



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DISPOSITIVO PARA
MEDIR LA CORRIENTE DE RETORNO DE RAYO EN
TORRES DE TRANSMISIÓN**

Autor:
I.E. JONATHAN JAIR RUBIANO CRUZ

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Bogotá, Colombia
2019

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DISPOSITIVO PARA MEDIR LA CORRIENTE DE RETORNO DE RAYO EN TORRES DE TRANSMISIÓN

Tesis de Maestría para obtener el título de Magister en Ingeniería
Eléctrica con Énfasis en Alta Tensión

Autor:

I.E. Jonathan Jair Rubiano Cruz

Director:

Ph.D. Horacio Torres Sánchez

Codirector:

Ph.D. César Alexander Chacón Cardona

Línea de Investigación:

Descargas Eléctricas Atmosféricas

Grupo de Investigación:

Programa de Adquisición y Análisis de Señales PAAS – UN

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Bogotá, Colombia
2019

*Dedico este trabajo a la vida por
brindarme esta valiosa oportunidad, a mi
Padre, a mi madre por sus enseñanzas, a
Ardilla y mis amigos cercanos.*

Agradecimientos

Al profesor Horacio Torres Sánchez por la dirección de esta tesis, su continuo apoyo, sus enseñanzas y valiosos conocimientos.

Al profesor César Alexander Chacón Cardona por la codirección de esta tesis, su continuo apoyo, paciencia, motivación y por brindarme su gran amistad desde hace varios años.

Al grupo de Investigación PAAS de la Universidad Nacional de Colombia.

Al profesor Francisco Amórtegui director del Laboratorio de Ensayos Eléctricos Industriales “Fabio Chaparro” de la Facultad de Ingeniería (LABE).

Al laboratorio de alta tensión de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas y su personal por el desarrollo de las pruebas necesarias para la tesis.

Resumen

Esta tesis aborda temas relacionados en la investigación y adecuación de sistemas de medida directa de rayos; teniendo como referencia que Colombia actualmente cuenta con una sola estación de medición directa de rayos, por esta razón se planteó el diseño de un dispositivo con el fin de realizar la medición directa de rayos en torres de transmisión de energía eléctrica y así aumentar la probabilidad de obtención de datos de mediciones directas de este fenómeno atmosférico.

El argumento para desarrollar esta tesis se basa en la ubicación geográfica de Colombia y sus condiciones climatológicas especiales, ya que es un país con alta densidad de descargas a tierra, esto se debe a que se encuentra en la zona tropical del planeta; asimismo se puede decir que asociado a la alta densidad de descargas a tierra también se afirma que las magnitudes de corriente de retorno de rayo son más elevadas que en otras latitudes del globo terráqueo, para el caso de Colombia se tiene que la magnitud de la corriente de retorno de rayo está en promedio en 43 [kA] [1].

Dada la importancia de este fenómeno eléctrico atmosférico en el país, el diseño y construcción de un prototipo para la medición de rayos a un bajo costo ayudaría a obtener datos de mediciones directas, esto si se llegase a implementar a futuro en diferentes lugares del país con financiación externa y así aumentar el número de muestras tomadas de mediciones directas a rayos en el país, con el fin de entender y analizar más profundamente este fenómeno en aspectos relacionados a la protección de vidas humanas.

Palabras clave: densidad de descargas a tierra, zona tropical, rayo, corriente de retorno de rayo, medición directa.

Abstract

This thesis includes topics related to research and adaptation of direct lightning measurement systems; it is assumed that Colombia currently has a single direct lightning measurement station, for this reason the design of a device capable of direct lightning measurement in electrical power transmission towers was made and thus increase the probability of obtaining data of direct measurements of this atmospheric phenomenon.

The argument to develop this thesis is based on the geographic location of Colombia and its special climatic conditions, which is a country with high ground flash density, this is because it is located in the tropical zone of the planet; it can also be said that associated with the high ground flash density it is also stated that the magnitudes of lightning return current are higher than in other latitudes of the terrestrial globe, for the case of Colombia the magnitude of the lightning return current has to be it is on average at 43 [kA] [1].

Given the importance of this atmospheric electric phenomenon in the country, the design and construction of a prototype for the measurement of lightning at a low cost would help to obtain data from direct measurements, this if it were to be implemented in the future in different parts of the country. external financing and thus increase the number of samples taken from direct measurements of lightning in the country, in order to understand and analyze this phenomenon more deeply in aspects related to the protection of human lives.

Keywords: Ground flash density, tropical zone, lightning, lightning return current, direct measure

Contenido

Resumen	i
Abstract	ii
Contenido	iii
Lista de tablas	xiv
Introducción	xviii
1. Estado del arte sobre mediciones de corriente de rayo	1
1.1. Leyes de Maxwell.....	1
1.1.1. Ley de Gauss para campo eléctrico	1
1.1.2. Ley de Gauss para campo magnético	1
1.1.3. Ley de Faraday-Lenz.....	2
1.1.4. Ley de Ampère	2
1.2. Permeabilidad magnética.....	2
1.3. Permitividad eléctrica	3
1.4. Resonancia	3
1.4.1. Frecuencia de resonancia	4
1.4.2. Comportamiento de un circuito en resonancia	4
1.5. Densidad de descargas a tierra	5
1.6. Polaridad de los rayos.....	6
1.7. Magnitudes de corriente de retorno de rayo.....	7
1.8. Clasificación de las descargas eléctricas atmosféricas.....	8
1.9. Onda tipo rayo.....	9
1.9.1. Formas de ondas de rayo normalizadas.....	10
1.10. Medición de rayos.....	10
1.10.1. Medición directa de rayos.....	10
1.10.1.1. Elementos para la medición directa de rayos.....	11
1.10.2. Mediciones indirectas de rayos	11
1.10.2.1. Sistema LLP.....	11
1.10.2.2. Serie IMPACT	12
1.10.2.3. Sistema LPATS.....	12
1.10.2.4. Máquinas de campo eléctrico.....	12
1.10.2.5. Lightning Imaging Sensor LIS	12
1.10.3. Mediciones indirectas en Colombia	13
1.10.3.1. LPATS en Colombia.....	13
1.10.3.2. LLP en Colombia.....	13
1.10.3.3. Red Colombiana de detección total de rayos LINET	13
1.10.3.4. Sensores de Campo Electrostático PreThor	13
1.10.4. Estaciones de medición directa de rayos	14
1.10.4.1. Estaciones de medición directa en Colombia.....	14
1.10.4.2. Estación experimental de medición directa de rayos, Ilyapa.....	14
1.10.4.3. Estaciones de medición directa en el mundo	15
1.11. Torres de transmisión	16
1.11.1. Partes de una torre de transmisión	16
1.11.2. Tipos de torres	16
1.11.2.1. Según su función	17
1.11.2.1.1. Torres de suspensión	17

1.11.2.1.2. Torres de retención	17
1.11.2.1.3. Torres de terminal	18
1.11.2.2. Según su geometría.....	18
1.12. Características principales de una bobina de Rogowski	20
2. Distribución y comportamiento de la corriente de rayo sobre un grupo de torres.....	21
2.1. Ecuación desarrollada para hallar impedancias de sobretensión.	25
2.2. Calculo de componentes en el modelo Multistory	30
2.3. Impacto de rayo en la torre 1	31
2.4. Impacto de rayo en la torre 2	34
2.5. Impacto de rayo en la torre 3	38
2.6. Impacto de rayo en la torre 4	42
2.7. Impacto de rayo en la torre 5	46
2.8. Impacto de rayo en la torre 6	50
2.9. Impacto de rayo en la torre 7	54
2.10. Impacto de rayo en la mitad del cable de guarda entre la torre 5 y 6 ...	57
3. Consideraciones a tener en cuenta respecto al lugar donde se realice la medición de corriente en el grupo de torres.....	61
3.1. Impacto en la torre 1	61
3.2. Impacto en la torre 2	64
3.3. Impacto en la torre 3.....	67
3.4. Impacto en la torre 4	70
3.5. Espectro de la serie de Fourier en señales medidas de forma directa en Colombia y Brasil	73
3.6. Corrección aplicada a las señales.....	76
3.7. Uso del factor de corrección de amplitud de armónicos y de amplitud en el tiempo	83
3.7.1. Impacto en la torre 1.....	83
3.7.1.1. Corriente por la torre 1	84
3.7.1.2. Corriente por la torre 2	85
3.7.1.3. Corriente por la torre 3	86
3.7.1.4. Corriente por la torre 4	87
3.7.1.5. Corriente por la torre 5	88
3.7.1.6. Corriente por la torre 6	89
3.7.1.7. Corriente por la torre 7	90
3.7.2. Impacto en la torre 2.....	91
3.7.2.1. Corriente por la torre 1	92
3.7.2.2. Corriente por la torre 2	93
3.7.2.3. Corriente por la torre 3	94
3.7.2.4. Corriente por la torre 4	95
3.7.2.5. Corriente por la torre 5	96
3.7.2.6. Corriente por la torre 6	97
3.7.2.7. Corriente por la torre 7	98
3.7.3. Impacto en la torre 3.....	99
3.7.3.1. Corriente por la torre 1	100
3.7.3.2. Corriente por la torre 2	101
3.7.3.3. Corriente por la torre 3	102

3.7.3.4.	Corriente por la torre 4	103
3.7.3.5.	Corriente por la torre 5	104
3.7.3.6.	Corriente por la torre 6	105
3.7.3.7.	Corriente por la torre 7	106
3.7.4.	Impacto en la torre 4	107
3.7.4.1.	Corriente por la torre 1	108
3.7.4.2.	Corriente por la torre 2	109
3.7.4.3.	Corriente por la torre 3	110
3.7.4.4.	Corriente por la torre 4	111
3.7.4.5.	Corriente por la torre 5	112
3.7.4.6.	Corriente por la torre 6	113
3.7.4.7.	Corriente por la torre 7	114
3.8.	Corrección generalizada	115
4.	Velocidad del sonido en Colombia	123
5.	Relación de la velocidad del sonido y el impacto en la torre o el cable de guarda	129
5.1.	Distancia entre torres	129
5.2.	Velocidad del sonido en el lugar	129
5.3.	Determinar la dirección de impacto	130
5.4.	Determinación del lugar del impacto del rayo respecto al lugar de impacto	131
6.	Ubicación del dispositivo de medición en la torre de transmisión y consideraciones a tener en cuenta en este lugar de instalación de la torre	133
6.1.	Comportamiento de la corriente en la torre a realizar la medición	134
6.2.	Campo magnético en conductores, caso especial (Ángulos de la torre de transmisión.....)	139
7.	Criterio con el cual se determina la ubicación idónea para realizar la medición directa (escoger la torre adecuada para la instalación del equipo de medida).....	141
8.	Diseño de la bobina de Rogowski.....	144
8.1.	Clases de bobina de Rogowski	144
8.1.1.	Bobina de Rogowski (Parámetros concentrados).....	144
8.1.2.	Bobina de Rogowski (Parámetros distribuidos)	144
8.1.3.	Bobina de Rogowski (Auto-integradora)	145
8.2.	Calculo teórico de la bobina de Rogowski.....	146
8.3.	Diseño de la Bobina de Rogowski.....	156
8.3.1.	Parámetros de diseño de la bobina de Rogowski.....	156
8.3.2.	Adecuación de la bobina	156
9.	Sistema de obtención de datos.....	162
10.	Resultados	170
11.	Conclusiones y trabajos futuros.....	179
12.	Bibliografía.....	181

