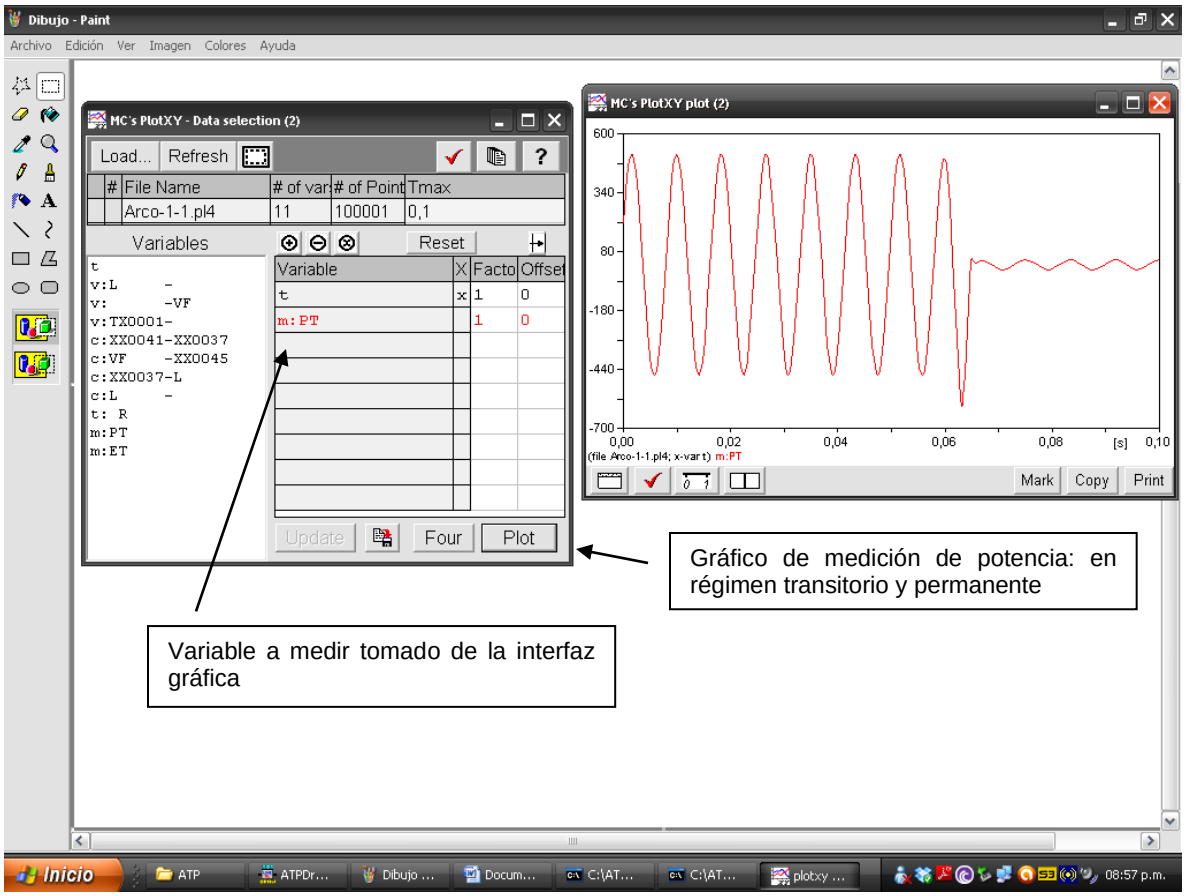


Gráfico 252. Medición de potencia en el transformador.

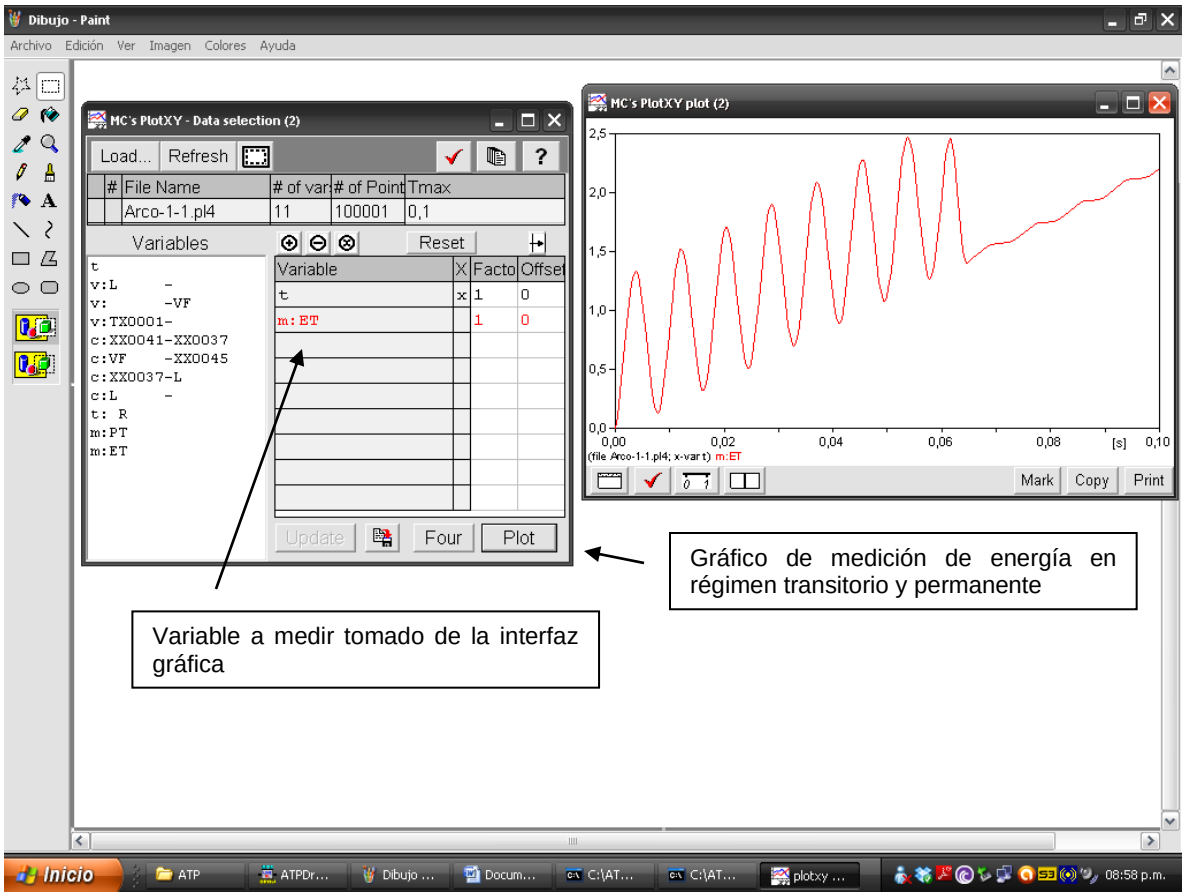


Gráfico 253. Medición de energía en el transformador.

3.4.3 Análisis de los Resultados Experimentales Realizados a la Chapa de Acero al Silicio de los Transformadores Fallados.

Los métodos no convencionales aplicados en el análisis de fallas a las chapas de acero al silicio de las muestras de equipos fallados se indican a continuación:

- Análisis de microestructura: se realizaron análisis a todas las muestras de equipos fallados, verificando cantidad de inclusiones o impurezas de acuerdo a la norma ASTM E-45, además del tamaño de grano (patrones ASTM), cuyas fotomicrografías se muestran en la parte experimental del presente capítulo, sin embargo, como la falla de mayor incidencia es debido al arco eléctrico, el estudio está dirigido hacia esta condición en particular. A continuación se indican estos resultados:

- ✓ La muestra procedente de la Región Antioquia (Medellín) presenta mayor cantidad de inclusiones tipo D óxidos gruesos, es decir, "*presencia de precipitados por alta temperatura"*. La muestra procedente de la Región Pacífico (Popayán) tiene condiciones similares pero, los óxidos son finos. La muestra de la Región Caldas presenta inclusiones tipo D de óxidos gruesos, pero en menor cantidad, mientras que la procedente de la Región Bogotá *"está limpia",* presentando granos finos al igual que la muestra patrón. A continuación se muestran las fotomicrografías obtenidas en los gráficos 254 hasta 258:

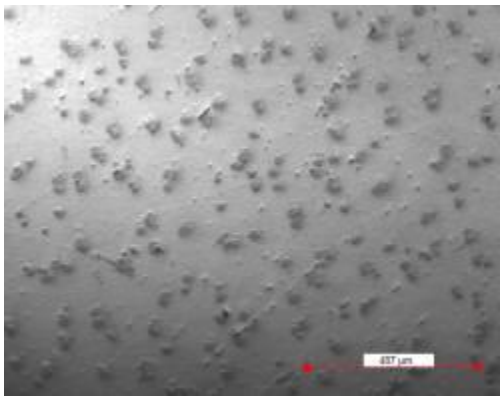


Grafico 254. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla por Arco Eléctrico debido a un Cortocircuito Externo X100. Región de procedencia: Antioquia (Medellín). TIPO D: OXIDOS GRUESOS 12 µ.

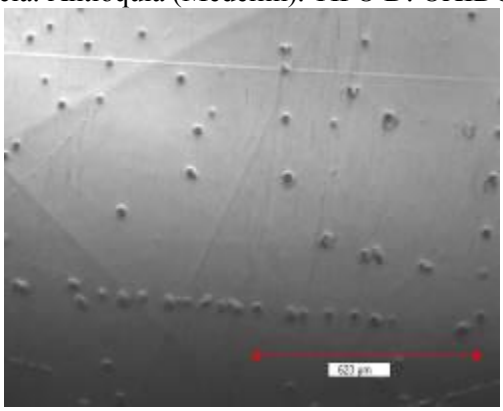


Gráfico 255. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla por Arco Eléctrico debido a un Cortocircuito Externo X100. Región de procedencia: Caldas (Manizales). TIPO D: OXIDOS GRUESOS 10 µ.

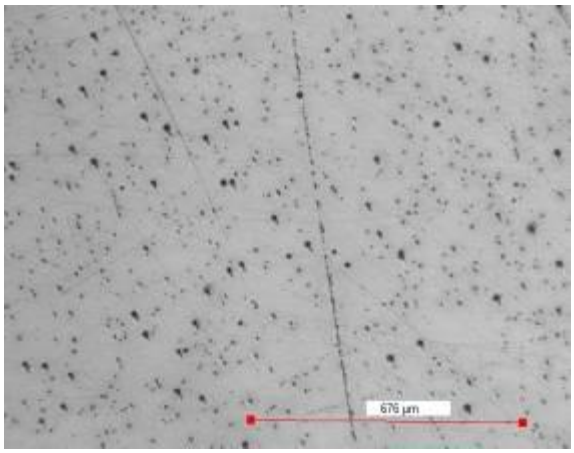


Gráfico 256. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla por Arco Eléctrico debido a un Cortocircuito Externo X100. Región de procedencia: Pacífico (Popayán). TIPO D: OXIDOS FINOS 7 µ.

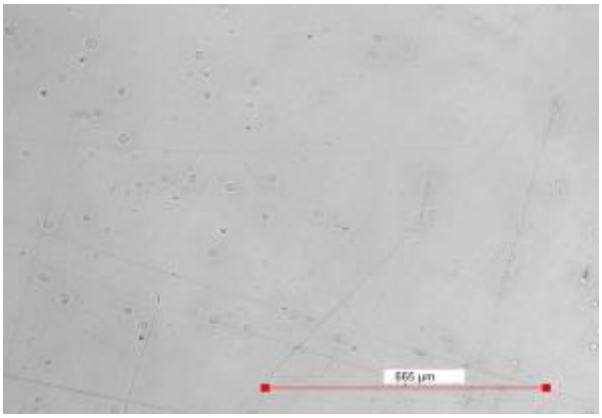


Gráfico 257. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla por Arco Eléctrico debido a una Sobrecarga X100. Región de procedencia: Bogotá. TIPO D: OXIDOS FINOS 4 µ.

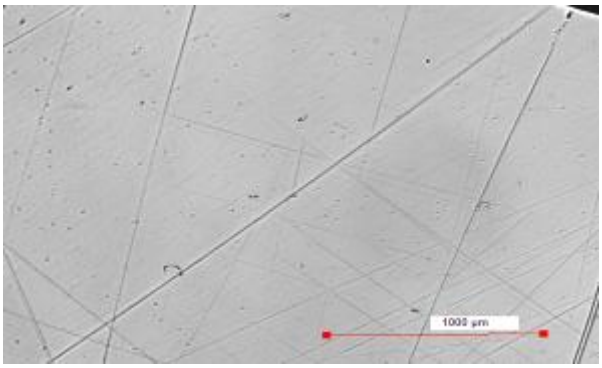


Gráfico 258. Fotomicrografía de la muestra Patrón sin ataque químico X50. TIPO D: OXIDOS FINOS 4 µ.

- ✓ En cuanto al tamaño de grano, las muestras procedentes de las Regiones Antioquia, Pacífico y Patrón presentan tamaño 1, mientras que las otras

muestras procedentes de Caldas y Bogotá tamaño 2. A continuación se muestran las fotomicrografías obtenidas en los gráficos 259 hasta 263:

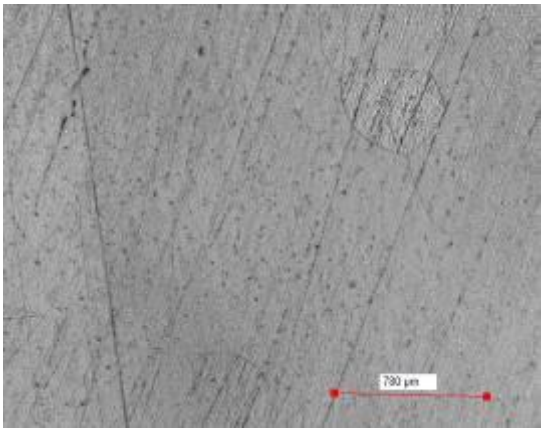


Gráfico 259. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla por Arco Eléctrico debido a un Cortocircuito Externo X50. Región de procedencia: Antioquia (Medellín). TAMAÑO 1. FWHM 1,704 2 THETA 43,672 TAMAÑO DEL CRISTAL 5,05 nm.

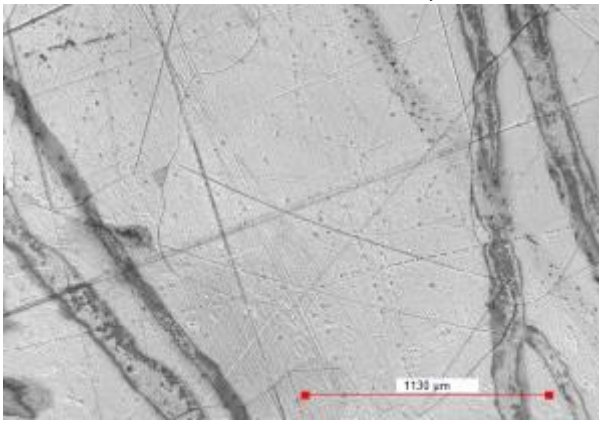


Gráfico 260. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla por Arco Eléctrico debido a un Cortocircuito Externo X50. Región de procedencia: Caldas (Manizales). TAMAÑO 2. FWHM 0,144 2 THETA 43,505 TAMAÑO DEL CRISTAL NO SE APRECIA ESCALA (0 nm)

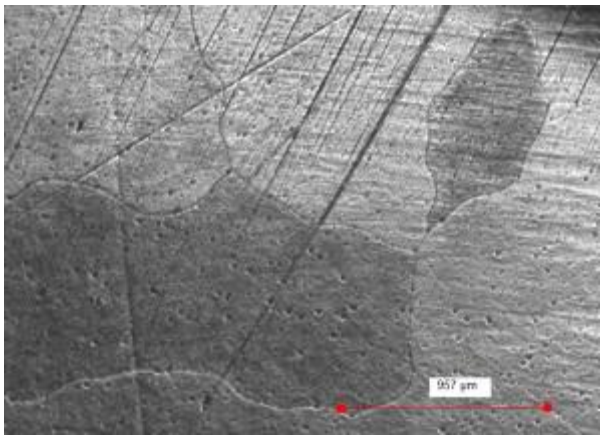


Gráfico 261. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla por Arco Eléctrico debido a un Cortocircuito Externo X50. Región de procedencia: Pacífico (Popayán). TAMAÑO 1. FWHM 0,271 2 THETA 43,875 TAMAÑO DEL CRISTAL 41,06 nm

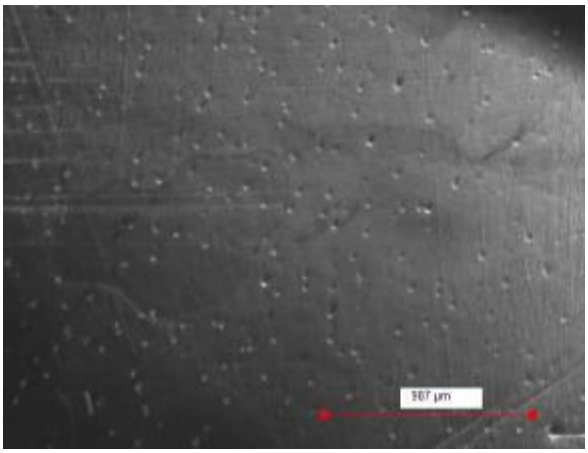


Gráfico 262. Fotomicrografía de una muestra de chapa de acero al silicio que presentó una Falla por Arco Eléctrico debido a una Sobrecarga X50. Región de procedencia: Bogotá. TAMAÑO 2. FWHM 0,234 2 THETA 43,888 TAMAÑO DEL CRISTAL 54,36 nm

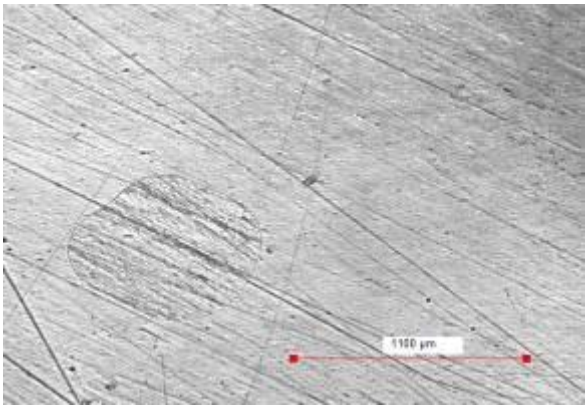


Gráfico 263. Fotomicrografía de la muestra Patrón mostrando ataque químico X50. TAMAÑO 1 FWHM 0,652 2 THETA 43,459 TAMAÑO DEL CRISTAL 13,6 nm

A continuación, en los gráficos 264 y 265, se indican condiciones magnéticas de la chapa de acero al silicio de las muestras de equipos fallados para la condición de falla por arco eléctrico, correspondientes a: *Resistividad, Fuerza Coercitiva e Inducción Remanente* acuerdo al porcentaje de carbono, observándose que los cambios específicos corresponden a "*la fuerza coercitiva"* para la Región Bogotá, mientras que, al comparar la *Conductibilidad, Saturación Magnética y Permeabilidad* en todas las regiones, "*no se evidencian cambios significativos"*:

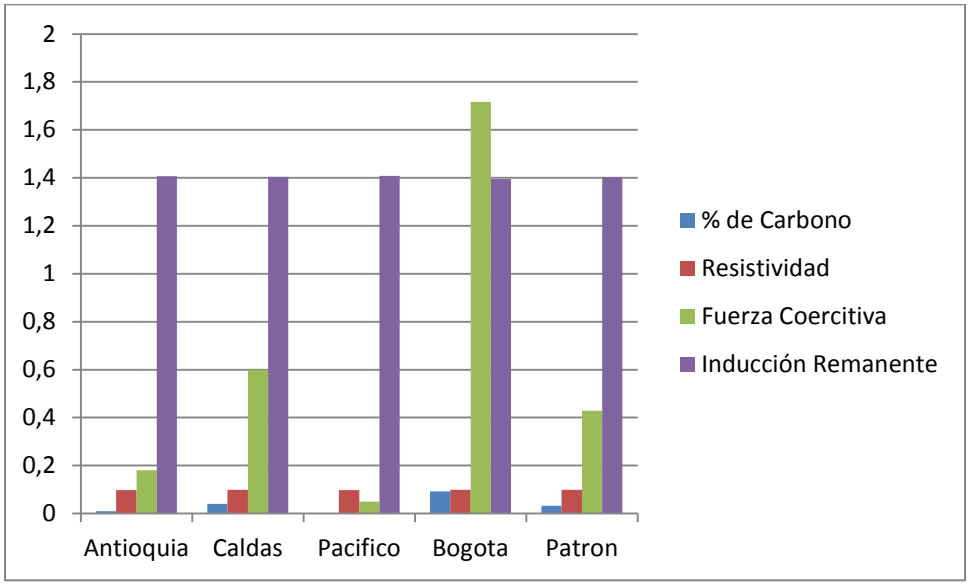


Gráfico 264. Análisis Porcentaje Carbono versus Resistividad, Fuerza Coercitiva e Inducción Remanente en la Falla por Arco Eléctrico.

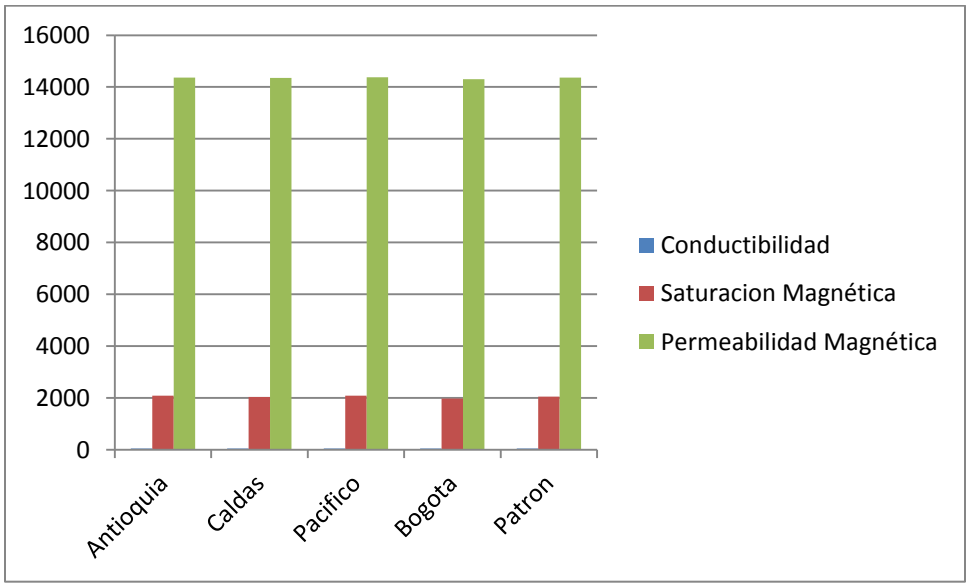


Gráfico 265. Análisis de la Conductibilidad, Saturación Magnética y Permeabilidad en la Falla por Arco Eléctrico.

- Análisis de dureza: estas pruebas fueron realizadas a todas las muestras de equipos fallados, sin embargo, el análisis correspondiente para las que presentaron fallas por arco eléctrico se muestran en el grafico 266, donde "*el cambio más significativo se evidencia en la muestra procedente de la Región Bogotá"*. A continuación lo indicado:

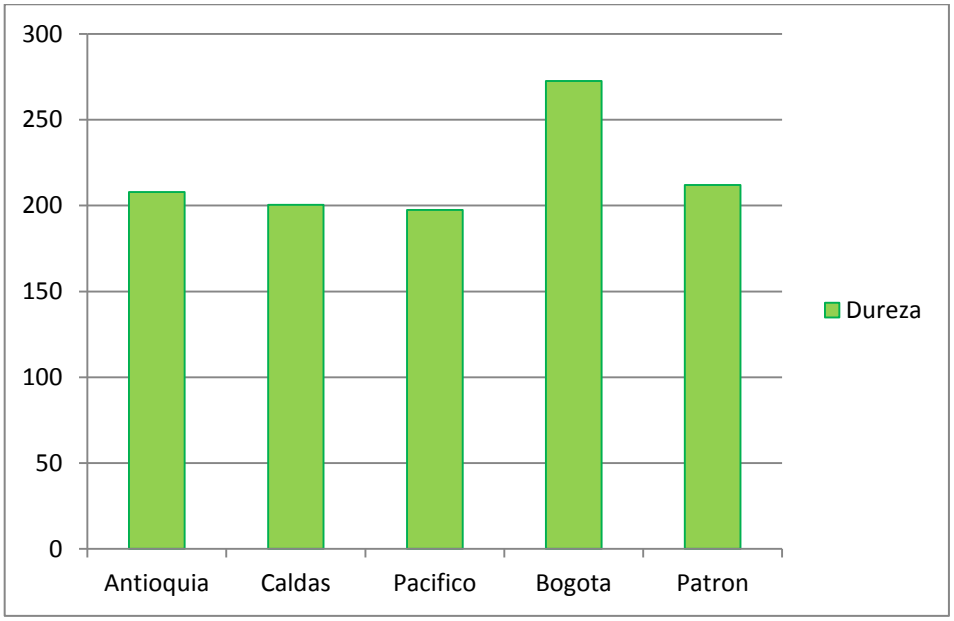
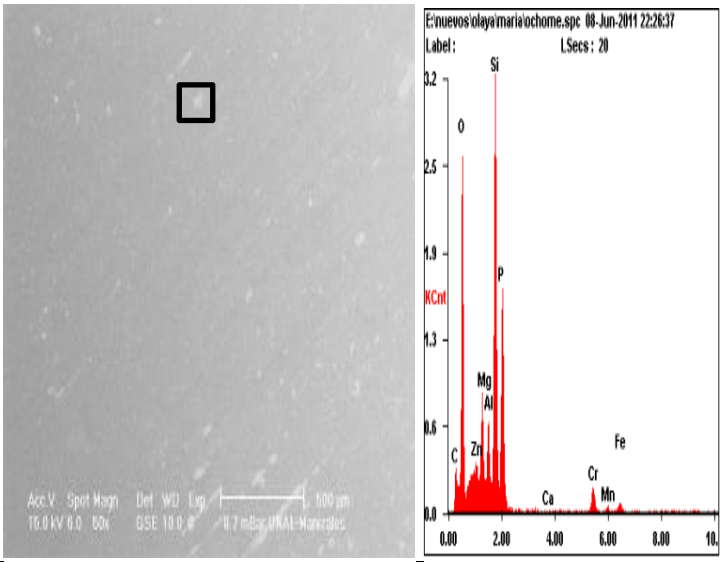


Gráfico 266. Resultados obtenidos de las mediciones de dureza en las muestras de Fallas por Arco Eléctrico.

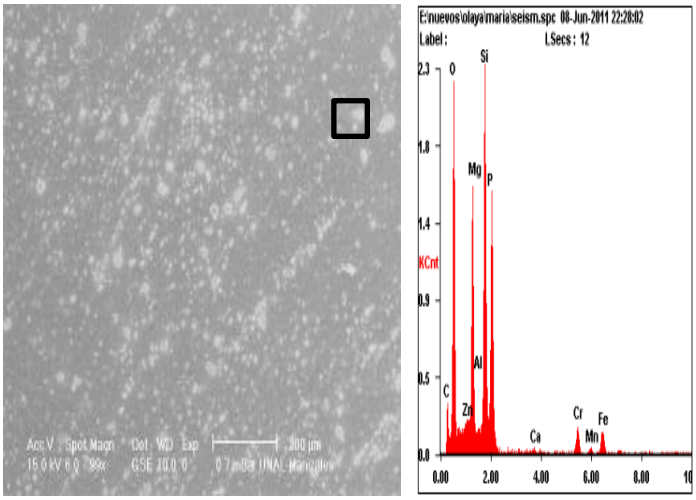
- Pruebas de microscopia electrónica de barrido: se realizaron pruebas de microscopia electrónica de barrido en ambiente (E-SEM) a todas las muestras de transformadores fallados, sin embargo, a continuación se evalúa el elemento o combinación de estos, que producen precipitados por alta temperatura (*inclusiones o impurezas*) en la chapa de acero al silicio para la falla por arco eléctrico. Los que se observan en el espectro, son los que afectan la calidad y durabilidad del material. A continuación lo indicado:



Element	Wt %	At %
C K	21.38	33.28
O K	35.03	40.93
ZnL	05.26	01.50
MgK	04.68	03.60
AlK	03.63	02.52
SiK	16.45	10.95
P K	09.72	05.87
CaK	00.03	00.02
CrK	02.46	00.88
MnK	00.15	00.05
FeK	01.19	00.40

Gráfico 267. ESEM Muestra Región Antioquia.

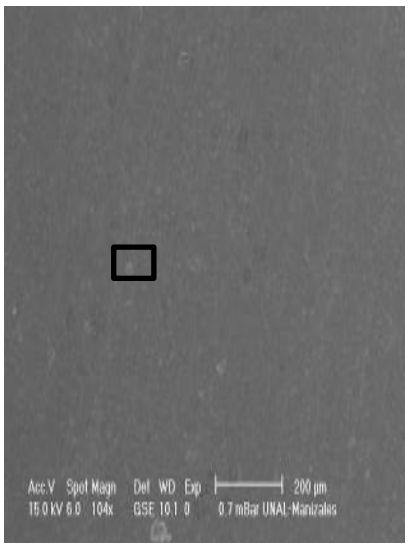
En el gráfico 267 de la muestra procedente de la Región Antioquia, el silicio (Si), oxígeno (O) y fósforo (P), son los elementos que presentan cambios significativos en el espectro e influyen en los precipitados por alta temperatura.

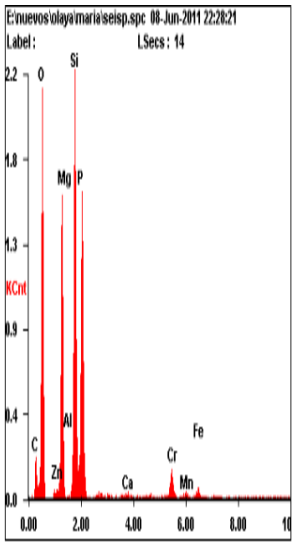


Element	Wt %	At %
C K	19.76	31.18
O K	34.33	40.67
ZnL	03.75	01.09
MgK	10.58	08.25
AlK	01.08	00.76
SiK	13.86	09.35
P K	10.87	06.65
CaK	00.21	00.10
CrK	02.54	00.93
MnK	00.18	00.06
FeK	02.86	00.97

Gráfico 268. E-SEM Muestra Región Caldas.

En el gráfico 268 de la muestra procedente de la Región Caldas, los elementos que producen cambios significativos son el silicio (Si) y el oxígeno (O), también el magnesio (Mg) y el fosforo (P) como se indicó anteriormente.

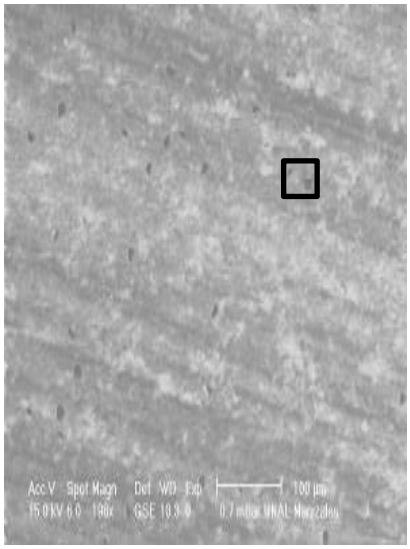


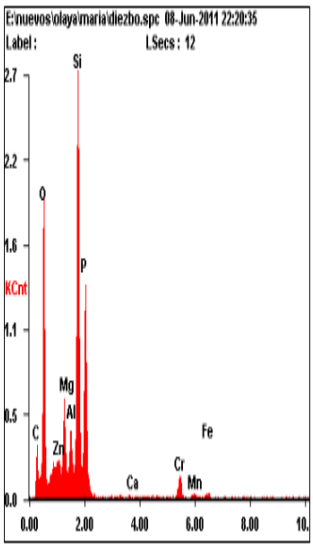


Element	Wt %	At %
C K	18.83	29.08
O K	37.34	43.30
ZnL	00.88	00.25
MgK	11.15	08.51
AlK	00.06	00.04
SiK	14.51	09.58
P K	12.85	07.70
CaK	00.16	00.07
CrK	02.74	00.98
MnK	00.17	00.06
FeK	01.32	00.44

Gráfico 269. E-SEM Muestra Región Pacífico.

En el gráfico 269 cuya muestra procede de la Región Pacífico, hay bastante similitud a la indicada anteriormente de la Región Caldas, lo que pudiera inferir lo siguiente: *"a pesar de los cambios de temperatura debido a las distintas ubicaciones geográficas, la respuesta ante la falla se mantiene".*

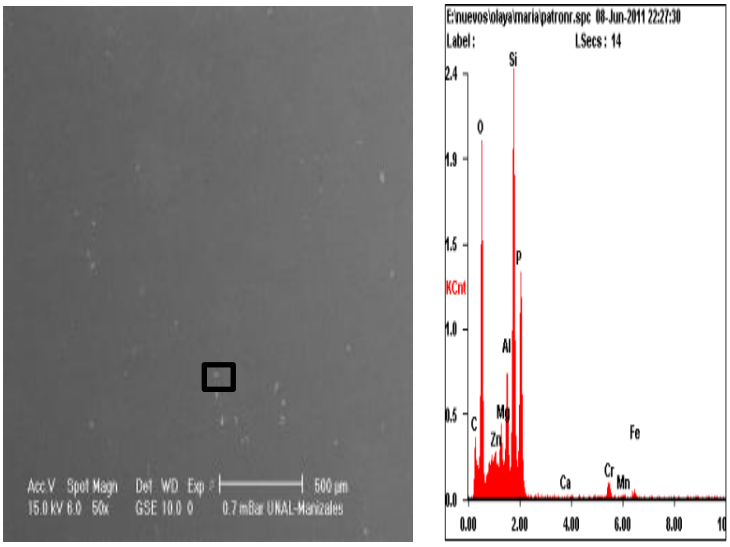




Element	Wt %	At %
C K	24.74	37.53
O K	33.46	38.09
ZnL	04.72	01.31
MgK	04.41	03.30
AlK	02.91	01.96
SiK	16.93	10.98
P K	09.78	05.75
CaK	00.09	00.04
CrK	02.16	00.76
MnK	00.09	00.03
FeK	00.71	00.23

Gráfico 270. E-SEM Muestra Región Bogotá.

El gráfico 270 de la muestra procedente de la Región Bogotá presenta el mismo comportamiento que la procedente de la región Antioquia, pero es menor la proporción de oxigeno (O) y fosforo (P). La fotomicrografía no evidencia exceso de óxidos, la muestra está *"limpia de precipitados por alta temperatura".*



Element	Wt %	At %
C K	24.90	37.35
O K	35.29	39.74
ZnL	04.78	01.32
MgK	03.04	02.26
AlK	04.71	03.15
SiK	14.90	09.56
P K	10.02	05.83
CaK	00.02	00.01
CrK	01.48	00.51
MnK	00.00	00.00
FeK	00.86	00.28

Gráfico 271. E-SEM Muestra Patrón.

En el caso del gráfico 271 correspondiente a la muestra patrón, el silicio (Si) y el oxígeno (O) son los elementos de mayor incidencia, luego el fosforo (P) y aluminio (Al). La fotomicrografía no muestra alteraciones o presencia de "*Inclusiones o impurezas".*

- Pruebas de difracción por rayos X: a todas las muestras de equipos fallados se les realizaron pruebas de difracción por rayos X con la finalidad de determinar el tamaño y ancho del pico, cuyos resultados se muestran en las pruebas experimentales del presente capítulo, sin embargo, en el grafico 272 se indican los correspondientes a la falla por arco eléctrico. En la tabla N° 18 se determinan las diferencias del tamaño del cristal (grano) en nanómetros, luego en la tabla N° 19 complementando con el gráfico 273, la relación entre las pérdidas totales: debido al efecto Foucault e histéresis magnética versus tamaño del cristal (grano).

Tabla N° 18. Tamaño del cristal (grano) versus el error obtenido.

Region	FWHM	THETA	Tamaño del Cristal	Error Aproximado	Observaciones del error
Antioquia	1,704	43,672	5,05	0,37	Valor por debajo del patrón
Caldas	0,144	43,505	0	0,00	Valor que no puede apreciarse
Pacifico	0,271	43,875	41,06	3,02	Valor por encima del patrón
Bogota	0,234	43,888	54,36	4,00	Idem anterior
Patron	0,652	43,459	13,6	1	Valor patrón

Nota. Fuente: M. Mago (2013)

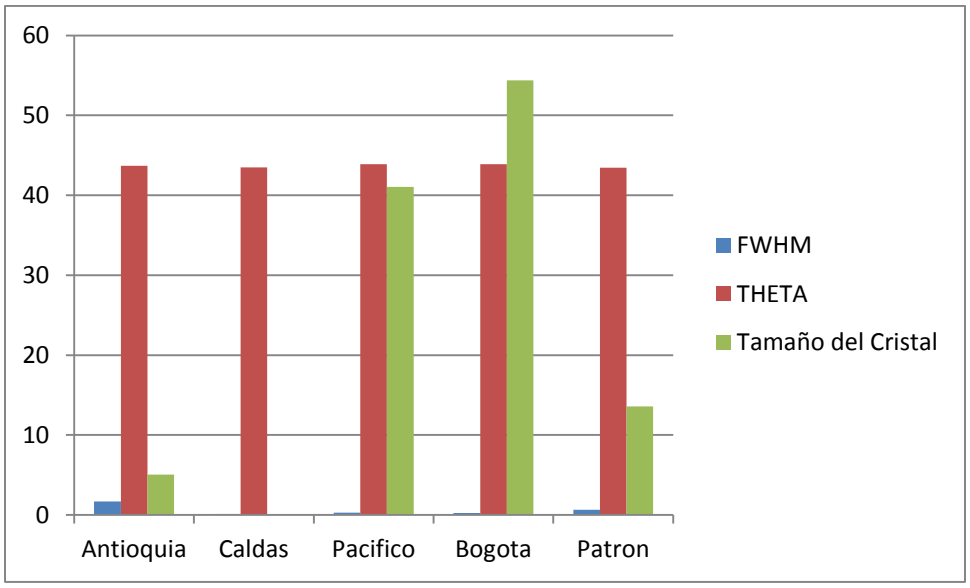


Gráfico 272. Tamaño de cristal en la falla por arco eléctrico.

Todos los tamaños de cristal (grano) están fuera de los rangos establecidos, es decir, la falla por arco eléctrico *"afecta esta condición del material"*, independiente de la ubicación geográfica del transformador en estudio.

Tabla N° 19. Pérdidas versus tamaño del cristal (grano) de acuerdo al porcentaje de Carbono

Region	Perdidas Foucault	Perdidas Histeresis	Perdidas Totales	Tamaño del Cristal	Error aproximado
Antioquia	1,4163874	0,17518707	1,59157447	5,05	1,421048634
Caldas	1,4071184	0,17404062	1,58115902	0	1,411749125
Pacifico	1,418616	0,17546266	1,59407866	41,06	1,423284518
Bogota	1,3913426	0,1720894	1,563432	54,36	1,395921429
Patron	2,82052799	0,3488594	3,16938739	13,6	2,82981017

Nota. Fuente: M. Mago (2013).

Las aproximaciones para obtener las pérdidas totales a partir del porcentaje de carbono de las muestras de equipos fallados traen consigo, errores en la medición, de tal manera que; al calcular las pérdidas totales los resultados obtenidos están por encima de los establecidos por el fabricante, sin embargo, por razones de inmediatez para las empresas que reparan o fabrican estos equipos este método resulta bastante útil, siempre y cuando, *"se considere dicho error"*.

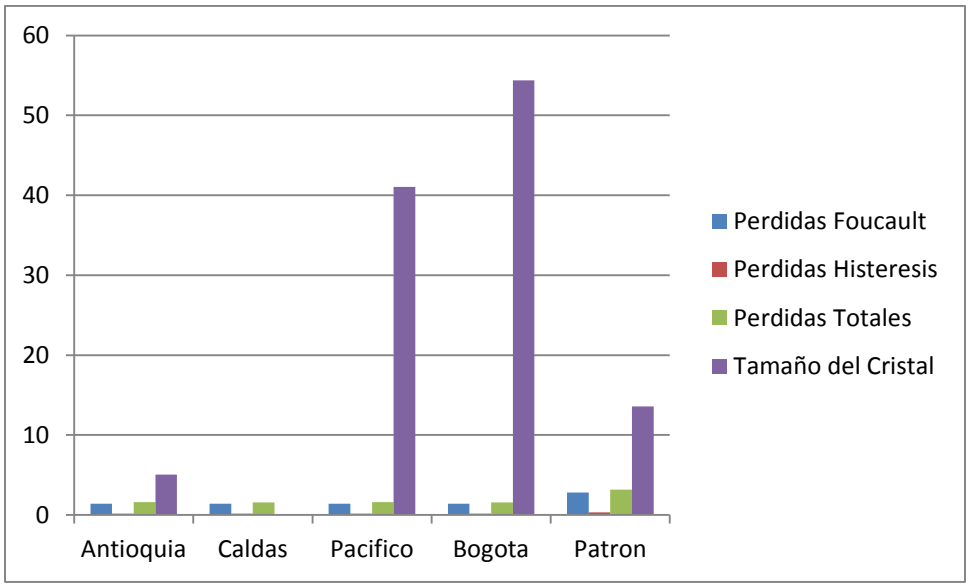


Gráfico 273. Tamaño de cristal versus relación de pérdidas en la falla por Arco eléctrico de acuerdo al porcentaje de carbono.

La relación con el tamaño del cristal que se muestra en el gráfico 273 es importante, porque las muestras procedentes de las Regiones de Bogotá y el Pacífico, presentan un tamaño muy grande en comparación con la muestra patrón, no siendo el caso de las procedentes de las Regiones de Antioquia y Caldas, cuyos tamaños son bastante reducidos. "*La temperatura ambiente influye de manera importante, en los cambios que presenta la microestructura del material"*.

- Ensayos por partículas magnéticas y líquidos penetrantes: estos ensayos fueron presentados en la investigación realizada sobre métodos no convencionales en el año 2011[34], no apreciándose en las muestras analizadas *"ninguna discontinuidad superficial"* en el caso de líquidos penetrantes de acuerdo al método ASTM E-165-95, y *"ningún cambio en los mismos"* aplicando partículas magnéticas de acuerdo al método ASTM E709-01.

- Pruebas magnéticas con el magnetómetro: cuando se realizaron estas pruebas a las muestras de equipos fallados no se apreciaron cambios en el campo magnético o magnetización de la chapa de acero al silicio. A continuación en el grafico 274 se muestran los resultados obtenidos para la falla por arco eléctrico:

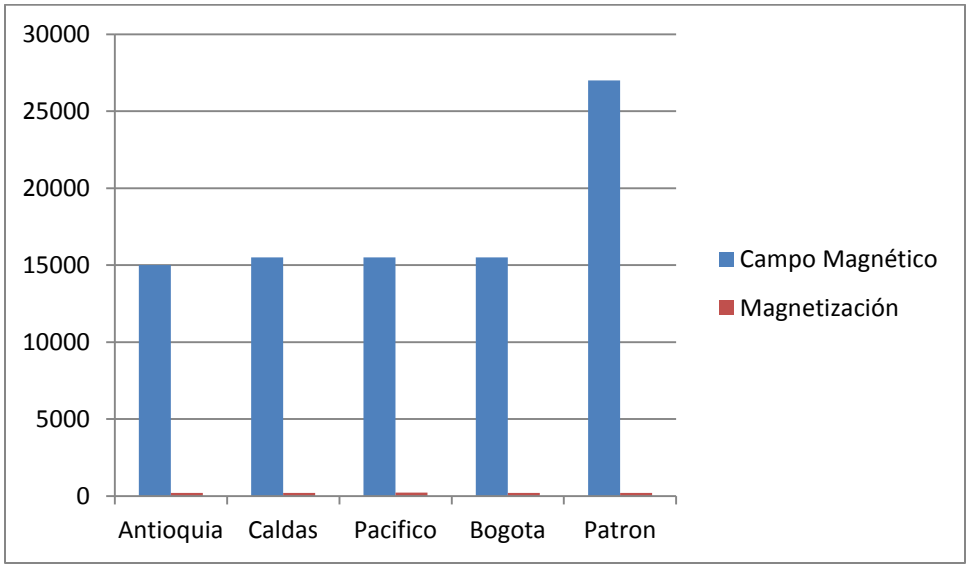


Gráfico 274. Resultados obtenidos de las pruebas magnéticas para la Falla por Arco Eléctrico.

En el gráfico 274 se evidencia que hay una disminución del campo magnético en todas las muestras que fueron analizadas, aunque se mantiene la magnetización. La condición de falla *"afecta la calidad magnética del material"*.

En la tabla N° 20, se muestra la relación entre las pérdidas totales versus el tamaño del cristal (grano) en escala manométrica para la falla por arco eléctrico en los resultados obtenidos de las pruebas magnéticas:

Tabla N° 20. Pérdidas versus tamaño del cristal de acuerdo a las pruebas magnéticas

Region	Perdidas Foucault	Perdidas Histeresis	Perdidas Totales	Tamaño del Cristal	Error aproximado
Antioquia	1,00939608	0,13554054	1,14493662	5,05	1,022264839
Caldas	1,01137626	0,1355676	1,14694386	0	1,024057018
Pacifico	1,01335838	0,13559465	1,14895303	41,06	1,02585092
Bogota	1,01137626	0,1355676	1,14694386	54,36	1,024057018
Patron	2,24155008	0,3045605	2,54611058	13,6	2,273313018

Nota. Fuente: M. Mago (2013).

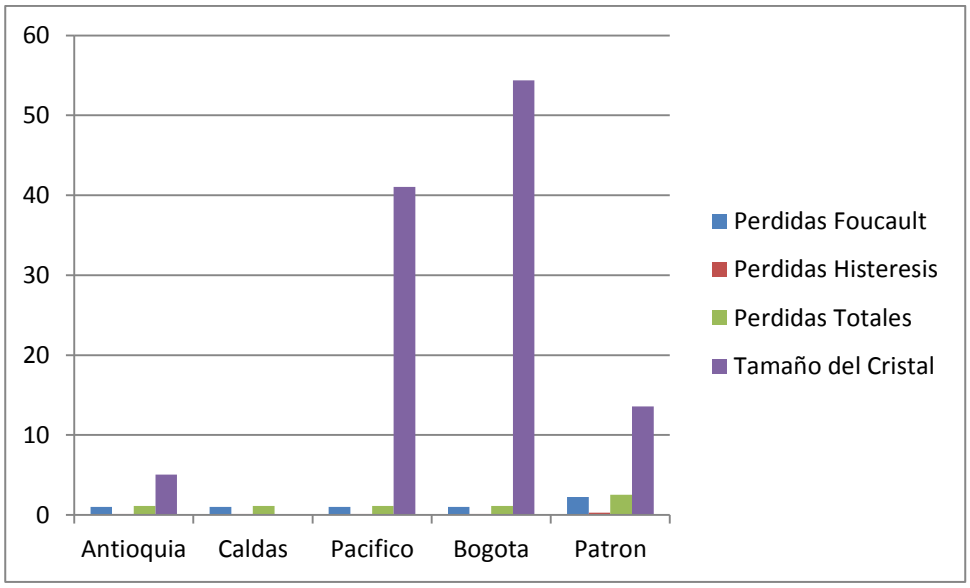


Gráfico 275. Tamaño de cristal versus relación de pérdidas en la Falla por Arco eléctrico de acuerdo a las pruebas magnéticas.

Obtener las pérdidas totales utilizando este tipo de ensayo *"es mucho más conveniente, ya que disminuyen los errores en los métodos de aproximación".* En el gráfico 275 se comprueba lo indicado anteriormente, con respecto al tamaño del cristal y regiones en estudio.

3.4.4 Análisis de los Resultados Experimentales Realizados a las Muestras de Papel Aislante de los Transformadores Fallados.

- Pruebas de tensión: los resultados obtenidos aplicando otro método no convencional al papel aislante utilizando el estándar ASTM-828 correspondientes de manera específica, a la falla por arco eléctrico, se indican a continuación en los gráficos 276 a 278:

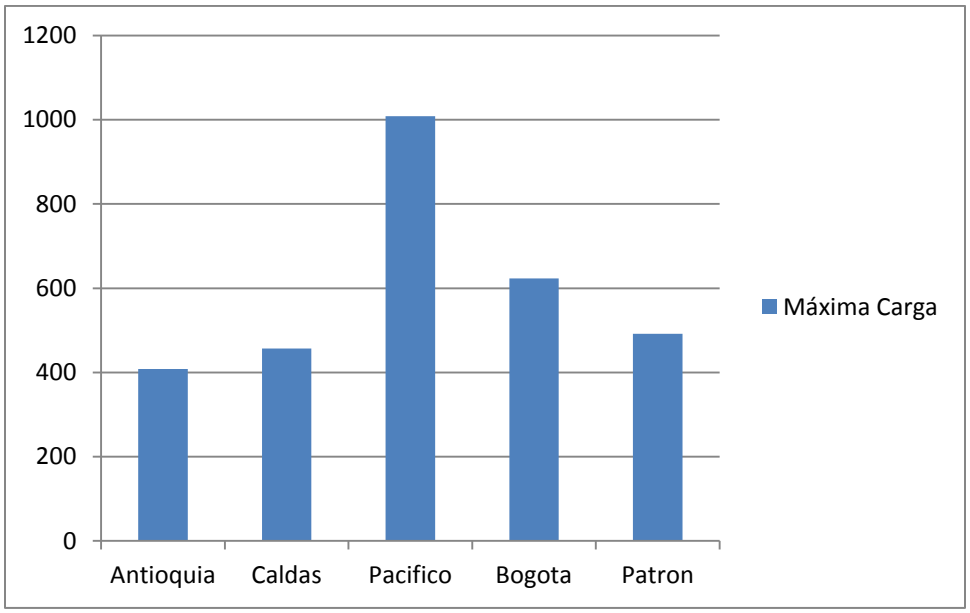


Gráfico 276. Máxima carga aplicada a las probetas de la Falla por Arco Eléctrico.

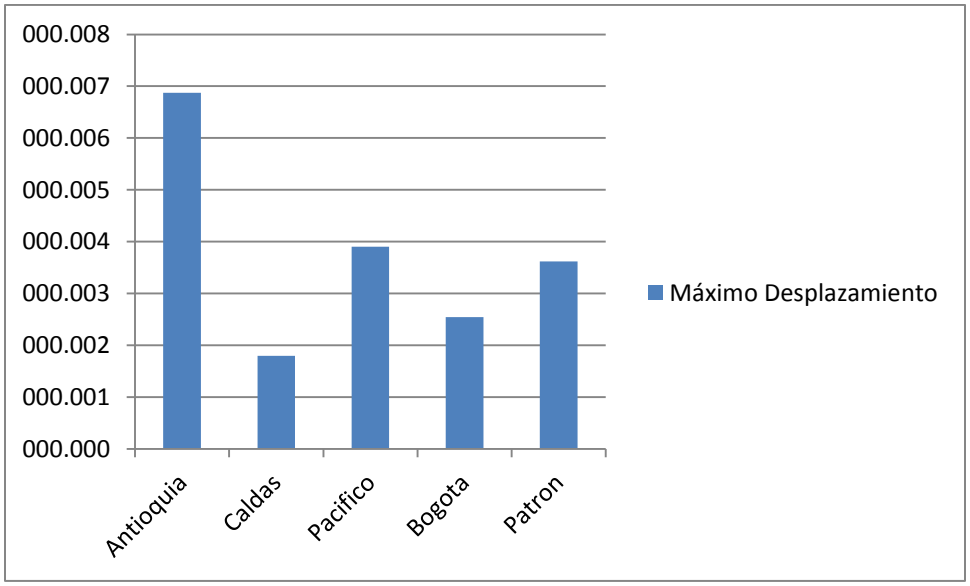


Gráfico 277. Máximo desplazamiento aplicado a las probetas de la Falla por Arco Eléctrico.

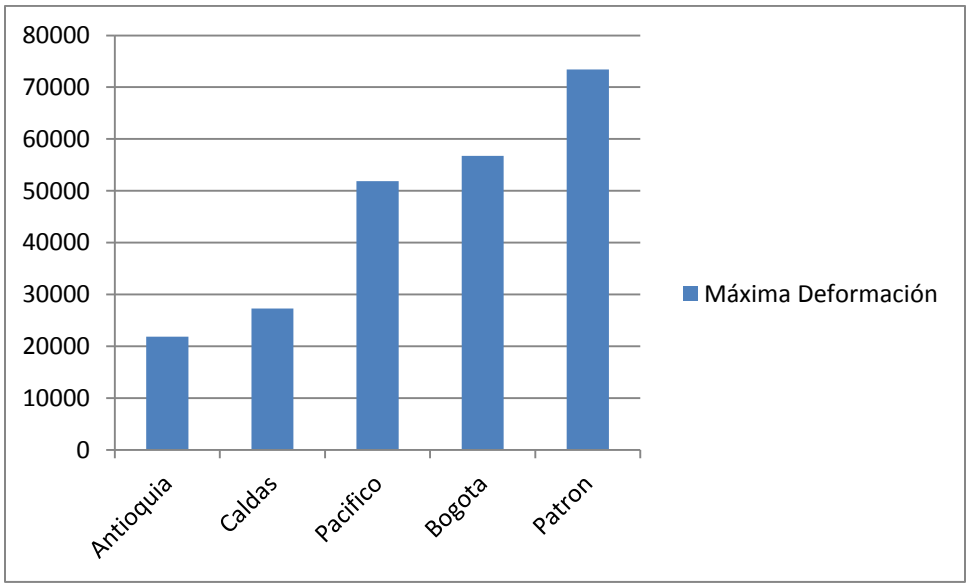


Gráfico 278. Máxima deformación aplicada a las probetas de la Falla por Arco Eléctrico.

Los resultados obtenidos indican que las muestras procedentes de las regiones del Pacífico y Bogotá son las que soportan mayor carga, es decir, *"las temperaturas ambientes elevadas o bajas, parecieran favorecer la condición operativa del equipo"*. La muestra procedente de la Región Antioquia es la que tiene más tiempo de servicio *"y se comprueba porque presenta el mayor desplazamiento"*. Las muestras de las regiones donde *"hay menor deformación, son las más propensas a salir fuera de servicio en caso de ocurrir alguna falla"*.

3.4.5 Análisis de los Resultados de Rigidez Dieléctrica Realizados a las Muestras de Aceite de los Transformadores Fallados

Al realizar el análisis de rigidez dieléctrica a las muestras de los equipos fallados se comprueba, que los mismos están fuera de norma. En la parte experimental del presente capítulo se indican los mismos.

3.4.6 Análisis de los Resultados Obtenidos al Aplicar la Máquina de Soporte Vectorial a los Resultados Experimentales Realizados a la Chapa de Acero al Silicio. Caso: Transformadores Fallados por Arco Eléctrico.

Utilizar una máquina de soporte vectorial (MSV) para caracterizar condiciones de la chapa de acero al silicio de los transformadores fallados, de acuerdo a la falla por arco eléctrico (que en nuestro caso es la de mayor incidencia), permite mapear los puntos de entrada a un espacio de características de una dimensión mayor, para luego encontrar el hiperplano que los separe (introducido por funciones núcleo o Kernel) maximizando el margen entre las clases.

De manera general, esta MSV clasifica las muestras de equipos fallados y no fallados en dos clases: uno (1) para los que presentan fallas por arco eléctrico y (-1) menos uno para la muestra patrón. En el caso de la presente investigación doctoral, los puntos de entrada corresponden a los resultados de las pruebas experimentales o aproximaciones obtenidas de acuerdo al porcentaje de carbono de las chapas de acero al silicio de las muestras de equipos fallados indicados en la parte experimental del presente capítulo.

Como existe un hiperplano de separación óptimo, de forma que la distancia entre este hiperplano y el valor de entrada más cercano sea máxima, permite encontrar los vectores de soporte definidos como *"Alfa".* Para el entrenamiento de la MVS se utilizó la función Kernel tipo *RBF (Radial Basis Function)* que realiza la separación y el traslado de los datos al espacio de características, convirtiéndolo en un problema de optimización que está definido como un modelo de programación cuadrática con restricciones que se resuelve, introduciendo multiplicadores de *Lagrange*, de esta manera, los datos de entrenamiento aparecen como una combinación de vectores tal y como se muestra a continuación:

$$\text{Alfa} = \begin{bmatrix} 0.4545 \\ 0.4545 \\ 0.4545 \\ -1.3636 \end{bmatrix}$$

Clase tipo:

Y = [1]

$$\text{Alfa} = \begin{bmatrix} 0.4545 \\ 0.4545 \\ 0.4545 \\ -1.3636 \end{bmatrix}$$

Clase tipo:

Y = [1]

$$\text{Alfa} = \begin{bmatrix} 0.4545 \\ 0.4545 \\ 0.4545 \\ -1.3636 \end{bmatrix}$$

Clase tipo:

Y = [1]

$$\text{Alfa} = \begin{bmatrix} 0.4545 \\ 0.4545 \\ 0.4545 \\ -1.3636 \end{bmatrix}$$

Clase tipo:

Y = [1]

El análisis del resultado obtenido anteriormente por la MSV luego de efectuar cuatro (04) entrenamientos indica, que "*se clasifican las muestras como falladas a causa de un arco eléctrico, no importando la región de procedencia"*. En caso de tener un equipo fallado del cual se desconoce el tipo de falla, se podrían realizar estas pruebas experimentales y al mapear los resultados, el entrenamiento permitiría verificar si corresponden a arco eléctrico o se encuentra en buenas condiciones (de acuerdo a la clase donde lo ubique la MVS).

En el Apéndice N° 4 se muestran los Script del programa Matlab® utilizados en esta MSV.

3.4.7 Análisis de la Simulación de Montecarlo para Determinar la Relación entre Las Pérdidas Totales y El Tamaño de Cristal (Grano).

A partir de los resultados de las pruebas experimentales correspondientes a Difracción de Rayos X (XRD) se obtiene el tamaño del cristal (grano) de las muestras de los equipos fallados en escala nanométrica, comparándolo con las pérdidas totales del núcleo, permitiendo evidenciar la condición de que *"mientras más grande es el tamaño de grano menores son las pérdidas"*. La chapa de acero es menos frágil, vinculando la calidad magnética con los valores de inducción y campo (B-H) para lo cual es necesario mantener el equilibrio en cuanto a la energía utilizada. A continuación en el gráfico 279 se indican las mismas:

Region Antioquia		% Carbono	Pruebas magnéticas	Sample Name	FWHM	2 theta	Tamaño de cristal (nm)
	Tipo de falla						
Muestra 1	Termica	114,688596	85,8702465	Muestra 1	0,651	43,742	13,64
Muestra 2	Descarga parcial	117,877042	85,8702465	Muestra 2	0,68	43,583	13,01
Muestra 3	Arco electrico	119,368088	85,8702465	Muestra 3	1,704	43,672	5,05
Region Caldas							
Muestra 5	Termica	117,880969	85,8702465	Muestra 5	0,501	42,871	18,15
Muestra 6	Arco electrico	118,586927	86,020789	Muestra 6	0,144	43,505	
Muestra 7	Arco electrico	119,133076	85,8702465	Muestra 7	0,248	43,892	48,2
Muestra 8	Descarga parcial	119,25154	86,173507	Muestra 8	0,248	44,09	48,23
Region Pacifico							
Muestra 9	Termica	158,569707	122,932067	Muestra 9	0,384	44,149	25,01
Muestra 10	Arco electrico	119,555869	86,1714773	Muestra 10	0,271	43,875	41,06
Muestra 11	Descarga parcial	118,732706	86,1735068	Muestra 11	0,573	44,464	15,71
Region Cundinamarca							
Muestra 12	Termica	139,324676	103,242098	Muestra 12	0,228	43,938	57,68
Region Bogota							
Muestra 13	Arco electrico/Termica	235,265044	191,182617	Bogotá 13	0,896	43,366	9,72
Muestra 14	Arco electrico	117,257396	86,020789	Bogotá 10	0,234	43,888	54,36
Muestra 15	Arco electrico	118,116709	86,020789	Bogotá 14	0,222	44,542	61,7
Muestra 16	Descarga parcial	116,557365	86,0187599	Bogotá 3	0,553	44,045	16,31
Muestra 17	Termica	115,111196	86,020789	Bogotá 5	0,293	44,009	36,23
Patron							
Muestra 18		131,828066	98,5467465	Patrón	0,652	43,459	13,6

Gráfico 279. Pérdidas totales (W) 75 kg peso del transformador de 5 kVA versus tamaño del cristal (grano).

Se desarrolló "*un modelo de regresión logístico, ya que la variable es discreta",* comprando dureza del material, tamaño del cristal (grano), óxidos y pérdidas totales que son condiciones que influyen en la presencia de *"precipitados por alta temperatura",* además de corresponder con la *"evaluación de la calidad magnética"*. De manera previa, se utilizó un modelo similar para apreciar las condiciones ambientales: temperatura promedio, brillo solar, precipitaciones y velocidad del viento. A continuación en la tabla N° 21 se muestran los datos utilizados y el tabla N° 22 los resultados obtenidos del modelo de regresión:

Tabla N° 21. Datos equipos fallados versus condiciones ambientales

Meses de año	Equipos Fallados	Temperatura Ambiente ºC (x1)	Brillo Solar (horas del sol al dia) (x2)	Precipitacion mm (x3)	Velocidad del viento m/s (x4)
Enero	9	26,3	5	17	1,5
Febrero	15	27	4	6	1
Marzo	12	27,2	5	12	1
Abril	16	26,8	5	17	1
Mayo	10	26,6	5	5	1
Junio	11	26,5	4	8	1
Julio	7	26,4	4	13	2
Agosto	7	26,5	5	8	1
Septiembre	8	26,4	5	2	1,5
Octubre	4	26,3	5	4	1,5
Noviembre	0	25,9	4	1	1,5

Nota. Fuente: M.Mago (2010-2011).

Tabla N° 22. Todas las regresiones posibles para los datos de condiciones ambientales

Numero de variables del modelo	p	Variables del modelo	Rp^2	SSr(p)	Sse(p)	Mse(p)	$\bar{}Rp^2$	Cp
1	2	X_2	0,01652203	3,53571429	210,464286	23,3849206	-0,0927533	22,844139
1	2	X_4	0,35684759	76,3653846	137,634615	15,292735	0,28538621	11,824701
1	2	X_3	0,28686757	61,3896592	152,610341	16,9567045	0,20763063	14,090592
1	2	X_1	0,71250116	152,475248	61,5247525	6,83608361	0,68055684	0,308956
2	3	X_2, X_4	0,35700935	76,4000000	137,600000	17,2000000	0,19626168	15,819463
2	3	X_2, X_3	0,28722262	61,4656398	152,53436	19,066795	0,10902827	18,079095
2	3	X_3, X_4	0,63187453	135,221149	78,7788509	78,7788509	0,53984316	6,919574
2	3	X_1, X_3	0,77267214	165,351837	48,6481626	6,08102032	0,71584017	2,360676
2	3	X_1, X_2	0,71360853	152,712226	61,2877739	7,66097174	0,64201067	4,273100
2	3	X_1, X_4	0,72218055	154,546638	59,4533623	7,43167028	0,65272569	3,995545
3	4	X_2, X_3, X_4	0,64723897	138,509139	75,4908613	10,7844088	0,49605567	8,422087
3	4	X_1, X_3, X_4	0,80292067	171,825023	42,1749772	6,02499674	0,7184581	3,381252
3	4	X_1, X_2, X_3	0,77765227	166,417585	47,5824147	6,79748781	0,68236038	4,199421
3	4	X_1, X_2, X_4	0,72457131	155,058261	58,9417388	8,4202484	0,60653045	5,918135
4	5	X_1, X_2, X_3, X_4	0,8146943	174,34458	39,65542	6,60923667	0,69115717	5,000000

Nota. Fuente: M. Mago (2013)

Se selecciona el mejor modelo de una variable *(x_1)*, de dos variables (x_1, x_3) y de tres variables *(x_1,x_3,x_4)*. El valor mínimo de *MSe(p)* se presenta para el mejor modelo de tres variables, también minimiza la $\bar{}Rp^2$ ajustada y el estadístico $Cp \leq p$. Pero, en los modelos de una o dos variables los estadísticos son mucho menores que el caso anterior, por lo tanto, en esta investigación doctoral se ha considerado la variable *(x_1)* como la más conveniente, sin dejar de lado la combinación de las variables (x_1, x_3) como segunda opción.

Lo anterior implica que la *"temperatura promedio es la condición ambiental de mayor influencia para los equipos fallados"*, sin olvidar que la combinación de *temperatura promedio-precipitaciones* también debe ser evaluada en futuras investigaciones para trabajos similares en esta área. El modelo de regresión final es:

$$y = -280.009901 + 10.89108911\, x_1$$

El otro modelo de regresión que permite construir la *"mejor ecuación"* tiene en la tabla N° 23 los datos que relacionan las pérdidas totales versus caracterización de las muestras de equipos fallados debido a arco eléctrico, mientras que en la tabla N° 24 todas las regresiones posibles para los datos de caracterización física. A continuación lo indicado:

Tabla N° 23. Datos de pérdidas versus caracterización del material.

REGION	TAMAÑO DEL CRISTAL EN nm	ESCALA µ	DUREZA	PERDIDAS TOTALES
	X1	X2	X3	Y
ANTIOQUIA	5,05	12	207,8	119,368088
CALDAS	0	10	200,4	118,586927
PACIFICO	41,06	7	197,45	119,555869
BOGOTA	54,36	4	272,6	117,257396
PATRON	13,6	4	212	131,828066

Nota. Fuente: M. Mago (2013).

Tabla N° 24. Todas las regresiones posibles para los datos de caracterización física.

Numero de variables del modelo	p	Variables del modelo	Rp^2	SSr(p)	Sse(p)	Mse(p)	$\bar{R}p^2$	Cp
1	2	X_2	0,19222493	27,1644592	114,151547	38,0505157	-0,07703343	2,076078
1	2	X_3	0,05989991	8,46481562	132,851191	44,2837302	-0,25346679	2,907845
1	2	X_1	0,08069223	11,4031032	129,912903	43,304301	-0,2257437	2,777180
2	3	X_2, X_3	0,54501926	77,0199456	64,2960607	32,1480303	0,09003853	3,895932
2	3	X_1, X_3	0,08587579	12,135624	129,180382	64,5901912	-0,82824842	6,744605
2	3	X_1, X_2	0,77680292	109,774687	31,5413193	15,7706597	0,55360585	2,402631
3	4	X_1, X_2, X_3	0,84080184	118,818758	22,4972486	22,4972486	0,36320735	4,000000

Nota. Fuente: M. Mago (2013).

Se selecciona el mejor modelo de dos variables (x_1, x_2) el cual presenta el valor mínimo *MSe(p)* minimiza la $\bar{R}p^2$ ajustada y el estadístico $Cp \leq p$. No se consideran los modelos de una variable porque los coeficientes de determinación Rp^2 no corresponden con valores cercanos a uno *(1)* y las $\bar{R}p^2$ ajustadas tienen valores negativos y ningún estadístico *Cp* es menor que *p*. El modelo de regresión final es:

$$y = 140{,}8125973 - 0{,}25537154\, x_1 - 1{,}846929965 x_2$$

Los resultados obtenidos indican que *"las variables tamaño de cristal(grano) (x_1) y óxidos (precipitados por alta temperatura) (x_2) son las condiciones que influyen en las pérdidas totales del núcleo"*, por lo tanto, el modelo de Simulación de Montecarlo incorpora estas condiciones en la generación de números aleatorios para el tipo de falla por arco eléctrico, como se muestra en los gráficos 280 y 281 indicados a continuación:

	Distribucion	Media (mín	Desv. Est. (mín)		Tamaño cristal	Inclusiones	Resultado	Caracteristica aleacion
Tamaño 1	Normal	1	3,4		3,8	0,4	3,8	2
Inclusiones 2	Normal	4	2,6		-2,3	4,6	4,6	1
					2,1	5,5	5,5	1
		Frecuencia	Porcentaje		0,9	2,8	2,8	1
	Total iteraciones	98	100,00%		-0,4	4,9	4,9	1
	S1+tamaño 1	73	74,49%		3,1	7,2	7,2	1
	S2+inclusiones	25	25,51%		0,2	5,4	5,4	1
					-0,2	-0,1	-0,1	1
	Promedio	4,5	Micras		7,1	2,7	7,1	2
	Desv. Est.	2,2	Micras		-0,6	5,6	5,6	1
	95% para total esperado	4,0	4,9		1,3	-1,1	1,3	2
					4,5	-1,0	4,5	2
					-0,7	5,0	5,0	1
					2,6	6,2	6,2	1
					3,5	6,1	6,1	1
					4,8	4,9	4,9	1
					-0,1	3,8	3,8	1
					-0,1	2,4	2,4	1
					7,7	3,4	7,7	2
					-2,1	9,3	9,3	1
					-1,9	1,8	1,8	1
					-2,0	2,6	2,6	1
					-1,4	5,1	5,1	1

Gráfico 280. Tamaño de grano versus inclusiones. Caso 1

La hoja de cálculo muestra *"resultado y características de la aleación"* que para el Caso N° 1 corresponden al tamaño 1 (Standard ASTM) de una muestra "*Limpia*" de óxido tipo D 4µ (micras) cuya simulación indica que el tamaño de grano va a ser la condición que va a influir primero como condición de cambio en la chapa de acero al silicio en un 74,49% y va a ser escasa la aparición de precipitados por alta temperatura ya que el rango de 25,51%, por lo tanto, *"las pérdidas totales no se afectan en este caso"*. En el gráfico 281 se muestran los resultados obtenidos, luego en el gráfico 282 los correspondientes a la muestra patrón y por último en el gráfico 283 los de la Región Caldas que presenta el menor tamaño y alto contenido de óxidos gruesos tipo D:

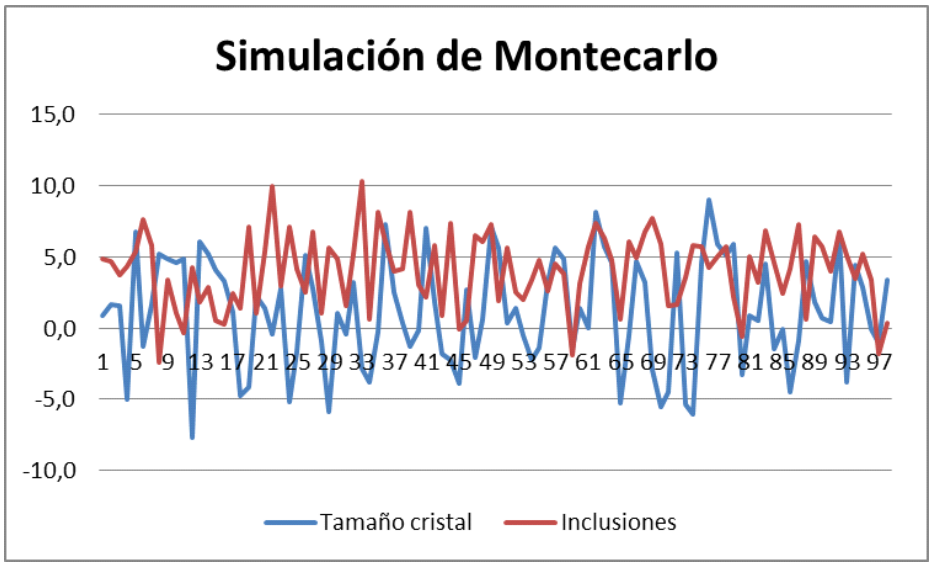


Gráfico 281. Caso N° 1: Tamaño de grano 1 versus 4 µ de Óxidos. (Microestructura)

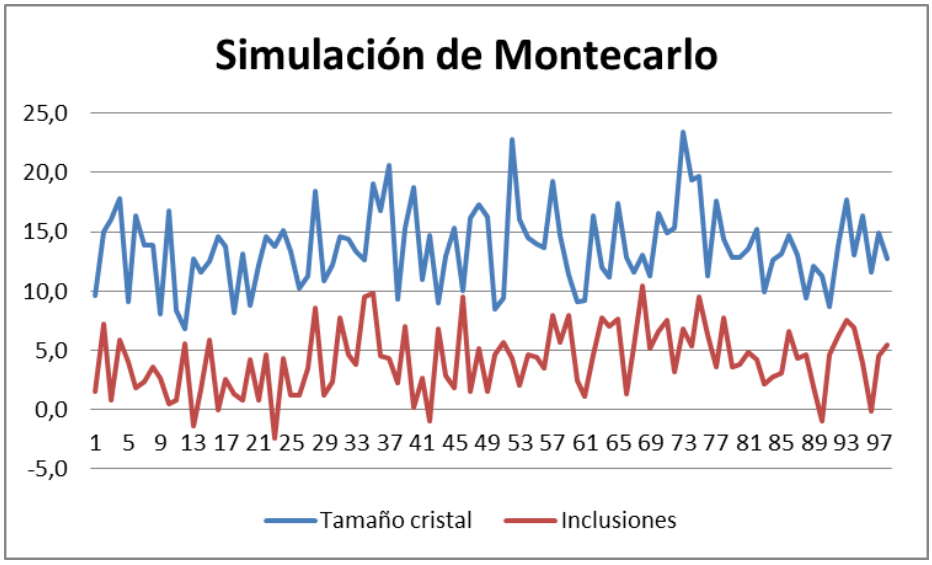


Gráfico 282. Muestra Patrón: Tamaño de cristal (grano) 13,6 nm versus 4µ de Óxidos.

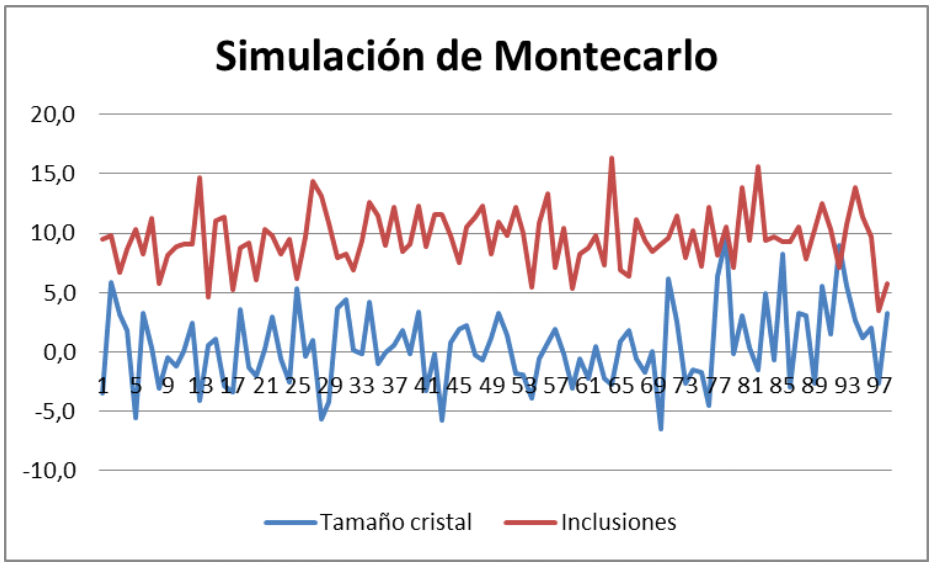


Gráfico 283. Región Caldas: Tamaño de cristal (grano) 0 nm versus 10 µ Óxidos.