Lista de figuras

Figura 1. Líneas de campo magnético generadas por una corriente en un conductor.	1
Figura 2. Grafica de tensión y corriente en fase.....	4
Figura 3. Corriente e impedancia como funciones de la frecuencia angular (escala logarítmica en el eje ω).....	5
Figura 4. Densidad de descargas a tierra DDT (strokes / km ² x año).	6
Figura 5. Tipos de descarga de rayos nube- tierra	7
Figura 6. Clasificación de las descargas eléctricas atmosféricas.....	8
Figura 7. Onda tipo rayo.....	9
Figura 8. Onda de rayo ILYAPA.....	15
Figura 9. Partes de una torre de transmisión.....	16
Figura 10. Torre de suspensión.	17
Figura 11. Torre de retención.	18
Figura 12. Torre de terminal o remate.	18
Figura 13. Geometría Torres de transmisión.	19
Figura 14. Bobina de Rogowski	20
Figura 15. Parámetros insertados para simular la fuente tipo Heidler.....	21
Figura 16. Modelo fuente de corriente para la simulación	22
Figura 17. Disposición de las líneas.....	23
Figura 18. Modelo Multistory de Torre de Transmisión desarrollado por Ishii.....	23
Figura 19. Radio equivalente de una estructura.....	24
Figura 20. Secciones en la torre según Ishii	25
Figura 21. Esquema de la torre para determinar el radio equivalente de sección 1	25
Figura 22. Esquema de torre para determinar el radio equivalente de secciones diferentes a la 1	27
Figura 23. Calculo de Z_{t1} con diferentes ecuaciones	28
Figura 24. Calculo de Z_{t2} con diferentes ecuaciones	28
Figura 25. Circuito con 7 torres e impacto en la torre 1.	31
Figura 26. Modelo fuente de corriente de rayo tipo Heidler en el punto superior de la torre 1	31
Figura 27. Corriente de impacto en torre 1 y corrientes a tierra por las torres	32
Figura 28. Corrientes a tierra por cada torre cuando el impacto fue en la torre 1	32
Figura 29. Curva de comportamiento del pico de corriente por cada torre de la parte derecha del circuito cuando el impacto es en la torre 1.....	33
Figura 30. Circuito con 7 torres e impacto en la torre 2.	34
Figura 31. Modelo fuente de corriente de rayo tipo Heidler en el punto superior de la torre 2	34
Figura 32. Corriente de impacto en torre 2 y corrientes a tierra por las torres	35
Figura 33. Corrientes a tierra por cada torre cuando el impacto fue en la torre 2	35
Figura 34. Curva de comportamiento del pico de corriente por cada torre de la parte izquierda del circuito cuando el impacto es en la torre 2.....	36
Figura 35. Curva de comportamiento del pico de corriente por cada torre de la parte derecha del circuito cuando el impacto es en la torre 2.....	37
Figura 36. Circuito con 7 torres e impacto en la torre 3.	38

Figura 37. Modelo fuente de corriente de rayo tipo Heidler en el punto superior de la torre 3	38
Figura 38. Corriente de impacto en torre 3 y corrientes a tierra por las torres	39
Figura 39. Corrientes a tierra por cada torre cuando el impacto fue en la torre 3	39
Figura 40. Curva de comportamiento del pico de corriente por cada torre de la parte izquierda del circuito cuando el impacto es en la torre 3.	40
Figura 41. Curva de comportamiento del pico de corriente por cada torre de la parte derecha del circuito cuando el impacto es en la torre 3.	41
Figura 42. Circuito con 7 torres e impacto en la torre 4.	42
Figura 43. Modelo fuente de corriente de rayo tipo Heidler en el punto superior de la torre 4	42
Figura 44. Corriente de impacto en torre 4 y corrientes a tierra por las torres	43
Figura 45. Corrientes a tierra por cada torre cuando el impacto fue en la torre 4	43
Figura 46. Curva de comportamiento del pico de corriente por cada torre de la parte izquierda del circuito cuando el impacto es en la torre 4.	44
Figura 47. Curva de comportamiento del pico de corriente por cada torre de la parte derecha del circuito cuando el impacto es en la torre 4.	45
Figura 48. Circuito con 7 torres e impacto en la torre 5.	46
Figura 49. Modelo fuente de corriente de rayo tipo Heidler en el punto superior de la torre 5	46
Figura 50. Corriente de impacto en torre 5 y corrientes a tierra por las torres	47
Figura 51. Corrientes a tierra por cada torre cuando el impacto fue en la torre 5	47
Figura 52. Curva de comportamiento del pico de corriente por cada torre de la parte izquierda del circuito cuando el impacto es en la torre 5.	48
Figura 53. Curva de comportamiento del pico de corriente por cada torre de la parte derecha del circuito cuando el impacto es en la torre 5.	49
Figura 54. Circuito con 7 torres e impacto en la torre 6	50
Figura 55. Modelo fuente de corriente de rayo tipo Heidler en el punto superior de la torre 6	50
Figura 56. Corriente de impacto en la torre 6 y corrientes a tierra por las torres	51
Figura 57. Corrientes a tierra por cada torre cuando el impacto es en la torre 6	51
Figura 58. Curva de comportamiento del pico de corriente por cada torre de la parte derecha del circuito cuando el impacto es en la torre 6.	53
Figura 59. Curva de comportamiento del pico de corriente por cada torre de la parte izquierda del circuito cuando el impacto es en la torre 6.	53
Figura 60. Circuito con 7 torres e impacto en la torre 7.	54
Figura 61. Modelo fuente de corriente de rayo tipo Heidler en el punto superior de la torre 7	54
Figura 62. Corriente de impacto en torre 7 y corrientes a tierra por las torres	55
Figura 63. Corrientes a tierra por cada torre cuando el impacto fue en la torre 7	55
Figura 64. Curva de comportamiento del pico de corriente por cada torre de la parte izquierda del circuito cuando el impacto es en la torre 7.	56
Figura 65. Modelo fuente de corriente de rayo tipo Heidler en el punto medio entre las torres 5 y 6	57

Figura 66. Distribución de la corriente en el cable de guarda con el impacto entre la torre 5 y 6	57
Figura 67. Corriente de impacto en el cable de guarda entre las torres 5-6 y corrientes a tierra por las torres	58
Figura 68. Corrientes a tierra por cada torre cuando el impacto fue entre las torres 5 y 6 59	
Figura 69. Curva del comportamiento de las corrientes en las torres cuando el impacto es en la torre 1	62
Figura 70. Corrientes por las torres cuando el impacto es en la torre 1 y aplicando el primer factor de corrección	63
Figura 71. Curva original de corriente y la corriente que pasa por la torre 1 aplicando el factor de la ecuación 42 “curva torre 1 * factor (torre1)”	63
Figura 72. Curva del comportamiento de las corrientes hacia el lado izquierdo, cuando el impacto es en la torre 2	65
Figura 73. Curva del comportamiento de las corrientes hacia el lado derecho, cuando el impacto es en la torre 2	65
Figura 74. Corrientes por las torres cuando el impacto es en la torre 2	66
Figura 75. Curva original de corriente y la corriente que pasa por la torre 1 aplicando el factor de la ecuación 43 “curva torre 2 * factor (torre2)”	66
Figura 76. Curva del comportamiento de las corrientes hacia el lado izquierdo, cuando el impacto es en la torre 3	68
Figura 77. Curva del comportamiento de las corrientes hacia el lado derecho, cuando el impacto es en la torre 3	68
Figura 78. Corrientes por las torres cuando el impacto es en la torre 3	69
Figura 79. Curva original de corriente y la corriente que pasa por la torre 1 aplicando el factor de la ecuación 45 “curva torre 3 * factor (torre3)”	69
Figura 80. Curva del comportamiento de las corrientes hacia el lado izquierdo, cuando el impacto es en la torre 4	71
Figura 81. Curva del comportamiento de las corrientes hacia el lado derecho, cuando el impacto es en la torre 4	71
Figura 82. Corrientes por las torres cuando el impacto es en la torre 4	72
Figura 83. Curva original de corriente y la corriente que pasa por la torre 1 aplicando el factor de la ecuación 47 “curva torre 4 * factor (torre4)”	72
Figura 84. Señal medida en la estación Morro do Cachimbo en Brasil	74
Figura 85. Espectro de la señal de Morro do Cachimbo	74
Figura 86. Señal medida Rayo de Oro	75
Figura 87. Espectro de la señal de Rayo de Oro	75
Figura 88. Señal medida Ilyapa	75
Figura 89. Espectro de la señal Ilyapa	76
Figura 90. Amplitud de los armónicos de la señal original que baja por la torre 1 cuando el impacto es en la torre 1	76
Figura 91. Amplitud de los armónicos a partir del 4to armónico de la señal que baja por la torre 1 cuando el impacto es en la torre 1	77
Figura 92. Curva exponencial relacionada a partir del armónico 4	77
Figura 93. Aplicación de la corrección de amplitud de los amónicos 4 en adelante	78

Figura 94. Amplitudes de armónicos aplicando el suavizado y la primera corrección de amplitud.....	79
Figura 95. Curva del factor completo de amplitud cuando el impacto es en la torre 1	81
Figura 96. Curva de corrección de amplitud en el tiempo.....	82
Figura 97. Aplicación de corrección de amplitud de armónicos y amplitud de la señal en el tiempo.....	82
Figura 98. Factor de corrección de amplitud de armónicos.....	83
Figura 99. Factor de corrección de amplitud en el tiempo.....	83
Figura 100. Amplitud del espectro de la señal que baja por la torre 1 cuando el impacto es en la torre 1	84
Figura 101. Graficas de corrección y señal de corriente de retorno de rayo original, impacto en la torre 1 y medida en la torre 1.....	84
Figura 102. Amplitud del espectro de la señal que baja por la torre 2 cuando el impacto es en la torre 1	85
Figura 103. Graficas de corrección y señal de corriente de retorno de rayo original, impacto en la torre 1 y medida en la torre 2.....	85
Figura 104. Amplitud del espectro de la señal que baja por la torre 3 cuando el impacto es en la torre 1	86
Figura 105. Graficas de corrección y señal de corriente de retorno de rayo original, impacto en la torre 1 y medida en la torre 3.....	86
Figura 106. Amplitud del espectro de la señal que baja por la torre 4 cuando el impacto es en la torre 1	87
Figura 107. Graficas de corrección y señal de corriente de retorno de rayo original, impacto en la torre 1 y medida en la torre 4.....	87
Figura 108. Amplitud del espectro de la señal que baja por la torre 5 cuando el impacto es en la torre 1	88
Figura 109. Graficas de corrección y señal de corriente de retorno de rayo original, impacto en la torre 1 y medida en la torre 5.....	88
Figura 110. Amplitud del espectro de la señal que baja por la torre 6 cuando el impacto es en la torre 1	89
Figura 111. Graficas de corrección y señal de corriente de retorno de rayo original, impacto en la torre 1 y medida en la torre 6.....	89
Figura 112. Amplitud del espectro de la señal que baja por la torre 7 cuando el impacto es en la torre 1	90
Figura 113. Graficas de corrección y señal de corriente de retorno de rayo original, impacto en la torre 1 y medida en la torre 7.....	90
Figura 114. Factor de corrección de amplitud de armónicos	91
Figura 115. Factor de corrección de amplitud en el tiempo.....	91
Figura 116. Amplitud del espectro de la señal que baja por la torre 1 cuando el impacto es en la torre 2	92
Figura 117. Graficas de corrección y señal de corriente de retorno de rayo original, impacto en la torre 2 y medida en la torre 1.....	92
Figura 118. Amplitud del espectro de la señal que baja por la torre 2 cuando el impacto es en la torre 2	93
Figura 119. Graficas de corrección y señal de corriente de retorno de rayo original, impacto en la torre 2 y medida en la torre 2.....	93

Figura 120. Amplitud del espectro de la señal que baja por la torre 3 cuando el impacto es en la torre 2	94
Figura 121. Graficas de corrección y señal de corriente de retorno de rayo original, impacto en la torre 2 y medida en la torre 3.....	94
Figura 122. Amplitud del espectro de la señal que baja por la torre 4 cuando el impacto es en la torre 2	95
Figura 123. Graficas de corrección y señal de corriente de retorno de rayo original, impacto en la torre 2 y medida en la torre 4.....	95
Figura 124. Amplitud del espectro de la señal que baja por la torre 5 cuando el impacto es en la torre 2	96
Figura 125. Graficas de corrección y señal de corriente de retorno de rayo original, impacto en la torre 2 y medida en la torre 5.....	96
Figura 126. Amplitud del espectro de la señal que baja por la torre 6 cuando el impacto es en la torre 2	97
Figura 127. Graficas de corrección y señal de corriente de retorno de rayo original, impacto en la torre 2 y medida en la torre 6.....	97
Figura 128. Amplitud del espectro de la señal que baja por la torre 7 cuando el impacto es en la torre 2	98
Figura 129. Graficas de corrección y señal de corriente de retorno de rayo original, impacto en la torre 2 y medida en la torre 7.....	98
Figura 130. Factor de corrección de amplitud de armónicos	99
Figura 131. Factor de corrección de amplitud en el tiempo.....	99
Figura 132. Amplitud del espectro de la señal que baja por la torre 1 cuando el impacto es en la torre 3	100
Figura 133. Graficas de corrección y señal de corriente de retorno de rayo original, impacto en la torre 3 y medida en la torre 1.....	100
Figura 134. Amplitud del espectro de la señal que baja por la torre 2 cuando el impacto es en la torre 3	101
Figura 135. Graficas de corrección y señal de corriente de retorno de rayo original, impacto en la torre 3 y medida en la torre 2.....	101
Figura 136. Amplitud del espectro de la señal que baja por la torre 3 cuando el impacto es en la torre 3	102
Figura 137. Graficas de corrección y señal de corriente de retorno de rayo original, impacto en la torre 3 y medida en la torre 3.....	102
Figura 138. Amplitud del espectro de la señal que baja por la torre 4 cuando el impacto es en la torre 3	103
Figura 139. Graficas de corrección y señal de corriente de retorno de rayo original, impacto en la torre 3 y medida en la torre 4.....	103
Figura 140. Amplitud del espectro de la señal que baja por la torre 5 cuando el impacto es en la torre 3	104
Figura 141. Graficas de corrección y señal de corriente de retorno de rayo original, impacto en la torre 3 y medida en la torre 5.....	104
Figura 142. Amplitud del espectro de la señal que baja por la torre 6 cuando el impacto es en la torre 3	105
Figura 143. Graficas de corrección y señal de corriente de retorno de rayo original, impacto en la torre 3 y medida en la torre 6.....	105

Figura 144. Amplitud del espectro de la señal que baja por la torre 7 cuando el impacto es en la torre 3	106
Figura 145. Graficas de corrección y señal de corriente de retorno de rayo original, impacto en la torre 3 y medida en la torre 7	106
Figura 146. Factor de corrección de amplitud de armónicos	107
Figura 147. Factor de corrección de amplitud en el tiempo.....	107
Figura 148. Amplitud del espectro de la señal que baja por la torre 1 cuando el impacto es en la torre 4	108
Figura 149. Graficas de corrección y señal de corriente de retorno de rayo original, impacto en la torre 4 y medida en la torre 1	108
Figura 150. Amplitud del espectro de la señal que baja por la torre 2 cuando el impacto es en la torre 4	109
Figura 151. Graficas de corrección y señal de corriente de retorno de rayo original, impacto en la torre 4 y medida en la torre 2.....	109
Figura 152. Amplitud del espectro de la señal que baja por la torre 3 cuando el impacto es en la torre 4	110
Figura 153. Graficas de corrección y señal de corriente de retorno de rayo original, impacto en la torre 4 y medida en la torre 3.....	110
Figura 154. Amplitud del espectro de la señal que baja por la torre 4 cuando el impacto es en la torre 4	111
Figura 155. Graficas de corrección y señal de corriente de retorno de rayo original, impacto en la torre 4 y medida en la torre 4.....	111
Figura 156. Amplitud del espectro de la señal que baja por la torre 5 cuando el impacto es en la torre 4	112
Figura 157. Graficas de corrección y señal de corriente de retorno de rayo original, impacto en la torre 4 y medida en la torre 5.....	112
Figura 158. Amplitud del espectro de la señal que baja por la torre 6 cuando el impacto es en la torre 4	113
Figura 159. Graficas de corrección y señal de corriente de retorno de rayo original, impacto en la torre 4 y medida en la torre 6.....	113
Figura 160. Amplitud del espectro de la señal que baja por la torre 7 cuando el impacto es en la torre 4	114
Figura 161. Graficas de corrección y señal de corriente de retorno de rayo original, impacto en la torre 4 y medida en la torre 7.....	114
Figura 162. Factor de corrección de amplitud de armónicos en función de la torre de medición cuando el Impacto es en la torre 1	115
Figura 163. Factor de corrección de amplitud de armónicos en función de la torre de medición cuando el Impacto es en la torre 2	115
Figura 164. Factor de corrección de amplitud de armónicos en función de la torre de medición cuando el Impacto es en la torre 3	116
Figura 165. Factor de corrección de amplitud de armónicos en función de la torre de medición cuando el Impacto es en la torre 4	116
Figura 166. Señales cuando el impacto es en la torre 6 con 10 torres.....	117
Figura 167. Señales cuando el impacto es en la torre 6 con 21 torres.....	117
Figura 168. Señales cuando el impacto es en la torre 6 con 35 torres.....	118
Figura 169. Señales cuando el impacto es en la torre 16 con 35 torres	118

Figura 170. Impacto de rayo en la torre 1, varia el número total de torres entre 7 y 100, se tiene el factor de corrección desde la torre 1 hasta la 7.....	119
Figura 171. Impacto de rayo en la torre 2, varia el número total de torres entre 7 y 100, se tiene el factor de corrección desde la torre 1 hasta la 8	120
Figura 172. Impacto de rayo en la torre 5, varia el número total de torres entre 10 y 100, se tiene el factor de corrección desde la torre 1 hasta la 10	120
Figura 173. Impacto de rayo en la torre 7, varia el número total de torres entre 10 y 100, se tiene el factor de corrección desde la torre 1 hasta la 13.....	120
Figura 174. Temperatura en función de la altitud.....	123
Figura 175. Estaciones meteorológicas en Colombia	124
Figura 176. Temperatura en función de la altitud, datos IDEAM y ecuación NASA.....	125
Figura 177. Temperatura en función de la altitud en Colombia con ajuste de curva y formula de la NASA.....	125
Figura 178. Contraste entre la ecuación de la NASA y la ecuación hallada en este trabajo para la temperatura en función de la altitud en Colombia	126
Figura 179. Variación de la velocidad del sonido en función de la humedad relativa y la temperatura	126
Figura 180. Histograma de velocidad del sonido en Colombia.....	127
Figura 181. Mapa de velocidad del sonido en Colombia	128
Figura 182. Ejemplo de dirección de impacto respecto a un sensor de sonido	130
Figura 183. Probabilidad de escuchar un trueno.....	132
Figura 184. Ubicación del equipo de medida en la torre de transmisión.....	133
Figura 185. Lugar de instalación en la torre de transmisión.....	133
Figura 186. Secciones de la torre Multistory	134
Figura 187. Pata de una torre.....	135
Figura 188. Esquema de sistema de puesta a tierra para una torre de transmisión	135
Figura 189. Variación del modelo para determinar la corriente por cada pata.....	136
Figura 190. Torre de transmisión con modificación para determinar la corriente por cada pata.....	137
Figura 191. Corriente por cada pata y corriente total por la torre de transmisión	138
Figura 192. Corrientes por diferentes lugares de la torre teniendo en cuenta las componentes verticales y horizontales	138
Figura 193. Corrientes por la torre de transmisión con modelo ampliado.....	139
Figura 194. Densidad de campo magnético B asociado a un conductor cilíndrico ante un impulso de corriente de retorno de rayo de 11.25 kA.....	139
Figura 195. Densidad de campo magnético B asociado a una corriente de retorno de rayo de 1.25 kA en el ángulo de la pata de la torre	140
Figura 196. Densidad de campo magnético B asociado a una corriente de retorno de rayo de 11.25 kA en el ángulo de la pata de la torre	140
Figura 197. Sistema nacional de transmisión en Colombia actual UPME 2016	141
Figura 198. Sistema interconectado nacional SIN actual 2016 UPME	142
Figura 199. Bobina de Rogowski, modelo de parámetros concentrados	144
Figura 200. Bobina de Rogowski, modelo de parámetros distribuidos.....	145
Figura 201. Núcleo bobina de Rogowski	146
Figura 202. Primera Bobina de Rogowski construida.....	157

Figura 203. Datos medidos de la primera Bobina de Rogowski	157
Figura 204. Segunda Bobina de Rogowski construida.....	158
Figura 205. Datos medidos de la segunda bobina de Rogowski.....	158
Figura 206. Tercera bobina de Rogowski construida	159
Figura 207. Datos tercera bobina de Rogowski.....	159
Figura 208. Diseño bobina final de Rogowski.....	160
Figura 209. Respuesta en frecuencia de la bobina final	160
Figura 210. Resultados diseño final de bobina de Rogowski.....	161
Figura 211. Laboratorio de alta tensión de la Universidad Distrital Facultad Tecnológica	161
Figura 212. Instalación de la bobina para las pruebas.....	162
Figura 213. Señal de trueno real.....	162
Figura 214. LM393	163
Figura 215. Convertidor DC-DC MP2307	163
Figura 216. Arduino nano con conversor USB FT232RL.....	164
Figura 217. Primer circuito de pruebas.....	164
Figura 218. segundo circuito de pruebas	164
Figura 219. Inicializar y crear variables.....	165
Figura 220. Void setup()	166
Figura 221. lectura de sensores.....	167
Figura 222. Impresión de datos.....	167
Figura 223. PCB adquisición de datos	168
Figura 224. Circuito de adquisición de datos terminado	168
Figura 225. Ploteo en serial Arduino	169
Figura 226. Ploteo en Osciloscopio	169
Figura 227. Controlador de carga solar	170

Lista de tablas

Tabla 1. Permeabilidad de materiales. Adaptado [7]	3
Tabla 2. Permitividad relativa de materiales. Adaptado [6]	3
Tabla 3. DDT medidas en diferentes latitudes del planeta. [1]	5
Tabla 4. Mediana del valor pico de corriente de retorno de rayo en diferentes países. [1] .	7
Tabla 5. Clasificación de las descargas atmosféricas	8
Tabla 6. Valores normalizados para ondas de ensayo tipo rayo	10
Tabla 7. Altura de torres según el nivel de tensión.	19
Tabla 8. Valores de impedancia de sobretensión Z_{t1} para el modelo de Ishii.	28
Tabla 9. Valores de impedancia de sobretensión Z_{t2} para el modelo de Ishii.	29
Tabla 10. Valores de corriente pico cuando el impacto es en la torre 1	32
Tabla 11. Porcentaje de la corriente que baja por cada torre respecto a la fuente, cuando el impacto es en la torre 1	33
Tabla 12. Valores de corriente pico cuando el impacto es en la torre 2	35
Tabla 13. Porcentaje de la corriente que baja por cada torre respecto a la fuente, cuando el impacto es en la torre 2	36
Tabla 14. Relación de las corrientes de la parte izquierda del circuito cuando el impacto es en la torre 2	36
Tabla 15. Relación de las corrientes de la parte derecha del circuito cuando el impacto es en la torre 2.	37
Tabla 16. Valores de corriente pico cuando el impacto es en la torre 3	39
Tabla 17. Porcentaje de la corriente que baja por cada torre respecto a la fuente, cuando el impacto es en la torre 3	40
Tabla 18. Relación de las corrientes de la parte izquierda del circuito cuando el impacto es en la torre 3	40
Tabla 19. Relación de las corrientes de la parte derecha del circuito cuando el impacto es en la torre 3.	41
Tabla 20. Valores de corriente pico cuando el impacto es en la torre 4	43
Tabla 21. Porcentaje de la corriente que baja por cada torre respecto a la fuente, cuando el impacto es en la torre 4	44
Tabla 22. Relación de las corrientes de la parte izquierda del circuito cuando el impacto es en la torre 4	44
Tabla 23. Relación de las corrientes de la parte derecha del circuito cuando el impacto es en la torre 4.	45
Tabla 24. Valores de corriente pico cuando el impacto es en la torre 5	47
Tabla 25. Porcentaje de la corriente que baja por cada torre respecto a la fuente, cuando el impacto es en la torre 5	48
Tabla 26. Relación de las corrientes de la parte izquierda del circuito cuando el impacto es en la torre 5	48
Tabla 27. Relación de las corrientes de la parte derecha del circuito cuando el impacto es en la torre 5.	49
Tabla 28. Valores de corriente pico cuando el impacto es en la torre 6	51
Tabla 29. Porcentaje de la corriente que baja por cada torre respecto a la fuente, cuando el impacto es en la torre 6	52