	Distribucion	Media (min	Desv. Est. (min)		Tamaño cristal	Inclusiones	Resultado	Caracteristica aleacion
Tamaño 1	Normal	5,05	3,4		7,7	9,5	9,5	1
Inclusiones 2	Normal	12	2,6		6,2	12,2	12,2	1
					6,1	13,1	13,1	1
		Frecuencia	Porcentaje		5,1	12,5	12,5	1
	Total iteraciones	98	100,00%		-1,4	13,2	13,2	1
	S1 + tamaño 1	95	96,94%		4,6	11,9	11,9	1
	S2 +inclusiones	3	3,06%		6,3	10,9	10,9	1
					8,0	10,8	10,8	1
	Promedio	12,0	Micras		3,3	15,2	15,2	1
	Desv. Est.	2,5	Micras		5,7	14,0	14,0	1
	95% para total esperado	11,5	12,5		12,9	9,8	12,9	2
					3,8	13,1	13,1	1
					5,8	10,7	10,7	1
					8,5	10,6	10,6	1
					8,4	12,6	12,6	1
					1,9	6,2	6,2	1
					8,4	12,1	12,1	1
					6,0	14,6	14,6	1
					4,0	14,3	14,3	1
					5,8	11,3	11,3	1
					0,8	15,1	15,1	1
					6,6	10,7	10,7	1
					-2,0	10,2	10,2	1

Gráfico 284. Tamaño de grano versus inclusiones. Caso 2.

Para el Caso N° 2 el tamaño de grano es 5,05 con presencia de óxidos tipo D gruesos de 12µ, el resultado de la Simulación de Montecarlo indica que *"la condición de material va a afectarse primero debido al tamaño de grano en un 96,94%, los óxidos van a mantenerse en menor proporción, 3,06%"*. Este método "*predice de manera asertiva cuál de las dos condiciones afecta primero a la chapa de acero al silicio, al igual que dos servidores funcionando en paralelo",* en caso de ser reutilizada por las empresas que fabrican o reparan transformadores.

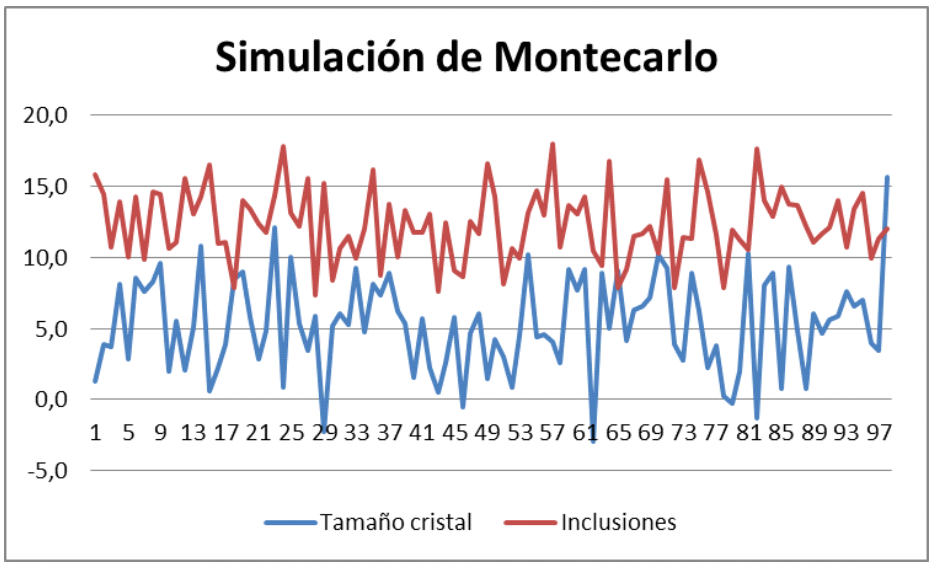


Gráfico 285. Caso N° 2: Tamaño de cristal (grano) 5,05 nm versus 12µ de Óxidos.

3.4.8 Análisis del Modelo en Espacios de Estado Obtenido. Caso: Transformadores Fallados por Arco Eléctrico.

El diseño de un modelo de control en espacios de estado utilizando el programa matlab® simulik, es la representación de un modelo matemático del transformador de distribución como un sistema físico, mediante un conjunto de entradas, salidas y variables de estado relacionadas por ecuaciones diferenciales de primer orden que se combinan en una ecuación diferencial matricial. Para el caso estudio de la presente investigación doctoral las ecuaciones de entrada y estados aplicados en este modelo se muestran en el apéndice N° 2.

En las gráficas 286, 287, 288 y 289 se aprecian con el osciloscopio luego de simular el modelo, las corrientes del lado secundario, lado primario y de magnetización:

MODELO DE ESTADO UTILIZANDO SIMULINK

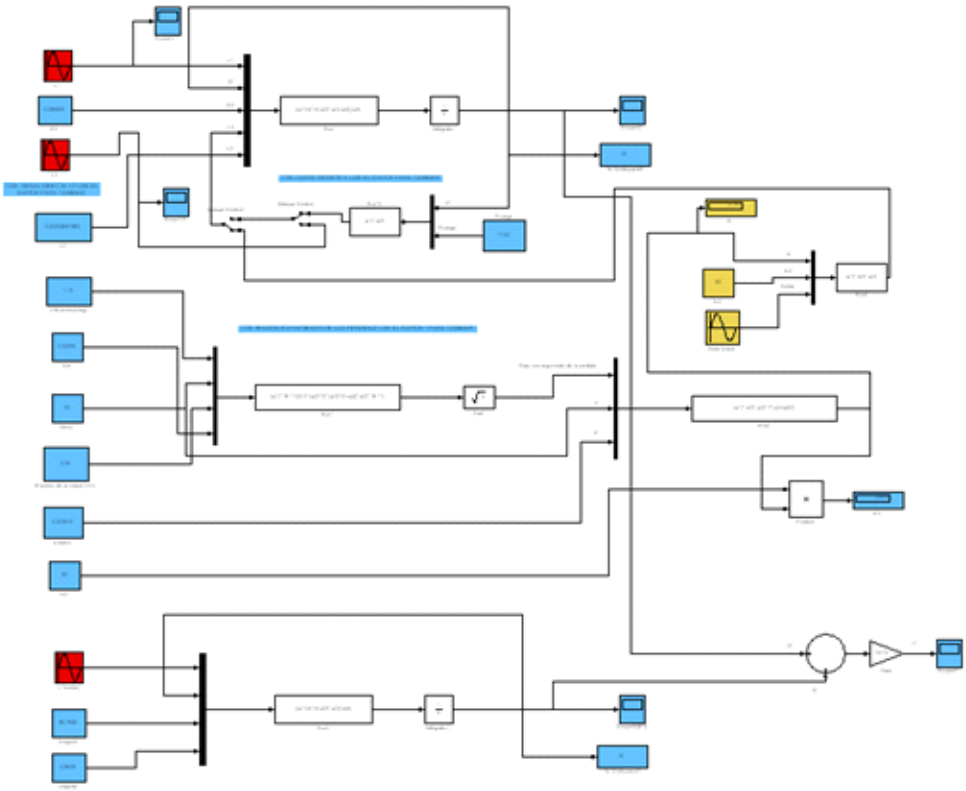


Gráfico 286. Esquema del Modelo de Control

En el caso de las pérdidas totales hay que ajustar el coeficiente de acoplamiento del material o K_H que es una variable que depende del tipo de material, sin embargo, la misma permite la comprobación de los valores de corriente nominales de este transformador. A continuación se muestran las gráficas obtenidas luego de la simulación:

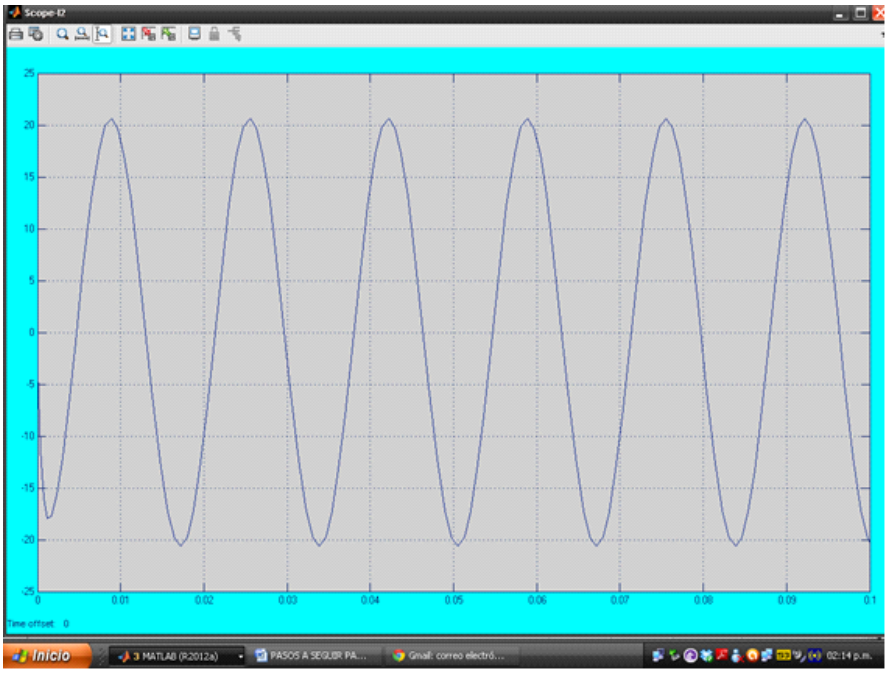


Gráfico 287. Señal de corriente en el lado secundario del transformador.

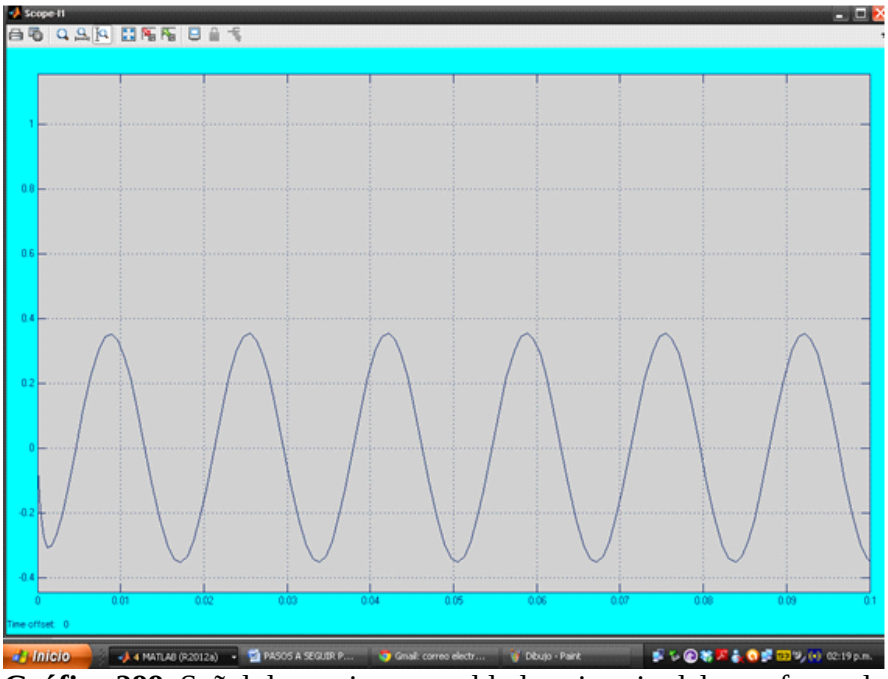


Gráfico 288. Señal de corriente en el lado primario del transformador.

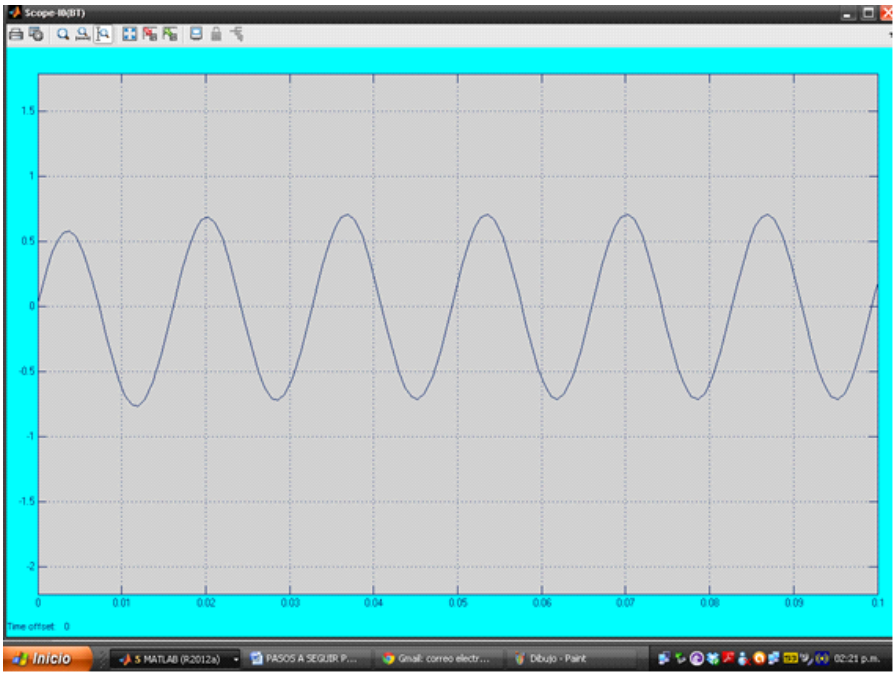


Gráfico 289. Señal de corriente en la rama de magnetización.

Utilizando el siguiente script del matlab© se obtienen las matrices de estado, entada, salida y transmisión directa:

```
xo = [20.31;0.71];
ui = [13800;238.5];
 yo = [20.31;0.71];
ix = [];
iu = [1;1];
[x,u,y,dx] = trim('Proyecto_Mago_Entrada_Salida',xo,ui,yo,ix,iu)
[A,B,C,D] = linmod('Proyecto_Mago_Entrada_Salida',x)
Proyecto_Mago_Entrada_Salida = idss(A,B,C,D);
idtf(Proyecto_Mago_Entrada_Salida)
```

MATRIZ A: estado

-1918.1	0
0	-100.5

MATRIZ B: entrada

372.6056	0
0.0201	0

MATRIZ C: salida

1	0
0	1

MATRIZ D = 0 (transmisión directa)

Las funciones de transferencia obtenidas del modelo de estado corresponden a la relación de la entrada V_1 o tensión del lado primario, versus el estado uno (01) o corriente de magnetización y el estado dos (02) o corriente del lado secundario, tal y como se indica a continuación:

$$V_1 \text{ versus corriente de la rama de magnetización} = \frac{372.6}{S + 1918}$$

$$V_1 \text{ versus corriente lado secundario} = \frac{0.02013}{S + 100.5}$$

En relación a la entrada V_2 las funciones de transferencia para los estados correspondientes la respuesta es cero (0) en ambos casos. No se puede relacionar esa entrada con los estados. En cuanto a la parametrización:

Número de polos: [1 0; 1 0] Número de ceros: [1 0; 1 0]

Número de coeficientes libres: 8

A partir de las matrices de estado obtenidas anteriormente a continuación se indica comando utilizado aplicando Matlab©, encontrándose la función de transferencia:

[NUM,DEN]=ss2tf(A,B,C,D,iu)

$$\text{NUM} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

DEN = 1.0e+05 * [0.0000 0.0202 1.9277]

De acuerdo a esta función de transferencia anterior, se obtiene del modelo propuesto la forma canónica controlable, tal y como se indica a continuación:

- **Forma Canónica Controlable:** analiza el enfoque de la ubicación de los polos en el modelo de estado propuesto. A continuación el comando en Matlab© utilizado: [A,B,C,D]=tf2ss(NUM,DEN)

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_{1(t)} \\ \dot{X}_{2(t)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -002020.0 & -192770.0 \\ 000000.0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1(t)} \\ x_{2(t)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} u(t)$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1(t)} \\ x_{2(t)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} u(t)$$

- **Forma Canónica Observable:** obtenemos la misma a partir del resultado anterior tal y como se muestra a continuación:

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_{1(t)} \\ \dot{X}_{2(t)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -002020.0 & 000000.0 \\ -192770.0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1(t)} \\ x_{2(t)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} u(t)$$

$$y(t) = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} x_{1(t)} \\ x_{2(t)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} u(t)$$

“hay cambios en las matrices de entrada y salida del modelo propuesto”. Ahora se realizarán las siguientes operaciones a fin de verificar si el mismo es controlable relacionando las matrices de entrada y de estados, tal y como se indica a continuación:

A = [-0.02020 000000.0; -192770.0 0]

B = [1 ; 0]

C= [0 0; 0 0]

D= [0 ; 0]

E= [A*B] realizamos esta operación de multiplicación de matrices y obtenemos:

$$E = \begin{bmatrix} -2018.6 \\ 1.000 \end{bmatrix}$$

F=[B E] siendo la matriz *"de controlabilidad"* la indicada a continuación:

$$F = \begin{bmatrix} 1.000 & -2018.6 \\ 0 & 1.00 \end{bmatrix}$$

El sistema es controlable dado que el rango de la matriz es *n x n, "se dice que un modelo es controlable en el tiempo t_0 si se puede llevar de cualquier estado inicial $x_t(0)$ mediante un vector de control sin restricciones, en un intervalo de tiempo finito".*

Hay que verificar ahora, si el modelo es observable realizando las siguientes operaciones con las matrices del modelo:

J=[C*A]

$$J = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

K=[C J] siendo la matriz de *"observabilidad"* la indicada a continuación:

$$K = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

El modelo no es observable: *"se dice que un modelo es observable en el tiempo t_0 si, el modelo en el estado $X_{(t0)}$, es posible determinar este estado a partir de la observación de la salida durante un intervalo de tiempo finito".*

- **Obtención del Modelo de Estados por Programación Paralela.**

Para la aplicación de este método se debe obtener la expansión en fracciones parciales de la función de transferencia dada tal y como se muestra en el siguiente script:

```
B = [1 ;  0] ; donde B= Y(z)
A = [-0.02020  000000.0; -192770.0  0];  donde A= u(z)
[R,P,K]=residue(B,A)
```

R = término de ceros o residuos

1.0e-04 *

-0.0000 + 0.2535i
-0.0000 - 0.2535i
0

P = término de polos

0.0002 + 9.7722i
0.0002 - 9.7722i
0

K = término independiente

[]

La función de transferencia queda ahora de la siguiente manera:

$$\frac{Y(z)}{u(z)} = \frac{-0.0000+0.2535i}{z-(0.0200+9.7722i)} + \frac{-0.0000-0.2535i}{z-(0.0002-9.7722i)}$$

"El modelo es estable ya que la parte real del número complejo en el módulo de los polos obtenidos es menor que uno, por lo tanto, está dentro del circulo unitario, lo cual garantiza esta condición".

Se construye el Diagrama de Estado y la matriz correspondiente, tal y como se muestra a continuación:

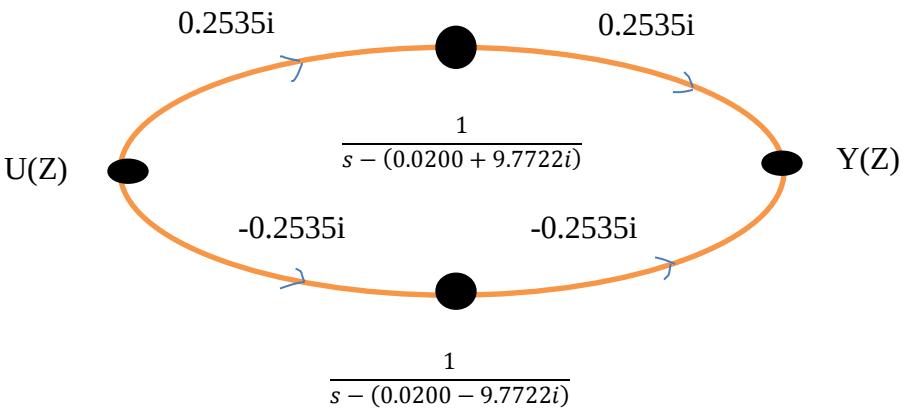


Gráfico 290. Diagrama de estado del modelo propuesto.

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0200 + 9.7722i \\ 0.0200 - 9.7722i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} u(z)$$

$$Y(z) = [0.2535i \quad -0.2535i] \begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \end{bmatrix}$$

3.4.9 Análisis del Sistema Estocástico Propuesto en la presente Investigación Doctoral. Caso: Transformadores Fallados por Arco Eléctrico.

El diseño de un sistema estocástico plantea ecuaciones de primer orden que dependen de dos (02) términos: en primer lugar la variable aleatoria multiplicada por una exponencial evaluada en t=0 (los valores de esta exponencial se deducen de los parámetros del circuito equivalente y para rangos mayores a 0 hasta 1 son indeterminados). En segundo lugar, se adiciona la variabilidad de las pérdidas totales, siendo mostrados estos resultados a continuación en las gráficas 291 hasta 294 que corresponden a casos similares estudiados para la simulación de Montecarlo:

3.4.9.1 Ecuaciones Diferenciales Estocásticas de Primer Orden

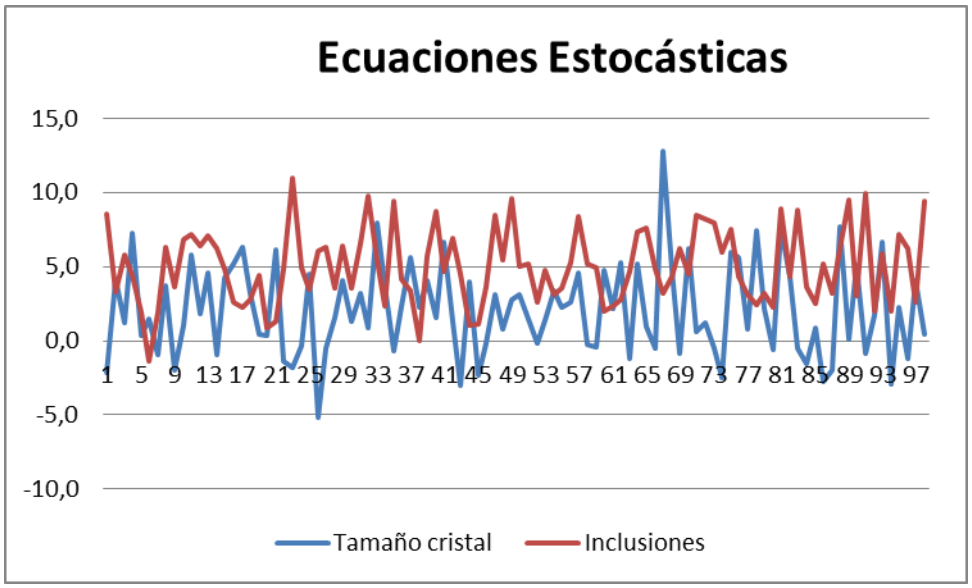


Gráfico 291. Caso 1: Tamaño de grano 1 inclusiones 4µ.

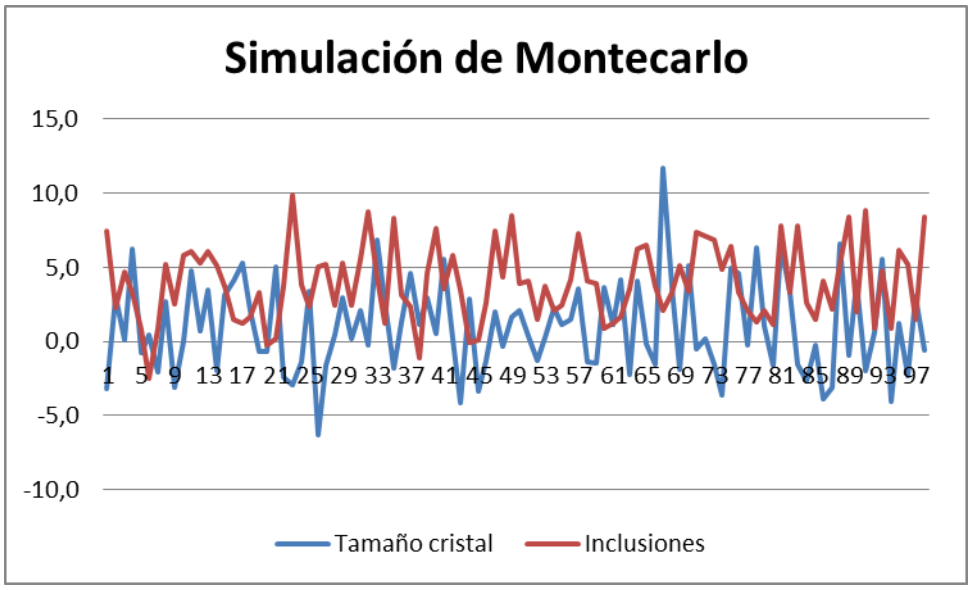


Gráfico 292. Comparando con el resultado anterior.

En este caso se afecta con un *"73,20% el tamaño de grano y con un 26,80% los óxidos tipo D (precipitados por alta temperatura)".* También hay que acotar que el tamaño de grano incide en como primera condición en el cambio de la aleación en estudio.

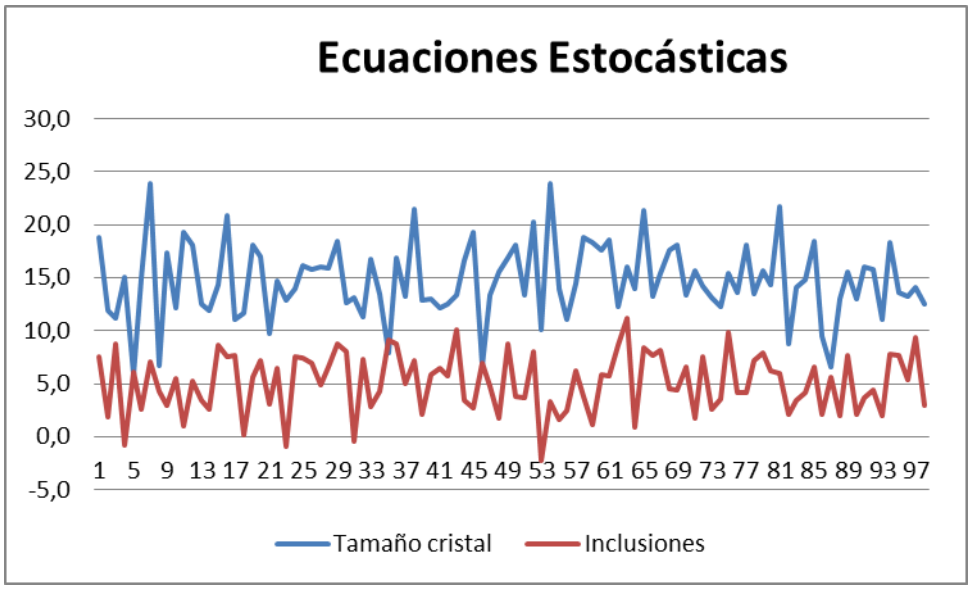


Gráfico 293. Tamaño de cristal(grano) 13,6 nm y 4µ de óxidos tipo D correspondiente a resultados presentados en muestra Patrón.

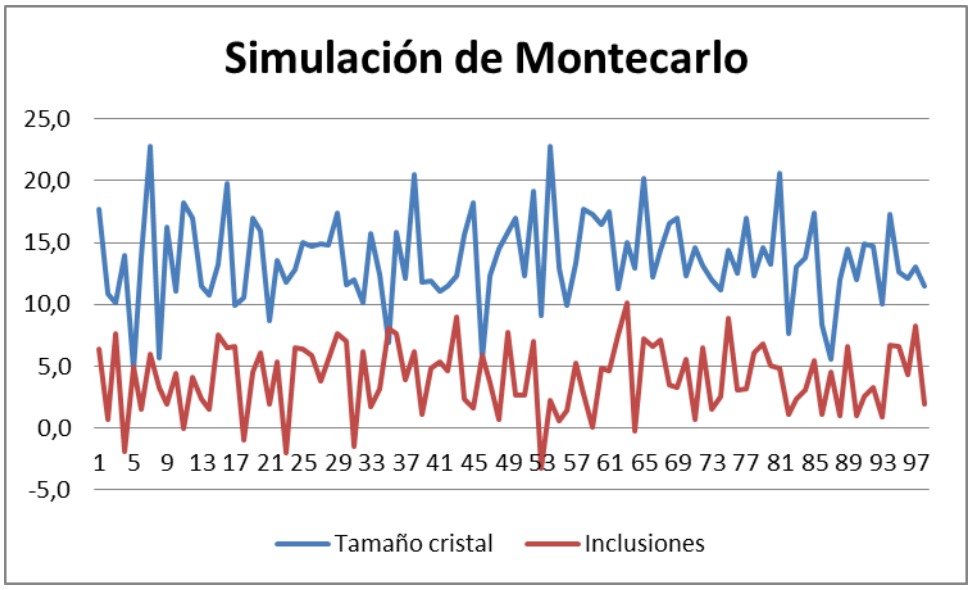


Gráfico 294. Comparando con el resultado anterior.

En el caso de la muestra patrón donde el tamaño del cristal (grano) tiene el 3,09% mientras que las inclusiones el 96,91% indica que *"lo que primero afecta la aleación son los precipitados por alta temperatura"*.

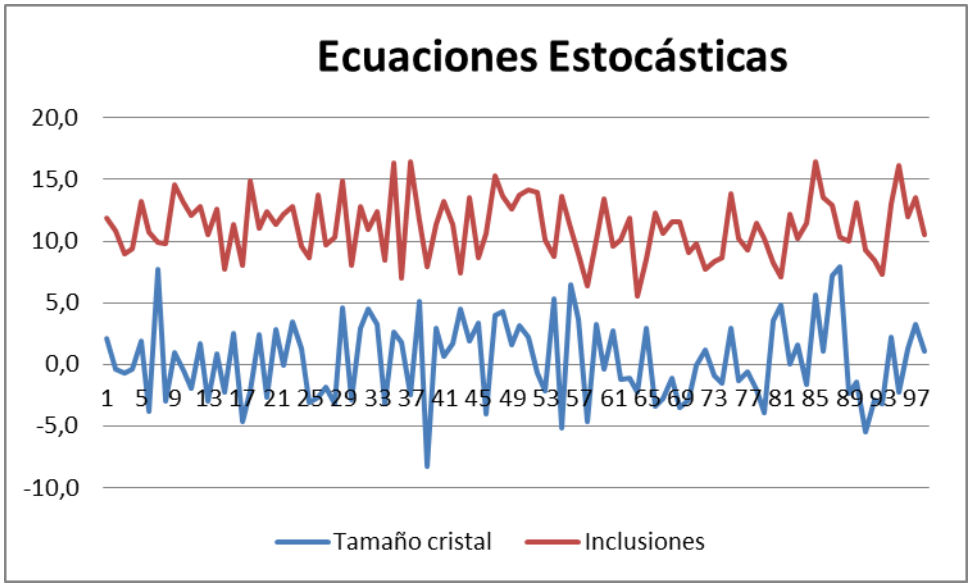


Gráfico 295. Tamaño de cristal (grano) 0 y 10 µ de óxidos tipo D correspondiente a muestra procedente Región Caldas.

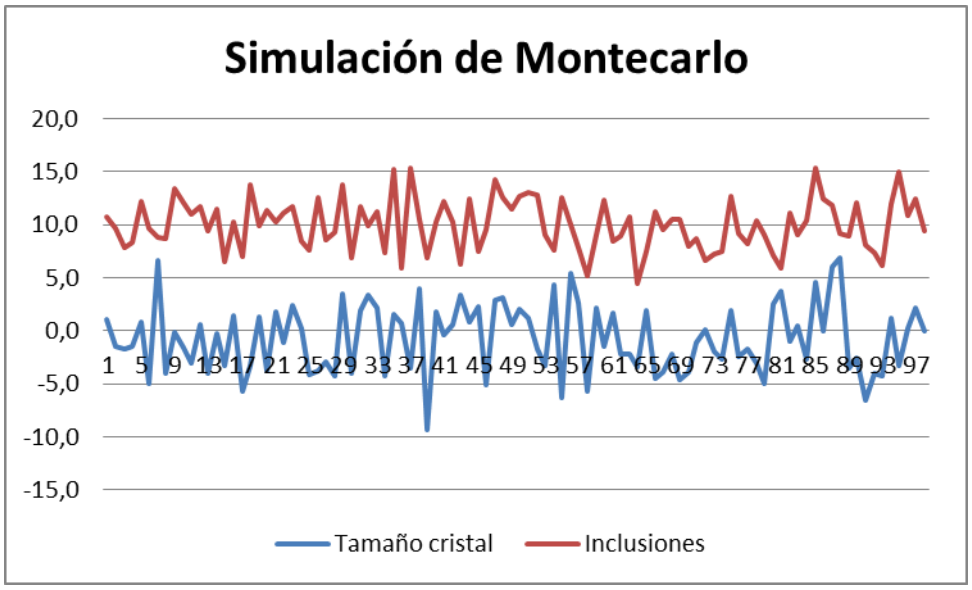


Gráfico 296. Comparación con resultado anterior.

En el caso de muestra procedente de la Región Caldas, "*la condición que afecta en un 100% corresponde evidentemente al tamaño del cristal (grano)"*, que aunque se ha estimado en 0 nm, su rango es inapreciable para el difractómetro utilizado en las pruebas indicadas.

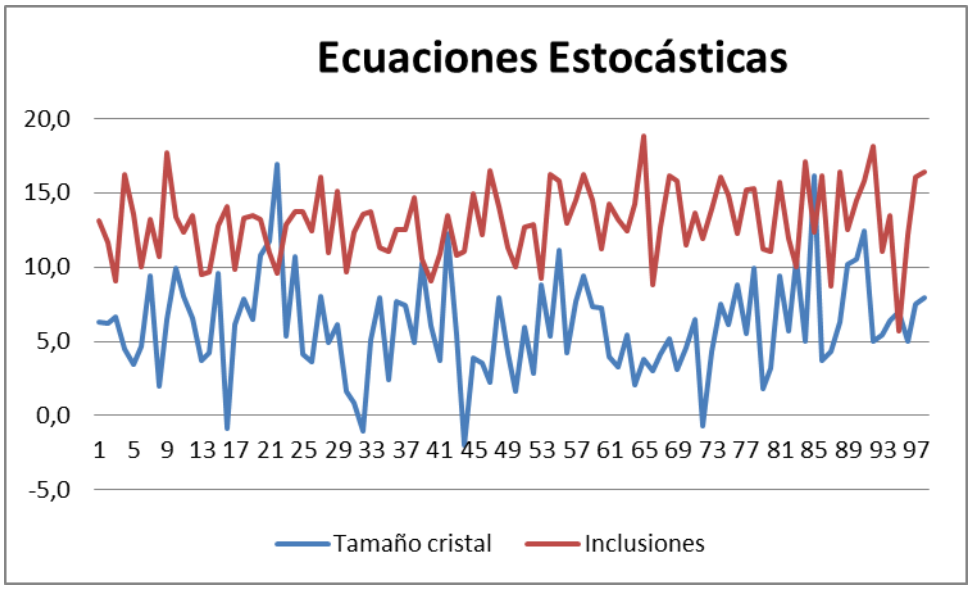


Gráfico 297. Tamaño de cristal (grano) 5,05 nm y 12µ de óxidos tipo D correspondiente a muestra procedente de la Región Antioquia.

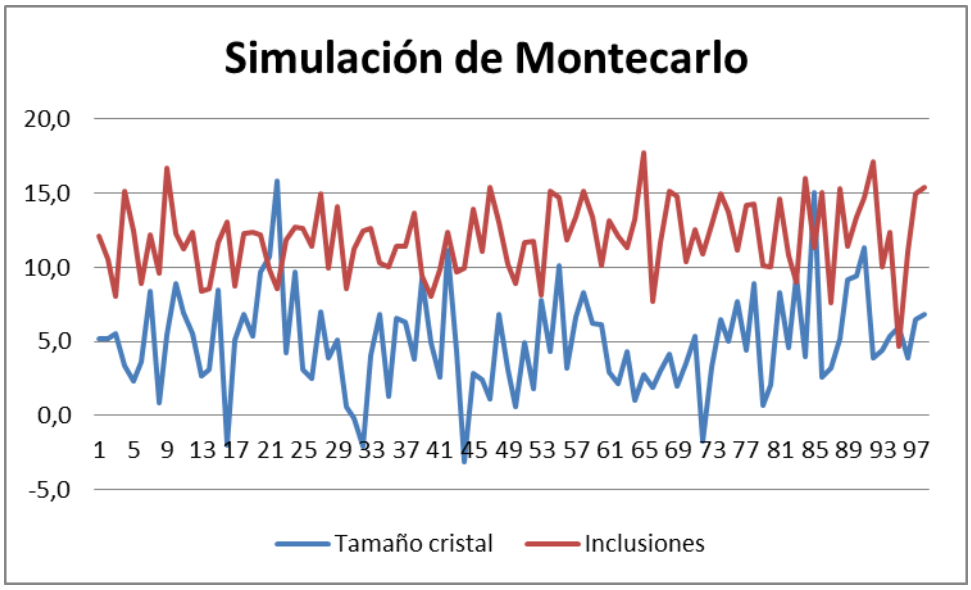


Gráfico 298. Comparación con resultado anterior.

En el caso de "*la muestra procedente de la Región Antioquia el tamaño del cristal(grano) tiene 94,85% de influencia en el deterioro de la chapa de acero, mientras que los óxidos tipo D un 5,15%"*, a pesar de que en la escala son el valor más alto para estos precipitados.

"*El sistema estocástico es un método más preciso que la simulación de Montecarlo"*, cuando comparamos estas variables aleatorias que corresponden al tamaño de cristal (grano) y cantidad de óxidos presentes en la chapa de acero al silicio. En el anexo N°1 se muestran las demostraciones de las ecuaciones estocásticas utilizadas.

3.4.9.2 Estimación Puntual: Método de Máxima Verosimilitud.

La estimación puntual por el método de máxima verosimilitud permite determinar un estimador que maximiza la función de verosimilitud, en el anexo N°2 se indican las demostraciones que contempla este modelo. En el caso de la presente investigación doctoral, se aplica la estimación puntual a la muestra de transformadores fallados y pérdidas totales del núcleo, considerando tipo de falla por arco eléctrico que es la de mayor incidencia. A continuación se presentan los resultados obtenidos:

Tabla N° 25. Data de equipos fallados

Meses del año	Equipos Fallados
Enero	9
Febrero	15
Marzo	12
Abril	16
Mayo	10
Junio	11
Julio	7
Agosto	7
Septiembre	8
Octubre	4
Noviembre	0

Nota. Fuente: Central Hidroeléctrica de Caldas (2011).