Tabla 30. Relación de las corrientes de la parte izquierda del circuito cuando el impacto es en la torre 6.	52
Tabla 31. Relación de las corrientes de la parte derecha del circuito cuando el impacto es en la torre 6.	52
Tabla 32. valores de corriente pico cuando el impacto es en la torre 7	55
Tabla 33. Porcentaje de la corriente que baja por cada torre respecto a la fuente, cuando el impacto es en la torre 7.....	56
Tabla 34. Picos de corriente que van hacia torre 5 y torre 6 luego del impacto en el cable de guarda.....	57
Tabla 35. Porcentaje de corriente que viaja por el cable de guarda luego del impacto entre la torre 5 y 6.....	58
Tabla 36. valores de corriente pico cuando el impacto es entre las torres 5 y 6.....	59
Tabla 37. Porcentaje de la corriente que baja por cada torre respecto a la fuente, cuando el impacto es entre las torres 5 y 6.....	59
Tabla 38. Relación de las corrientes de la parte izquierda del circuito cuando el impacto es entre las torres 5 y 6.	60
Tabla 39. Relación de las corrientes de la parte derecha del circuito cuando el impacto es entre las torres 5 y 6	60
Tabla 40. Valores pico de corriente en la torre impactada por rayo	61
Tabla 41. Relación de corrientes cuando el impacto es en la torre 1	62
Tabla 42. Correlación existente entre la corriente total y la corriente que circula por cada una de las torres, cuando el impacto es en la torre 1.....	64
Tabla 43. Relación de las corrientes en la parte izquierda y derecha cuando el impacto es en la torre 2	64
Tabla 44. Correlación existente entre la corriente total y la corriente que circula por cada una de las torres, cuando el impacto es en la torre 2.....	67
Tabla 45. Relación de las corrientes en la parte izquierda y derecha cuando el impacto es en la torre 3	67
Tabla 46. Correlación existente entre la corriente total y la corriente que circula por cada una de las torres, cuando el impacto es en la torre 3.....	70
Tabla 47. Relación de las corrientes en la parte izquierda y derecha cuando el impacto es en la torre 4	70
Tabla 48. Correlación existente entre la corriente total y la corriente que circula por cada una de las torres, cuando el impacto es en la torre 4.....	73
Tabla 49. Ecuaciones usadas en la serie de Fourier	73
Tabla 50. Primera correlación de amplitud	78
Tabla 51. Amplitudes del primer armónico de las señales de cada torre cuando el impacto es en la torre 1	79
Tabla 52. Factor completo de amplitud	80
Tabla 53. Correlación obtenida de las señales de cada torre con las correcciones de amplitud de armónicos y suavizado	81
Tabla 54. Correlación con la corrección total “amplitud de armónicos y en el tiempo” comparada con la correlación obtenida con corrección de amplitud simple.....	84
Tabla 55. Correlación con la corrección total “amplitud de armónicos y en el tiempo” comparada con la correlación obtenida con corrección de amplitud simple.....	85

Tabla 79. Correlación con la corrección total “amplitud de armónicos y en el tiempo” comparada con la correlación obtenida con corrección de amplitud simple.....	112
Tabla 80. Correlación con la corrección total “amplitud de armónicos y en el tiempo” comparada con la correlación obtenida con corrección de amplitud simple.....	113
Tabla 81. Correlación con la corrección total “amplitud de armónicos y en el tiempo” comparada con la correlación obtenida con corrección de amplitud simple.....	114
Tabla 82. Línea de transmisión 230 kV subestación Guavio – subestación Nueva Esperanza.....	129
Tabla 83. Reconfiguración Paraíso – Nueva Esperanza 230 kV	129
Tabla 84. Reconfiguración Nueva Esperanza – circo y Nueva Esperanza – San Mateo	129
Tabla 85. Tiempos de señal de corriente y sonido en cada torre cuando el impacto del rayo es en la torre 1	131

Introducción

El presente proyecto tiene como finalidad el desarrollo de un prototipo con el cual se pueda medir la corriente de retorno de rayo en torres de transmisión y así obtener datos reales de medición directa de este fenómeno natural que se presenta con mucha frecuencia en el país, debido a la ubicación geográfica de Colombia en el planeta, ya que se encuentra en la zona tropical y a países que se ubican en esta zona se les relaciona con una alta actividad eléctrica atmosférica [2]

Se hace necesario para el desarrollo del prototipo buscar información idónea y real de parámetros de rayo en el país como lo son la magnitud, tiempo de frente, tiempo de cola y carga, esto con el fin de definir los parámetros de diseño. Para obtener esta información se tendrá en cuenta mediciones directas de rayos obtenidas en Colombia y adicionalmente se puede tener en cuenta mediciones realizadas en la estación de Morro Cachimbo en Brasil [3], ya que estas mediciones tomadas en Brasil también corresponden a un país ubicado en la zona tropical del planeta.

Con este proyecto se plantea que el dispositivo ayude a incrementar el número de muestras tomadas de mediciones directas a rayos en el país y así tener más datos reales de parámetros de este fenómeno natural para analizar a futuro.

1. Estado del arte sobre mediciones de corriente de rayo

1.1. Leyes de Maxwell

Las ecuaciones a mencionar son la base de muchos adelantos tecnológicos actuales, aunque se llaman las leyes de Maxwell, estas son la recopilación de avances obtenidos por Gauss, Ampere y Faraday [4].

1.1.1. Ley de Gauss para campo eléctrico

Esta es conocida como la primera ley de Maxwell, conocida como la ley de Gauss para el campo eléctrico en el espacio libre, indica que el flujo eléctrico en una superficie cerrada es igual a la carga total encerrada [5]. La ley de Gauss en forma diferencial e integral se muestran a continuación:

$$\nabla \cdot (\epsilon_0 E) = \rho_v \quad \text{Ec. 1}$$

$$\oint_s \epsilon_0 E \cdot ds = \int_v \rho_v dv \quad \text{Ec. 2}$$

En otras palabras, esta primera ecuación de Maxwell indica que entre mayor es la densidad de carga, más intenso es el campo eléctrico [4].

1.1.2. Ley de Gauss para campo magnético

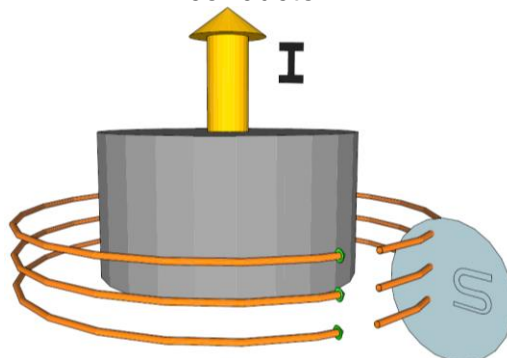
La segunda ley de Maxwell, conocida como la ley de Gauss para el campo magnético expresada en forma diferencial o integral como se muestran a continuación respectivamente:

$$\nabla \cdot B = 0 \quad \text{Ec. 3}$$

$$\oint_s B \cdot ds = 0 \quad \text{Ec. 4}$$

Concluye que no existen monopolos magnéticos, un ejemplo clásico para explicar esta ley es el comportamiento que tiene un imán cuando se va partiendo, siempre cada trozo mantiene ambos polos, positivo y negativo.

Figura 1. Líneas de campo magnético generadas por una corriente en un conductor.



En palabras sencillas la segunda ley de Maxwell dice que el flujo magnético neto a través de cualquier superficie cerrada es igual a cero, es decir, las líneas de campo siempre son cerradas [5].

1.1.3. Ley de Faraday-Lenz

La tercera ley de Maxwell o la ley de Faraday-Lenz indica que un campo magnético variable en el tiempo puede inducir un campo eléctrico, a continuación, se muestra la ecuación en forma diferencial e integral respectivamente:

$$\nabla \times E = - \frac{dB}{dt} \quad \text{Ec. 5}$$

$$\oint_l E \cdot dl = - \frac{\partial}{\partial t} \int_s B \cdot ds \quad \text{Ec. 6}$$

Esta ecuación describe la fuerza electromotriz inducida, esto más formalmente describe que el flujo magnético que atraviesa una superficie A es igual a la integral de campo eléctrico alrededor de la superficie cerrada A [4].

1.1.4. Ley de Ampère

La cuarta ley de Maxwell o ley de Ampère, describe como un campo eléctrico variable o una corriente pueden producir un campo magnético [4], las ecuaciones se muestran a continuación:

$$\nabla \times \frac{B}{\mu_0} = J + \frac{\delta(\epsilon_0 E)}{\delta t} \quad \text{Ec. 7}$$

$$\oint_l \frac{B}{\mu_0} \cdot dl = \int_s J \cdot ds + \frac{\delta}{\delta t} \int_s \epsilon_0 E \quad \text{Ec. 8}$$

El aporte fundamental que se realizó Ampère es determinar que la circulación de un campo magnético en un contorno cerrado siempre va a ser proporcional a la corriente que está circulando, adicionalmente se evidencia que la intensidad de campo disminuye a medida que me aleje del conductor que transporta la corriente.

1.2. Permeabilidad magnética

La permeabilidad magnética, también conocida con la letra griega “ μ ”, en física puede describir cómo un material puede afectar y ser afectado por un campo magnético [6], su definición corresponde a:

$$\mu = \mu_0 * \mu_r \quad \text{Ec. 9}$$

donde μ_0 es llamada permeabilidad magnética en el vacío, la cual tiene un valor de $4\pi \times 10^{-7} \frac{H}{m}$ y μ_r es la permeabilidad relativa de cada material. No se puede hablar de la permeabilidad como un valor único para un material en específico, este valor puede tener dependencia de algunos parámetros, como la temperatura, frecuencia

o la dirección de propagación [6]. A continuación, se muestran algunos valores de permeabilidad relativa usados frecuentemente.

Tabla 1. Permeabilidad de materiales. Adaptado [7]

Material	Permeabilidad relativa (μ_r)
Cobre	0,999991
Aluminio	1,000004
Níquel	600
Hierro con impurezas	5000
Hierro silicio	7000 o menor
Hierro purificado	200000

1.3. Permitividad eléctrica

La permitividad eléctrica, también conocida con la letra griega "ε", es un parámetro usado en física el cual describe cómo un campo eléctrico puede afectar y llega a ser afectado por un medio y se define de la siguiente manera:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 * \varepsilon_r \quad \text{Ec. 10}$$

donde ε_0 es la permitividad eléctrica en el vacío y tiene un valor de $8,85418 \times 10^{-12} \frac{F}{m}$ y ε_r es conocida como la permitividad relativa del material [6]. En la siguiente Tabla se muestran valores de permitividad relativa de algunos materiales:

Tabla 2. Permitividad relativa de materiales. Adaptado [6]

Material	Permitividad relativa ε_r
Aire	1,00059
Agua (20°C)	81
PVC	3,2
Plexiglás	2,55
Vidrio	6

1.4. Resonancia

La resonancia tiene como origen la presencia de elementos reactivos (bobinas y condensadores) propios del circuito. Dado lo anterior, se tiene que asociar los dos elementos anteriormente mencionados a parámetros en función de la frecuencia, conocidos como reactancia inductiva X_L y reactancia capacitiva X_C , las cuales están dadas de la siguiente manera respectivamente:

$$X_L = \omega L \quad \text{Ec. 11}$$

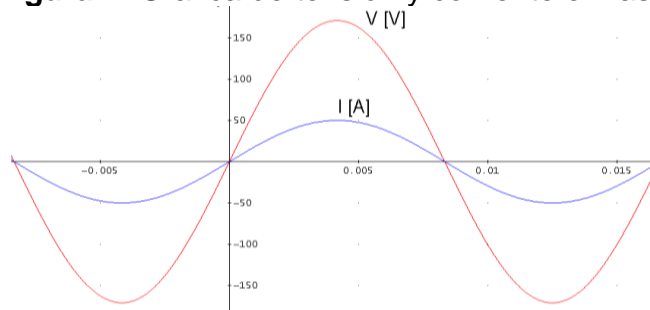
$$X_C = \frac{1}{\omega C} \quad \text{Ec. 12}$$

Dadas estas reactancias, se puede decir que la reactancia inductiva X_L aumenta si la frecuencia " ω " aumenta, caso contrario en la reactancia capacitiva X_C la cual disminuye si la frecuencia " ω " aumenta. Dado este comportamiento de los elementos reactivos, se puede llegar a neutralizar a una frecuencia particular las reactancias capacitivas e inductivas conectadas en un circuito serie, así mismo, puede llegar a pasar lo mismo con las susceptancias de condensadores y bobinas conectadas en circuito paralelo, por lo tanto, se puede decir que el comportamiento en dicha frecuencia sería netamente resistivo [8].

1.4.1. Frecuencia de resonancia

La frecuencia de resonancia es aquella en la cual se obtiene un valor máximo en la respuesta de tensión o corriente, esto debido a la anulación de los efectos capacitivos e inductivos en la red eléctrica o circuito eléctrico analizado.

Figura 2. Grafica de tensión y corriente en fase.



de una manera análoga, se puede definir la frecuencia de resonancia como los valores máximos de energías almacenadas en condensadores y bobinas, se puede decir que la tensión y la corriente están en fase, como se muestra en la Figura 2 [8].

1.4.2. Comportamiento de un circuito en resonancia

Al momento de realizar la variación de la frecuencia angular ω de la fuente de excitación, se evidencia la variación de la amplitud de la corriente I en función de la ecuación 13, dicha variación de la frecuencia angular se varía como se muestra en la Figura 3; donde el valor máximo de I se registra cuando se encuentra un valor de frecuencia tal que la impedancia Z es mínima, donde el valor máximo que puede llegar a tomar la amplitud de la corriente I , se presenta en una determinada frecuencia la cual se llama resonancia [9].

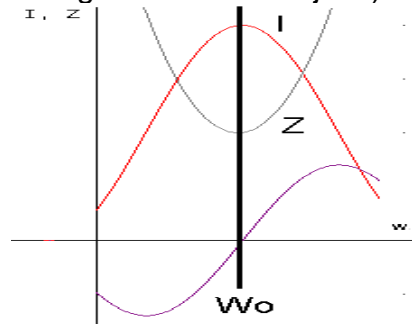
$$I = \frac{V}{Z} \quad \text{Ec. 13}$$

$$X_L = X_C \quad \text{Ec. 14}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{Ec. 15}$$

La frecuencia angular ω_0 , en la cual se presenta el máximo de resonancia se conoce como frecuencia angular de resonancia, dicha frecuencia angular de resonancia hace que las reactancias capacitiva e inductiva sean iguales, pero con diferente signo, por tal motivo se cancelan dando como resultado un valor de reactancia cero y por ende solo permanece la parte resistiva del circuito. [9],

Figura 3. Corriente e impedancia como funciones de la frecuencia angular (escala logarítmica en el eje ω)



1.5. Densidad de descargas a tierra

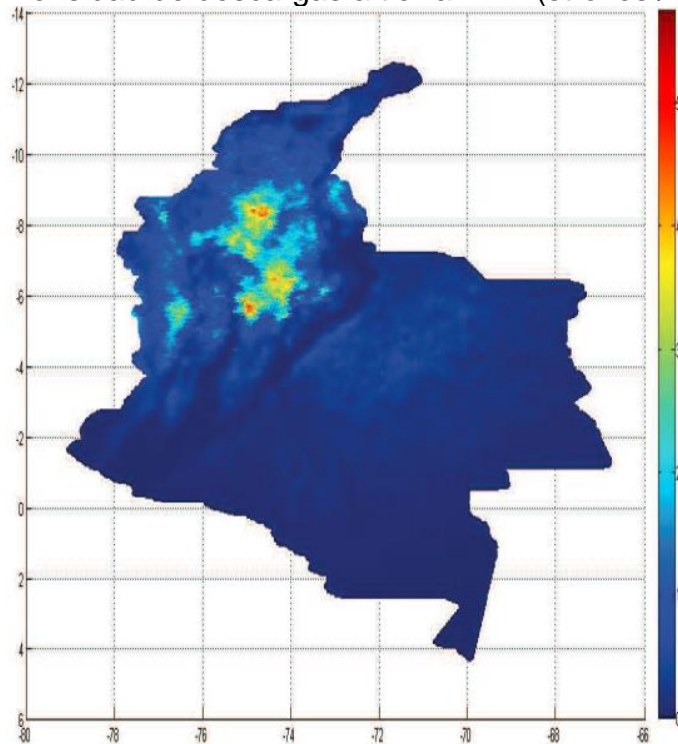
De acuerdo con la Norma Técnica Colombiana (NTC 4552), la Densidad de Descargas a Tierra (DDT) o Ground Flash Density (GFD) se conoce como el número de descargas individuales (strokes) por kilómetro cuadrado al año [10]. El DDT se ha obtenido mediante mediciones directas con equipos contadores de rayos, sistemas localizadores, pero más actualmente con el uso de sistemas satelitales [11].

Tabla 3. DDT medidas en diferentes latitudes del planeta. [1]

Lugar	Latitud	DDT (Descargas/ Km^2 -año)
Brisbane, Australia	27°S	4.5
Gabarone, Botswana	24°S	38.2
Minas Gerais, Brasil	15°S	10
Darwin, Australia	12°S	5.5
Orlando, USA	28°N	26.2
Berlín, Alemania	52°N	0.73
Tomsk, Rusia	54°N	1.5
Uppsala, Suecia	60°N	0.66
Bagre, Colombia	8°N	67

Con la entrada de los contadores de rayos, se empezó a realizar comparaciones del valor de DDT en diferentes lugares, donde se realizaron mediciones como se muestra en la Tabla 3, donde se puede evidenciar que dependiendo la ubicación donde se realizó la medición varía el DDT, donde los valores más altos se presentan en lugares ubicados en la zona tropical del planeta.

Figura 4. Densidad de descargas a tierra DDT (strokes / km² x año).



El DDT en Colombia se obtiene mediante la red LINET [12], que es administrada por Keraunos S.A.S. [13], la cual cuenta con un conjunto de 10 antenas de campo magnético con una eficiencia de más del 90% y menos de 500 metros de incertidumbre en el lugar de la descarga. El DDT del año 2012 se muestra en la Figura 4, el cual fue realizado en Matlab y con datos suministrados por Keraunos S.A.S.

Los lugares con mayor actividad eléctrica atmosférica en Colombia se encuentran en los departamentos de Magdalena, Boyacá, Bolívar, Antioquia y Cundinamarca.

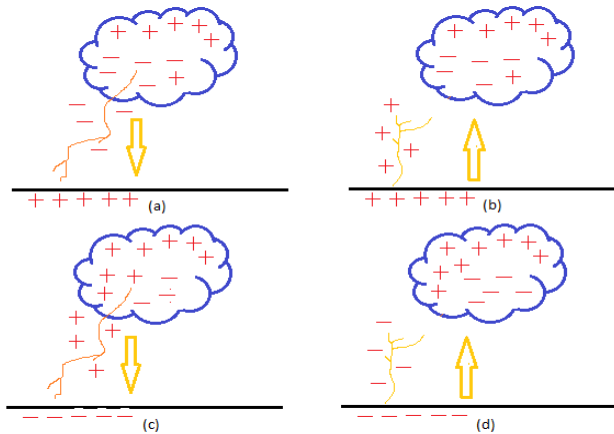
1.6. Polaridad de los rayos

La polaridad de un rayo puede ser positiva o negativa, esto se evidencio con las mediciones realizadas por Berger en los años 50 en Monte San Salvatore ubicado en suiza. A través del tiempo se ha determinado que los valores de amplitud de corriente de retorno de rayo tienen valores más elevados en rayos de polaridad positiva, pero esta polaridad solo se tiene entre un 5 y 10% del total de las descargas eléctricas atmosféricas en el mundo, mientras que los rayos de polaridad negativa se encuentran alrededor de un 90 y 95% del total de las descargas presentadas sobre la superficie terrestre. [1].

Las descargas de polaridad positiva se relacionaron directamente a climas fríos, latitudes altas y grandes elevaciones, adicionalmente en Colombia con la implementación de las antenas TSS 420 se dedujo que los rayos de polaridad

positiva no solo dependían de esas condiciones climáticas sino de condiciones temporales como hora y periodo del año. [11]

Figura 5. Tipos de descarga de rayos nube- tierra



(a) Downward negative lightning, (b) Upward negative lightning, (c) Downward positive lightning, (d) Upward positive lightning

Se pueden tener cuatro tipos de descargas nube a tierra, dentro de la polaridad negativa se pueden tener descargas descendentes o ascendentes como se muestra en la Figura 5 en los ítems a y b respectivamente, así mismo, con la polaridad positiva se tienen descargas descendentes y ascendentes Figura 5 literal c y d respectivamente. El grupo de polaridad negativa tanto en ascendente y descendente suman un porcentaje entre 90-95% del total de los rayos, mientras que el grupo de rayos de polaridad positiva en tipo ascendente y descendente tienen un porcentaje entre el 5-10% del total de las descargas eléctricas atmosféricas. [14]

1.7. Magnitudes de corriente de retorno de rayo

La magnitud de corriente de retorno de rayo varía según su ubicación, en países ubicados dentro de la zona ecuatorial la magnitud es mayor respecto a países ubicados en latitudes norte o latitudes sur [1].

Tabla 4. Mediana del valor pico de corriente de retorno de rayo en diferentes países. [1]
 Dados los valores anteriores, se puede evidenciar que los países ubicados en la zona tropical tienen una mediana mayor de corriente.

País	Mediana (kA)
Estados Unidos	23
Suiza	30
Suecia	30
Polonia	31
Malasia	36
Brasil	45,3
Republica de Zimbabwe	42
Colombia	42,9

1.8. Clasificación de las descargas eléctricas atmosféricas

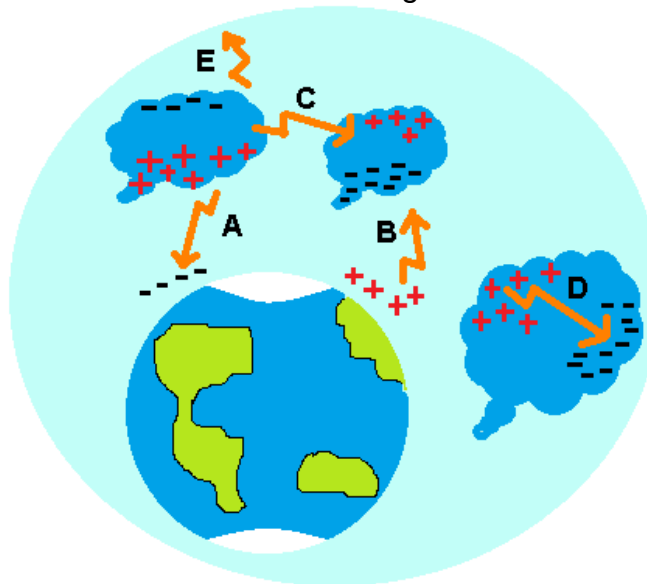
Las descargas eléctricas de origen atmosférico son producidas por la formación de canales, los cuales realizan la conducción y conexión entre dos puntos, según, como y donde se ubiquen dichos puntos, los rayos se pueden clasificar en siete tipos o también esta clasificación se puede reducir en tres grupos [15], los cuales se mencionan y se muestran en la Tabla 5 y Figura 6 respectivamente.