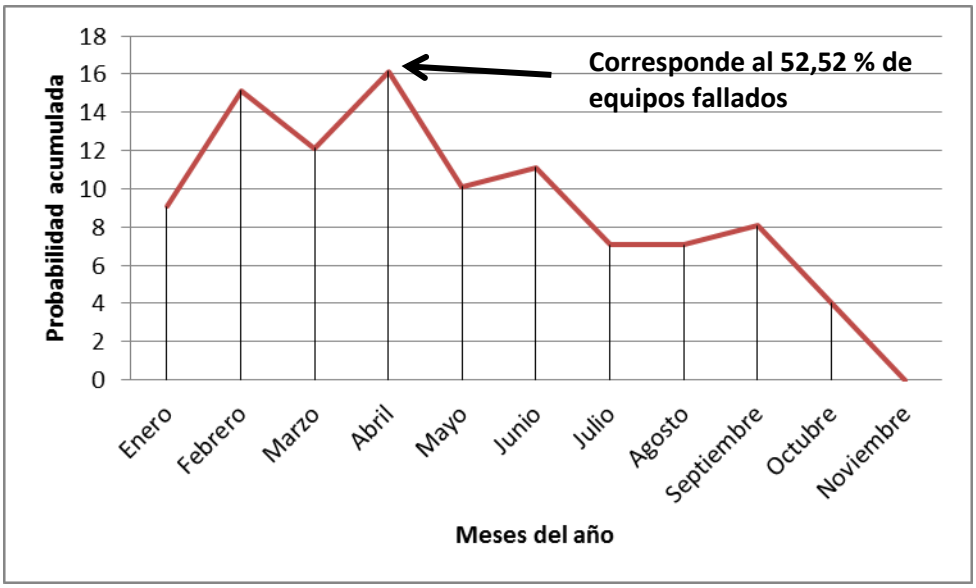


Gráfico 299. Data equipos fallados año 2011. Región Caldas Cap. 5 kVA.

"El estimador de máxima verosimilitud corresponde a $\hat{p}$ *=9 lo cual indica que al menos nueve equipos fallaran en un mes".* Esta medición presenta un error estándar de 3,64% y un intervalo razonable para la falla promedio con una confianza del 95% que se encuentra entre 6,84481007 ≤ μ ≤ 11,15518993 para los límites inferior y superior respectivamente. "*Esta estimación puntual es un valor de suma importancia en la*

implementación de planes o rutinas de mantenimiento preventivo y/o correctivo para las empresas operadoras del sistema eléctrico".

A continuación en la tabla N° 15 se muestran datos correspondientes para el caso de las pérdidas totales:

Tabla N° 26. Datos pérdidas totales fallas por arco eléctrico

Región	*Xi*	*Media-Xi*	*(Media-Xi)²*
Antioquia	1,536049	0,00099214	9,84342E-07
Caldas	1,53490255	-0,00015431	2,38116E-08
Pacífico	1,53632459	0,00126773	1,60714E-06
Bogotá	1,5329513	-0,00210556	4,43338E-06

Nota. Fuente: M. Mago (2013).

El estimador $\hat{p}$ de máxima verosimilitud corresponde a 1,53505686. Esta medición presenta un error estándar de 0,00153% y un intervalo razonable para las pérdidas totales promedio con una confianza del 95% que se encuentra entre $1{,}534151017 \leq \mu \leq 1{,}535962703$ para los límites inferior y superior respectivamente. A continuación en la gráfica 81 de muestra la relación entre las pérdidas totales y las regiones de procedencia:

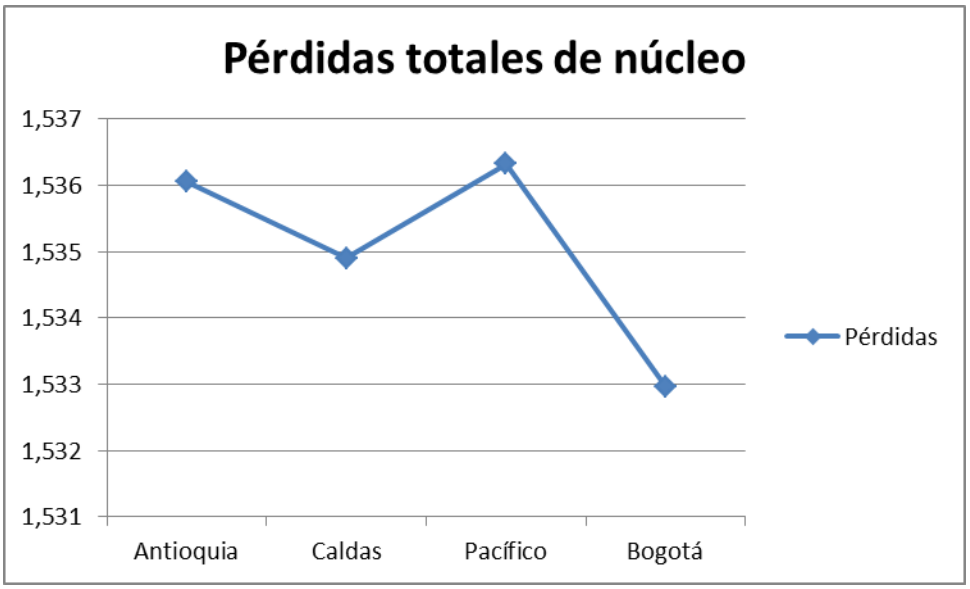


Gráfico 300. Relación entre las pérdidas totales de acuerdo a la Regiones de procedencia.

3.4.9.3 Densidad Espectral.

El objetivo de la estimación espectral es describir la distribución (sobre la frecuencia) de la energía contenida en una señal, basado en un rango finito de datos. El espectro de potencia de un proceso estacionario aleatorio que está matemáticamente relacionado, con la correlación de la secuencia por la transformada discreta de Fourier. Se puede reemplazar la frecuencia física en Hertz de la red, por la frecuencia de muestreo *fs.*

Existen varios métodos de estimación espectral, sin embargo, en la presente investigación doctoral se aplicarán los *"No paramétricos"* para la estimación de la densidad espectral de energía *PSD, "ya que la variable es discreta"*. El método más simple es el periodograma, que consiste en determinar la transformada discreta de Fourier de unas muestras del proceso tomando el cuadrado de la magnitud del resultado. A continuación se muestra el scritp del programa Matlab© y en el gráfico 301 el periodograma de la estimación de la densidad espectral de energía:

```
randn('state',0);
 fs = 1000;
 t = (0:fs)/fs;
 xn=[1.536049 ; 1.53490255 ; 1.53632459 ; 1.5329513]
Pxx = periodogram(xn,[],'twosided',1024,fs);
periodogram(xn,[],'twosided',1024,fs);
```

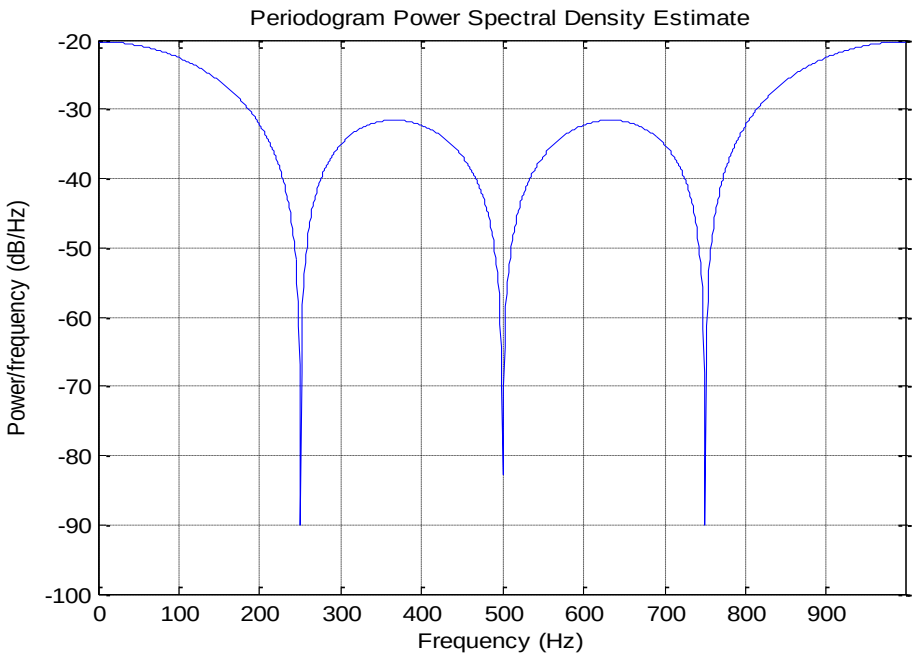


Gráfico 301. Periodograma de la densidad espectral de energía de las Pérdidas Totales.

La potencia promedio es determinada utilizando la siguiente instrucción:

Pow = (fs/length(Pxx)) * sum(Pxx) = 2.3564 Watts/Hertz

Si se cambia la frecuencia de muestreo como se indica: t = (0:fs/10)/fs; se obtiene la gráfica 302 indicada a continuación:

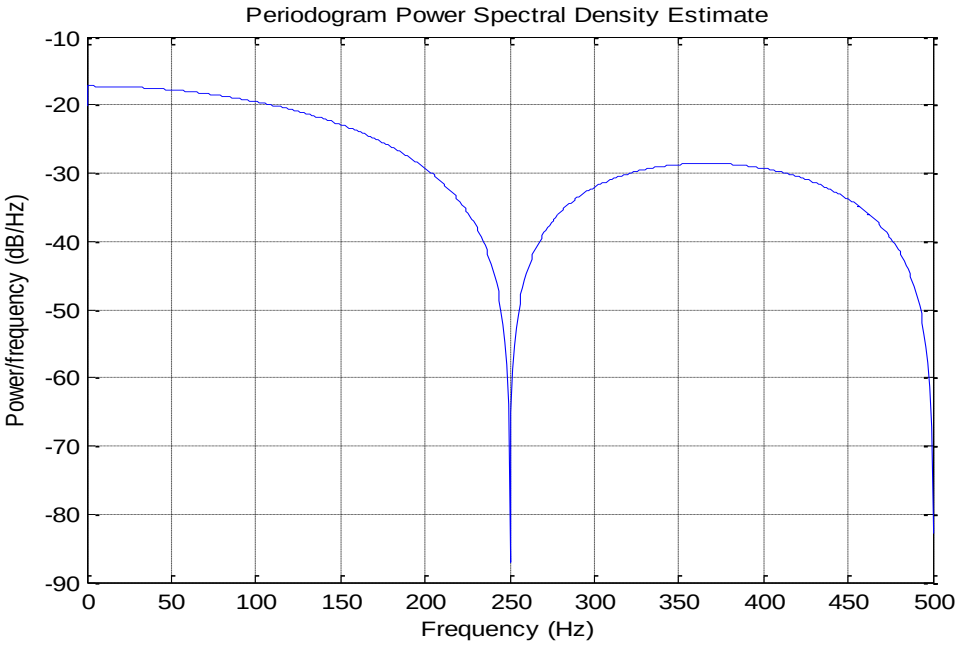


Gráfico 302. Periodograma de la densidad espectral de energía

Utilizando la siguiente instrucción: periodogram(xn,hamming(length(xn)),1024,fs); se obtiene el periodograma de la densidad espectral de energía. A continuación se muestra la gráfica correspondiente:

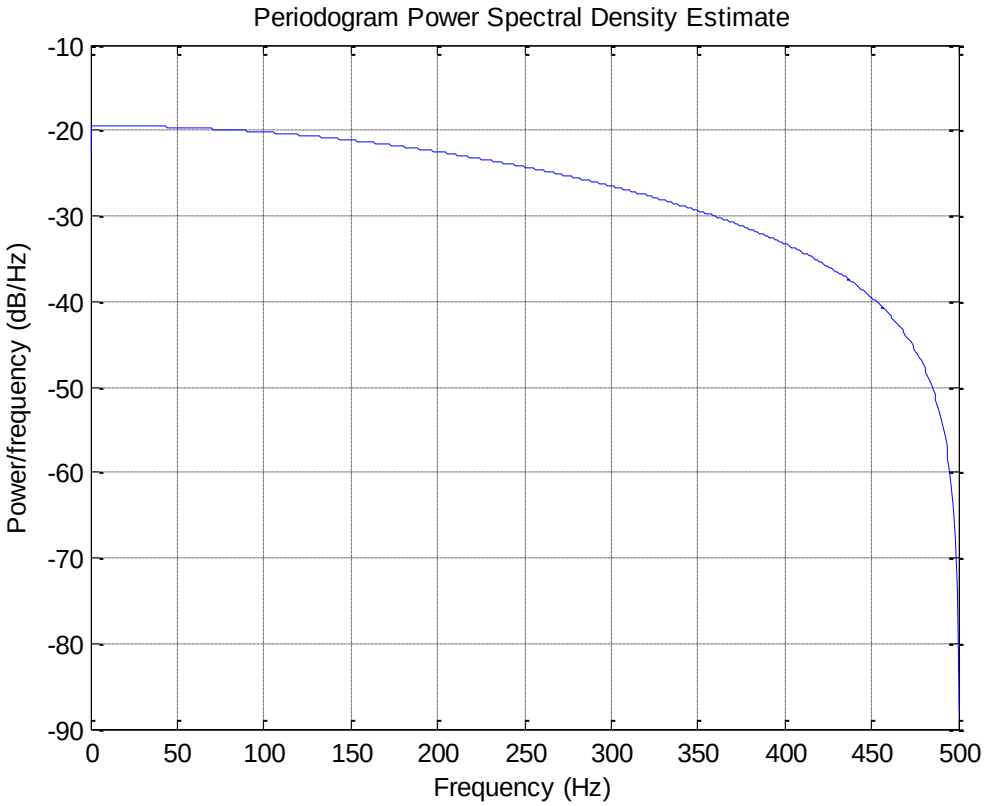


Gráfico 303. Periodograma estimado de la densidad espectral de energía utilizando la ventana de Hamming.

Las gráficas obtenidas en esta parte de la propuesta de investigación, *"serán utilizadas como referencias o patrones en investigaciones similares en el área de sistemas estocásticos"*.

3.4.10 Determinar la Confiabilidad de la Muestra de Equipos Fallados, a fin de Mejorar las Políticas de Mantenimiento Preventivo y Predictivo, en las Empresas de los Sectores Eléctricos de Venezuela y Colombia.

Los equipos que han sido motivo de estudio en la presente investigación doctoral corresponden a los transformadores fallados por arco eléctrico con capacidad de 5 kVA cuyas muestras proceden de distintas regiones de Colombia, dado que las muestras de los correspondientes a 25 kVA venezolanos, no han sido analizados todavía por no tenerse muestras disponibles. La data utilizada para esta parte de la propuesta corresponde a la Región Caldas perteneciente a la empresa Central Hidroeléctrica de Caldas, sin embargo en investigaciones anteriores realizadas por quien suscribe aplicando métodos no convencionales hay aplicaciones y resultados obtenidos para ambos países. A continuación se presentan los resultados obtenidos y en el apéndice N° 3 se ubica, la planilla de análisis de falla y otros relacionados:

*V= (N Σ Zibi - Σ Zi Σbi)/(Σzibi*Σbi - Σzi*Σbi²)* *K= Σ Zi Bi/Σbi-LnV*Σbi²*

a= N Σ Zibi	*-10980,3*	*V =*	*-2693,217*	*1,4836353*	*4,408945(*)*
b= Σ Zi Σbi	*-8287,06*		*-1815,283*		
*c= Σzibi*Σbi*	*-11825,8*				
*d= Σzi*Σbi²*	*-10010,5*	*K=B*	*-110,9119*	*1,3131226(**)*	
			-84,46426		
d= Σ Zi Bi	*-110,912*				
e= Σbi	*106,623*				
*f= LN(V)*Σbi²*	*191,087*				

K es igual a uno (01) los equipos están en condición normal de operación.

El tiempo promedio entre fallas o TPEF es de 7,7665479 lo cual indica que al menos ocho (08) equipos fallaran en un mes. Con esta condición las empresas responsables de la operación del sistema eléctrico pueden ajustar las frecuencias de inspección u otras tareas de mantenimiento preventivo/predictivo en los equipos correspondientes.

(*) Ecuación 12 coeficiente de vida característica y (**) Ecuación 13 coeficiente de dispersión.

IV. Análisis y Discusión de Resultados

4.1 *Resultados Obtenidos Aplicando el Programa SPSS.*
4.2 *Resultados de la Falla por Arco Eléctrico Aplicando Programa ATP.*
4.3 *Resultados Experimentales realizados a la Chapa de Acero al Silicio de los Transformadores Fallados.*
4.4 *Resultados Experimentales realizados a las Muestras de Papel Aislante de los Transformadores Fallados.*
4.5 *Resultados de Rigidez Dieléctrica realizados a las Muestras de Aceite de los Transformadores Fallados.*
4.6 *Resultados Obtenidos al Aplicar la Máquina de Soporte Vectorial a los Resultados Experimentales realizados a la Chapa de Acero al Silicio.*
4.7 *Resultados de la Simulación de Montecarlo para Determinar la Relación entre las Pérdidas Totales y el Tamaño de Cristal (Grano).*
4.8 *Resultados del Modelo en Espacios de Estado Obtenido. Caso: Transformadores Fallados por Arco Eléctrico.*
4.9 *Resultados del Sistema Estocástico Obtenido. Caso: Transformadores Fallados por Arco Eléctrico.*
4.10 *Comparar el Modelo Estocástico Propuesto versus el Modelo de Estado.*

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

3.1 Resultados Obtenidos Aplicando El Programa SPSS.

4.1.1 Análisis y Discusión de estos resultados:

CASO VENEZUELA.

No se puede determinar el tipo de falla, ni causas y/o consecuencias, dado que la información suministrada por los operadores del sistema solo reporta *"transformador quemado"*. Tampoco se tuvo acceso a muestras de equipos fallados con la capacidad indicada, por lo tanto, no se pudieron realizar pruebas experimentales a estas chapas de acero al silicio.

Lo anterior es debido a que los instrumentos de recolección de datos utilizados por los operadores del sistema en Venezuela, específicamente, para el área servida de la empresa Corpoelec en el Estado Carabobo, no indican el tipo de falla ni la causa asociada a la misma.

CASO COLOMBIA.

Los resultados obtenidos en la parte estadística en investigaciones previas realizadas por quien suscribe, fueron comparados con estudios realizados por empresas colombianas entre las que se encuentran: la Compañía Hidroeléctrica de Caldas y las Empresas Públicas de Medellín, las cuales coinciden con los transformadores fallados en la capacidad de 5 kVA. Con respecto a las otras condiciones evaluadas como tipos de fallas, año de fabricación, etc, las mismas fueron revisadas en las muestras de quipos fallados procedentes de distintas regiones de Colombia, durante la estancia de investigación realizada por quien suscribe. Debería establecerse en los instrumentos de recolección de datos utilizados por las empresas que reparen o fabriquen estos equipos, la ubicación geográfica y fecha exacta en la ocurrencia de fallas.

4.2 Resultados de la Falla por Arco Eléctrico Aplicando el Programa ATP.

4.2.1 Análisis y Discusión de estos resultados:

Las respuestas obtenidas en esta parte de la investigación doctoral, permitirán realizar investigaciones futuras, sobre el comportamiento del equipo ante este tipo de fallas, evaluando escenarios del régimen transitorio y permanente, de tal manera que, los

operadores del sistema evidencien a través de otras modelaciones, cuales son las condiciones de potencia y energía verificando sus efectos sobre los sistemas de distribución eléctrica. En qué instante de tiempo ocurren, qué pasa con las condiciones nominales y por sobre todo; su verificación tiene como punto de partida, los parámetros conocidos del circuito equivalente. Las empresas responsables de la operación del sistema podrán mejorar el ajuste de los sistemas de protección, al igual que sus políticas de mantenimiento de acuerdo a lo establecido en la GO 38006.

4.3 Resultados Experimentales Realizados a la Chapa de Acero al Silicio de los Transformadores Fallados.

4.3.1 Análisis y Discusión de estos resultados:

- Análisis de microestructura: la muestra procedente de la Región Antioquia (Medellín) presenta mayor cantidad de inclusiones tipo D óxidos gruesos, es decir, "*presencia de precipitados por alta temperatura"*. La muestra procedente de la Región Pacífico (Popayán) tiene condiciones similares pero, los óxidos son finos. La muestra de la Región Caldas presenta inclusiones tipo D de óxidos gruesos, pero en menor cantidad, mientras que la procedente de la Región Bogotá *"está limpia",* presentando granos finos al igual que la muestra patrón. En cuanto al tamaño de grano, las muestras procedentes de las Regiones Antioquia, Pacífico y Patrón presentan tamaño 1, mientras que las otras muestras procedentes de Caldas y Bogotá tamaño 2.

  Los cambios que presenta la microestructura tienen su inicio en el tratamiento térmico que recibió la aleación durante el proceso de fabricación y que se indican en la composición química de acuerdo al porcentaje de carbono, luego, las condiciones de la temperatura promedio tanto en la Región Antioquia, Región Pacífico y Región Caldas influyeron de manera importante en la presencia de los *"precipitados por alta temperatura en forma de óxidos tipo D, tanto finos como gruesos"*, al igual que en el tamaño de grano. Esto afecta la *"calidad térmica del material y su reutilización".*

- Condiciones magnéticas de acuerdo al porcentaje de carbono: los cambios específicos corresponden a la *fuerza coercitiva* para la Región Bogotá, mientras que, al comparar la *Conductibilidad, Saturación Magnética y Permeabilidad* en todas las regiones, "*no se evidencian cambios significativos"*.

- Dureza: el cambio más significativo se evidencia en la muestra procedente de la Región Bogotá.

- Microscopia electrónica de barrido: en el capítulo III de la presente investigación doctoral, se muestran las imágenes con los cambios de fase, inclusiones, y otros de la estructura física a fin de compararlas con las fotomicrografías, además de incorporar el espectro con los elementos químicos, que afectan la aleación e influyen en su *"deterioro térmico como evidencia significativa"*.

- Difracción de rayos X: todos los tamaños de cristal (grano) evaluados en la presente investigación doctoral procedentes de distintas regiones de Colombia, están fuera de los rangos establecidos, es decir, la falla por arco eléctrico *"afecta esta condición del material"*, independiente de la ubicación geográfica del transformador en estudio. La relación con el tamaño del cristal indicada en el gráfico 273 es de suma importancia, porque las muestras procedentes de las Regiones de Bogotá y el Pacífico, presentan un tamaño muy grande en comparación con la muestra patrón, no siendo el caso de las procedentes de las Regiones de Antioquia y Caldas, cuyos tamaños son bastante reducidos, lo cual permite establecer que "*la temperatura ambiente influye en los cambios que presenta la microestructura del material".*

- Pruebas magnéticas con el magnetómetro: en el gráfico 274 se evidencia que hay una disminución del campo magnético en todas las muestras que fueron analizadas, aunque se mantiene la magnetización. La condición de falla *"afecta la calidad magnética del material".*

4.4 Resultados Experimentales Realizados a las Muestras de Papel Aislante de los Transformadores Fallados.

4.4.1 Análisis y Discusión de estos resultados:

Los resultados obtenidos indican que las muestras procedentes de las regiones del Pacífico y Bogotá son las que soportan mayor carga, es decir, *"las temperaturas ambiente promedio elevadas o bajas, parecieran favorecer la condición operativa del equipo"*. La muestra procedente de la Región Antioquia es la que tiene más tiempo de servicio o vida útil *"y se comprueba, porque presenta el mayor desplazamiento".* Las muestras de las regiones donde *"hay menor deformación, son las más propensas a salir fuera de servicio en caso de ocurrir alguna falla"*.

4.5 Resultados de Rigidez Dieléctrica Realizados a las Muestras de Aceite de los Transformadores Fallados.

4.5.1 Análisis y Discusión de estos resultados:

Al realizar los análisis de rigidez dieléctrica a las muestras de equipos fallados se comprueba que están fuera de norma los mismos.

4.6 Resultados Obtenidos al Aplicar la Máquina de Soporte Vectorial a los Resultados Experimentales realizados a la Chapa de Acero al Silicio.

4.6.1 Análisis y Discusión de estos resultados:

El análisis del resultado obtenido por la MSV luego de efectuar cuatro (04) entrenamientos indica, que se clasifican las muestras como falladas a causa de un arco eléctrico, *"no importando la región de procedencia"*. En caso de tener un equipo fallado del cual se desconoce el tipo de falla, se podrían realizar estas pruebas experimentales y al mapear los resultados, el entrenamiento permitiría verificar si corresponden a arco eléctrico o se encuentra en buenas condiciones (de acuerdo a la clase donde lo ubique la MVS). No pudo realizarse la comparación de la MVS utilizando patrones de imágenes, porque no se tuvo acceso a mayor cantidad de equipos fallados con esta condición, sin embargo, sería conveniente realizarlo en futuras investigaciones.

4.7 Resultados de la Simulación de Montecarlo para Determinar la Relación entre las Pérdidas Totales y el Tamaño de Grano.

4.7.1 Análisis y Discusión de estos resultados:

El modelo de regresión utilizado para evaluar condiciones ambientales indica que la *"temperatura promedio es la condición de mayor influencia para los equipos fallados"*, sin olvidar que la combinación de *temperatura promedio-precipitaciones* también debe ser considerada en futuras investigaciones para trabajos similares en esta área.

El otro modelo utilizado para comparar las pérdidas totales versus la caracterización realizada a las muestras de equipos fallados indica *"las variables tamaño de cristal (grano) (x_1) y óxidos (precipitados por alta temperatura) (x_2) son las condiciones que influyen en las pérdidas totales de núcleo"*.

La hoja de cálculo muestra al realizar la simulación con la generación de números aleatorios que para el caso tamaño 1 (Standard ASTM) de una muestra "*Limpia*" de óxido tipo D 4µ (micras) este se va a mantener con un 74,49% y será escasa la aparición de precipitados por alta temperatura, ya que el rango máximo de inclusiones será de 4,9 µ, por lo tanto, *"las pérdidas totales no se afectan en este caso".* Para el Caso donde el tamaño de grano es 5,05 con presencia de óxidos tipo D gruesos de 12µ, el resultado indica que *"el tamaño de grano está relacionado como condición de mayor influencia y que más rápido afecta a la chapa de acero al silicio en un 96,94%. Los óxidos se mantendrán en esa condición.* Este método "*predice de manera asertiva cuál de las dos condiciones, afecta primero a chapa de acero al silicio como si fueran dos servidores operando al mismo tiempo",* en caso de ser reutilizada por las empresas que fabrican o reparan transformadores el método ayuda en la verificación del estado o vida remanente de la misma. Las gráficas obtenidas así lo evidencian.

4.8 Resultados del Modelo en Espacios de Estado Obtenido. Caso: Transformadores Fallados por Arco Eléctrico.

4.8.1 Análisis y Discusión de estos resultados:

El modelo en espacios de estado permite evaluar las señales de corriente en el lado primario, lado secundario y magnetización a partir de las pérdidas totales, pero,

ajustando el valor del coeficiente de oscilación. Esto traerá ventajas a las empresas que fabrican o reparan estos equipos, ya que podrán diseñar la chapa de acero al silicio bajo esta condición de falla versus valores nominales. Con respecto a las variables ambientales, específicamente la temperatura ambiente, aunque ajusten los valores de las resistencias del lado y primario y secundario, "*no es posible establecer un valor de temperatura mayor a 85°C o superior, dado que el punto de Curie es demasiado elevado"*, por los resultados obtenidos en las pruebas experimentales la chapa de acero al silicio *"no pierde o cambia sus propiedades magnéticas"*, pero, se llena de óxidos o inclusiones debido a precipitados por alta temperatura que desmejoran la calidad térmica. La forma canónica, viene a ser la forma más perfecta, pura, natural o simple en la cual se puede presentar un *"modelo"* exacto por norma matemática. El modelo es controlable, no observable y estable (CØE).

4.9 Resultados del Sistema Estocástico Obtenido. Caso: Transformadores Fallados por Arco Eléctrico.

4.9.1 Análisis y Discusión de estos resultados:

El sistema estocástico es asertivo hacia la predicción de la condición de la chapa de acero al silicio bajo esta condición de falla, a continuación se muestran otras consideraciones de los resultados obtenidos del modelo propuesto:

4.9.1.1 Ecuaciones Diferenciales Estocásticas: la respuesta ante la variable aleatoria, más la condición de variabilidad o varianza que corresponde a las pérdidas totales del núcleo indica que "*el modelo estocástico es más preciso, que el utilizado en la Simulación de Montecarlo".*

4.9.1.2 Principios Generales de Estimación: la estimación puntual aplicando el método de máxima verosimilitud es bastante exacto cuando se aplica a las pérdidas totales del núcleo. Los márgenes de errores son reducidos. La estimación del tiempo entre fallas,

permitirá el juste en las frecuencias y rutinas de inspección que deben implementarse para estos equipos y sistemas de distribución, por parte de los operadores del sistema.

4.9.1.3 Densidad Espectral: los periodogramas obtenidos servirán de patrones de referencia para este tipo de fallas a futuras investigaciones en esta área. Los cambios en la frecuencia de muestreo, cambian el tamaño de la ventana y por consiguiente, la forma gráfica. Los cálculos de potencia promedio son bastante exactos. La estimación de la densidad espectral de energía, permite construir una respuesta *"sobre la frecuencia contenida en una señal".*

4.10 Comparar el Modelo Estocástico Propuesto Versus el Modelo de Estado.

4.10.1 Análisis y Discusión de estos resultados:

- ✓ En el modelo de estado, luego de determinarse las pérdidas totales por cualquiera de las dos (02) formas, bien sea, a partir del porcentaje de carbono de la aleación o pruebas magnéticas, "*requiere el ajuste del coeficiente de oscilación de la chapa de acero al silicio para ajustarse a los valores nominales del equipo"*, mientras que el sistema estocástico, *"se relacionan directamente las variables aleatorias correspondientes de acuerdo a las condiciones o características físicas que afectan el material ante la presencia de fallas"*. El sistema estocástico es preciso al relacionar las dos condiciones de falla al mismo tiempo.
- ✓ *"El modelo de estado relaciona directamente, las entradas de voltaje, tanto del lado primario como del lado secundario con los estados de las bobinas correspondientes, tanto del lado de alta como de baja tensión y rama de magnetización",* mientras que "*el sistema estocástico requiere previamente, un modelo de regresión logístico (o lineal múltiple) que compare las pérdidas totales versus caracterizaciones físicas"*, apoyándose en la simulación de Montecarlo como primera estimación. El sistema estocástico es complementario en cada fase de análisis, los errores son reducidos, se puede comparar la variabilidad, es mucho más completo para la predicción de fallas.

V. Conclusiones y Prospectivas.

✓ El modelo de control muestra los resultados gráficos de todas las corrientes: $i_{1,}$ i_2 o i_m, pero el cambio en las condiciones ambientales corresponde a la temperatura promedio que internamente puede apreciarse si se varían las resistencias de las bobinas del lado primario y secundario, dado que estas corresponden a las pérdidas en el cobre o bobinas. En el sistema estocástico, la estimación puntual y la densidad espectral de energía permiten evaluar la condición de falla que presenta el equipo en estudio, calculando la desviación estándar, intervalos de confianza, aspectos comparativos que servirán de apoyo a las futuras investigaciones en el área. El sistema estocástico es más completo como modelo predictivo.

Conclusiones y Prospectivas.

V. CONCLUSIONES Y PROSPECTIVAS.

En la presente investigación doctoral, se diseñó un sistema estocástico unificado para la predicción confiable de fallas por condiciones ambientales de algunos Departamentos o Regiones de Colombia, para los transformadores de distribución monofásicos de poste, mostrando a continuación, las conclusiones y prospectivas obtenidas del mismo:

Conclusiones.

- ✓ *La temperatura, es la condición ambiental que incide directamente en la generación de fallas por arco eléctrico en transformadores con cap. 5 kVA.*
- ✓ *En Régimen Permanente y Transitorio se determina aplicando el programa de análisis transitorios ATM/EMTP, el tiempo de ocurrencia y las condiciones nominales del transformador de distribución, en función de la Potencia y Energía.*
- ✓ *Las condiciones ambientales afectan la calidad térmica de la chapa de acero al silicio y su reutilización, originando precipitados por alta temperatura (óxidos Tipo D entre 4 y 12μ), al igual que disminución del Tamaño de Grano 2 (estándar*

ASTM o 5.05 nm), afectando estas condiciones entre 33,33 y 61,15 +/- 10 % respectivamente.

- ✓ *La Falla por Arco Eléctrico produce una disminución del 57,40% del campo magnético, aunque se mantiene la magnetización.*
- ✓ *Cuando la Tensión en el papel aislante presenta una condición de Deformación Máxima entre 189,86 y 49,70 % de las muestras provenientes de las Regiones Antioquia y Caldas respetivamente, y el Máximo Esfuerzo se ubique entre 37,19 y 29,77 kPa, se debe directamente a la temperatura ambiente.*
- ✓ *Las Pérdidas Totales del Núcleo se deben a presencia de óxidos Tipo D y cambios en el tamaño de grano por variación de la temperatura ambiente.*
- ✓ *Estocásticamente el modelo desarrollado tiene una confiabilidad CØE (controlable, no observable y estable) de 76,74 %.*
- ✓ *Hay propensión a una Falla por Arco Eléctrico, dada la cercanía del coeficiente de dispersión al Índice de Confiabilidad mayor a uno.*

Prospectivas.

1.- Determinar combinaciones ambientales que afecten este modelo en transformadores de 5 kVA.

2.- Determinar cambios de fase en la chapa de acero al silicio, por efecto de las condiciones ambientales en transformadores de distribución.

3.- Demostrar que la Estimación Puntual por el Método de Máxima Verosimilitud se puede implementar de manera operativa en sistemas de mantenimiento y diagnóstico en transformadores de distribución.

4.- Comparar con Estándares de fabricación la Densidad Espectral de Energía.

5.- Determinar el Coeficiente de Dispersión Confiablemente a partir del cual se inicia el proceso de falla exponencial por Arco Eléctrico.

Anexo N° 1

6.- Diseñar el Sistema Estocástico Unificado para la Predicción Confiable de Fallas por Condiciones Ambientales en transformadores de distribución trifásicos.

7.- Estimar vida útil de los Transformadores de Distribución de 5 kVA a partir de los resultados de deformación versus esfuerzo que presenta el papel aislante.

Ecuaciones Diferenciales Estocásticas de Primer Orden.

Ecuaciones Diferenciales Estocásticas.

1.- Ecuación Diferencial Estocástica de Primer Orden:
$a_0 \ X'(t) + a_1 \ X(t) = W'(t) \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (1)$;
donde $a_0 \ y \ a_1$ son constante reales que corresponden a valores del circuito equivalente del transformador. Además

W´(t) es el ruido blanco con parámetro σ^2 .

Al integrar desde t_0 *hasta* t se obtiene la siguiente respuesta considerando un punto $\omega \epsilon \Omega$ del proceso Wiener como una función simple $W_{(t)} = W_{(t,\omega)}$ *que esta definida como una función continua.* La ecuación queda de la siguiente manera:

$$X_{(t)} + \frac{a_1}{a_0}\int_{t_0}^{t} X(s)\ ds = X_{(t0)} - \frac{W_{(t0)}}{a_0} + \frac{W_{(t)}}{a_0} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2)$$

Multiplicando ambos miembros de la ecuación por la expresión: $e^{-\alpha t}$ donde $\alpha = -\frac{a_1}{a_0}$

Encontramos que:

$$e^{-\alpha t}\, X(t) - \alpha e^{-\alpha t}\int_{t_0}^{t} X(s)\, ds = \left(x_{(t0)} - \frac{W_{(t0)}}{a_0}\right)e^{-\alpha t} + \frac{e^{-\alpha t}}{a_0}\ W(t) \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (3)$$

Reescribiendo la ecuación anterior como se indica:

$$\frac{d}{dt}\left(e^{-\alpha t}\int_{t_0}^{t} X(s)\ ds\right) = \left(X_{(t0)} - \frac{W_{(t0)}}{a_0}\right)e^{-\alpha t} + \frac{e^{-\alpha t}}{a_0}\ W(t) \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (4)$$

Integrando a ambos lados de la ecuación desde t_0 *hasta* t obtenemos lo siguiente:

$$\int_{t_0}^{t} X(s)\ ds = \left(X_{(t0)} - \frac{W_{(t0)}}{a_0}\right)\left(\frac{e^{\alpha(t-t_0)} - 1}{\alpha}\right) + e^{\alpha t}\int_{t_0}^{t}\frac{e^{-\alpha s}}{a_0}\ W(s)\, ds \ldots\ldots\ldots\ldots (5)$$

Aplicando diferenciación se obtiene en forma general la solución de la ecuación N°2 como se indica:

$$X\,(t) = \left(X_{(t0)} - \frac{W_{(t0)}}{a_0}\right)e^{\alpha(t-t_0)} + \frac{W_{(t)}}{a_0} + \frac{\alpha}{a_0}\int_{t_0}^{t} e^{\alpha(t-s)}\, W(s)\, ds \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (6)$$

Al principio de estas definiciones fue planteada la condición del proceso Wiener como una función simple que converge y tiene la siguiente respuesta:

$$\int_a^b f(t)dW(t) = f(b)W(b) - f(a)W(a) - \int_a^b f'(t)W(t)dt$$

Utilizando la expresión anterior la ecuación (6) queda como se indica a continuación:

$$X(t) = X(t_0)e^{\alpha(t-t_0)} + \frac{1}{a_0}\int_{t_0}^{t} e^{\alpha(t-s)}\, dW(s) \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (7)$$

$X(_{t0})$ = C es una variable aleatoria, por lo tanto, el proceso estocástico queda definido como:

$$X(t) = Ce^{\alpha(t-t_0)} + \frac{1}{a_0}\int_{t_0}^{t} e^{\alpha(t-s)}\ dW(s) \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (8)$$

Donde

$X(t_0\ )$es un proceso Gaussiano para una solución desde$(-\infty, \infty)$ $entonces \quad para\ -\infty < t < \infty$ la ecuación (7) presenta la siguiente solución:

$$X(t) = \ Ce^{\alpha t} + \ X_{0(t)} \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots .. (9)$$

Anexo N° 2

Método de Máxima Verosimilitud.