Tabla 5. Clasificación de las descargas atmosféricas

Grupo	Tipo
Nube tierra	Ascendentes (Positivo o negativo)
	Descendentes (Positivo o negativo)
	Artificiales
Atmosféricas	Nube-Nube
	Intra-Nube
Atmosféricas superiores "Nube-Ionosfera"	Blue Jets
	Sprites (Duendes)

Gráficamente se pueden visualizar los diferentes tipos de rayos en la siguiente ilustración:

Figura 6. Clasificación de las descargas eléctricas atmosféricas



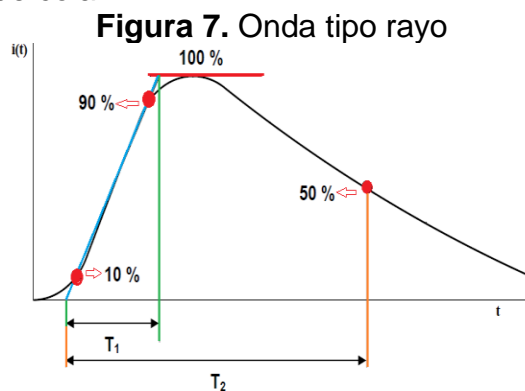
(A)Nube-Tierra descendente, (B)Nube-Tierra ascendente, (C)Nube-Nube, (D)Intra-Nube, (E)Nube-Ionosfera

Dada esta clasificación, se hará énfasis en el grupo nube-tierra, ya que estas son las que se pretenden medir en este trabajo, dicho esto se puede decir lo siguiente:

- Descargas Nube-Tierra: Forman la menor actividad eléctrica durante las tormentas eléctricas, este dato se puede estimar en alrededor del 25% del total de la actividad eléctrica atmosférica en el planeta, se clasifica este grupo en:
 - Descarga descendente: Se presentan cuando el inicio de la descarga eléctrica comienza en la nube. Para este caso las descargas eléctricas de polaridad negativa constituyen el 90% del total de las descargas eléctricas Nube-Tierra [15].
 - Descargas ascendentes: Se presentan cuando el inicio de la descarga eléctrica tiene como comienzo algún objeto ubicado en la superficie de la tierra, más frecuentemente en estructuras de gran altura [15].
 - Descargas artificiales: Son descargas eléctricas atmosféricas forzadas a caer en un determinado lugar, esto mediante el uso de cohetes “Rockets” equipados con un alambre conductor, tienen un comportamiento equivalente y muy similar a las descargas naturales [15].

1.9. Onda tipo rayo

Una onda tipo rayo básicamente es una señal con un ascenso muy rápido, donde este tramo se conoce como tiempo de frente y un descenso más lento el cual tiene como nombre tiempo de cola.



- Tiempo de frente (T_1): Se consigue trazando una recta tangente al valor pico de la señal, luego se realiza el trazo de una recta que una los puntos del 10% y 90% del pico de la señal que adicionalmente cruce por la recta tangente y la recta del eje de tiempo. El tiempo de frente es el que se tiene entre el punto donde se cruzan la pendiente y el eje de tiempo y la proyección del punto donde se presenta el cruce de la pendiente y la recta tangente al pico de la señal [10].
- Tiempo de Cola (T_2): este tiempo se encuentra entre el punto obtenido del cruce de la pendiente y la recta del plano del tiempo y un punto obtenido por la proyección del valor en el 50% en el eje de tiempo [10].

1.9.1. Formas de ondas de rayo normalizadas

Para ensayos de laboratorio y practicas académicas se han venido implementando algunas ondas normalizadas de rayo [16], entre ellas están:

Tabla 6. Valores normalizados para ondas de ensayo tipo rayo

Onda	Aplicación
1.2/50 μs	Tensión
8/20 μs	Corriente
10/350 μs	

La señal normalizada de tensión es usada para verificar que los equipos puedan resistir sobretensiones de origen atmosférico (impulso de tensión está dado en la IEC 61000-4-6), como también la onda de tensión normalizada de rayo es usada en aplicaciones relacionadas a aislamiento eléctrico.

Mientras que los dos tipos de señales normalizadas de corrientes son usadas en pruebas de dispositivos de protección contra sobretensiones basadas en la norma IEC 61643-11. Así mismo, estas dos ondas de corriente normalizadas también son usadas para determinar la inmunidad de equipos contra corrientes de rayo.

1.10. Medición de rayos

Para realizar la medición de un impulso tipo rayo o más conocido como corriente de retorno de rayo, existen dos formas de lograrlo, puede ser de forma directa o indirecta, a continuación, se entra en detalle en estas dos formas de medición:

1.10.1. Medición directa de rayos

Lo primero que una estación directa de medición de rayos debe contemplar es la capacidad y la soportabilidad para medir las magnitudes de todos los parámetros de la descarga eléctrica atmosférica, para esto se debe examinar el lugar de instalación de la torre de medición y hacer un estudio previo de las condiciones y variables del lugar; para luego realizar el diseño de los elementos de adquisición y medida. Los instrumentos usados en la medición se pueden discriminar en grupos, los cuales son:

- instrumentos receptores: Son los encargados de recibir el impacto del rayo, el instrumento receptor más conocido se llama antena de descarga y esta se ubica en la punta de la torre de medición. [1].
- Instrumentos ciegos: Son conformados por elementos de derivación como la resistencia shunt, la torre e incluso la antena de descarga entra en este tipo.

- Instrumentos indicadores y registradores: Como su nombre lo dice, estos indican y registran datos, los elementos que están en este grupo son el osciloscopio o tarjetas de adquisición de datos.
- Instrumentos transmisores: los elementos que conforman este grupo pueden ser la shunt o accesorios que lleven la señal a un elemento registrador, transductores, convertidores y elementos de derivación de la señal. [1].
- Instrumentos adicionales: estos elementos son opcionales y entre los cuales están molinos de campo eléctrico, sensores de campo magnético y cámaras fotográficas de alta velocidad.

1.10.1.1. Elementos para la medición directa de rayos.

Los instrumentos usados para la medición directa de rayos son los siguientes:

- Bobina de Munich: Transductores utilizados para obtener la pendiente de la corriente del rayo. Aunque no reciben directamente el impacto, se consideran seguros para el manejo de altas corrientes al aislar los equipos de medida [1]
- Bobina de Rogowski: Tiene la particularidad que no tiene problemas de offset ni tampoco problemas de saturación, esta cuenta con un amplio rango de medición y adicionalmente es capaz de medir corrientes altas a altas frecuencias [17]
- Resistencia Shunt: Cuenta con un alto grado de linealidad, los materiales recomendados para su fabricación son kantal o ferroníquel. La resistencia Shunt se puede utilizar para determinar la forma de onda del impulso de corriente, esto mediante la caída de tensión reflejada en la resistencia. [18]
- Osciloscopio: Existen de tipo analógico y digital, los primeros trabajan con variables continuas mientras que los segundos trabajan con variables discretas. Los osciloscopios analógicos, son preferiblemente usados cuando se visualiza variaciones rápidas de la señal de entrada en tiempo real. Los osciloscopios digitales son adecuados para visualizar y estudiar eventos no repetitivos. [1].

1.10.2. Mediciones indirectas de rayos

Las mediciones indirectas de descargas eléctricas atmosféricas pueden ser realizadas mediante redes localizadoras de rayos, mediciones satelitales y redes de molinos de campo eléctrico. A continuación, se describen algunos sistemas:

1.10.2.1. Sistema LLP

El Sistema Lightning location and protection (LLP) está desarrollado a partir de una técnica llamada Direction Finder DF la cual fue desarrollada por Uman and Krider,

los cuales estaban en la capacidad de registrar de manera automática descargas eléctricas atmosféricas de nube a tierra de polaridad negativas en un rango de cientos de kilómetros [11]

1.10.2.2. Serie IMPACT

Esta es una evolución del sistema LLP, fue llamado IMPACT DF y comercialmente ALDF-141-E, el cual combina la tecnología de MDF Magnetic Direction Finding y la tecnología de Precise Timing, logrando así una mejora en la exactitud de la localización en 0.5 kilómetros o mejor si se implementan 4 sensores sobre una línea base de 200km, cuando se juntan ambas tecnologías se puede lograr una estimación más optima de la localización. [11]

1.10.2.3. Sistema LPATS

El sistema "LPATS" Lightning Position and Tracking System, implemento la técnica de Time of Arrival o tiempo de arribo, este técnica ayudo a lograr una gran exactitud al momento de determinar la localización de una descarga, también puede detectar más del 85% de los rayos nube tierra que se registran dentro del alcance del dispositivo, a su vez, este receptor es capaz de rechazar descargas entre nubes y ruidos, para su versión actualizada de este LPATS mejora la exactitud que puede ser mejor que un kilómetro sobre el 95 % del área en monitoreo [11]

1.10.2.4. Máquinas de campo eléctrico

El Molino de campo eléctrico que salió a la luz por los investigadores Malan y Scholand, el cual es capaz de medir el campo eléctrico ambiental en la tierra E_{gnd} . Para el desarrollo del molino de campo se utilizó el principio de inducción de carga superficial, donde existe un electrodo, el cual es expuesto y cubierto periódicamente con un movimiento rotacional, con lo cual se genera una carga eléctrica variable. El mecanismo que se usa es la implementación de una hélice, la cual hace las veces de apantalladora, la cual cubre y deja expuesta el electrodo sensor, con lo cual la placa sensora tendría una carga total Q que dependería del área expuesta con el movimiento rotacional, por ende, la carga Q estaría en función del tiempo y se expresa de la siguiente manera: [11].

$$Q(t) = \epsilon_0 \vec{E}A(t) \quad Ec. 16$$

1.10.2.5. Lightning Imaging Sensor LIS

El Lightning Imaging Sensor o en sus siglas en ingles LIS, es un sistema de observación el cual fue implementado por la NASA (por sus siglas en inglés, National Aeronautics and Space Administration), el cual fue desarrollado con el objetivo de determinar una distribución y encontrar como varían los rayos sobre el planeta, así mismo, con la implementación de este sistema se trata de realizar pronósticos climatológicos y de alguna manera relacionar los rayos a otros fenómenos climáticos [11].

1.10.3. Mediciones indirectas en Colombia

Las mediciones indirectas iniciaron en 1988 en la Universidad Nacional de Colombia por el programa de investigación PAAS-UN y la Empresa de Energía de Bogotá, con lo cual se planteó desarrollar un programa con el cual se estudiará este fenómeno natural, al cual se unirían más adelante empresas como ISA, EMP CORELCA, entre otras, esto debido al interés de todas por conocer más acerca de las descargas eléctricas atmosféricas y sus consecuencias a equipos y personal de sus compañías [11], los sistemas implementados en el país han sido:

1.10.3.1. LPATS en Colombia

Se puso en funcionamiento en el año de 1997, para su primera fase contaba con seis sensores que se localizaban en Sabanalarga, Cerromatoso, Los Palos, San Carlos, San Marcos y torca, esta primera fase estuvo comprendida entre los años de 1997 y el año 2001, se ubicaron de esta manera para dar una mayor cobertura de la red eléctrica nacional. [11]

1.10.3.2. LLP en Colombia

Empresas Públicas de Medellín en el año de 1994 adquirió el sistema LLP o sistema de medición y localización de descargas eléctricas atmosféricas, el cual contaba con cuatro sensores que fueron ubicados en el departamento de Antioquia más específicamente en Troneras, Rio grande II, La Fe y Playas. Así mismo, la Universidad Nacional de Colombia adquirió el sensor LLP TSS-420, el cual fue instalado en las instalaciones de la Universidad en la sede Bogotá en el año de 1990 y estuvo en funcionamiento hasta el año de 2004, este sensor tenía un rango de funcionamiento de 185 kilómetros. [11]

1.10.3.3. Red Colombiana de detección total de rayos LINET

La red LINET implementada en Colombia, ha podido suministrar una serie datos histórica de la actividad eléctrica atmosférica más grande que existe en la zona tropical, con lo cual ha podido contribuir ampliamente al entendimiento de este fenómeno natural [19]. En los últimos años la densidad de descarga a tierra en Colombia se obtiene mediante la red LINET, la cual es administrada por Keraunos SAS, la cual cuenta con un conjunto de 10 antenas de campo magnético con una eficiencia de más del 90% y menos de 500 metros de incertidumbre en el lugar de descarga. La información obtenida es necesaria para estudiar el riesgo eléctrico por esta actividad. [20]

1.10.3.4. Sensores de Campo Electroestático PreThor

La medida que se realiza de campo electrostático Tipo I como la llama la norma IEC62793, es catalogada como la mejor manera de detectar la presencia de una tormenta eléctrica. El sensor PreThor usado para la medición de campo electrostático ha sido desarrollado en Colombia, con lo cual fue adaptado a las condiciones tanto meteorológicas y geográficas que se presentan en Colombia.

Este desarrollo tecnológico ha aportado para el entendimiento del rayo en el país y con lo cual se ha podido llegar a usar para sistemas de alerta temprana de tormentas en sectores como Oil & Gas, sectores eléctricos, minas, campos de golf entre otros. [19]

1.10.4. Estaciones de medición directa de rayos

Con la necesidad de realizar mediciones de impulsos tipo rayo y conocer más acerca de este fenómeno natural, en el mundo se han instalado varias estaciones de medición directa de rayos incluyendo a Colombia que también cuenta con una estación para hacer la medición directa de rayos.