Método de Máxima Verosimilitud

Uno de los mejores métodos para obtener un estimador puntual de un parámetro es el máxima verosimilitud. Tal y como su nombre lo implica, el estimador será el valor del parámetro que maximiza la ***función de verosimilitud*.**

Definición:

Supóngase que X es una variable aleatoria con distribución de probabilidad $f(x,\theta)$, donde θ es un parámetro desconocido. Sean $X_1, X_2, \ldots\ldots, X_n$ los valores observados en una muestra aleatoria de tamaño *n*. La *función de verosimilitud* de la muestra es:

$$L(\theta) = f(x_1, \theta) \cdot (x_2, \theta) \cdot \ldots\ldots\ldots\ldots \cdot f(x_n, \theta)$$

Nótese que la función de verosimilitud es ahora una función del parámetro desconocido θ. El ***estimador de máxima verosimilitud*** de θ es el valor de θ que maximiza la función de verosimilitud $L(\theta)$.

En el caso de una variable aleatoria discreta, la interpretación de la función de verosimilitud es clara. La

función de verosimilitud de la muestra $L(\theta)$ es precisamente la probabilidad

$$P(X_{1=x_1}, X_{2=x_2}, \ldots\ldots\ldots, X_{n=x_n})$$

Esto es, $L(\theta)$ es la probabilidad de obtener los valores muestrales $X_1, X_2, \ldots\ldots\ldots\ldots, X_n$. Por lo tanto en el caso discreto, el estimador de máxima verosimilitud es un estimador que maximiza la probabilidad de ocurrencia de los valores muestrales.

CASO 1: Variable aleatoria de Bernoulli.

La función de probabilidad es

$$f_{x\ (x;p)}=\begin{cases} p^x(1-p)^{1-x} & x=0,1 \\ 0 \end{cases}$$

Donde p es el parámetro a estimar. La función de verosimilitud de una muestra de tamaño *n* es:

$$L(p) = p^{x_1}(1-p)^{1-x_1}p^{x_2}(1-p)^{1-x_2} \ldots\ldots p^{x_n}(1-p)^{1-x_n}$$

$$= \prod_{i=1}^{n} p^{x_1}(1-p)^{1-x_1}$$

$$= p^{\sum_{i=1}^{n} x_i}(1-p)^{n-\sum_{i=1}^{n} x_i}$$

Se observa que si $\hat{p}$ maximiza $L(p)$, entonces $\hat{p}$ también maximiza *ln*(*p*). Por consiguiente:

$$ln\,L(p) = \left(\sum_{i=1}^{n} x_i\right) + \ln p + \left(n - \sum_{i=1}^{n} x_i\right)\ln(1-p)$$

Ahora bien,

$$\frac{d\ln L(p)}{dp} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{p} - \frac{(n-\sum_{i=1}^{n} x_i)}{1-p}$$

Al igualar a cero la expresión anterior y resolver para *p*, se tiene que $\hat{p} = \left(1/n\right)\sum_{i=1}^{n} x_i$ En consecuencia, el estimador de máxima verosimilitud de *p* es

$$\hat{p} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$$

Anexo N° 3

1. Normas ASTM D-828

2. Normas ASTM D-877

3. Normas ASTM 3906-3

4. Normas ASTM 3942-3

Designation: D 828 – 97

An American National Standard

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS
100 Barr Harbor Dr., West Conshohocken, PA 19428
Reprinted from the Annual Book of ASTM Standards. Copyright ASTM

Standard Test Method for Tensile Properties of Paper and Paperboard Using Constant-Rate-of-Elongation Apparatus[1]

This standard is issued under the fixed designation D 828; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ε) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

1. Scope

1.1 This test method covers procedures for determining tensile properties of paper and paperboard.

1.2 The procedures given in this test method are for use with constant-rate-of-elongation tensile testing equipment and as such, may be used with instruments designed for either vertical or horizontal operation, and whether manually operated or computer controlled.

1.3 These procedures are applicable for all types of paper, paperboard, paper products, and related materials within the measurement limitations of the equipment used. They are not for use with combined corrugated board.

1.4 Properties that may be determined using this test method include tensile strength, stretch, tensile energy absorption, tensile stiffness, breaking length, and tensile index.

1.5 The values stated in SI units are to be regarded as the standard. The inch-pound units given in parentheses are for information only.

1.6 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards:*

D 585 Practice for Sampling and Accepting a Single Lot of Paper, Paperboard, Fiberboard, and Related Products[2]

D 685 Practice for Conditioning Paper and Paper Products for Testing[2]

D 987 Method of Test for Stretch of Paper and Paper Products Under Tension[3]

D 1968 Terminology Relating to Paper and Paper Products[2]

E 122 Practice for Choice of Sample Size to Estimate a Measure of Quality for a Lot or Process[4]

3. Terminology

3.1 *Definitions*—For definitions of terms used in this test method, refer to Terminology D 1968 or the *Dictionary of Paper*.[5]

3.2 *Definitions of Terms Specific to This Standard:*

3.2.1 *line contact grips, n*—grips or jaws on a tensile testing machine having a clamping zone for gripping the specimen comprised of a cylindrical and a flat surface or two cylindrical surfaces whose axes are parallel.

4. Significance and Use

4.1 The tensile properties measured in this test method are fundamental properties associated with the manufacture, or end use, or both, of paper and paper products. They may be influenced by, or indicative of the type fibers used or the treatment of the fibers, or both, in a particular paper. They may also be influenced by or indicative of specific manufacturing procedures used in producing a specific paper or paper product. Likewise, paper converting operations may significantly impact properties measured using this test method, and this test method may be used to measure and understand such effects.

4.2 Tensile strength is indicative of the serviceability of many papers, such as wrapping, bag, gummed tape, and cable wrapping, that are subjected to direct tensile stress. The tensile strength of printing papers is indicative of the potential resistance to web breaking during printing and other converting operations and during travel of the web from the roll through the equipment.

4.3 Stretch, and sometimes tensile stiffness are indicative of the ability of the paper to conform to a desired contour. These are important properties of creped papers, towels, napkins, decorative papers, industrially used paper tapes (both creped and pleated), bags, and liners for cans, barrels, and cartons.

4.4 Tensile energy absorption is a measure of the ability of a paper to absorb energy at the strain rate of the test, and indicates durability of papers that are subjected to repetitive straining and stressing, such as multiwall sack papers.

4.5 Tensile stiffness often gives a better indication of the mechanical response of the sheet to converting forces than do tensile rupture criteria.

---

[1] This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D-6 on Paper and Paper Products and is the direct responsibility of Subcommittee D06.92 on Test Methods.

Current edition approved Dec. 10, 1997. Published November 1998. Originally published as D 828 – 45 T. Last previous edition D 828 – 93.

[2] *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 15.09.

[3] Discontinued, see *1968 Annual Book of ASTM Standards*, Part 15.

[4] *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 14.02.

[5] Available from the Technical Association of the Pulp and Paper Industry, PO Box 105113, Atlanta, GA 30348.

Designation: D 877 – 00

Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Liquids Using Disk Electrodes[1]

This standard is issued under the fixed designation D 877; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ε) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope

1.1 This test method describes two procedures, A and B, for determining the electrical breakdown voltage of insulating liquid specimens. The breakdown test uses ac voltage in the power-frequency range from 45 to 65 Hz.

1.2 This test method is used to judge if the disk electrode breakdown voltage requirements are met for insulating liquids, as delivered from the manufacturer, that have never been filtered or dried. See Specification D 3487, Specification D 4652, and Guide D 5222 for the minimum specified electrical breakdown. This test method should be used as recommended by professional organization standards such as IEEE C57.106.

1.3 *Limitations of the Procedures*:

1.3.1 The sensitivity of this test method to the general population of contaminants present in a liquid sample decreases as applied test voltages used in this test method become greater than approximately 25 kV rms.

1.3.2 If the concentration of water in the sample at room temperature is less than 60 % of saturation, the sensitivity of this test method to the presence of water is decreased. For further information refer to RR: 327-1006.[2]

1.3.3 The suitability for this test method has not been determined for a liquid's viscosity higher than 900 cSt at 40°C.

1.4 *Procedure Applications*—Procedure A is used to determine the breakdown voltage of liquids in which any insoluble breakdown products easily settle during the interval between the required repeated breakdown tests. These liquids include petroleum oils, hydrocarbons, and askarels (PCB) used as insulating and cooling liquids in transformers, cables, and similar apparatus.

1.4.1 *Procedure B*

1.4.1.1 This procedure is used to determine the breakdown voltage of liquids in which any insoluble breakdown products do not completely settle from the space between the disks during the 1-min interval required in Procedure A. Procedure B, modified in accordance with Section 17 of Test Methods D 2225, is acceptable for testing silicone dielectric liquids.

1.4.1.2 Procedure B should also be applied for the determination of the breakdown voltage of liquid samples containing insoluble materials that settle from the specimen during testing. These may include samples taken from circuit breakers, load tap changers, and other liquids heavily contaminated with insoluble particulate material. These examples represent samples that may have large differences between replicate tests. The use of Procedure B will result in a more accurate value of breakdown voltage when testing such liquids.

1.4.1.3 Use Procedure B to establish the breakdown voltage of an insulating liquid where an ASTM specification does not exist or when developing a value for an ASTM guide or standard. Procedure A may be used once the single operator precision of 13.1 has been demonstrated.

1.5 Both the SI and inch-pound units are equally acceptable.

1.6 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards:*

D 923 Test Method for Sampling Electrical Insulating Liquids[3]

D 1816 Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Oils of Petroleum Origin Using VDE Electrodes[3]

D 2225 Test Methods for Silicone Fluids Used for Electrical Insulation[3]

D 2864 Terminology Relating to Electrical Insulating Liquids and Gases

D 3487 Specification for Mineral Insulating Oil Used in Electrical Apparatus[3]

D 4652 Specification for Silicone Fluid Used for Electrical Insulation[3]

D 5222 Guide for High Fire-Point Electrical Mineral Insulating Oils[3]

---

[1] This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D27 on Electrical Insulating Liquids and Gases and is the direct responsibility of Subcommittee D27.05 on Electrical Test.

Current edition approved Dec. 10, 2000. Published February 2001. Originally published as D 877 – 46 T. Last previous edition D 877 – 87 (1995).

[2] RR: D27–1006, Round-Robin Data Using Modified VDE Electrode Cell for Dielectric Strength Tests on Oil, is available from ASTM Headquarters.

[3] *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 10.03.

Copyright © ASTM, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.

Designation: D3906 – 03 (Reapproved 2008)

Standard Test Method for Determination of Relative X-ray Diffraction Intensities of Faujasite-Type Zeolite-Containing Materials[1]

This standard is issued under the fixed designation D3906; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ε) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

1. Scope

1.1 This test method covers the determination of relative X-ray diffraction intensities of zeolites having the faujasite crystal structure, including synthetic *Y* and *X* zeolites, their modifications such as the various cation exchange forms, and the dealuminized, decationated, and ultrastable forms of *Y*. These zeolites have cubic symmetry with a unit cell parameter usually within the limits of 24.2 and 25.0 Å (2.42 and 2.50 nm).

1.2 The samples include zeolite preparations in the various forms, and catalysts and adsorbents containing these zeolites.

1.3 The term "intensity of an X-ray powder diffraction (XRD) peak" is the "integral intensity," either the area of counts under the peak or the product of the peak height and the peak width.

1.4 This test method provides a number that is the ratio of intensity of portions of the XRD pattern of the sample to intensity of the corresponding portion of the pattern of a reference zeolite, NaY. (Laboratories may use a modified *Y* or *X*, for example, REY as a secondary standard.) The intensity ratio, expressed as a percentage, is then labeled "% XRD intensity/NaY."

1.5 Under certain conditions such a ratio is the percent zeolite in the sample. These conditions include:

1.5.1 The zeolite in the sample is the same as the reference zeolite.

1.5.2 The absorption for the X-rays used is the same for the zeolite and the nonzeolite portions of the sample.

1.6 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards:*[2]

E177 Practice for Use of the Terms Precision and Bias in ASTM Test Methods

E456 Terminology Relating to Quality and Statistics

E691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method

3. Summary of Test Method

3.1 The XRD patterns of the zeolite containing sample and the reference sample (NaY), are obtained under the same conditions. If the XRD pattern of the zeolite is sufficiently strong, a comparison of intensities of eight peaks is used to give % XRD intensity/NaY. For lower zeolite content intensities of the (533) peak (23.5° with Cu Kα radiation) are compared to provide "% XRD intensity/NaY (533)."

4. Significance and Use

4.1 Zeolites *Y* and *X*, particularly for catalyst and adsorbent applications, are a major article of manufacture and commerce. Catalysts and adsorbents comprising these zeolites in various forms plus binder and other components have likewise become important. *Y*-based catalysts are used for fluid catalytic cracking (FCC) and hydrocracking of petroleum, while *X*-based adsorbents are used for desiccation, sulfur compound removal, and air separation.

4.2 This X-ray procedure is designed to monitor these *Y* and *X* zeolites and catalysts and adsorbents, providing a number more or less closely related to percent zeolite in the sample. This number has proven useful in technology, research, and specifications.

4.3 Drastic changes in intensity of individual peaks in the XRD patterns of *Y* and *X* can result from changes of distribution of electron density within the unit cell of the zeolite. The electron density distribution is dependent upon the extent of filling of pores in the zeolite with guest molecules, and on the nature of the guest molecules. In this XRD method, the guest

---

[1] This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D32 on Catalysts and is the direct responsibility of Subcommittee D32.05 on Zeolites.

Current edition approved April 1, 2008. Published May 2008. Originally approved in 1988. Last previous edition approved in 2003 as D3906–03. DOI: 10.1520/D3906-03R08.

[2] For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

Copyright © ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States
Copyright by ASTM Int'l (all rights reserved); Fri Jun 7 17:11:55 EDT 2013
Downloaded/printed by
Universidad Nacional de Colombia pursuant to License Agreement. No further reproductions authorized.

Designation: D3942 – 03 (Reapproved 2008)

Standard Test Method for Determination of the Unit Cell Dimension of a Faujasite-Type Zeolite[1]

This standard is issued under the fixed designation D3942; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ε) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

1. Scope

1.1 This test method covers the determination of the unit cell dimension of zeolites having the faujasite crystal structure, including synthetic *Y* and *X* zeolites, their modifications such as the various cation exchange forms, and the dealuminized, decationated, and ultra stable forms of *Y*. These zeolites have cubic symmetry with a unit cell parameter usually within the limits of 24.2 and 25.0 Å (2.42 and 2.50 nm).

1.2 The samples include zeolite preparation in the various forms, and catalysts and adsorbents containing these zeolites. The zeolite may be present in amounts as low as 5 %, such as in a cracking catalyst.

1.3 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards:*[2]

E691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method

3. Summary of Test Method

3.1 A sample of the zeolite *Y* or *X*, or catalyst containing zeolite is mixed with powdered silicon. The zeolite unit cell dimension is calculated from the X-ray diffraction pattern of the mixture, using the silicon reflections as a reference.

4. Significance and Use

4.1 Zeolites *Y* and *X*, particularly for catalyst and adsorbent applications, are a major article of manufacture and commerce. Catalysts and adsorbents comprising these zeolites in various forms plus binder and other components have likewise become important. *Y*-based catalysts are used for fluid catalytic cracking (FCC) and hydrocracking of petroleum, while *X*-based adsorbents are used for desiccation, sulfur compound removal, and air separation.

4.2 The unit cell dimension of a freshly synthesized faujasite-type zeolite is a sensitive measure of composition which, among other uses, distinguishes between the two synthetic faujasite-type zeolites, *X* and *Y*. The presence of a matrix in a *Y*-containing catalyst precludes determination of the zeolite framework composition by direct elemental analysis.

4.3 Users of the test method should be aware that the correlation between framework composition and unit cell dimension is specific to a given cation form of the zeolite. Steam or thermal treatments, for example, may alter both composition and cation form. The user must therefore determine the correlation that pertains to his zeolite containing samples.[3] In addition, one may use the test method solely to determine the unit cell dimension, in which case no correlation is needed.

4.4 Other crystalline components may be present in the sample whose diffraction pattern may cause interference with the selected faujasite-structure diffraction peaks. If there is reason to suspect the presence of such components, then a full diffractometer scan should be obtained and analyzed to select faujasite-structure peaks free of interference.

5. Apparatus

5.1 *X-Ray Diffractometer,* able to scan at 0.25° 2θ/min, 2θ values in the following discussions were based on data obtained with a copper tube, although other tubes such as molybdenum can be used.

NOTE 1—A step-scanning accessory, to scan at a rate of 0.25° or less 2θ/min, will increase the accuracy of the determination and will facilitate measurement in samples of low zeolite content.

---

[1] This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D32 on Catalysts and is the direct responsibility of Subcommittee D32.05 on Zeolites.

Current edition approved April 1, 2008. Published May 2008. Originally approved in 1988. Last previous edition approved in 2003 as D3942–03. DOI: 10.1520/D3942-03R08.

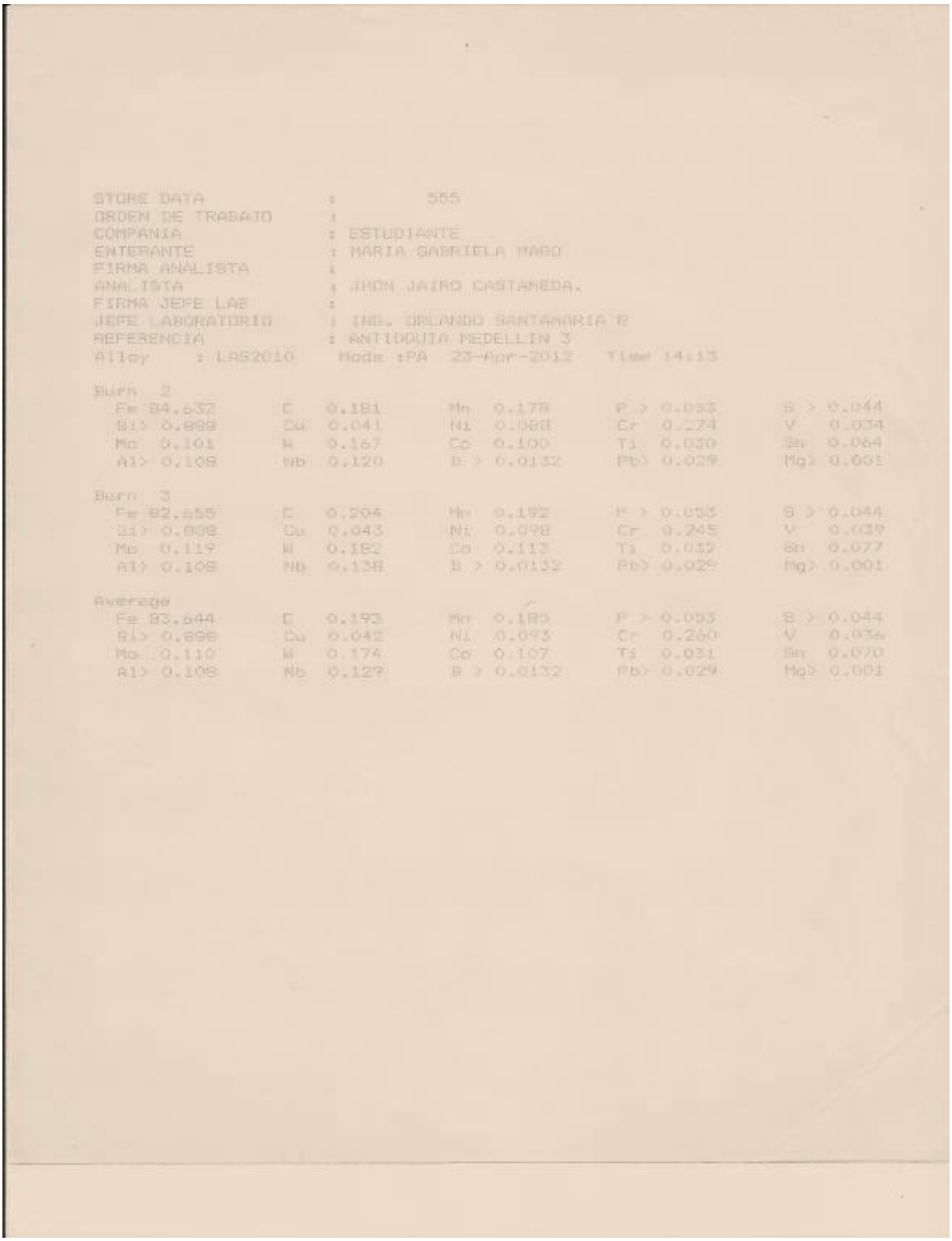
[2] For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

[3] Three correlations have been published for pure synthetic faujasite-type zeolites in the sodium or calcium form: Breck, D. W. and Flanigen, E. M. in "Molecular Sieves," *Society of Chemical Industry* , London, 1968, p. 47; Wright A. C., Rupert, J. P. and Granquist W. T. Amer. Mineral., Vol 53, 1968, p. 1295; and Dempsy, E., Kuehl, G. H., and Olson, D. H., *Journal of the Physical Chemistry*, Vol 73, 1968, p. 387.

Copyright © ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States
Copyright by ASTM Int'l (all rights reserved); Fri Jun 7 17:12:41 EDT 2013
Downloaded/printed by
Universidad Nacional de Colombia pursuant to License Agreement. No further reproductions authorized.

Anexo N° 4

Resultados del Análisis Químico de las Muestras de la Chapa de Acero al Silicio.



STORE DATA : 555
ORDEN DE TRABAJO :
COMPANIA : ESTUDIANTE
ENTERANTE : MARIA GABRIELA MAGO
FIRMA ANALISTA :
ANALISTA : JHON JAIRO CASTAÑEDA.
FIRMA JEFE LAB :
JEFE LABORATORIO : ING. ORLANDO SANTAMARIA R
REFERENCIA : ANTIOQUIA MEDELLIN 3
Alloy : LAS2010 Mode :PA 23-Apr-2012 Time 14:13

Burn 2

Fe	84.632	C	0.181	Mn	0.178	P	> 0.053	S	> 0.044
Si	> 0.889	Cu	0.041	Ni	0.088	Cr	0.274	V	0.034
Mo	0.101	W	0.167	Co	0.100	Ti	0.030	Sn	0.064
Al	> 0.108	Nb	0.120	B	> 0.0132	Pb	> 0.029	Mg	> 0.001

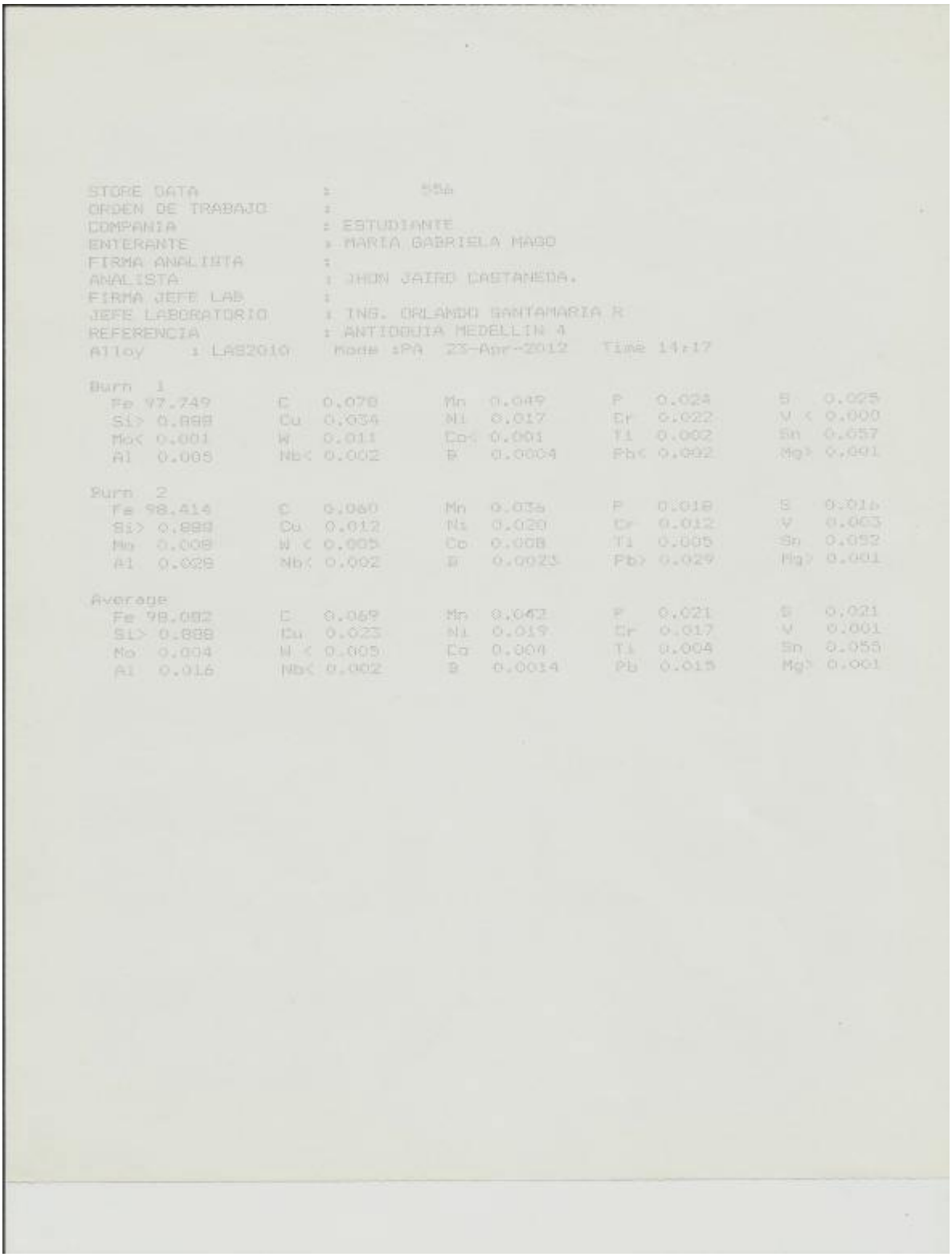
Burn 3

Fe	82.655	C	0.204	Mn	0.192	P	> 0.053	S	> 0.044
Si	> 0.808	Cu	0.043	Ni	0.098	Cr	0.245	V	0.039
Mo	0.119	W	0.182	Co	0.113	Ti	0.032	Sn	0.077
Al	> 0.108	Nb	0.138	B	> 0.0132	Pb	> 0.029	Mg	> 0.001

Average

Fe	83.644	C	0.193	Mn	0.185	P	> 0.053	S	> 0.044
Si	> 0.898	Cu	0.042	Ni	0.093	Cr	0.260	V	0.036
Mo	0.110	W	0.174	Co	0.107	Ti	0.031	Sn	0.070
Al	> 0.108	Nb	0.129	B	> 0.0132	Pb	> 0.029	Mg	> 0.001

Gráfico 304. Región Antioquia. Tipo de Falla: Térmica. Causa: Sobrecarga. Fuente: Laboratorio de Metalografía de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.



STORE DATA : 55a
ORDEN DE TRABAJO :
COMPANIA : ESTUDIANTE
ENTERANTE : MARIA GABRIELA MASO
FIRMA ANALISTA :
ANALISTA : JHON JAIRO CASTANEDA.
FIRMA JEFE LAB :
JEFE LABORATORIO : ING. ORLANDO SANTAMARIA R
REFERENCIA : ANTIOQUIA MEDELLIN 4
Alloy : LAS2010 Mode :PA 23-Apr-2012 Time 14:17

Burn 1

Fe	97.749	C	0.070	Mn	0.049	P	0.024	S	0.025
Si>	0.888	Cu	0.034	Ni	0.017	Cr	0.022	V <	0.000
Mo<	0.001	W	0.011	Co<	0.001	Ti	0.002	Sn	0.057
Al	0.005	Nb<	0.002	B	0.0004	Pb<	0.002	Mg>	0.001

Burn 2

Fe	98.414	C	0.060	Mn	0.036	P	0.018	S	0.016
Si>	0.888	Cu	0.012	Ni	0.020	Cr	0.012	V	0.003
Mo	0.008	W <	0.005	Co	0.008	Ti	0.005	Sn	0.052
Al	0.029	Nb<	0.002	B	0.0025	Pb>	0.029	Mg>	0.001

Average

Fe	98.082	C	0.069	Mn	0.042	P	0.021	S	0.021
Si>	0.888	Cu	0.023	Ni	0.019	Cr	0.017	V	0.001
Mo	0.004	W <	0.005	Co	0.004	Ti	0.004	Sn	0.055
Al	0.016	Nb<	0.002	B	0.0014	Pb	0.015	Mg>	0.001

Gráfico 305. Región Antioquia. Tipo de Falla: Descarga parcial. Causa: Sobretensión. Fuente: Laboratorio de Metalografía de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

STORE DATA : 557
ORDEN DE TRABAJO :
COMPANIA : ESTUDIANTE
ENTERANTE : MARIA GABRIELA MAGO
FIRMA ANALISTA :
ANALISTA : JHON JAIRO CASTANEDA.
FIRMA JEFE LAB :
JEFE LABORATORIO : ING. ORLANDO SANTAMARIA P
REFERENCIA : ANTIOQUIA MEDELLIN 8
Alloy : LAS2010 Mode :PA 23-Apr-2012 Time 14:20

Burn 1

Fe 97.326	C 0.009	Mn 0.048	P > 0.053	S 0.029	
Si> 0.888	Cu 0.018	Ni 0.026	Cr 0.044	V 0.002	
Mo 0.010	W < 0.005	Co 0.006	Ti 0.008	Sn 0.115	
Al 0.051	Nb< 0.002	B 0.0028	Pb 0.021	Mg> 0.001	

Burn 2

Fe 96.400	C 0.010	Mn 0.061	P > 0.053	S 0.033	
Si> 0.999	Cu 0.018	Ni 0.025	Cr 0.062	V 0.002	
Mo 0.011	W 0.131	Co 0.006	Ti 0.012	Sn> 0.120	
Al 0.076	Nb< 0.002	B 0.0048	Pb 0.019	Mg> 0.001	

Average

Fe 96.863	C 0.010	Mn 0.054	P > 0.053	S 0.031	
Si> 0.888	Cu 0.018	Ni 0.025	Cr 0.053	V 0.002	
Mo 0.011	W 0.065	Co 0.006	Ti 0.010	Sn> 0.120	
Al 0.063	Nb< 0.002	B 0.0038	Pb 0.020	Mg> 0.001	

Gráfico 306. Región Antioquia. Tipo de Falla: Arco eléctrico. Causa: Cortocircuito externo. Fuente: Laboratorio de Metalografía de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

STORE DATA : 558
ORDEN DE TRABAJO :
COMPANIA : ESTUDIANTE
ENTERANTE : MARIA GABRIELA MAGO
FIRMA ANALISTA :
ANALISTA : JHON JAIRO CASTANEDA.
FIRMA JEFE LAB :
JEFE LABORATORIO : ING. ORLANDO SANTAMARIA R
REFERENCIA : CALIAS MANIZALES 2
Alloy : LAS2010 Mode :PA 23-Apr-2012 Time 14:26

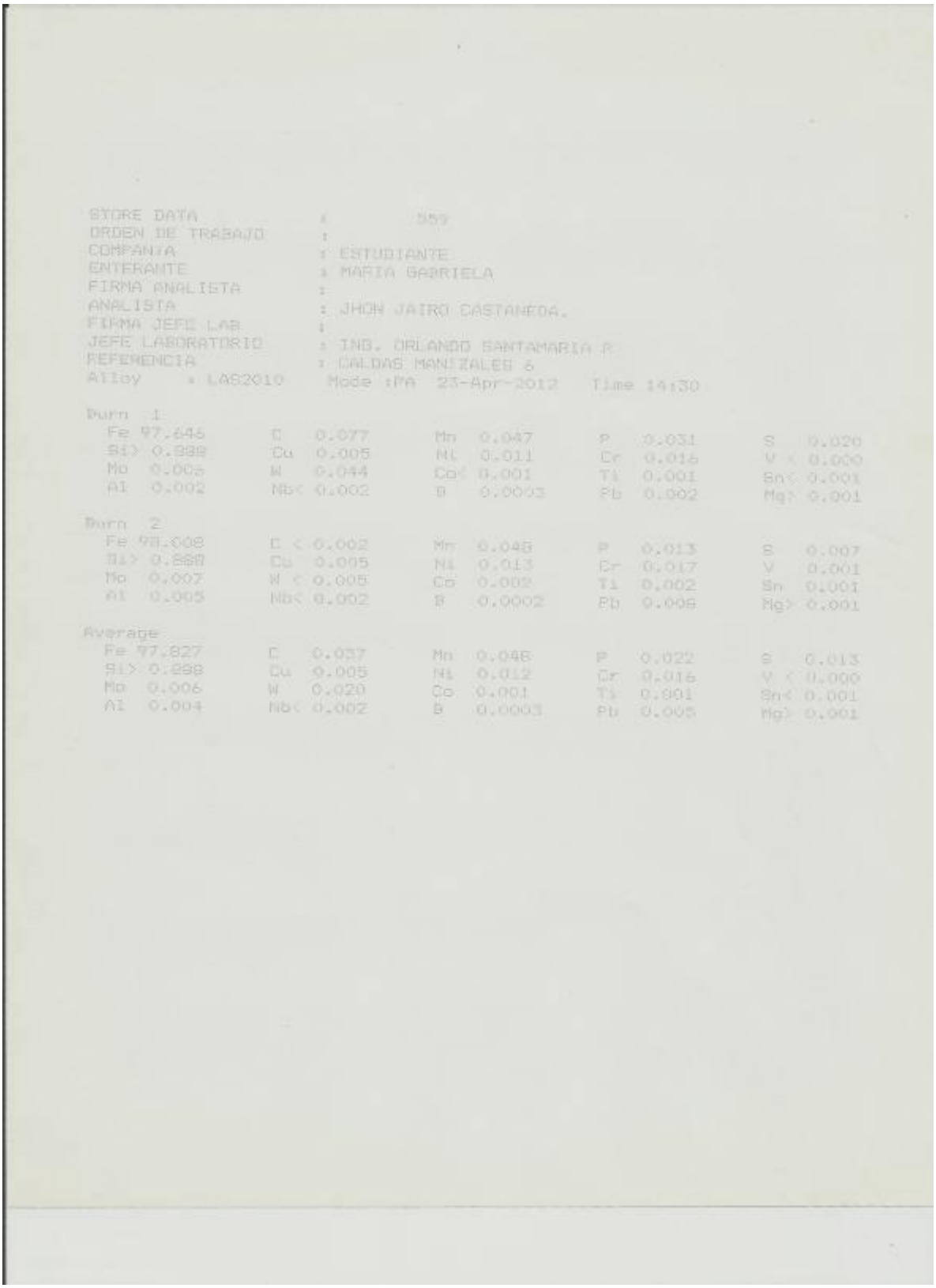
Burn 1

Fe	96.451	C	0.067	Mn	0.050	P	> 0.053	S	> 0.044
Si	> 0.888	Cu	0.016	Ni	0.033	Cr	0.180	V	0.009
Mo	0.039	W	0.027	Co	0.021	Ti	0.007	Sn	0.016
Al	0.100	Nb	0.018	B	0.0056	Pb	> 0.029	Mg	> 0.001

Average

Fe	96.451	C	0.067	Mn	0.050	P	> 0.053	S	> 0.044
Si	> 0.888	Cu	0.016	Ni	0.033	Cr	0.180	V	0.009
Mo	0.039	W	0.027	Co	0.021	Ti	0.007	Sn	0.016
Al	0.100	Nb	0.018	B	0.0056	Pb	> 0.029	Mg	> 0.001

Gráfico 307. Región Caldas. Tipo de Falla: Térmica. Causa: Sobrecarga. Fuente: Laboratorio de Metalografía de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.



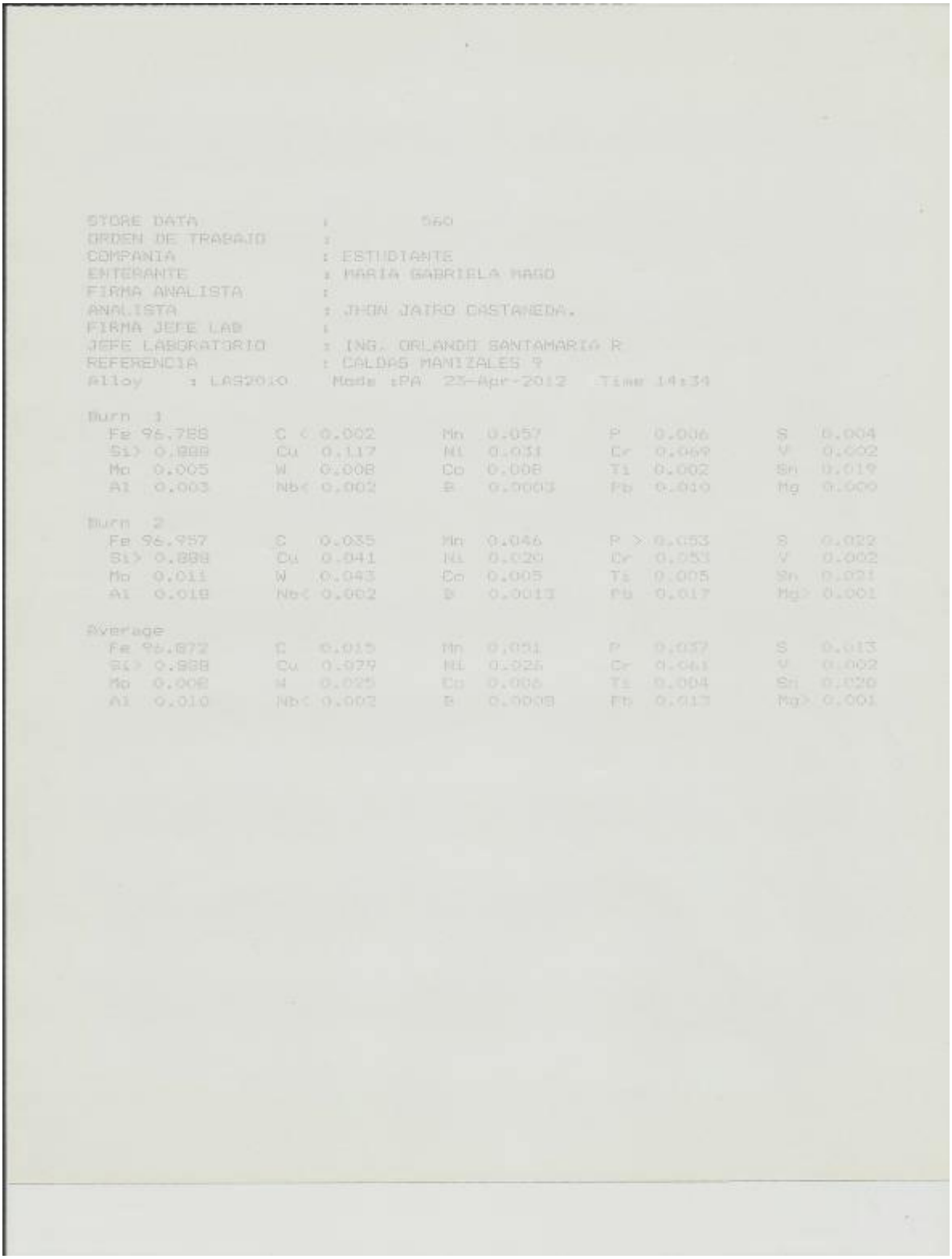
```
STORE DATA          :       559
ORDEN DE TRABAJO    :
COMPANIA            : ESTUDIANTE
ENTERANTE           : MARIA GABRIELA
FIRMA ANALISTA      :
ANALISTA            : JHON JAIRO CASTANEDA.
FIRMA JEFE LAB      :
JEFE LABORATORIO    : INB. ORLANDO SANTAMARIA R
REFERENCIA          : CALDAS MANIZALES 6
Alloy    : LAS2010    Mode :PA  23-Apr-2012   Time 14:30

Burn  1
  Fe 97.646      C   0.077      Mn  0.047      P   0.031      S   0.020
  Si> 0.388      Cu  0.005      Ni  0.011      Cr  0.016      V < 0.000
  Mo  0.005      W   0.044      Co< 0.001      Ti  0.001      Sn< 0.001
  Al  0.002      Nb< 0.002      B   0.0003     Pb  0.002      Mg> 0.001

Burn  2
  Fe 98.008      C < 0.002      Mn  0.048      P   0.013      S   0.007
  Si> 0.388      Cu  0.005      Ni  0.013      Cr  0.017      V   0.001
  Mo  0.007      W < 0.005      Co  0.002      Ti  0.002      Sn  0.001
  Al  0.005      Nb< 0.002      B   0.0002     Pb  0.008      Mg> 0.001

Average
  Fe 97.827      C   0.037      Mn  0.048      P   0.022      S   0.013
  Si> 0.388      Cu  0.005      Ni  0.012      Cr  0.016      V < 0.000
  Mo  0.006      W   0.020      Co  0.001      Ti  0.001      Sn< 0.001
  Al  0.004      Nb< 0.002      B   0.0003     Pb  0.005      Mg> 0.001
```

Gráfico 308. Región Caldas. Tipo de Falla: Arco eléctrico. Causa: Cortocircuito Externo. Fuente: Laboratorio de Metalografía de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.



STORE DATA : 560
ORDEN DE TRABAJO :
COMPANIA : ESTUDIANTE
ENTERANTE : MARIA GABRIELA HAGO
FIRMA ANALISTA :
ANALISTA : JHON JAIRO CASTANEDA.
FIRMA JEFE LAB :
JEFE LABORATORIO : ING. ORLANDO SANTAMARIA R
REFERENCIA : CALDAS MANIZALES 9
Alloy : LAS2010 Mode :PA 25-Apr-2012 Time 14:34

Burn 1

Fe	96.788	C	< 0.002	Mn	0.057	P	0.006	S	0.004
Si>	0.888	Cu	0.117	Ni	0.031	Cr	0.069	V	0.002
Mo	0.005	W	0.008	Co	0.008	Ti	0.002	Sn	0.019
Al	0.003	Nb<	0.002	B	0.0003	Pb	0.010	Mg	0.000

Burn 2

Fe	96.957	C	0.035	Mn	0.046	P >	0.053	S	0.022
Si>	0.888	Cu	0.041	Ni	0.020	Cr	0.053	V	0.002
Mo	0.011	W	0.043	Co	0.005	Ti	0.005	Sn	0.021
Al	0.018	Nb<	0.002	B	0.0013	Pb	0.017	Mg>	0.001

Average

Fe	96.872	C	0.015	Mn	0.051	P	0.037	S	0.013
Si>	0.938	Cu	0.079	Ni	0.026	Cr	0.061	V	0.002
Mo	0.008	W	0.025	Co	0.006	Ti	0.004	Sn	0.020
Al	0.010	Nb<	0.002	B	0.0008	Pb	0.013	Mg>	0.001

Gráfico 309. Región Caldas. Tipo de Falla: Arco eléctrico/térmica. Causa: Sobrecarga. Fuente: Laboratorio de Metalografía de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

STORE DATA : 551
ORDEN DE TRABAJO :
COMPANIA : ESTUDIANTE
ENTERANTE : MARIA GABRIELA MASO
FIRMA ANALISTA :
ANALISTA : JHON JAIRO CASTANEDA.
FIRMA JEFE LAB :
JEFE LABORATORIO : ING. ORLANDO SANTAMARIA R
REFERENCIA : CALIDAD MANIZALES 10
Alloy : LAS2010 Mode :PA 23-Apr-2012 Time 14:38

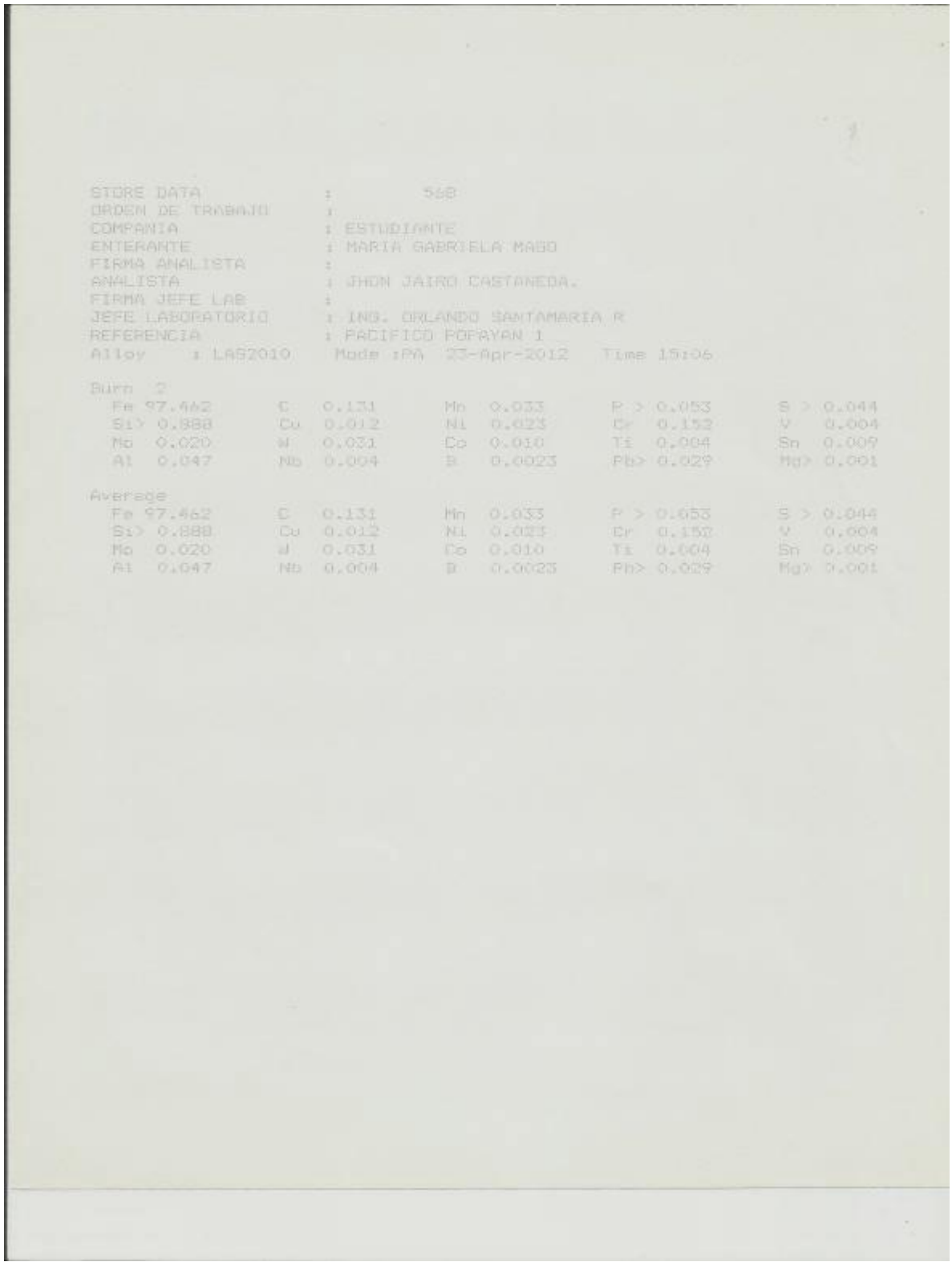
Burn 1

Fe	97.776	C	0.014	Mn	0.031	P	0.038	S	0.038
Si>	0.888	Cu	0.016	Ni	0.021	Cr	0.181	V	0.001
Mo	0.013	W	0.082	Co	0.003	Ti	0.002	Sn	0.004
Al	0.013	Nb<	0.002	B	0.0006	Pb	0.011	Mg>	0.001

Average

Fe	97.776	C	0.014	Mn	0.031	P	0.038	S	0.038
Si>	0.888	Cu	0.016	Ni	0.021	Cr	0.181	V	0.001
Mo	0.013	W	0.082	Co	0.003	Ti	0.002	Sn	0.004
Al	0.013	Nb<	0.002	B	0.0006	Pb	0.011	Mg>	0.001

Gráfico 310. Región Caldas. Tipo de Falla: Descarga parcial. Causa: Defecto de fabricación/Humedad. Fuente: Laboratorio de Metalografía de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.



STORE DATA : 568
ORDEN DE TRABAJO :
COMPANIA : ESTUDIANTE
ENTERANTE : MARIA GABRIELA MAGO
FIRMA ANALISTA :
ANALISTA : JHON JAIRO CASTANEDA.
FIRMA JEFE LAB :
JEFE LABORATORIO : ING. ORLANDO SANTAMARIA R
REFERENCIA : PACIFICO POPAYAN 1
Alloy : LAS2010 Mode :PA 23-Apr-2012 Time 15:06

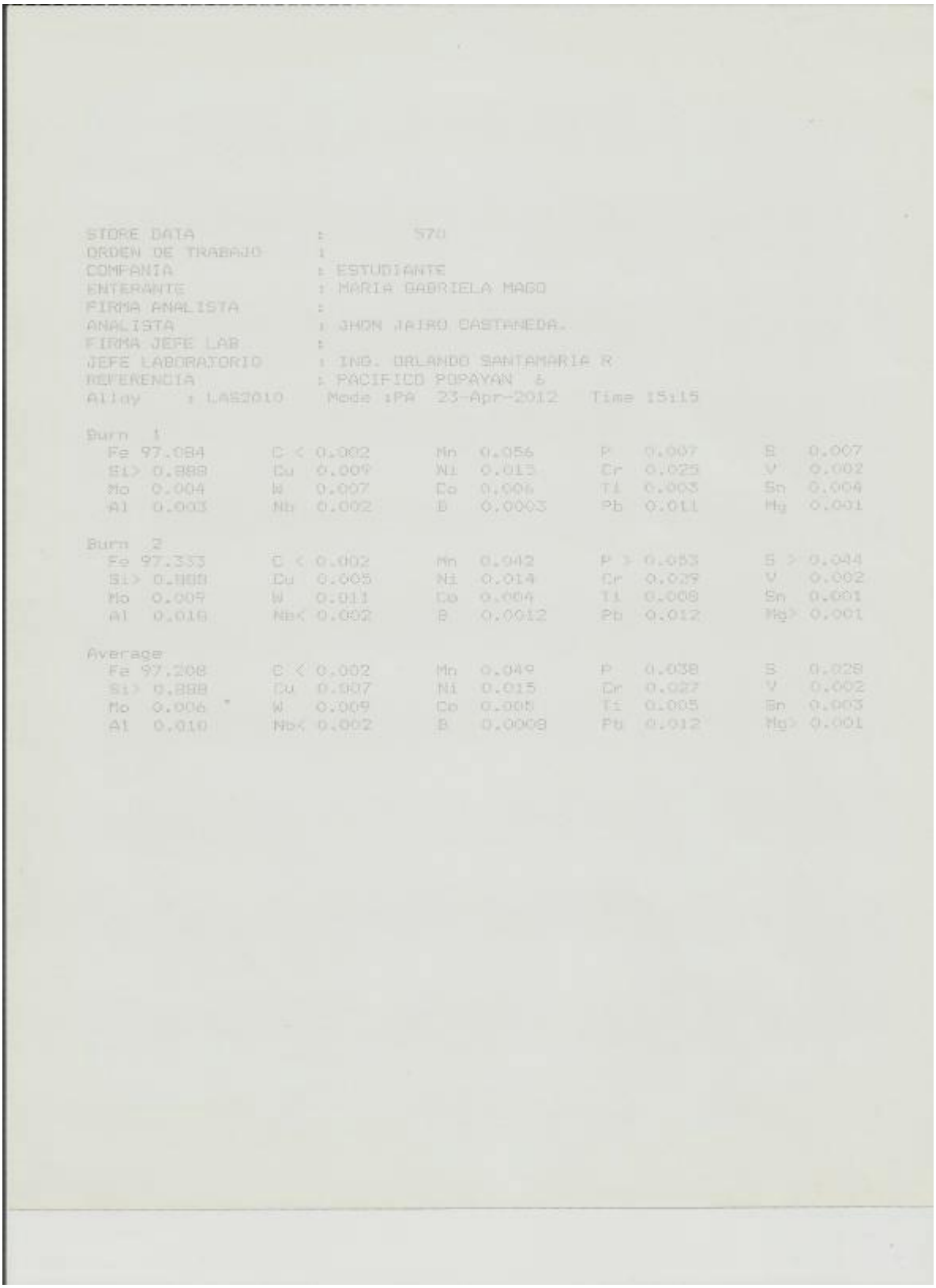
Burn 2

Fe 97.462	C 0.131	Mn 0.033	P > 0.053	S > 0.044	
Si> 0.888	Cu 0.012	Ni 0.023	Cr 0.152	V 0.004	
Mo 0.020	W 0.031	Co 0.010	Ti 0.004	Sn 0.009	
Al 0.047	Nb 0.004	B 0.0023	Pb> 0.029	Mg> 0.001	

Average

Fe 97.462	C 0.131	Mn 0.033	P > 0.053	S > 0.044	
Si> 0.888	Cu 0.012	Ni 0.023	Cr 0.152	V 0.004	
Mo 0.020	W 0.031	Co 0.010	Ti 0.004	Sn 0.009	
Al 0.047	Nb 0.004	B 0.0023	Pb> 0.029	Mg> 0.001	

Gráfico 311. Región Pacífico. Tipo de Falla: Térmica/Arco eléctrico. Causa: Sobrecarga. Fuente: Laboratorio de Metalografía de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.



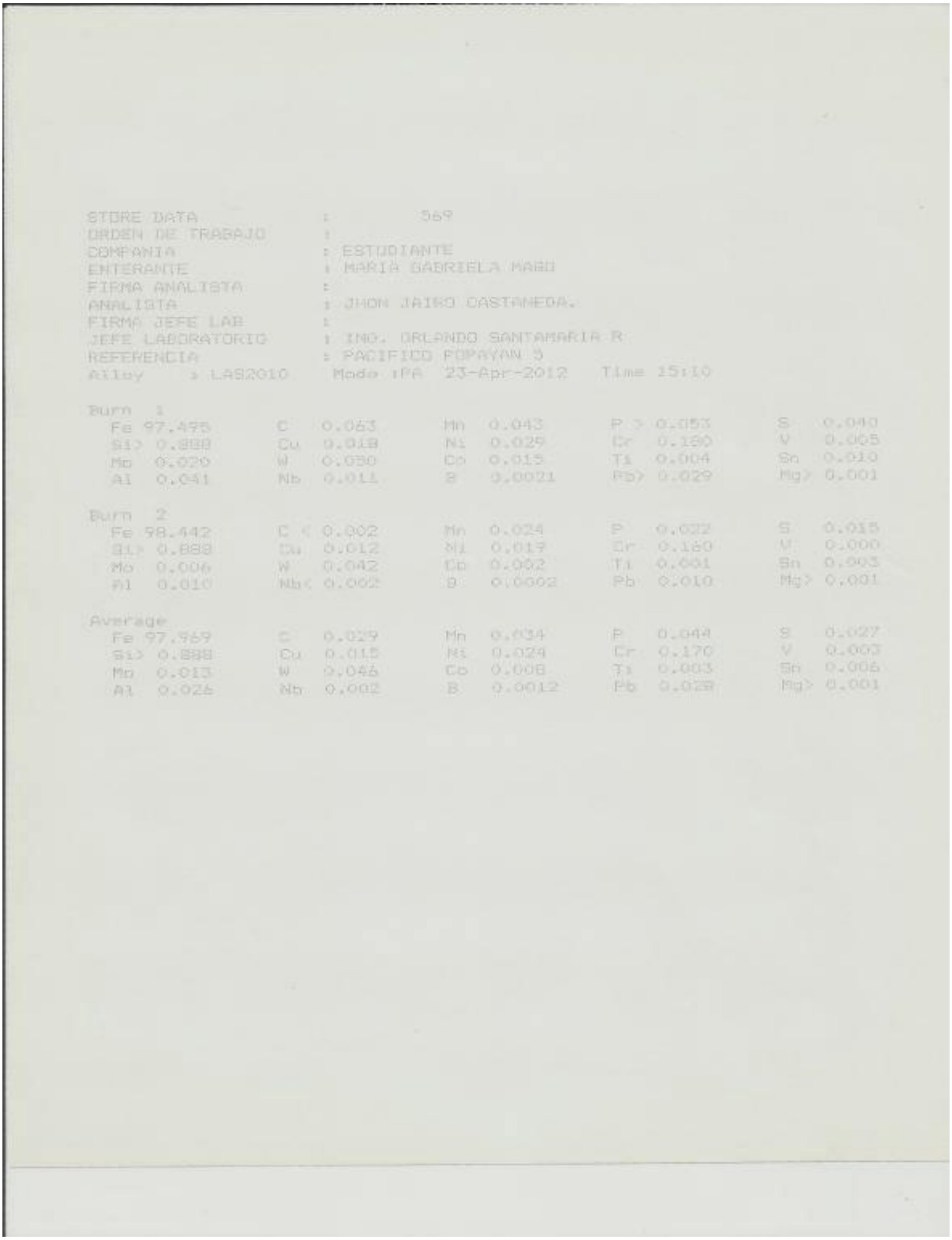
```
STORE DATA          :        570
ORDEN DE TRABAJO    :
COMPANIA            : ESTUDIANTE
ENTERANTE           : MARIA GABRIELA MAGO
FIRMA ANALISTA      :
ANALISTA            : JHON JAIRO CASTANEDA.
FIRMA JEFE LAB      :
JEFE LABORATORIO    : ING. ORLANDO SANTAMARIA R
REFERENCIA          : PACIFICO POPAYAN  6
Alloy    : LAS2010    Mode :PA  23-Apr-2012   Time 15:15

Burn  1
  Fe 97.084      C < 0.002      Mn  0.056      P   0.007      S   0.007
  Si> 0.888      Cu  0.009      Ni  0.015      Cr  0.025      V   0.002
  Mo  0.004      W   0.007      Co  0.006      Ti  0.003      Sn  0.004
  Al  0.003      Nb  0.002      B   0.0003     Pb  0.011      Mg  0.001

Burn  2
  Fe 97.333      C < 0.002      Mn  0.042      P > 0.053      S > 0.044
  Si> 0.888      Cu  0.005      Ni  0.014      Cr  0.029      V   0.002
  Mo  0.009      W   0.011      Co  0.004      Ti  0.008      Sn  0.001
  Al  0.010      Nb< 0.002      B   0.0012     Pb  0.012      Mg> 0.001

Average
  Fe 97.208      C < 0.002      Mn  0.049      P   0.038      S   0.028
  Si> 0.888      Cu  0.007      Ni  0.015      Cr  0.027      V   0.002
  Mo  0.006      W   0.009      Co  0.005      Ti  0.005      Sn  0.003
  Al  0.010      Nb< 0.002      B   0.0008     Pb  0.012      Mg> 0.001
```

Gráfico 312. Región Pacífico. Tipo de Falla: Arco eléctrico. Causa: Cortocircuito externo. Fuente: Laboratorio de Metalografía de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.



STORE DATA : 569
ORDEN DE TRABAJO :
COMPANIA : ESTUDIANTE
ENTERANTE : MARIA GABRIELA MARO
FIRMA ANALISTA :
ANALISTA : JHON JAIRO CASTANEDA.
FIRMA JEFE LAB :
JEFE LABORATORIO : ING. ORLANDO SANTAMARIA R.
REFERENCIA : PACIFICO POPAYAN 5
Alloy : LAS2010 Mode :PA 23-Apr-2012 Time 15:10

Burn 1

Fe	97.495	C	0.063	Mn	0.043	P	> 0.053	S	0.040
Si	> 0.888	Cu	0.018	Ni	0.029	Cr	0.180	V	0.005
Mo	0.020	W	0.030	Co	0.015	Ti	0.004	Sn	0.010
Al	0.041	Nb	0.011	B	0.0021	Pb	> 0.029	Mg	> 0.001

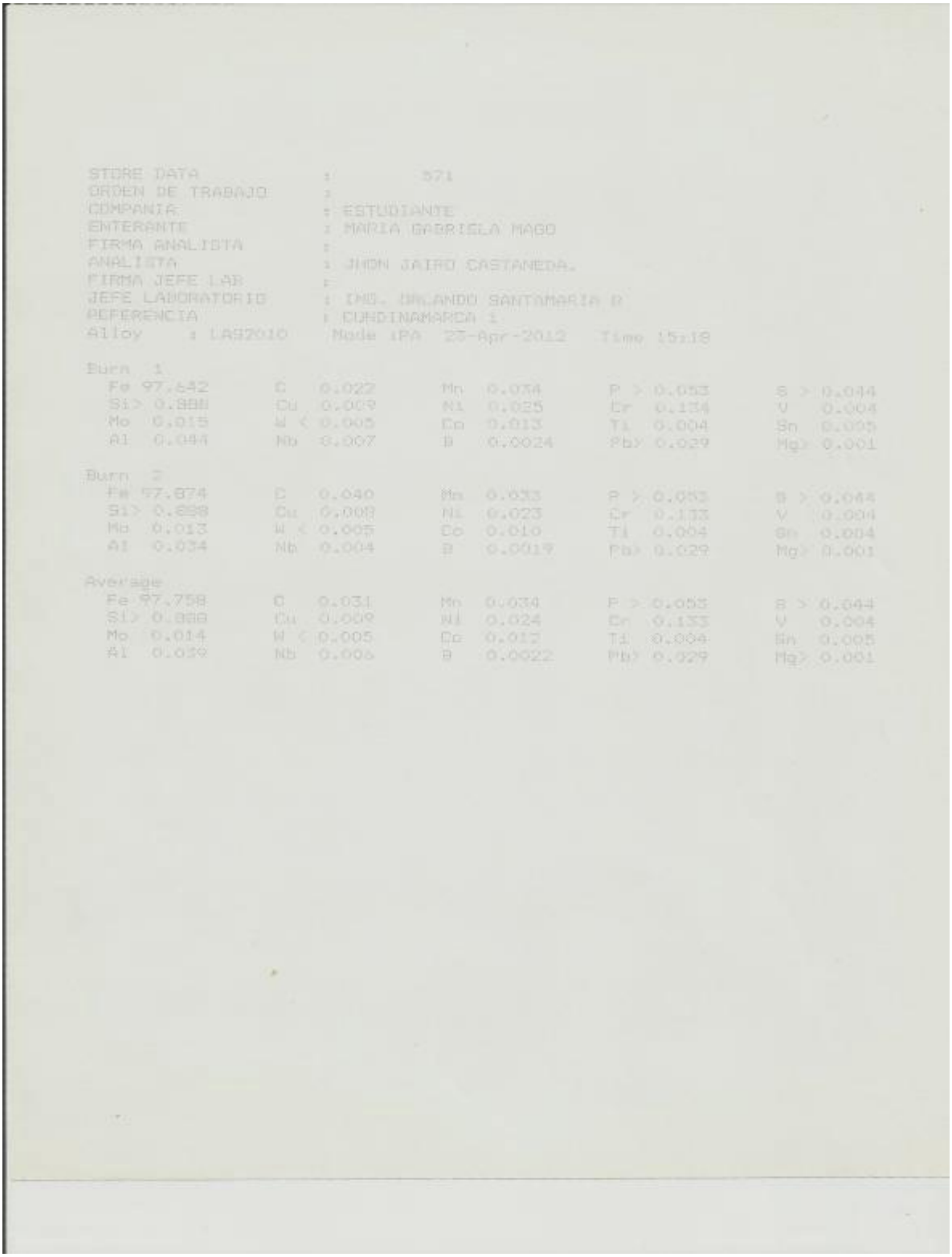
Burn 2

Fe	98.442	C	< 0.002	Mn	0.024	P	0.022	S	0.015
Si	> 0.888	Cu	0.012	Ni	0.019	Cr	0.160	V	0.000
Mo	0.006	W	0.042	Co	0.002	Ti	0.001	Sn	0.003
Al	0.010	Nb	< 0.002	B	0.0002	Pb	0.010	Mg	> 0.001

Average

Fe	97.969	C	0.029	Mn	0.034	P	0.044	S	0.027
Si	> 0.888	Cu	0.015	Ni	0.024	Cr	0.170	V	0.003
Mo	0.013	W	0.046	Co	0.008	Ti	0.003	Sn	0.006
Al	0.026	Nb	0.002	B	0.0012	Pb	0.029	Mg	> 0.001

Gráfico 313. Región Pacífico. Tipo de Falla: Descarga parcial. Causa: Sobretensión. Fuente: Laboratorio de Metalografía de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.



STORE DATA : 571
ORDEN DE TRABAJO :
COMPANIA : ESTUDIANTE
ENTERANTE : MARIA GABRIELA MAGO
FIRMA ANALISTA :
ANALISTA : JHON JAIRO CASTANEDA.
FIRMA JEFE LAB :
JEFE LABORATORIO : ING. ORLANDO SANTAMARIA D
REFERENCIA : CUNDINAMARCA 1
Alloy : LAS2010 Mode :PA 23-Apr-2012 Time 15:18

Burn 1

Fe 97.642	C 0.022	Mn 0.034	P > 0.053	S > 0.044	
Si> 0.888	Cu 0.009	Ni 0.025	Cr 0.134	V 0.004	
Mo 0.015	W < 0.005	Co 0.013	Ti 0.004	Sn 0.005	
Al 0.044	Nb 0.007	B 0.0024	Pb> 0.029	Mg> 0.001	

Burn 2

Fe 97.874	C 0.040	Mn 0.033	P > 0.053	S > 0.044	
Si> 0.888	Cu 0.009	Ni 0.023	Cr 0.133	V 0.004	
Mo 0.013	W < 0.005	Co 0.010	Ti 0.004	Sn 0.004	
Al 0.034	Nb 0.004	B 0.0019	Pb> 0.029	Mg> 0.001	

Average

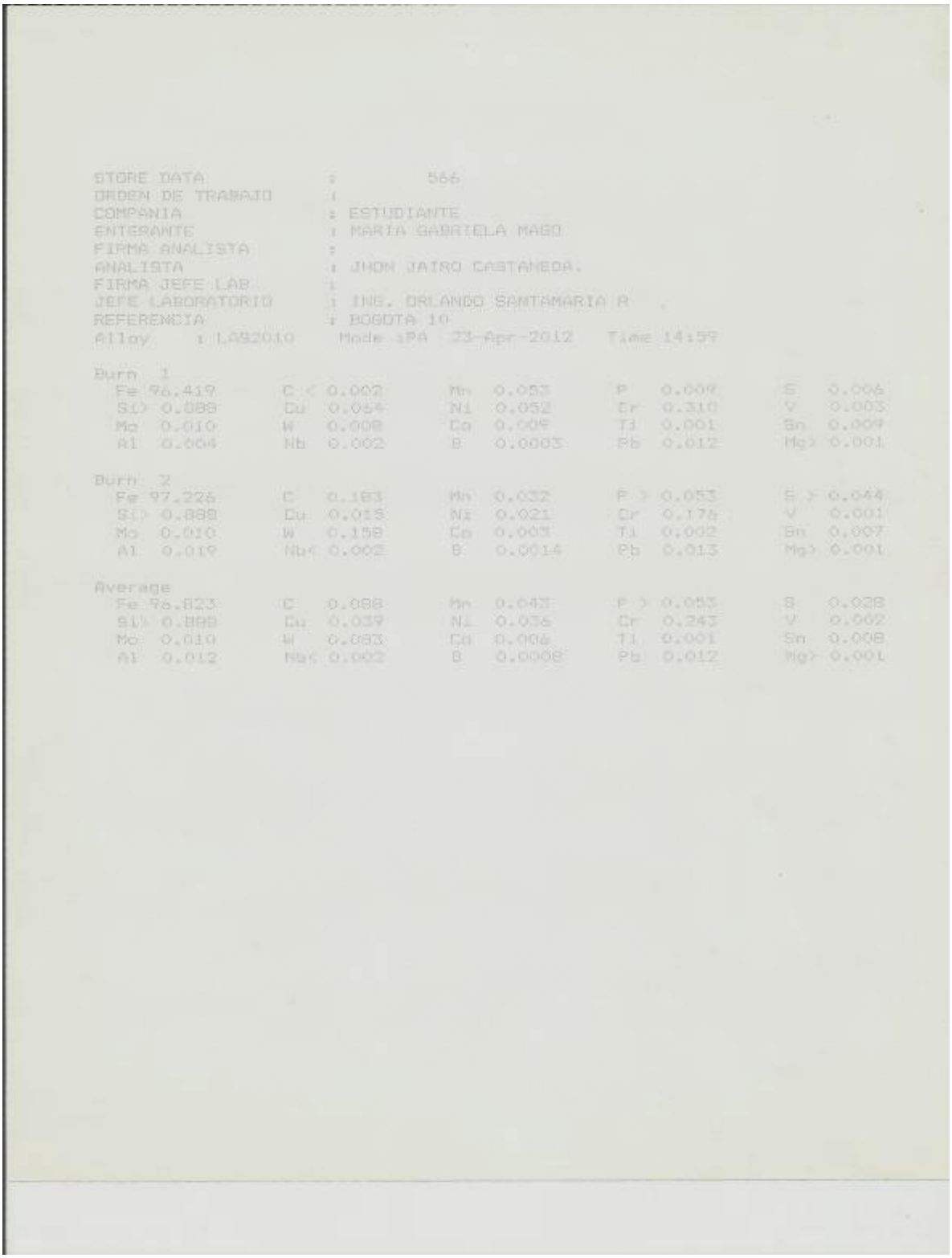
Fe 97.758	C 0.031	Mn 0.034	P > 0.053	S > 0.044	
Si> 0.888	Cu 0.009	Ni 0.024	Cr 0.133	V 0.004	
Mo 0.014	W < 0.005	Co 0.012	Ti 0.004	Sn 0.005	
Al 0.039	Nb 0.006	B 0.0022	Pb> 0.029	Mg> 0.001	

Gráfico 314. Región Cundinamarca. Tipo de Falla: Térmica. Causa: Sobrecarga. Fuente: Laboratorio de Metalografía de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

STORE DATA : 564
ORDEN DE TRABAJO :
COMPANIA : ESTUDIANTE
ENTERANTE : MARIA GABRIELA MASO
FIRMA ANALISTA :
ANALISTA : JHON JAIRO CASTANEDA.
FIRMA JEFE LAB :
JEFE LABORATORIO : ING. ORLANDO SANTAMARIA R
REFERENCIA : BOGOTA 4
Alloy : LAB2010 Mode :PA 23-Apr-2012 Time: 14:53

Burn 1											
Fe	96.628	C	< 0.002	Mn	0.036	P	0.007	S	0.006		
Si	> 0.888	Cu	0.053	Ni	0.036	Cr	0.261	V	0.002		
Mo	0.009	W	< 0.005	Co	0.007	Ti	0.001	Sn	0.007		
Al	0.005	Nb	< 0.002	B	0.0003	Pb	0.009	Mg	0.001		
Burn 2											
Fe	97.716	C	0.207	Mn	0.033	P	> 0.053	S	> 0.044		
Si	> 0.888	Cu	0.012	Ni	0.017	Cr	0.158	V	0.001		
Mo	0.006	W	0.027	Co	0.002	Ti	0.002	Sn	0.005		
Al	0.018	Nb	< 0.002	B	0.0089	Pb	0.014	Mg	> 0.001		
Average											
Fe	97.172	C	0.102	Mn	0.034	P	> 0.053	S	0.027		
Si	> 0.888	Cu	0.033	Ni	0.027	Cr	0.209	V	0.001		
Mo	0.008	W	0.016	Co	0.005	Ti	0.002	Sn	0.005		
Al	0.011	Nb	< 0.002	B	0.0046	Pb	0.011	Mg	> 0.001		

Gráfico 315. Región Bogotá. Tipo de Falla: Arco eléctrico/Térmica. Causa: Sobrecarga. Fuente: Laboratorio de Metalografía de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.



STORE DATA : 566
ORDEN DE TRABAJO :
COMPANIA : ESTUDIANTE
ENTERANTE : MARIA GABRIELA MAGO
FIRMA ANALISTA :
ANALISTA : JHON JAIRO CASTANEDA.
FIRMA JEFE LAB :
JEFE LABORATORIO : ING. ORLANDO SANTAMARIA R
REFERENCIA : BOGOTA 10
Alloy : LAS2010 Mode :PA 23-Apr-2012 Time 14:59

Burn 1

Fe	96.419	C	< 0.002	Mn	0.053	P	0.009	S	0.006
Si	> 0.888	Cu	0.054	Ni	0.052	Cr	0.310	V	0.003
Mo	0.010	W	0.008	Co	0.009	Ti	0.001	Sn	0.009
Al	0.004	Nb	0.002	B	0.0003	Pb	0.012	Mg	> 0.001

Burn 2

Fe	97.226	C	0.183	Mn	0.032	P	> 0.053	S	> 0.044
Si	> 0.888	Cu	0.015	Ni	0.021	Cr	0.176	V	0.001
Mo	0.010	W	0.158	Co	0.003	Ti	0.002	Sn	0.007
Al	0.019	Nb	< 0.002	B	0.0014	Pb	0.013	Mg	> 0.001

Average

Fe	96.823	C	0.088	Mn	0.043	P	> 0.053	S	0.028
Si	> 0.888	Cu	0.039	Ni	0.036	Cr	0.243	V	0.002
Mo	0.010	W	0.083	Co	0.006	Ti	0.001	Sn	0.008
Al	0.012	Nb	< 0.002	B	0.0008	Pb	0.012	Mg	> 0.001

Gráfico 316. Región Bogotá. Tipo de Falla: Arco Eléctrico. Causa: Sobretensión. Fuente: Laboratorio de Metalografía de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

STORE DATA : 567
ORDEN DE TRABAJO :
COMPANIA : ESTUDIANTE
ENTERANTE : MARIA GABRIELA HAGO
FIRMA ANALISTA :
ANALISTA : JHON JAIRO CASTANEDA.
FIRMA JEFE LAB :
JEFE LABORATORIO : ING. ORLANDO SANTAMARIA R
REFERENCIA : BORRITA 14
Alloy : LAB2010 Mode :PA 23-Apr-2012 Time 15:02

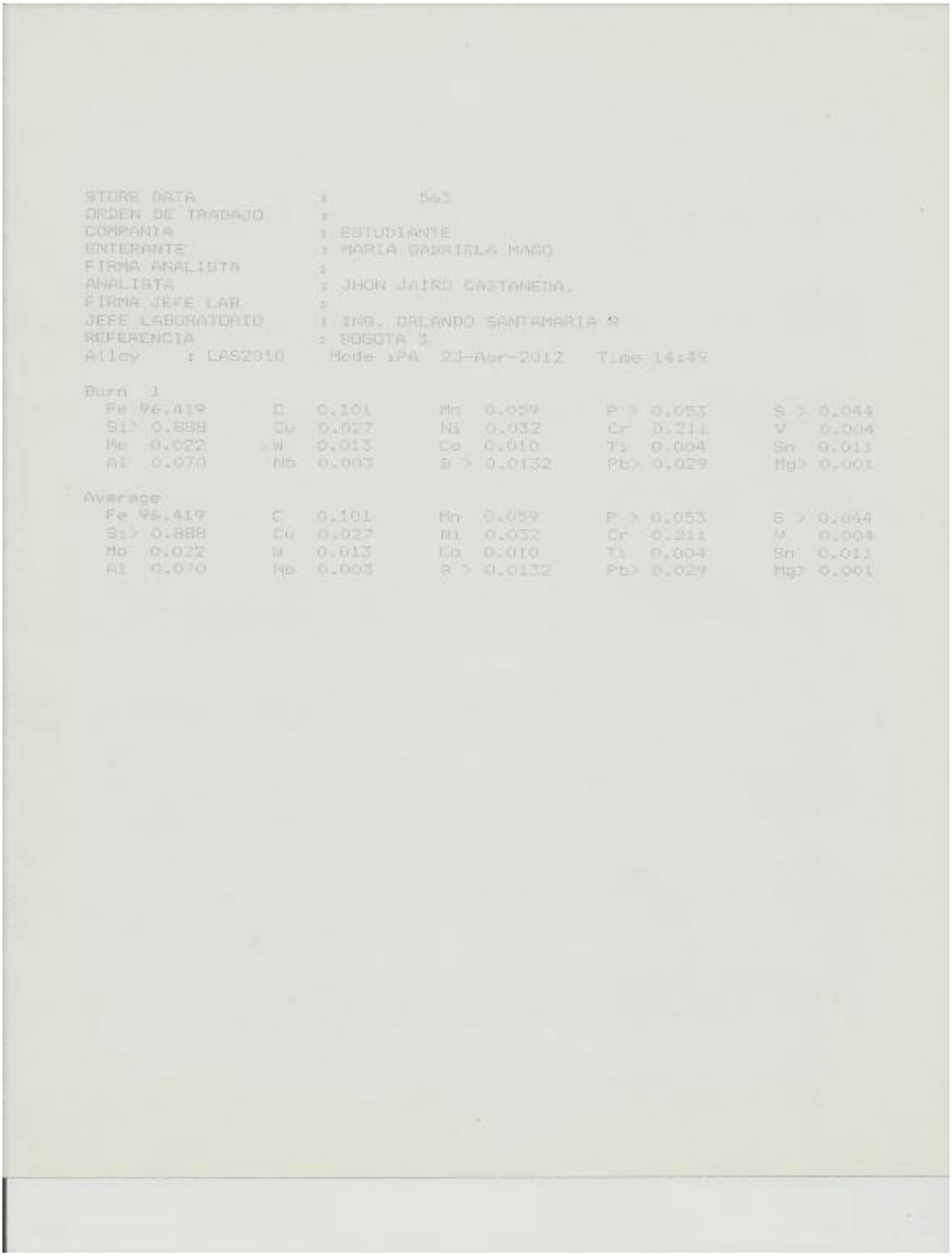
Burn 1

Fe 97.959	C 0.062	Mn 0.041	P 0.050	S 0.016	
Si> 0.868	Cu 0.020	Ni 0.014	Cr 0.021	V < 0.000	
Mo 0.001	W 0.237	Co< 0.001	Ti 0.004	Sn 0.090	
Al 0.011	Nb< 0.002	B 0.0005	Pb 0.005	Mg> 0.001	

Average

Fe 97.959	C 0.062	Mn 0.041	P 0.050	S 0.016	
Si> 0.868	Cu 0.020	Ni 0.014	Cr 0.021	V < 0.000	
Mo 0.001	W 0.237	Co< 0.001	Ti 0.004	Sn 0.090	
Al 0.011	Nb< 0.002	B 0.0005	Pb 0.005	Mg> 0.001	

Gráfico 317. Región Bogotá. Tipo de Falla: Arco eléctrico. Causa: Cortocircuito externo. Fuente: Laboratorio de Metalografía de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.