1.10.4.1. Estaciones de medición directa en Colombia

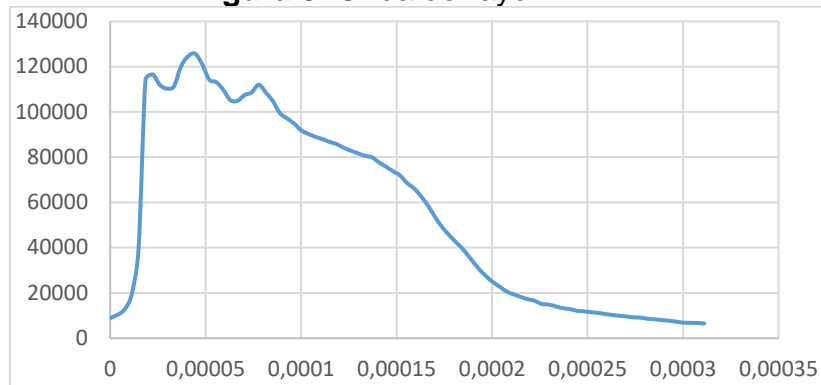
En Colombia se estimaron las magnitudes de los parámetros del rayo mediante mediciones indirectas a través de los sistemas de localización de descargas en 1998, sin embargo, se vio la necesidad de complementar la caracterización del rayo en el trópico a través de las mediciones directas, esto se llevó a cabo con la organización del grupo PAAS de la Universidad Nacional, donde se realizó el diseño y construcción de una estación instrumentada [21].

1.10.4.2. Estación experimental de medición directa de rayos, Ilyapa

Para la implementación de esta estación ubicada en el municipio de Samaná en el departamento de Caldas, se realizó un estudio detallado que se fundamentó en la hipótesis de variación espacial y temporal de los parámetros del rayo (Torres, 1998), es decir se buscaba un lugar que cumpliera los requerimientos de seguridad, facilidad de acceso y, principalmente, una alta densidad de descargas a tierra, DDT [1].

Ilyapa originalmente estaba ubicada en la latitud $5^{\circ}26'36''$ N y longitud $74^{\circ}56'12$ W, este lugar tiene una altitud de 1000 msnm y un DDT de $35 \frac{\text{strokes}^2}{\text{Km}} - \text{año}$, adicionalmente tenía un fácil acceso, con lo cual se cumplía con los requisitos para su instalación. Inicialmente Ilyapa tenía una altura de 30 metros y 60 centímetros de ancho, una base piramidal en la cual se instaló los equipos de medida. La estación Ilyapa se cambió de ubicación en el año 2001 a Puerto Olaya en unas instalaciones de Ecopetrol, donde se aumentó su altura a 60 metros [1]. En la estación Ilyapa se pudo registrar algunas ondas, uno de estos eventos se muestra a continuación:

Figura 8. Onda de rayo ILYAPA



Fuente: Rubiano, Jonathan. Análisis estadístico de dos parámetros de rayo en zona tropical [3].

1.10.4.3. Estaciones de medición directa en el mundo

Existen varias estaciones instaladas alrededor del mundo que han contribuido a la investigación de los parámetros del rayo, las siguientes son algunas de las estaciones de medición directa que existen:

Estación de la torre de telecomunicaciones del Monte Hoher Peissenberg (Alemania): Las mediciones en la torre de telecomunicaciones de 160 m de altura en el monte Peissenberg en el sur de Alemania comenzaron en 1978, con el fin de investigar el frente de impulso de corriente a la torre [1]

Estación en la torre Nacional de Toronto CN en Canadá: Es la más alta estructura libremente soportada del mundo, se asume que el punto de impacto está bastante lejos de la bobina (en la punta de la torre 79m por encima de la localización de la bobina) y así la corriente es dividida igualmente por los cinco lados del pentágono. [1]

Estación Morro Cachimbo en Brasil: es una torre de 60 metros de altura, en el transcurso de tiempo comprendido entre 2004-2011 se han registrado un total de 38 descargas de polaridad negativa, los valores de corriente registrados en el primer stroke fueron entre 18 y 45 kA. [22]

Torre Gaisberg: ubicada en Austria, tiene una altura de 100 metros, esta torre registro entre el año 2000 y 2007 una media en el pico de la corriente de retorno de rayo de 9.2 kA. [23].

Torre Santis: ubicada en Suiza, la cual tiene una altura de 124 metros, esta torre entre el periodo de tiempo transcurrido entre el año 2010 a 2012 registro 32 descargas de polaridad positivas [23]

Lanzamiento de cohetes: es una estructura de lanzamiento de cohetes ubicada en Alabama y la Florida, la cual es capaz de lanzar un cohete con un conductor

aterrizado a la atmosfera a una distancia de 200 o 300 metros cuando la nube de tormenta está cerca. Estas descargas inducidas tienen un comportamiento similar a una descarga natural [1].

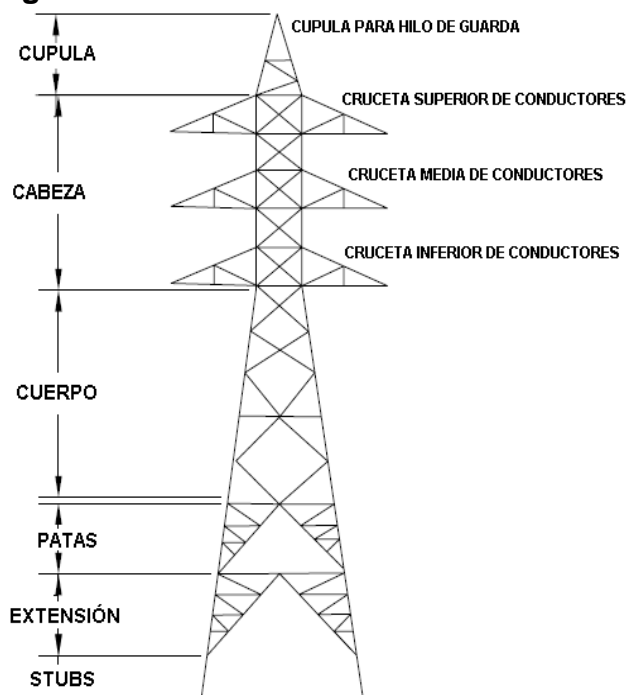
1.11. Torres de transmisión

Las torres de transmisión son estructuras fundamentales en la transmisión de energía eléctrica en el mundo, ya que estas soportan los cables que brindan el transporte de la energía eléctrica producida en un lugar de generación a lugares de consumo.

1.11.1. Partes de una torre de transmisión

En principio todas las torres de transmisión de energía eléctrica tienen las siguientes partes: cable de guarda, crucetas, cabeza, cuerpo piramidal, patas, stubs, extensiones, aisladores, herrajes y conductores. En la Figura que se muestra a continuación se puede apreciar las partes estructurales de una torre de transmisión.

Figura 9. Partes de una torre de transmisión.



Algo que no se menciona tanto son los stubs, los cuales son el ángulo de anclaje a la cimentación, este se diseña con el fin de anclar a la cimentación y tener la suficiente resistencia para soportar las fuerzas de tensión y compresión a la que está expuesta la estructura en general.

1.11.2. Tipos de torres

En la actualidad existen diferentes tipos de torres, estas deben ser capaces de soportar los cables de conducción y el cable de guarda para protección contra descargas atmosféricas. Adicionalmente deben cumplir con distancias de seguridad respecto a zonas de servidumbre y arcos eléctricos.

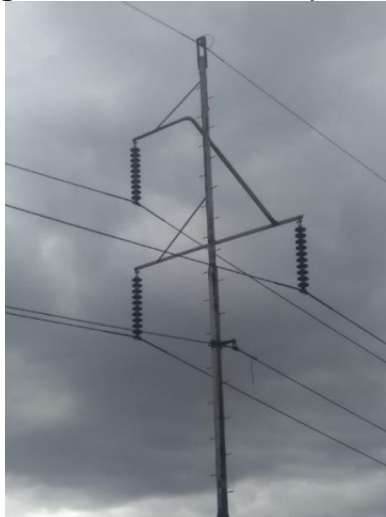
1.11.2.1. Según su función

Las torres se pueden clasificar según la función que desempeñen dentro de un sistema, a continuación, se definen los tipos de torres que existen según su función:

1.11.2.1.1. Torres de suspensión

Estas estructuras como su nombre lo indica son capaces de soportar el peso de los cables y de las cadenas de aisladores como se muestra en la siguiente Figura, estas también deben soportar el viento que golpea los aisladores y a los mismos conductores. Este tipo estructuras son usadas en tramos rectos y tienen como ventaja que son livianas en comparación a otras estructuras según su función.

Figura 10. Torre de suspensión.



Fuente: Foto tomada por el autor en la Av. 1ra de mayo con Kra. 30 en Bogotá

1.11.2.1.2. Torres de retención

Las torres de retención pueden tener las mismas cargas que las estructuras usadas en suspensión, pero con la diferencia que estas se usan dónde pueden existir cambios en la trayectoria de la línea de transmisión como en montañas, a comparación de las torres de suspensión que se usan en tramos rectos. Estas torres por soportar estos cambios de trayectorias deben ser más robustas y pesadas, por lo general se ven con una mayor abertura entre las cuatro patas con el fin de brindar más soporte. A continuación, se muestra una imagen en la cual se detalla una torre de retención.

Figura 11. Torre de retención.



Fuente: Foto tomada por el autor en la Av. 1ro de mayo con Kra. 68 en Bogotá.

1.11.2.1.3. Torres de terminal

Este tipo de torres de remate o terminal son conocidas por que se encuentran ubicadas al inicio o al final de una línea de transmisión, estas son más robustas que los dos modelos anteriores ya que deben soportar mayores esfuerzos mecánicos, este tipo de torre debe tener una cimentación cuidada al detalle para no incurrir en una posible caída de la estructura debida a las grandes fuerzas producidas. En la figura que se muestra a continuación se ve una torre tipo remate o terminal.

Figura 12. Torre de terminal o remate.

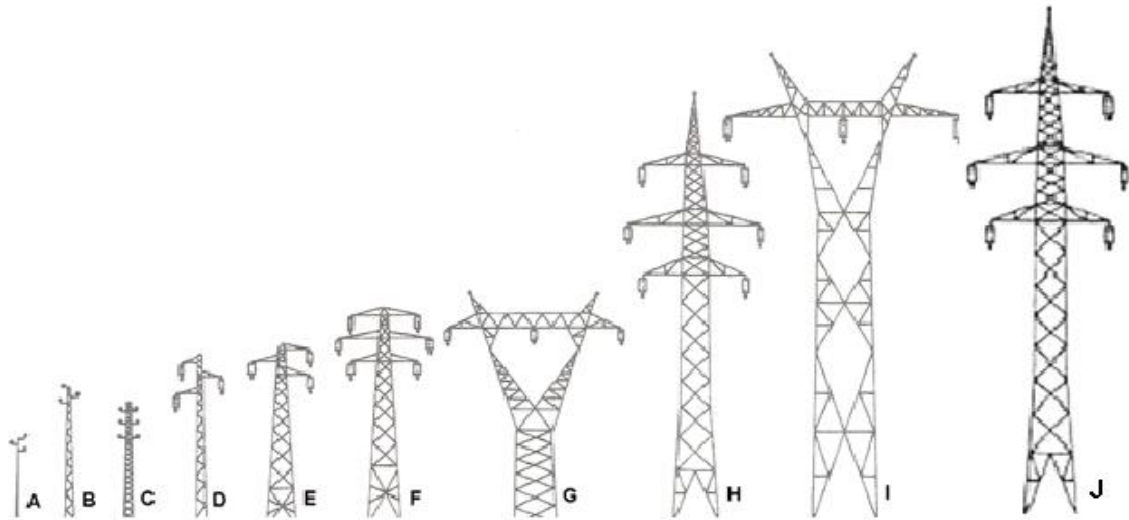


Fuente: Foto tomada por el autor en las afueras de la subestación San Carlos en Bogotá.