STORE DATA : 543
ORDEN DE TRABAJO :
COMPANIA : ESTUDIANTE
ENTERANTE : MARIA GABRIELA MAGO
FIRMA ANALISTA :
ANALISTA : JHON JAIRO CASTANEDA.
FIRMA JEFE LAB :
JEFE LABORATORIO : ING. ORLANDO SANTAMARIA S
REFERENCIA : BOGOTA 3
Alloy : LAS2010 Mode :PA 23-Apr-2012 Time 14:49

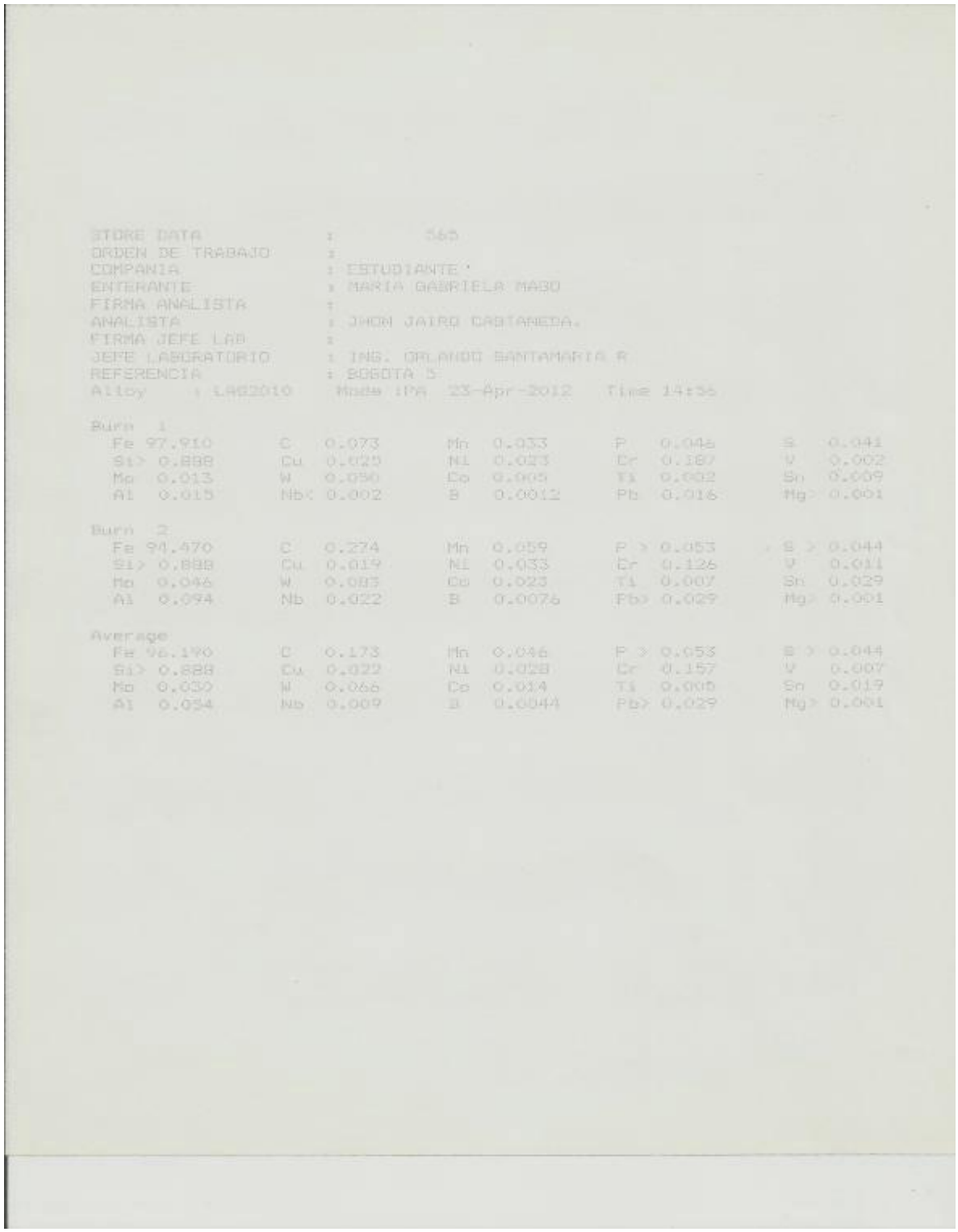
Burn 1

Fe 96.419	C 0.101	Mn 0.059	P > 0.053	S > 0.044	
Si> 0.888	Cu 0.027	Ni 0.032	Cr 0.211	V 0.004	
Mo 0.022	W 0.013	Co 0.010	Ti 0.004	Sn 0.011	
Al 0.070	Nb 0.003	B > 0.0132	Pb> 0.029	Mg> 0.001	

Average

Fe 96.419	C 0.101	Mn 0.059	P > 0.053	S > 0.044	
Si> 0.888	Cu 0.027	Ni 0.032	Cr 0.211	V 0.004	
Mo 0.022	W 0.013	Co 0.010	Ti 0.004	Sn 0.011	
Al 0.070	Nb 0.003	B > 0.0132	Pb> 0.029	Mg> 0.001	

Gráfico 318. Región Bogotá. Tipo de Falla: Descarga parcial. Causa: Sobretensión. Fuente: Laboratorio de Metalografía de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.



STORE DATA : 565
ORDEN DE TRABAJO :
COMPANIA : ESTUDIANTE
ENTERANTE : MARIA GABRIELA MAGO
FIRMA ANALISTA :
ANALISTA : JHON JAIRO CASTANEDA.
FIRMA JEFE LAB :
JEFE LABORATORIO : ING. ORLANDO SANTAMARIA R
REFERENCIA : BOGOTA 5
Alloy : LAB2010 Mode IPA 23-Apr-2012 Time 14:56

Burn 1

Fe	97.910	C	0.073	Mn	0.033	P	0.046	S	0.041
Si	0.888	Cu	0.025	Ni	0.023	Cr	0.187	V	0.002
Mo	0.013	W	0.050	Co	0.005	Ti	0.002	Sn	0.009
Al	0.015	Nb	0.002	B	0.0012	Pb	0.016	Mg	0.001

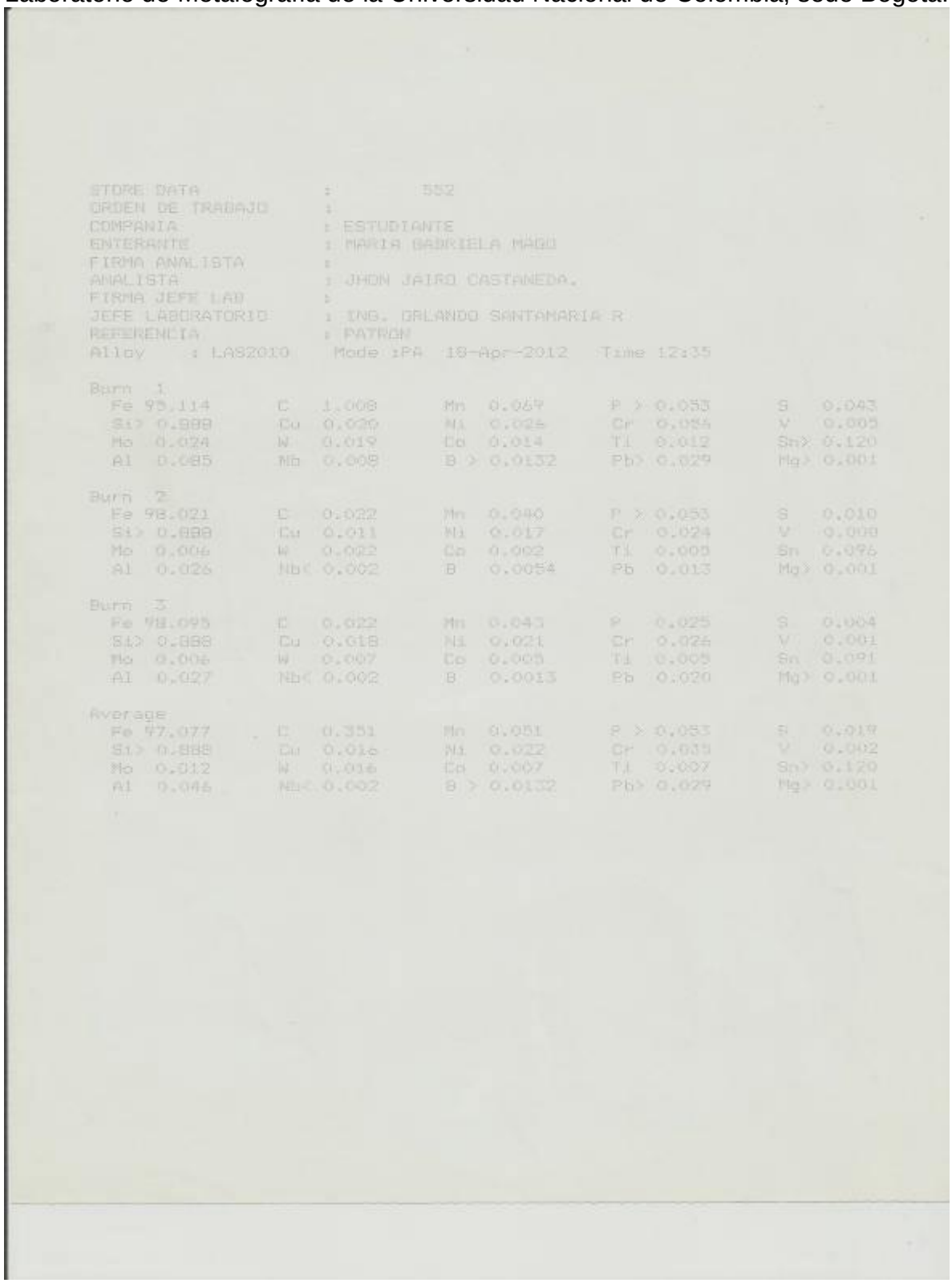
Burn 2

Fe	94.470	C	0.274	Mn	0.059	P	0.053	S	0.044
Si	0.888	Cu	0.019	Ni	0.033	Cr	0.126	V	0.011
Mo	0.046	W	0.083	Co	0.023	Ti	0.007	Sn	0.029
Al	0.094	Nb	0.022	B	0.0076	Pb	0.029	Mg	0.001

Average

Fe	96.190	C	0.173	Mn	0.046	P	0.053	S	0.044
Si	0.888	Cu	0.022	Ni	0.028	Cr	0.157	V	0.007
Mo	0.030	W	0.066	Co	0.014	Ti	0.005	Sn	0.019
Al	0.054	Nb	0.009	B	0.0044	Pb	0.029	Mg	0.001

Gráfico 319. Región Bogotá. Tipo de Falla: Térmica. Causa: Sobrecarga. Fuente: Laboratorio de Metalografía de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.



STORE DATA : 552
ORDEN DE TRABAJO :
COMPANIA : ESTUDIANTE
ENTERANTE : MARIA GABRIELA MAGO
FIRMA ANALISTA :
ANALISTA : JHON JAIRO CASTANEDA.
FIRMA JEFE LAB :
JEFE LABORATORIO : ING. ORLANDO SANTAMARIA R
REFERENCIA : PATRON
Alloy : LAS2010 Mode :PA 18-Apr-2012 Time 12:35

Burn 1

Fe	95.114	C	1.008	Mn	0.069	P	> 0.053	S	0.043
Si	> 0.888	Cu	0.020	Ni	0.026	Cr	0.056	V	0.005
Mo	0.024	W	0.019	Co	0.014	Ti	0.012	Sn	> 0.120
Al	0.085	Nb	0.009	B	> 0.0132	Pb	> 0.029	Mg	> 0.001

Burn 2

Fe	98.021	C	0.022	Mn	0.040	P	> 0.053	S	0.010
Si	> 0.888	Cu	0.011	Ni	0.017	Cr	0.024	V	0.000
Mo	0.006	W	0.022	Co	0.002	Ti	0.005	Sn	0.096
Al	0.026	Nb	< 0.002	B	0.0054	Pb	0.013	Mg	> 0.001

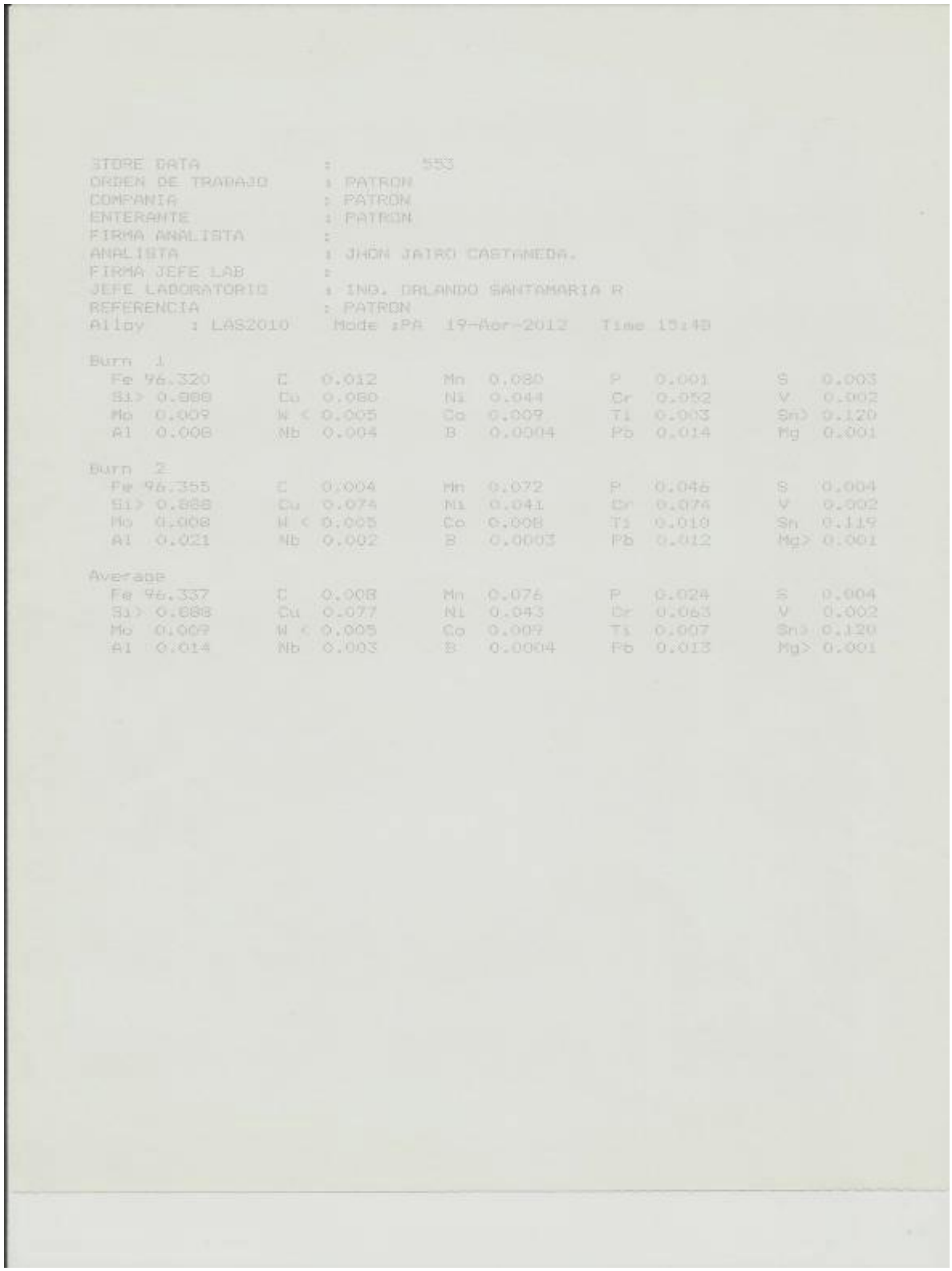
Burn 3

Fe	98.095	C	0.022	Mn	0.043	P	0.025	S	0.004
Si	> 0.888	Cu	0.018	Ni	0.021	Cr	0.026	V	0.001
Mo	0.006	W	0.007	Co	0.005	Ti	0.005	Sn	0.091
Al	0.027	Nb	< 0.002	B	0.0013	Pb	0.020	Mg	> 0.001

Average

Fe	97.077	C	0.351	Mn	0.051	P	> 0.053	S	0.019
Si	> 0.888	Cu	0.016	Ni	0.022	Cr	0.035	V	0.002
Mo	0.012	W	0.016	Co	0.007	Ti	0.007	Sn	> 0.120
Al	0.046	Nb	< 0.002	B	> 0.0132	Pb	> 0.029	Mg	> 0.001

Gráfico 320. Muestra Patrón. Fuente: Laboratorio de Metalografía de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.



```
STORE DATA          :        553
ORDEN DE TRABAJO    : PATRON
COMPANIA            : PATRON
ENTERANTE           : PATRON
FIRMA ANALISTA      :
ANALISTA            : JHON JAIRO CASTAÑEDA.
FIRMA JEFE LAB      :
JEFE LABORATORIO    : ING. ORLANDO SANTAMARIA R
REFERENCIA          : PATRON
Alloy    : LAS2010    Mode :PA  19-Apr-2012   Time 15:40

Burn  1
  Fe 96.320      C   0.012      Mn  0.080      P   0.001      S   0.003
  Si> 0.688      Cu  0.080      Ni  0.044      Cr  0.052      V   0.002
  Mo  0.009      W < 0.005      Co  0.009      Ti  0.003      Sn> 0.120
  Al  0.008      Nb  0.004      B   0.0004     Pb  0.014      Mg  0.001

Burn  2
  Fe 96.355      C   0.004      Mn  0.072      P   0.046      S   0.004
  Si> 0.688      Cu  0.074      Ni  0.041      Cr  0.074      V   0.002
  Mo  0.008      W < 0.005      Co  0.008      Ti  0.010      Sn  0.119
  Al  0.021      Nb  0.002      B   0.0003     Pb  0.012      Mg> 0.001

Average
  Fe 96.337      C   0.008      Mn  0.076      P   0.024      S   0.004
  Si> 0.688      Cu  0.077      Ni  0.043      Cr  0.063      V   0.002
  Mo  0.009      W < 0.005      Co  0.009      Ti  0.007      Sn> 0.120
  Al  0.014      Nb  0.003      B   0.0004     Pb  0.013      Mg> 0.001
```

Anexo N° 5

Gráfico 321. Muestra Patrón. Fuente: Laboratorio de Metalografía de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

Script en Matlab© para las aproximaciones gráficas.

Construcción del polinomio interpolador de Newton de grado menor o igual que N que pasa por los puntos $(X\kappa, Y\kappa) = (X\kappa, f(X\kappa))$ para $K=0,1,\ldots\ldots,N$:

$$P(x) = d0,0 + d1,1(x-xo) + d2,2(x-xo)(x-x1)+\ldots.+dn,n(x-xo)(x-x1)\ldots(x-xn-1).$$

```
function [C,D]=newpoly(X,Y)
%Datos
%  - X es un vector con lista de las abscisas
%  - Y es un vector con lista de las ordenadas
%Resultados
%  - C es un vector que contiene los coeficientes
%       del polinomio interpolador de Newton,
escrito
%    de forma habitual, en potencias decrecientes
de x
%  - D es la tabla de diferencias divididas
n= length(X);
D= zeros(n,n);
D(:,1)=Y';
```

```
% Usamos la formula (20) para hallar
% la tabla de diferencias divididas
for j=2:n
    for k=j:n
    D(k,j)=(D(k,j-1)-D(k-1,j-1))/(X(k)-X(k-j+1));
    end
end
% Calculo del vector que contiene los coeficientes
% del polinonio interpolador de Newton, escrito
% de forma habitual, en potencias decrecientes de X
C=D(n,n);
for k=(n-1):-1:1
    C=conv(C, poly(X(k)));
    m=length(C);
    C(m)=C(m)+D(k,k);
end
```

Recta de regresión *y=Ax+B que mejor se ajusta en el sentido de los mínimos cuadrados a los N datos (X1,Y1),....,(Xn,Yn).*

```
function[A,B]=lsline(X,Y)
%Datos
%    - X es el vector de abscisas 1 x n
%    - Y es el vector de ordenadas 1 x n
%Resultados
%    - A es el coeficiente de x en Ax + B
%    - B es el termino independiente en Ax + B
xmean=mean(X);
ymean=mean(Y);
sumx2=(X-xmean)*(X-xmean)';
sumxy=(Y-ymean)*(X-xmean)';
A=sumxy/sumx2;
B=ymean-A*xmean;
```

Polinomio ôptimo en Minimos Cuadrados. Construcciòn del polinomio de grado *M* dado por

$$Pm(x) = c1 + c2x+c3x^2+...+cmx^{(m-1)}+cm+1^{(xm)}$$

que mejor se ajusta en el sentido de los mínimos cuadrados a las N parejas de datos{(xk,yk)}^N k=1.

```
function C = lspoly(X,Y,M)
% Datos
%      - X es el vector de orden 1 x n de las abscisas
%      - Y es el vector de orden 1 x n de las ordenadas
%      - M es el grado del polinomio optimo
% Resultado
%      - C es el vector de coeficientes del polinomio
%        en potencias decrecientes de x
n=length(X);
B=zeros(1:M+1);
F=zeros(n,M+1);
% Se rellenan las columnas de F con las potencias de X
```

Anexo N° 6

```
for k=1:M+1
    F(:,k)=X'.^(k-1);
end
% Resoluciòn de las ecuaciones normales
A=F'*F;
B=F'*Y';
C=A\B;
C=flipud(C);
```

Plano de Fabricación del Transformador de 5 kVA.

Apéndice N° 1

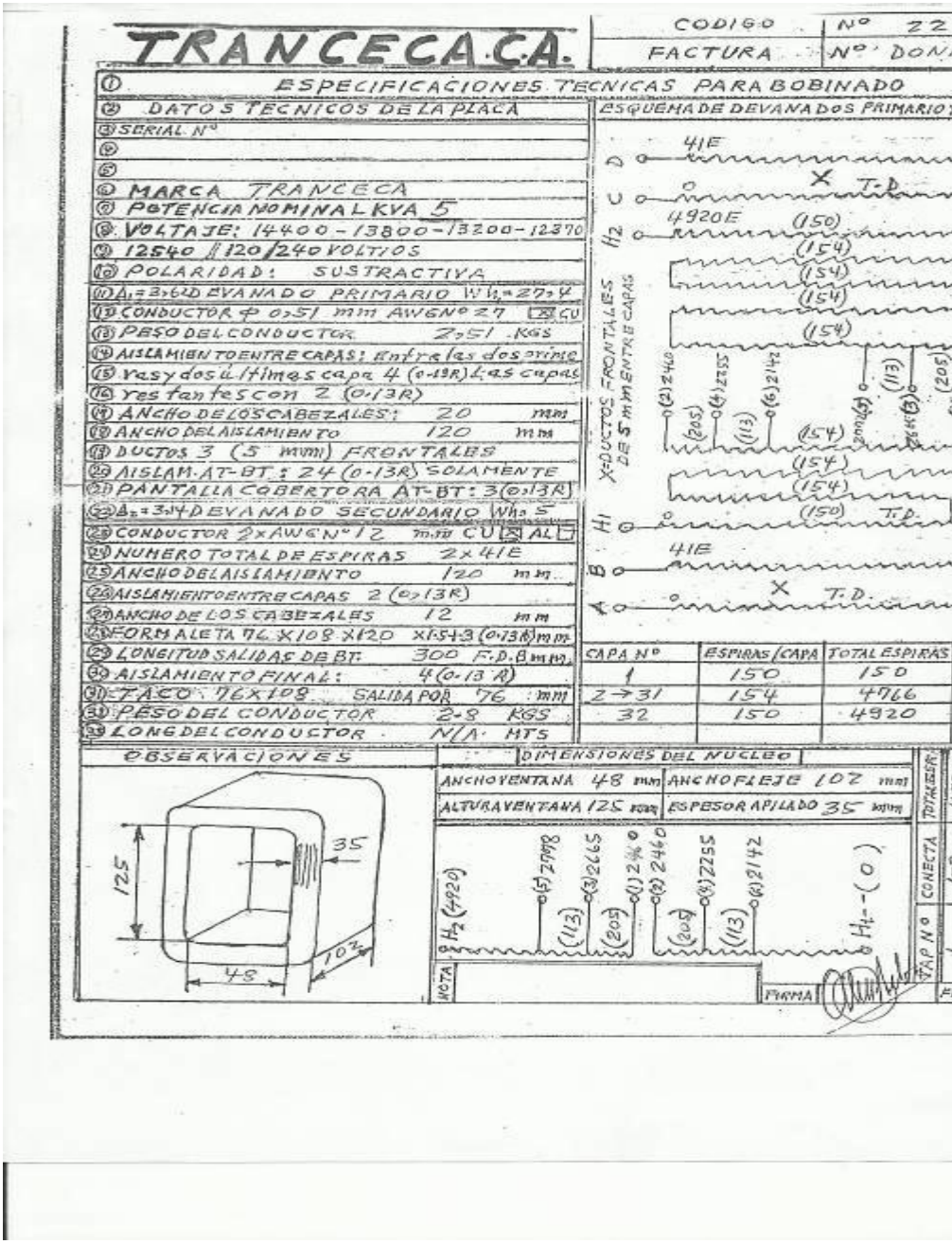


Gráfico 322. Plano del Transformador Cap. 5 kVA.
Fuente: Empresa TRANCECA, C.A

Ecuaciones del Circuito Equivalente del Transformador de Distribución.

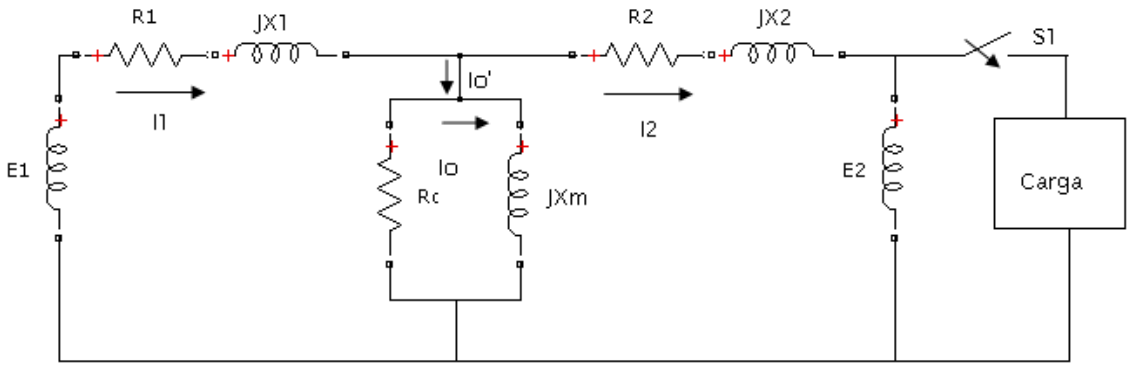


Gráfico 323. Circuito Equivalente de Transformador de Distribución.
Fuente: M. Mago (2013).

Antes de resolver las ecuaciones del circuito equivalente indicado en el grafico xx es importante realizar las siguientes anotaciones:

$E_1 = V_1(t)$, $E_2 = V_2(t)$, además, $jX_1 = jWL_1$, $jX_2 = jWL_2$ y $jX_m = jWL_m$.

Resolvemos como se indica para un circuito equivalente sin carga o en condición de vacio:

Ecuación Nº1 para I_1:

$$V_{1(t)} = i_{1(t)}(R_1 + R_C) + L_1 \frac{di_{1(t)}}{dt} - i_{o(t)} R_C \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (1)$$

Ecuación Nº2 para I_0:

$$0 = -i_{1(t)} R_C - L_m \frac{di_{2(t)}}{dt} + i_{0(t)} R_C + L_m \frac{di_{0(t)}}{dt} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2)$$

Ecuación Nº3 para I_2:

$$-V_{2(t)} = i_{2(t)} R_2 + (L_2 + L_m) \frac{di_{2(t)}}{dt} - L_m \frac{di_{0(t)}}{dt} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (3)$$

De la ecuación Nº 1 despejamos $i_{o(t)}$ obtenemos lo siguiente:

$$i_{0(t)} = \left(\frac{R_1 + R_C}{R_C}\right) i_{1(t)} + \frac{L_{1(t)}}{R_C} \frac{di_{1(t)}}{dt} - \frac{V_{1(t)}}{R_C} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (4)$$

De la ecuación Nº2 despejamos $di_{o(t)}/dt$ obtenemos lo siguiente:

$$\frac{di_{0(t)}}{dt} = -\frac{L_1}{L_m}\frac{di_{1(t)}}{dt} + \frac{di_{2(t)}}{dt} + \left(\frac{1}{L_m}\right) V_{1(t)} - i_{1(t)}\left(\frac{R_1}{L_m}\right) \ldots\ldots\ldots(5)$$

De la ecuación Nº 3 tambien despejamos $di_{0(t)}/dt$ obtenemos lo siguiente:

$$\frac{V_{2(t)}}{L_m} + i_{2(t)}\frac{R_2}{L_m} + \left(\frac{L_2 + L_m}{L_m}\right)\frac{di_{2(t)}}{dt} = \frac{di_{0(t)}}{dt} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(6)$$

Igualando las ecuaciones (5) y (6) nos queda asi:

$$-\frac{L_1}{L_m}\frac{di_{1(t)}}{dt} + \frac{di_{2(t)}}{dt} + \left(\frac{1}{L_m}\right) V_{1(t)} - i_{1(t)}\left(\frac{R_1}{L_m}\right) = \frac{V_{2(t)}}{L_m} + i_{2(t)}\frac{R_2}{L_m} + \left(\frac{L_2 + L_m}{L_m}\right)\frac{di_{2(t)}}{dt}$$

$$\left[1 - \frac{(L_2 + L_m)}{L_m}\right]\frac{di_{2(t)}}{dt} - \left(\frac{L_1}{L_m}\right)\frac{di_{1(t)}}{dt} = \left(\frac{1}{L_m}\right)\left[V_{2(T)} - V_{1(t)} + R_2\, i_{2(t)} + R_1\, i_{1(t)}\right]$$

$$-L_2\frac{di_{2(t)}}{dt} - L_1\frac{di_{1(t)}}{dt} = V_{2(t)} - V_{1(t)} + i_{2(t)}R_2 + i_{1(t)}R_1 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(7)$$

Recordando las relaciones fundamentales indicadas a continuación:

$$\frac{i_{1(t)}}{i_{2(t)}} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a} \qquad \frac{V_{1(t)}}{V_{2(t)}} = \frac{N_1}{N_2} = a$$

$$i_{1(t)} = \frac{1}{a}\, i_{2(t)} \qquad di_{1(t)} = \frac{1}{a}\, di_{2(t)}$$

Resolviendo la ecuación Nº 7 queda de la siguiente manera:

$$\left(-L_2 - \frac{L_1}{a}\right)\frac{di_{2(t)}}{dt} - \left(R_2 + \frac{R_1}{a}\right) i_{2(t)} = V_{2(t)} - V_{1(t)}$$

$$A' = -L_2 - \frac{L_1}{a} \qquad B' = R_2 + \frac{R_1}{a} \qquad V_{2(t)} = N_2\, \emptyset_{màx}\, 2\pi\, f\, Volts.$$

$$V_{1(t)} = N_1\, \emptyset_{màx}\, 2\pi\, f\, Volts. \qquad \emptyset_{màx} = Area\ B_{màx} = A\sqrt{\left(\frac{10^{11}\, P_t}{10^{11}\, K_h\, f + 2.2\, f^2\, \Delta^2}\right)}$$

$$K = A\sqrt{\left(\frac{10^{11}\, P_t}{10^{11}\, K_h\, f + 2.2\, f^2\, \Delta^2}\right)}\frac{2\pi\, f}{\sqrt{2}}\left[N_2 - N_1\right]$$

La ecuación diferencial propuesta queda asi:

$$(A')\frac{di_{2(t)}}{dt} - (B')\, i_{2(t)} = K$$

Resolviendo para determinar la solución homogénea y particular es como se indica a continuación:

$$i_{2(t)} = X \quad y \quad \frac{d_{x(t)}}{dt} = D \qquad (A')\frac{d_{x(t)}}{dt} - (B')\,x_{(t)} = K \qquad (A'D - B')\,X = K$$

$$Y_{h(t)} = e^{\left(-\frac{B'}{A'}\right)t} \qquad Y_{p(t)} = (A' - B')K$$

$$Y_{total} = Y_{h(t)} + Y_{p(t)} = e^{\left(-\frac{B'}{A'}\right)t} + K\,(A' - B')$$

El circuito equivalente con carga resistiva-inductiva

$$-L_2\frac{di_{2(t)}}{dt} - L_1\frac{di_{1(t)}}{dt} = V_{2(t)} - V_{1(t)} + i_{2(t)}R_2 + i_{1(t)}R_1$$

$$V_{2(t)} = -L_2\frac{di_{2(t)}}{dt} - L_1\frac{di_{1(t)}}{dt} + V_{1(t)} - i_{2(t)}R_2 - i_{1(t)}R_1$$

$$i_{2(t)}R_a + L_a\frac{di_{2(t)}}{dt} = -L_2\frac{di_{2(t)}}{dt} - L_1\frac{di_{1(t)}}{dt} + V_{1(t)} - i_{2(t)}R_2 - i_{1(t)}R_1$$

$$\left(-L_2 - L_a - \frac{L_1}{a}\right)\frac{di_{2(t)}}{dt} - i_{2(t)}\left(R_2 + R_a + \frac{R_1}{a}\right) = -V_{1(t)}$$

$$R = -L_2 - L_a - \frac{L_1}{a} \;; \quad S = R_2 + R_a + \frac{R_1}{a} \;; \quad P_t = P_{histeresis} + P_{focault} \;;$$

$$K' = -N_1 Area\left(\sqrt[2]{\frac{10^{11}P_t}{10^{11}K_H f + 2.2f^2\Delta^2}}\right)2\pi f$$

$$-R\,\frac{di_{2(t)}}{dt} - S\,i_{2(t)} = -K'$$

$$R\,\frac{di_{2(t)}}{dt} + S\,i_{2(t)} = K'$$

Circuito equivalente con carga resistiva:

$$T = -L_2 - \frac{L_1}{a} \;; \quad U = R_2 + R_a + \frac{R_1}{a}$$

$$-T\,\frac{di_{2(t)}}{dt} - S\,i_{2(t)} = -K'$$

$$T\,\frac{di_{2(t)}}{dt} + S\,i_{2(t)} = K'$$

Circuito equivalente con carga capacitiva

$$T\,\frac{di_{2(t)}}{dt} - U\,i_{2(t)} - H\int i_{2(t)}\,dt = K'$$

$$T\,\frac{di_{2(t)}^{2}}{dt} - U\,\frac{di_{2(t)}}{dt} - H\,i_{2(t)} = 0$$

	VALORES A UTILIZAR EN LAS ECUACIONES DIFERENCIALES									
Region Antioquia										
	Tipo de falla	A	B	R	S	T	U	H	K	K'
Muestra 1	Termica	-4,7487E-05	-0,09229096	-0,01336751	-10,461291	-4,74866E-05	-10,461291	1893,07224	-0,12771201	-0,1299724
Muestra 2	Descarga parcial	-4,7487E-05	-0,09229096	-0,01336751	-10,461291	-4,74866E-05	-10,461291	1893,07224	-0,12947509	-0,13176669
Muestra 3	Arco electrico	-4,7487E-05	-0,09229096	-0,01336751	-10,461291	-4,74866E-05	-10,461291	1893,07224	-0,13029139	-0,13259744
Region Caldas										
Muestra 5	Termica	-4,7487E-05	-0,09229096	-0,01336751	-10,461291	-4,74866E-05	-10,461291	1893,07224	-0,12947725	-0,13176888
Muestra 6	Arco electrico	-4,7487E-05	-0,09229096	-0,01336751	-10,461291	-4,74866E-05	-10,461291	1893,07224	-0,12986437	-0,13216286
Muestra 7	Arco electrico	-4,7487E-05	-0,09229096	-0,01336751	-10,461291	-4,74866E-05	-10,461291	1893,07224	-0,13016307	-0,13246684
Muestra 8	Descarga parcial	-4,7487E-05	-0,09229096	-0,01336751	-10,461291	-4,74866E-05	-10,461291	1893,07224	-0,13022777	-0,13253269
Region Pacifico										
Muestra 9	Termica	-4,7487E-05	-0,09229096	-0,01336751	-10,461291	-4,74866E-05	-10,461291	1893,07224	-0,1501695	-0,15282736
Muestra 10	Arco electrico	-4,7487E-05	-0,09229096	-0,01336751	-10,461291	-4,74866E-05	-10,461291	1893,07224	-0,13039384	-0,13270169
Muestra 11	Descarga parcial	-4,7487E-05	-0,09229096	-0,01336751	-10,461291	-4,74866E-05	-10,461291	1893,07224	-0,12994417	-0,13224406
Region Cundinamarca										
Muestra 12	Termica	-4,7487E-05	-0,09229096	-0,01336751	-10,461291	-4,74866E-05	-10,461291	1893,07224	-0,14076207	-0,14325343
Region Bogota										
Muestra 13	Arco electrico/Termica	-4,7487E-05	-0,09229096	-0,01336751	-10,461291	-4,74866E-05	-10,461291	1893,07224	-0,18291542	-0,18615286
Muestra 14	Arco electrico	-4,7487E-05	-0,09229096	-0,01336751	-10,461291	-4,74866E-05	-10,461291	1893,07224	-0,12913434	-0,1314199
Muestra 15	Arco electrico	-4,7487E-05	-0,09229096	-0,01336751	-10,461291	-4,74866E-05	-10,461291	1893,07224	-0,12960665	-0,13190057
Muestra 16	Descarga parcial	-4,7487E-05	-0,09229096	-0,01336751	-10,461291	-4,74866E-05	-10,461291	1893,07224	-0,12874829	-0,13102702
Muestra 17	Termica	-4,7487E-05	-0,09229096	-0,01336751	-10,461291	-4,74866E-05	-10,461291	1893,07224	-0,12794708	-0,13021163
Patron										
Muestra 18		-4,7487E-05	-0,09229096	-0,01336751	-10,461291	-4,74866E-05	-10,461291	1893,07224	-0,13692273	-0,13934614
Las ecuaciones diferenciales para determinar la corriente I2 quedan en funcion de:										
A, B y K	R, S y K'	T, U y K'	T, U, H							

Gráfica 324. Porcentaje de carbono
Fuente: M. Mago (2013).

Apéndice N° 2

			A	B	R	S	T	U	H	K
Region Antioquia										
	Tipo de falla									
Muestra 1	Termica		-4,7487E-05	-0,09229096	-0,01336751	-10,461291	-4,7487E-05	-10,461291	1893,07224	-0,1105078
Muestra 2	Descarga parcial		-4,7487E-05	-0,09229096	-0,01336751	-10,461291	-4,7487E-05	-10,461291	1893,07224	-0,1105078
Muestra 3	Arco electrico		-4,7487E-05	-0,09229096	-0,01336751	-10,461291	-4,7487E-05	-10,461291	1893,07224	-0,1105078
Region Caldas										
Muestra 5	Termica		-4,7487E-05	-0,09229096	-0,01336751	-10,461291	-4,7487E-05	-10,461291	1893,07224	-0,1105078
Muestra 6	Arco electrico		-4,7487E-05	-0,09229096	-0,01336751	-10,461291	-4,7487E-05	-10,461291	1893,07224	-0,1106046
Muestra 7	Arco electrico		-4,7487E-05	-0,09229096	-0,01336751	-10,461291	-4,7487E-05	-10,461291	1893,07224	-0,1105078
Muestra 8	Descarga parcial		-4,7487E-05	-0,09229096	-0,01336751	-10,461291	-4,7487E-05	-10,461291	1893,07224	-0,1107027
Region Pacifico										
Muestra 9	Termica		-4,7487E-05	-0,09229096	-0,01336751	-10,461291	-4,7487E-05	-10,461291	1893,07224	-0,1322221
Muestra 10	Arco electrico		-4,7487E-05	-0,09229096	-0,01336751	-10,461291	-4,7487E-05	-10,461291	1893,07224	-0,1107014
Muestra 11	Descarga parcial		-4,7487E-05	-0,09229096	-0,01336751	-10,461291	-4,7487E-05	-10,461291	1893,07224	-0,1107027
Region Cundinamarca										
Muestra 12	Termica		-4,7487E-05	-0,09229096	-0,01336751	-10,461291	-4,7487E-05	-10,461291	1893,07224	-0,1211713
Region Bogota										
Muestra 13	Arco electrico/Termica		-4,7487E-05	-0,09229096	-0,01336751	-10,461291	-4,7487E-05	-10,461291	1893,07224	-0,1648905
Muestra 14	Arco electrico		-4,7487E-05	-0,09229096	-0,01336751	-10,461291	-4,7487E-05	-10,461291	1893,07224	-0,1106046
Muestra 15	Arco electrico		-4,7487E-05	-0,09229096	-0,01336751	-10,461291	-4,7487E-05	-10,461291	1893,07224	-0,1106046
Muestra 16	Descarga parcial		-4,7487E-05	-0,09229096	-0,01336751	-10,461291	-4,7487E-05	-10,461291	1893,07224	-0,1106033
Muestra 17	Termica		-4,7487E-05	-0,09229096	-0,01336751	-10,461291	-4,7487E-05	-10,461291	1893,07224	-0,1106046
Patron										
Muestra 18			-4,7487E-05	-0,09229096	-0,01336751	-10,461291	-4,7487E-05	-10,461291	1893,07224	-0,1106046
A, B y K	R, S y K'	T, U y K'	T, U, H							

Gráfico 325. Pruebas Magnéticas.
Fuente: M. Mago (2013)

Los parámetros del circuito equivalente aproximado referido al lado secundario son los siguientes:

R_1=0.15933 Ω *$X_{1=}$ $X_{2\,=}$ j 0.017596* *frecuencia = 60 Hz.*
R_2= 0.08952 Ω cuando se trabaja con la carga resistiva la misma corresponde a: 11.521 Ω

Ecuaciones del Modelo de Estado.

Se trabaja con el circuito equivalente aproximado referido al lado secundario, además se ha simplificado la admitancia de magnetización. Las entradas son los voltajes V_1y V_2, los estados: el cambio en la reactancia de magnetización y en la reactancia de la bobina del lado secundario. A continuación las ecuaciones utilizadas:

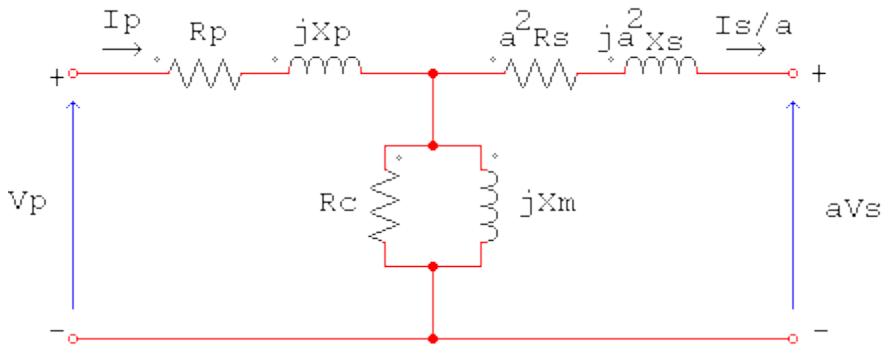


Gráfico 326. Circuito equivalente del transformador referido al lado primario.
Fuente: http://dc388.4shared.com/doc/zT62xVEL/preview.html.

$$\frac{V_{1(t)}}{a} = i_{0'(t)}R_{EQR} + L_{EQM}\frac{d_{i0'(t)}}{dt}V_1 \; entrada\ de\ la\ ecuación\ \ N°\ 1$$

$$\frac{V_{1(t)}}{a} = i_{2(t)}R_2 + L_2\frac{d_{i2(t)}}{dt} + V_{2(t)}V_1\ y\ V_2 entradas\ de\ la\ ecuación\ \ N°\ 2$$

$$\frac{d_{i0'(t)}}{dt} = \frac{\frac{V_{1(t)}}{a} - i_{0'(t)}R_{EQR}}{L_{EQM}}$$

$$\frac{d_{i2(t)}}{dt} = \frac{\frac{V_{1(t)}}{a} - i_{2(t)}R_2 - V_{2(t)}}{L_2}$$

$$X_1 = i_{0'} \quad y \quad X_2 = i_2 \qquad estados\ del\ modelo\ propueto$$

Construimos las ecuaciones en función de los estados y las entradas de la siguiente manera:

$$\frac{d_{X1(t)}}{d_t} = \frac{\frac{V_1}{a} - X_1 R_{EQR}}{L_{EQM}}$$

$$\frac{d_{X2(t)}}{d_t} = \frac{\frac{V_1}{a} - X_2 R_2 - V_2}{L_2}$$

Procedemos a linealizar el modelo de estado no lineal de la siguiente manera a fin de Obtener el modelo de estados con sus respectivas matrices, lo montamos en el programa MatlabSimulink© y verificamos sus condiciones de funcionamiento (simulamos un proceso de operación con condiciones iniciales iguales a cero).

$$\begin{bmatrix} \Delta X_{1'} \\ \Delta X_{2'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{EQR}}{L_{EQR}} & 0 \\ 0 & -\frac{R_2}{L_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_1 \\ \Delta X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\frac{V_1}{a}}{L_{EQM}} & 0 \\ \frac{\frac{V_1}{a}}{L_2} & -\frac{V_2}{L_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta L_1 \\ \Delta L_2 \end{bmatrix}$$

Matriz A Matriz B

Matriz C $Y_{t(t)} = \begin{bmatrix} \frac{\frac{V_1}{a}}{L_{EQM}} & \frac{\frac{V_1}{a}}{L_2} \\ 0 & -\frac{V_2}{L_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix}$

Matriz D = 0

$$Z_{EQ} = \frac{|R_C|X_m||}{|Z|} \angle 90° - \emptyset = R_{EQR} + j\,X_{EQM}$$

$$\emptyset = tan^{-1}\left\{\frac{X_m}{R_C}\right\}; \qquad V_2 = N_2\,\frac{2\,\pi\,f}{\sqrt{2}}\sqrt{\frac{10^{11}P_t}{10^{11}K_H\,f + 2.2\,f^2\Delta^2}}$$

Los datos del transformador de 5 kVA utilizado en la presente investigación doctoral, fue fabricado en la empresa TRANSECA, C.A ubicada en Guacara Estado Carabobo, el mismo será instalado en la Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Universidad de Carabobo, fueron obtenidos a partir de los ensayos en vacío y cortocircuito tal y como se indica a continuación:

Tap en 2, tensión del lado primario 13.800 Voltios, relación de espiras a = 57.5, donde N_1 = 4715 y N_2 = 2x 41 = 82.

En vacío **En cortocircuito**

$R_C(BT) = 1309.0909\ \Omega$ $X_{EQ}(AT) = 116.3575\ \Omega$

$R_C(AT) = 4328181.78812\ \Omega X_1(AT) = X_2(AT) = 58.1787\Omega$

$X_C(BT) = 348.84130\ \Omega L_1(AT) = L_2(AT) = 0.154323\Omega$

$X_C(AT) = 1153356.548112\ \Omega R_{EQ}\,(AT) = 822.7863\ \Omega$

$R_1(AT)(30°) = 450.2\ \Omega$

$R_1(AT)(75°) = 526.7935\ \Omega$

$R_2(AT)(75°) = 295.992727\ \Omega$

$I_{np} = 0.3623\ Amp \quad y \quad I_{ns} = 20.8333\ Amp \quad para \quad V_2 = 240\ Volts.$

Apéndice N° 3

En la simulación se conecta a una carga resistiva de 11.52 Ω correspondiente a los valores nominales de V_2 en 240 Voltios e I_2 en 20.83 Amp. Los valores de pérdidas totales obtenidos deben ser cambiados en el bloque correspondiente, al igual que el coeficiente de oscilación, tal y como; se indica a continuación:

Tabla Nº 27. Pérdidas totales versus coeficiente de oscilación

Pérdidas totales (P_t)	**Coeficiente de oscilación (K_H)**
1.44	0.002498
1.591	0.01199
1.581	0.00274
1.5940	0.00276
1.5634	0.00271
1.13	0.00203
1.7577	(*)

Nota. Fuente: M. Mago (2013)

Cálculo de Confiabilidad aplicando el Método de Mínimos Cuadrados.

Tabla Nº 28. Planilla de Análisis de Fallas.

M(N)		T(N)	L(N)	P(F)		P(S)	
1	1,414213562	3,4444444		0,01	0,01414214	0,99	0,98498731
2	2,449489743	3,4444444		0,02	0,0244949	0,98	0,97498718
3	3,464101615	3,4444444		0,03	0,03464102	0,97	0,96498705
4	4,472135955	3,4444444		0,04	0,04472136	0,96	0,95498691
5	5,477225575	3,4444444		0,05	0,05477226	0,95	0,94498677
6	6,480740698	3,4444444		0,06	0,06480741	0,94	0,93498663
7	7,483314774	3,4444444		0,07	0,07483315	0,93000000	0,92498649
8	8,485281374	3,4444444		0,08	0,08485281	0,92	0,91498634
9	9,486832981	3,4444444		0,09	0,09486833	0,91	0,90498619
10	10,48808848	1,8666667		0,1	0,10488088	0,9	0,89498603
11	11,48912529	1,8666667		0,11	0,11489125	0,89	0,88498588
12	12,48999600	1,8666667		0,12	0,12489996	0,88	0,87498571
13	13,49073756	1,8666667		0,13	0,13490738	0,87	0,86498555
14	14,49137675	1,8666667		0,14	0,14491377	0,86000000	0,85498538
15	15,49193338	1,8666667		0,15	0,15491933	0,85	0,84498521
16	16,49242250	1,8666667		0,16	0,16492423	0,84	0,83498503
17	17,49285568	1,8666667		0,17	0,17492856	0,83	0,82498485
18	18,49324201	1,8666667		0,18	0,18493242	0,82	0,81498466
19	19,49358869	1,8666667		0,19	0,19493589	0,81	0,80498447
20	20,49390153	1,8666667		0,2	0,20493902	0,8	0,79498428
21	21,49418526	1,8666667		0,21	0,21494185	0,79000000	0,78498408

22	22,49444376	1,8666667		0,22	0,22494444	0,78	0,77498387
23	23,49468025	1,8666667		0,23	0,2349468	0,77	0,76498366
24	24,49489743	1,8666667		0,24	0,24494897	0,76	0,75498344
25	25,49509757	2,5833333		0,25	0,25495098	0,75	0,74498322
26	26,49528260	2,5833333		0,26	0,26495283	0,74	0,73498299
27	27,49545417	2,5833333		0,27	0,27495454	0,73	0,72498276
28	28,49561370	2,5833333		0,28	0,28495614	0,72000000	0,71498252
29	29,49576241	2,5833333		0,29	0,29495762	0,71	0,70498227
30	30,49590136	2,5833333		0,3	0,30495901	0,7	0,69498201
31	31,49603150	2,5833333		0,31	0,31496031	0,69	0,68498175
32	32,49615362	2,5833333		0,32	0,32496154	0,68	0,67498148
33	33,49626845	2,5833333		0,33	0,33496268	0,67	0,6649812
34	34,49637662	2,5833333		0,34	0,34496377	0,66	0,65498092
35	35,49647870	2,5833333		0,35	0,35496479	0,65000000	0,64498062
36	36,49657518	2,5833333		0,36	0,36496575	0,64	0,63498031
37	37,49666652	1,875		0,37	0,37496667	0,63	0,62498
38	38,49675311	1,875		0,38	0,38496753	0,62	0,61497967
39	39,49683532	1,875		0,39	0,39496835	0,61	0,60497934
40	40,49691346	1,875		0,4	0,40496913	0,6	0,59497899
41	41,49698784	1,875		0,41	0,41496988	0,59	0,58497863
42	42,49705872	1,875		0,42	0,42497059	0,58000000	0,57497826
43	43,49712634	1,875		0,43	0,43497126	0,57	0,56497788
44	44,49719092	1,875		0,44	0,44497191	0,56	0,55497748
45	45,49725266	1,875		0,45	0,45497253	0,55	0,54497706
46	46,49731175	1,875		0,46	0,46497312	0,54	0,53497664
47	47,49736835	1,875		0,47	0,47497368	0,53	0,52497619
48	48,49742261	1,875		0,48	0,48497423	0,52	0,51497573
49	49,49747468	1,875		0,49	0,49497475	0,51000000	0,50497525
50	50,49752469	1,875		0,5	0,50497525	0,5	0,49497475
51	51,49757276	1,875		0,51	0,51497573	0,49	0,48497423
52	52,49761899	1,875		0,52	0,52497619	0,48	0,47497368
53	53,49766350	3,1		0,53	0,53497664	0,47	0,46497312
54	54,49770637	3,1		0,54	0,54497706	0,46	0,45497253
55	55,49774770	3,1		0,55	0,55497748	0,45	0,44497191
56	56,49778757	3,1		0,56	0,56497788	0,44000000	0,43497126
57	57,49782605	3,1		0,57	0,57497826	0,43	0,42497059
58	58,49786321	3,1		0,58	0,58497863	0,42	0,41496988
59	59,49789912	3,1		0,59	0,59497899	0,41	0,40496913
60	60,49793385	3,1		0,6	0,60497934	0,4	0,39496835
61	61,49796745	3,1		0,61	0,61497967	0,39	0,38496753
62	62,49799997	3,1		0,62	0,62498	0,38	0,37496667

63	63,49803147	2,72727227		0,63	0,63498031	0,37000000	0,36496575
64	64,49806199	2,72727227		0,64	0,64498062	0,36	0,35496479
65	65,49809158	2,72727227		0,65	0,65498092	0,35	0,34496377
66	66,49812027	2,72727227		0,66	0,6649812	0,34	0,33496268
67	67,49814812	2,72727227		0,67	0,67498148	0,33	0,32496154
68	68,49817516	2,72727227		0,68	0,68498175	0,32	0,31496031
69	69,49820142	2,72727227		0,69	0,69498201	0,31	0,30495901
70	70,49822693	2,72727227		0,7	0,70498227	0,30000000	0,29495762
71	71,49825173	2,72727227		0,71	0,71498252	0,29	0,28495614
72	72,49827584	2,72727227		0,72	0,72498276	0,28	0,27495454
73	73,49829930	2,72727223		0,73	0,73498299	0,27	0,26495283
74	74,49832213	4,42857143		0,74	0,74498322	0,26	0,25495098
75	75,49834435	4,42857143		0,75	0,75498344	0,25	0,24494897
76	76,49836600	4,42857143		0,76	0,76498366	0,24	0,2349468
77	77,49838708	4,42857143		0,77	0,77498387	0,23000000	0,22494444
78	78,49840763	4,42857143		0,78	0,78498408	0,22	0,21494185
79	79,49842766	4,42857143		0,79	0,79498428	0,21	0,20493902
80	80,49844719	4,42857143		0,8	0,80498447	0,2	0,19493589
81	81,49846624	4,42857143		0,81	0,81498466	0,19	0,18493242
82	82,49848483	4,42857143		0,82	0,82498485	0,18	0,17492856
83	83,49850298	4,42857143		0,83	0,83498503	0,17	0,16492423
84	85,48684109	4,42857143		0,84	0,85486841	0,16000000	0,14422205
87	86,49855490	4,42857143		0,87	0,86498555	0,13	0,13490738
86	86,49855490	4,42857143		0,86	0,86498555	0,14	0,13490738
87	87,49857142	4,42857143		0,87	0,87498571	0,13	0,12489996
88	88,49858756	3,75		0,88	0,88498588	0,12	0,11489125
89	89,49860334	3,75		0,89	0,89498603	0,11	0,10488088
90	90,49861877	3,75		0,9	0,90498619	0,1	0,09486833
91	91,49863387	3,75		0,91	0,91498634	0,09000000	0,08485281
92	92,49864864	3,75		0,92	0,92498649	0,08	0,07483315
93	93,49866309	3,75		0,93	0,93498663	0,07	0,06480741
94	94,49867724	3,75		0,94	0,94498677	0,06	0,05477226
95	95,49869109	3,75		0,95	0,95498691	0,05	0,04472136
96	96,49870465	7,75		0,96	0,96498705	0,04	0,03464102
97	97,49871794	7,75		0,97	0,97498718	0,03	0,0244949
98	98,49873096	7,75		0,98	0,98498731	0,02000000	0,01414214
99		7,75		0,99		0,01	

Nota. Fuente: M. Mago (2013)

Tabla Nº 29. Método de Mínimos Cuadrados

N	Ti	B=Lnti	bi=1/Ln ti	bi^2	yi=PS	Ln1/yi	A=Ln(ln 1/yi)	Zi=A/B	ZiBi
1	3,444444	1,236762614	0,8085626	0,653773485	0,99	0,0100503	-4,60014923	-3,71950864	-3,00745559
2	3,444444	1,236762614	0,8085626	0,653773485	0,98	0,0202027	-3,90193866	-3,15496168	-2,55098403
3	3,444444	1,236762614	0,8085626	0,653773485	0,97	0,0304592	-3,49136695	-2,82298875	-2,28256314
4	3,444444	1,236762614	0,8085626	0,653773485	0,96	0,040822	-3,19853426	-2,58621519	-2,09111689
5	3,444444	1,236762614	0,8085626	0,653773485	0,95	0,0512933	-2,97019525	-2,40158881	-1,94183149
6	3,444444	1,236762614	0,8085626	0,653773485	0,94	0,0618754	-2,78263253	-2,24993261	-1,81921137
7	3,444444	1,236762614	0,8085626	0,653773485	0,93000000	0,0725707	-2,62319412	-2,12101667	-1,71497476
8	3,444444	1,236762614	0,8085626	0,653773485	0,92	0,0833816	-2,48432751	-2,00873432	-1,62418745
9	3,444444	1,236762614	0,8085626	0,653773485	0,91	0,0943107	-2,36116085	-1,90914636	-1,54366435
10	1,8666667	0,624154327	1,6021678 6	2,566941 84	0,9	0,1053605	-2,25036733	-3,60546 62	-5,77656205
11	1,8666667	0,624154327	1,6021678 6	2,566941 84	0,89	0,1165338	-2,14957378	-3,44397801	-5,51783087

12	1,8666667	0,624154327	1,60216786	2,56694184	0,88	0,1278334	-2,05702765	-3,29570358	-5,28027034
13	1,8666667	0,624154327	1,60216786	2,56694184	0,87	0,1392621	-1,97139774	-3,15851 01	-5,06046335
14	1,8666667	0,624154327	1,60216786	2,56694184	0,86000000	0,1508229	-1,89164905	-3,03073 93	-4,85575308
15	1,8666667	0,624154327	1,60216786	2,56694184	0,85	0,1625189	-1,81696079	-2,91107618	-4,66403269
16	1,8666667	0,624154327	1,60216786	2,56694184	0,84	0,1743534	-1,74667108	-2,79846026	-4,48360307
17	1,8666667	0,624154327	1,60216786	2,56694184	0,83	0,1863296	-1,68023825	-2,69202371	-4,31307386
18	1,8666667	0,624154327	1,60216786	2,56694184	0,82	0,1984509	-1,61721337	-2,59104728	-4,15129266
19	1,8666667	0,624154327	1,60216786	2,56694184	0,81	0,210721	-1,55722015	-2,49492806	-3,99729355
20	1,8666667	0,624154327	1,60216786	2,56694184	0,8	0,2231436	-1,49993999	-2,40315563	-3,85025871
21	1,8666667	0,624154327	1,60216786	2,56694184	0,79000000	0,2357223	-1,44510072	-2,31529392	-3,70948 95
22	1,8666667	0,624154327	1,60216786	2,56694184	0,78	0,2484614	-1,39246794	-2,23096738	-3,57438422
23	1,8666667	0,624154327	1,60216786	2,56694184	0,77	0,2613648	-1,34183828	-2,14985017	-3,44442083
24	1,8666667	0,624154327	1,60216786	2,56694184	0,76	0,2744368	-1,29303411	-2,07165 77	-3,31914337
25	2,5833333	0,949080542	1,05365136	1,11018118	0,75	0,2876821	-1,24589932	-1,31274351	-1,38317398
2	2,5833	0,94908	1,05365	1,11018	0,74	0,3011	-	-	-

6	333	0542	136	118		051	1,20029593	1,26469343	1,33254595
27	2,5833333	0,949080542	1,05365136	1,11018118	0,73	0,3147107	-1,15610133	-1,21812774	-1,28348194
28	2,5833333	0,949080542	1,05365136	1,11018118	0,72000000	0,3285041	-1,11320606	-1,17293108	-1,23586042
29	2,5833333	0,949080542	1,05365136	1,11018118	0,71	0,3424903	-1,07151192	-1,12899998	-1,18957236
30	2,5833333	0,949080542	1,05365136	1,11018118	0,7	0,3566749	-1,03093043	-1,08624125	-1,14451957
31	2,5833333	0,949080542	1,05365136	1,11018118	0,69	0,3710637	-0,99138158	-1,04457055	-1,10061318
32	2,5833333	0,949080542	1,05365136	1,11018118	0,68	0,3856625	-0,95279269	-1,00391131	-1,05777252
33	2,5833333	0,949080542	1,05365136	1,11018118	0,67	0,4004776	-0,91509753	-0,96419375	-1,01592405
34	2,5833333	0,949080542	1,05365136	1,11018118	0,66	0,4155154	-0,8782355	-0,92535402	-0,97500052
35	2,5833333	0,949080542	1,05365136	1,11018118	0,65000000	0,4307829	-0,84215099	-0,88733353	-0,93494018
36	2,5833333	0,949080542	1,05365136	1,11018118	0,64	0,4462871	-0,80679281	-0,85007833	-0,89568619
37	1,875	0,628608659	1,59081487	2,53069 1936	0,63	0,4620355	-0,77211364	-1,22828985	-1,95398176
38	1,875	0,628608659	1,59081487	2,53069 1936	0,62	0,4780358	-0,73806965	-1,17413217	-1,86782692
39	1,875	0,628608659	1,59081487	2,53069 1936	0,61	0,4942963	-0,7046201	-1,12092013	-1,7831764
40	1,875	0,628608659	1,59081487	2,53069 1936	0,6	0,5108256	-0,67172	-1,06859	-1,69993

							699	328	408
41	1,875	0,628608659	1,590811487	2,530691936	0,59	0,5276327	-0,6393548	-1,01709512	-1,61801004
42	1,875	0,628608659	1,590811487	2,530691936	0,58000000	0,5447272	-0,60747021	-0,96637263	-1,53731995
43	1,875	0,628608659	1,590811487	2,530691936	0,57	0,5621189	-0,57604185	-0,91637594	-1,45778447
44	1,875	0,628608659	1,590811487	2,530691936	0,56	0,5798185	-0,54504016	-0,86705799	-1,37932875
45	1,875	0,628608659	1,590811487	2,530691936	0,55	0,597837	-0,51443714	-0,81837424	-1,30188191
46	1,875	0,628608659	1,590811487	2,530691936	0,54	0,6161861	-0,48420619	-0,7702824	-1,22537669
47	1,875	0,628608659	1,590811487	2,530691936	0,53	0,6348783	-0,454322	-0,72274218	-1,14974901
48	1,875	0,628608659	1,590811487	2,530691936	0,52	0,6539265	-0,42476037	-0,67571511	-1,07493764
49	1,875	0,628608659	1,590811487	2,530691936	0,51000000	0,6733446	-0,39549811	-0,62916428	-1,00088389
50	1,875	0,628608659	1,590811487	2,530691936	0,5	0,6931472	-0,36651292	-0,5830542	-0,92753129
51	1,875	0,628608659	1,590811487	2,530691936	0,49	0,7133499	-0,33778325	-0,53735062	-0,85482535
52	1,875	0,628608659	1,590811487	2,530691936	0,48	0,7339692	-0,30928825	-0,49202034	-0,78271327
53	3,1	1,131402111	0,883859056	0,781206827	0,47	0,7550226	-0,28100762	-0,24837113	-0,21952507
54	3,1	1,131402111	0,883859056	0,781206827	0,46	0,7765288	-0,25292156	-0,22354701	-0,19758405

55	3,1	1,131402111	0,883859056	0,781206827	0,45	0,7985077	-0,22501067	-0,19887772	-0,17577987
56	3,1	1,131402111	0,883859056	0,781206827	0,44000000	0,8209806	-0,19725586	-0,17434638	-0,15409762
57	3,1	1,131402111	0,883859056	0,781206827	0,43	0,8439701	-0,16963825	-0,14993063	-0,13252256
58	3,1	1,131402111	0,883859056	0,781206827	0,42	0,8675006	-0,14213911	-0,12563094	-0,11104005
59	3,1	1,131402111	0,883859056	0,781206827	0,41	0,8915981	-0,11473979	-0,10141038	-0,08963055
60	3,1	1,131402111	0,883859056	0,781206827	0,4	0,9162907	-0,08742157	-0,07726835	-0,06829433
61	3,1	1,131402111	0,883859056	0,781206827	0,39	0,9416085	-0,06016565	-0,05317796	-0,04700182
62	3,1	1,131402111	0,883859056	0,781206827	0,38	0,967584	-0,03295301	-0,02912582	-0,02574312
63	2,7272723	1,003301941	0,996708938	0,993428683	0,37000000	0,9942523	-0,00576431	-0,00574534	-0,00572643
64	2,7272723	1,003301941	0,996708938	0,993428683	0,36	1,0216512	0,02142019	0,02134969	0,02127943
65	2,7272723	1,003301941	0,996708938	0,993428683	0,35	1,0498221	0,04862074	0,04846073	0,04830124
66	2,7272723	1,003301941	0,996708938	0,993428683	0,34	1,0788097	0,07585827	0,07560861	0,07535978
67	2,7272723	1,003301941	0,996708938	0,993428683	0,33	1,1086626	0,10315445	0,10281496	0,10247659
68	2,7272723	1,003301941	0,996708938	0,993428683	0,32	1,1394343	0,1305319	0,13010231	0,12967413
69	2,7272723	1,003301941	0,996708938	0,993428683	0,31	1,171183	0,15801433	0,1574943	0,15697597
70	2,7272723	1,003301941	0,996708938	0,993428683	0,30000000	1,2039728	0,18562676	0,18501585	0,18440695
71	2,7272723	1,003301941	0,996708938	0,993428683	0,29	1,2378744	0,21339568	0,21269338	0,21199339

72	2,7272723	1,003301941	0,99670893	0,993428683	0,28	1,2729657	0,24134936	0,24055506	0,23976337
73	2,7272722	1,003301925	0,99670894	0,993428714	0,27	1,3093333	0,26951809	0,26863109	0,26774701
74	4,4285714	1,488077055	0,67200821	0,451595036	0,26	1,3470736	0,29793457	0,20021448	0,13454577
75	4,4285714	1,488077055	0,67200821	0,451595036	0,25	1,3862944	0,32663426	0,2195009	0,14750641
76	4,4285714	1,488077055	0,67200821	0,451595036	0,24	1,4271164	0,35565587	0,23900367	0,16061243
77	4,4285714	1,488077055	0,67200821	0,451595036	0,23000000	1,469676	0,38504195	0,25875135	0,17388303
78	4,4285714	1,488077055	0,67200821	0,451595036	0,22	1,5141277	0,41483952	0,27877556	0,18733947
79	4,4285714	1,488077055	0,67200821	0,451595036	0,21	1,5606477	0,44510096	0,2991115	0,20100538
80	4,4285714	1,488077055	0,67200821	0,451595036	0,2	1,6094379	0,475885	0,31979862	0,2149073
81	4,4285714	1,488077055	0,67200821	0,451595036	0,19	1,6607312	0,50725799	0,34088154	0,22907519
82	4,4285714	1,488077055	0,67200821	0,451595036	0,18	1,7147984	0,53929554	0,36241103	0,24354319
83	4,4285714	1,488077055	0,67200821	0,451595036	0,17	1,7719568	0,5720845	0,38444548	0,25835052
84	4,4285714	1,488077055	0,67200821	0,451595036	0,16000000	1,8325815	0,60572561	0,40705258	0,27354268
87	4,4285714	1,488077055	0,67200821	0,451595036	0,13	2,0402208	0,71305805	0,47918087	0,32201348
86	4,4285714	1,488077055	0,67200821	0,451595036	0,14	1,9661129	0,67605842	0,45431681	0,30530463
87	4,4285714	1,488077055	0,67200821	0,451595036	0,13	2,0402208	0,71305805	0,47918087	0,32201348
88	3,75	1,32175584	0,75656938	0,572397231	0,12	2,1202635	0,75154039	0,56859245	0,43017964
89	3,75	1,32175584	0,75656938	0,572397231	0,11	2,2072749	0,79175868	0,59902038	0,45320048
90	3,75	1,32175584	0,75656938	0,572397231	0,1	2,3025851	0,83403245	0,63100341	0,47739786
91	3,75	1,32175584	0,75656938	0,572397231	0,09000000	2,4079456	0,87877394	0,66485346	0,50300777
92	3,75	1,32175584	0,75656938	0,572397231	0,08	2,5257286	0,92652959	0,70098392	0,53034297
9	3,75	1,32175	0,75656	0,57239	0,07	2,6592	0,97804	0,73996	0,55983

3		584	938	7231		6	79	11	191
94	3,75	1,32175584	0,75656938	0,57239 7231	0,06	2,8134107	1,03439753	0,7825935	0,59208628
95	3,75	1,32175584	0,75656938	0,57239 7231	0,05	2,9957323	1,0971887	0,83009938	0,62802777
96	7,75	2,04769 2843	0,48835449	0,23849 0111	0,04	3,2188758	1,16903218	0,57090212	0,27880261
97	7,75	2,04769 2843	0,48835449	0,23849 0111	0,03	3,5065579	1,2546349	0,61270659	0,29921802
98	7,75	2,04769 2843	0,48835449	0,23849 0111	0,02000000	3,912023	1,36405463	0,66614221	0,32531354
99	7,75	2,04769 2843	0,48835449	0,23849 0111	0,01	4,6051702	1,52717963	0,74580503	0,36421724
								-	-
			106,622912	128,796 5867				77,7230955	110,91192

Nota. Fuente: M. Mago (2013)

Apéndice N° 4

Script en Matlab® de la Máquina de Soporte Vectorial.

A continuación se indican los Script realizados con el programa Matlab® utilizados en el entrenamiento de la Maquina de Soporte Vectorial (MVS) de la presente investigación:

Fase: Clasificación

```
function [Y] = Clasificar(Xtrain,Alfa,b,Kernel,kernel_pars,Xt)

N=size(Xt,1);

Y=zeros(N,1);
for i=1:N
    Y(i)=sim(Xtrain,Alfa,b,Kernel,kernel_pars,Xt(i,:));
end
Y = 2*(Y>0)-1;

function [Y1] = sim(Xtrain,Alfa,b,Kernel,kernel_pars,X)
kx = MKernel(Xtrain,Kernel,kernel_pars,X);
Y1 = kx'*Alfa+ones(size(kx,2),1)*b;
```

Fase: Selección función Kernel

```
function omega = MKernel(Xtrain,Kernel, kernel_pars,Xt)

nb_data = size(Xtrain,1);


if strcmp(Kernel,'RBF_kernel'),
    if nargin<4,
        XXh = sum(Xtrain.^2,2)*ones(1,nb_data);
        omega = XXh+XXh'-2*(Xtrain*Xtrain');
        omega = exp(-omega./(2*kernel_pars(1)));
    else
        XXh1 = sum(Xtrain.^2,2)*ones(1,size(Xt,1));
        XXh2 = sum(Xt.^2,2)*ones(1,nb_data);
        omega = XXh1+XXh2' - 2*Xtrain*Xt';
        omega = exp(-omega./(2*kernel_pars(1)));
    end

elseif strcmp(Kernel,'lin_kernel')
    if nargin<4,
        omega = Xtrain*Xtrain';
    else
        omega = Xtrain*Xt';
    end

elseif strcmp(Kernel,'poly_kernel')
    if nargin<4,
        omega = (Xtrain*Xtrain'+kernel_pars(1)).^kernel_pars(2);
    else
        omega = (Xtrain*Xt'+kernel_pars(1)).^kernel_pars(2);
    end
```

```
end
```

Fase: Selección Vectores de Soporte

```
function [Alfa,b,omega,H] = QP(Xtrain,Ytrain,gam,sig2,Kernel)


omega = MKernel(Xtrain,Kernel,sig2);


nb_data = size(Xtrain,1);
b=0;
Alfa = zeros(nb_data);


H = omega;

try
    invgam = gam^-1;
catch e
    invgam = gam^-1;
end

for t=1:nb_data
    H(t,t) = H(t,t)+invgam;
end

v = H\Ytrain;
nu = H\ones(nb_data,1);
s = ones(1,nb_data)*nu(:,1);
b = nu(:,1)'*Ytrain./s;
Alfa = v(:,1)-(nu(:,1)*b);
```

Fase: Entrenamiento

```
function [Yp]=MSVFallas(X,Y,Xp,gam)

% M = dlmread('data.txt');
% Y = M(2:5,25);
% X = M(2:5,1:24);
% clc
% X(:,1) = [180 173 168 176 160 160 162 168 164 175 178];
% X(:,2) = [80 60 62 70 65 61 62 66 63 65 62];
% Y = [1 1 1 1 1 -1 -1 -1 -1 -1 -1]';

% X = 20*rand(50,2) - 10*ones(50,2);
% Y = 2*rand(50,1) - ones(50,1);
% Y = 2*(Y>0)-1;

if nargin < 4
    gam = 10;
end
```

```
sig2 = 1;
Kernel = 'RBF_kernel';

[Alfa,b,omega] = QP(X,Y,gam,sig2,Kernel);
Alfa

% Xp=[5 5 ; 2 2];
% Xp=M(1,1:24);
Yp = Clasificar(X,Alfa,b,Kernel,sig2,Xp);
```