1.11.2.2. Según su geometría

Cuando se inicia un proyecto, lo primero que se busca es que la torre cumpla las especificaciones técnicas necesarias para su instalación, unas variables necesarias para encontrar la torre ideal son los niveles de tensión, distancias de seguridad, flechas y condiciones del terreno. La geometría a usar es en gran parte a la experiencia del diseñador, pero sin obviar los requerimientos técnicos.

Figura 13. Geometría Torres de transmisión.



Fuente: Adaptada de página sector electricidad. [24]

Otra de las variables a tener en cuenta en un diseño es la normatividad vigente en cada país en cuanto a construcción de líneas de transmisión. Algunas torres usadas se encuentran en figura anterior, donde se pueden ver estructuras tipo poste de solo 10 metros de altura hasta estructuras de 62 metros de altura y de forma piramidal.

Tabla 7. Altura de torres según el nivel de tensión.

Torre	Altura [m]	Nivel de tensión [kV]
A	10	45
B	16	66
C	14	66
D	19	110
E	20	132
F	25	132
G	26	220
H	47	220
I	51	330-420
J	62	500

La geometría se basa en los niveles de tensión y en la función que tiene la torre, con estos factores puede influir la apertura de las patas y sus cimientos, como también las longitudes y distancias entre las crucetas. También otros ítems a tener en cuenta son la facilidad de construcción y el costo de construcción de la torre, en muchos casos se busca facilidad y practicidad en la construcción de la misma o en otros casos se busca tener un ajuste monetario sin descuidar los requerimientos técnicos. En la tabla anterior se pueden ver las alturas y las tensiones que tienen las torres presentadas en la Figura 7.

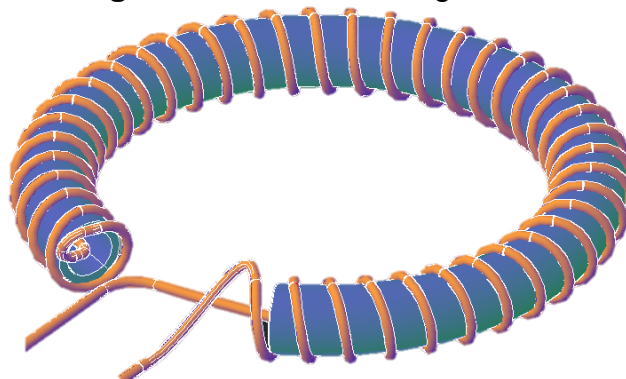
1.12. Características principales de una bobina de Rogowski

Una bobina de Rogowski esencialmente es un solenoide toroidal al cual se le hace un arrollamiento con un alambre conductor y donde este mismo conductor tiene su retorno por el centro del núcleo para así tener los dos extremos de la bobina en un mismo punto como se muestra en la figura 14. La bobina está acoplada magnéticamente al conductor y por ello se induce una tensión proporcional al cambio en el tiempo de la corriente medida, esto de acuerdo a la ley de inducción de Faraday. [25] [26].

Las ventajas de una bobina de Rogowski para la medida de pulsos de corriente, respecto a los transformadores de corriente, son:

- Linealidad: La medida es lineal debido a que el núcleo es de un material no ferromagnético, por tanto, no se producen fenómenos de saturación o histéresis, esto significa que la misma bobina se puede utilizar para medir un amplio rango de corrientes. [27]
- Aislamiento galvánico: El circuito de medida está aislado del circuito de potencia, esto constituye una gran ventaja cuando se quieren medir grandes intensidades.
- Buen ancho de banda: Las Bobinas de Rogowski pueden medir corrientes de frecuencias de algunos Hz hasta cientos de KHz.
- Facilidad de uso: Se debe a que no requieren un montaje especial.
- Es eficaz para medir corrientes: estas Bobinas se pueden usar para medir corriente de magnitud alta y con frecuencias elevadas. [28]

Figura 14. Bobina de Rogowski



Con lo anteriormente dicho se puede concluir que la bobina de Rogowski es muy útil para hacer mediciones de corrientes elevadas, tiene un buen ancho de banda, es segura, de fácil instalación y con mucha versatilidad.

2. Distribución y comportamiento de la corriente de rayo sobre un grupo de torres

Para poder simular el impacto de una descarga eléctrica atmosférica se tiene un modelo de corriente de retorno de rayo desarrollado por Fridolin Heidler [29], el cual se encuentra en la librería de Electromagnetic Transient Program (EMTP-ATP). La ecuación desarrollada por el profesor Heidler se muestra a continuación:

$$i(t) = \frac{i_{max}}{k} * \frac{(t/\tau_1)^n}{1+(t/\tau_1)^n} * e^{(-t/\tau_2)} \quad Ec. 17$$

Donde, i_{max} es el pico de corriente de la señal, t es el tiempo de evaluación de la señal, k es el factor de corrección del pico de corriente, n es un factor que modifica la señal en ampliarla o reducirla en el tiempo por ende modifica la pendiente de la señal y las constantes τ_1 y τ_2 son las constantes de tiempo conocidas como tiempo de frente y tiempo de cola respectivamente. [29]

En cuanto a la corriente de retorno de rayo, se va a plantear en la sección de resultados una simulación con la ecuación de corriente tipo rayo obtenida en el trabajo de grado de pregrado “ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DOS PARÁMETROS DE RAYO EN ZONA TROPICAL” desarrollada por el autor en la cual se determinó una ecuación con las condiciones dadas en el trópico y se puede replicar una señal real de rayo de las medidas en Colombia o Brasil, esta ecuación es la siguiente:

$$i = \left(\frac{A}{0.4545 + 0.1847 \ln(C_n)} \right) * e^{\frac{-(t-t_d)}{t_d(0.3274 + 0.1952 \ln(C_n))}} * \left(\frac{\left(\frac{t+0.2338*t_s}{t_s} \right)^{C_n}}{1 + \left(\frac{t+(0.2338*t_s)}{t_s} \right)^{C_n}} - 0.7773 * e^{-1.37 * C_n} \right) \quad Ec. 18$$

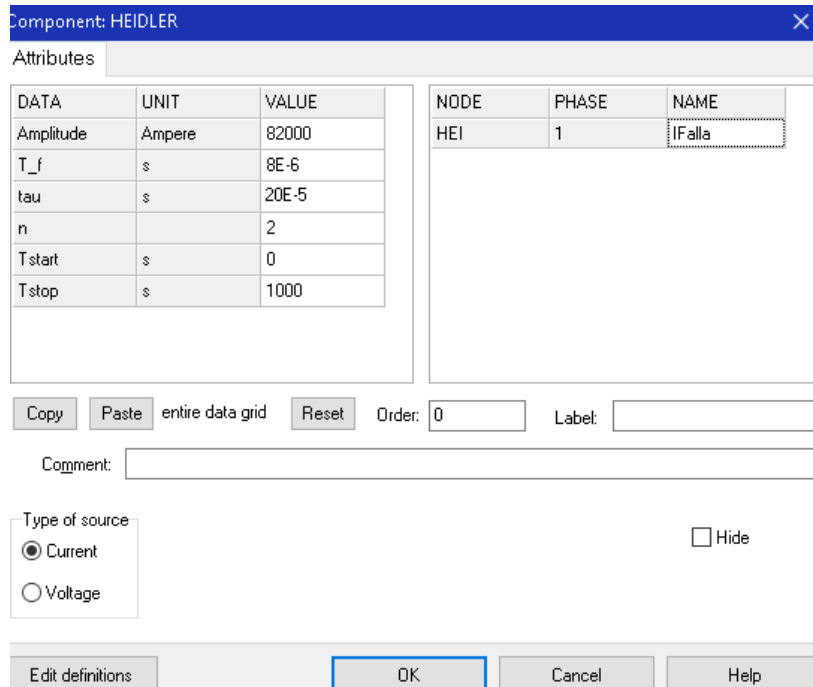
Donde A es la amplitud de la señal, t_d es el tiempo de descenso, el cual es el tiempo que se tarda la señal de 0 al 50% en decaimiento y t_s es el tiempo de ascenso el cual es el tiempo que tarda la señal en llegar de 0 al 90% de la señal en ascenso, adicionalmente C_n es el coeficiente de curvatura el cual está dado por:

$$C_n = \frac{2 * t_c}{1 * 10^{-5}} \quad Ec. 19$$

Para hallar este coeficiente de curvatura hay que tener el tiempo que tarda la señal del 50% de la onda de ascenso al 50% de la onda en descenso (t_c) (este tiempo debe estar en μs).

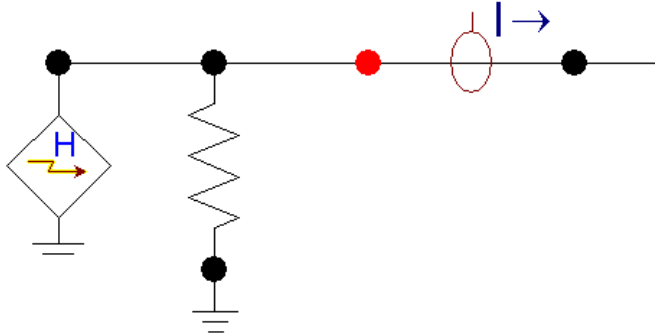
Para fines prácticos se usará la ecuación de Heidler en el desarrollo del modelo y que se encuentra en la librería de EMTP-ATP, aunque para la corroboración del modelo se usara la ecuación dada en la tesis de pregrado la cual se ingresó en ATP con un MODEL. Con lo anterior dicho se entra a usar la fuente tipo Heidler con la siguiente configuración:

Figura 15. Parámetros insertados para simular la fuente tipo Heidler.



Teniendo la fuente tipo Heidler con los parámetros ya establecidos se procede a completar el modelo para aplicarlo a un impacto sobre una torre o el cable de guarda, el modelo implementado se muestra en la Figura 16.

Figura 16. Modelo fuente de corriente para la simulación



Para modelar un impulso tipo rayo en el software EMTP-ATP la forma adecuada de hacerlo es haciendo uso de una fuente de corriente tipo Heidler en paralelo con una resistencia, donde esta resistencia simboliza la impedancia que tiene el rayo en su trayectoria hasta el punto de impacto.

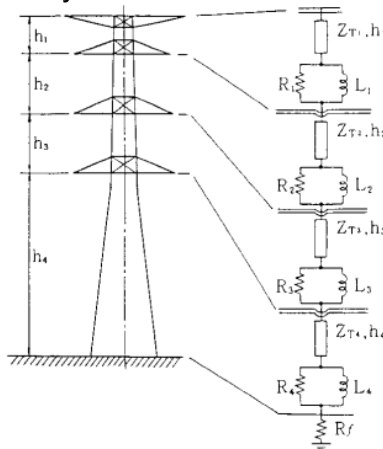
Para el desarrollo de este trabajo se va a usar una línea de transmisión de doble circuito con una tensión nominal de 230 kV con doble cable de guarda. La línea se va a simular con 7 torres espaciadas a 650 metros donde los conductores de fase y guarda se han espaciado como se muestra en la figura 17.

Figura 17. Disposición de las líneas.

Model										
Data										
Nodes										
#	Ph.no	Rin [cm]	Rout [cm]	Resis [ohm/km DC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]	Separ [cm]	Alpha [deg]	NB
1	1	0.2178	1.1785	0.0898	4.85	29	29	0	0	0
2	2	0.2178	1.1785	0.0898	4.85	35	35	0	0	0
3	3	0.2178	1.1785	0.0898	4.85	41	41	0	0	0
4	4	0.2178	1.1785	0.0898	-4.85	29	29	0	0	0
5	5	0.2178	1.1785	0.0898	-4.85	35	35	0	0	0
6	6	0.2178	1.1785	0.0898	-4.85	41	41	0	0	0
7	7	0.193	0.983	0.189	4.85	45	45	0	0	0
8	8	0.193	0.983	0.189	-4.85	45	45	0	0	0

Teniendo el modelo de la fuente Heidler y la distribución de las líneas, lo único que faltaría es modelar las torres de transmisión, para esto se analizó varios modelos donde los autores modelaron la torre en sobretensión, para este trabajo se planteó el uso del modelo Multistory de torre de transmisión, el cual fue propuesto Ishii y ayuda a modelar el comportamiento en sobretensión. El esquema del modelo Multistory desarrollado por Ishii se muestra detalladamente en la figura 18. [30]

Figura 18. Modelo Multistory de Torre de Transmisión desarrollado por Ishii

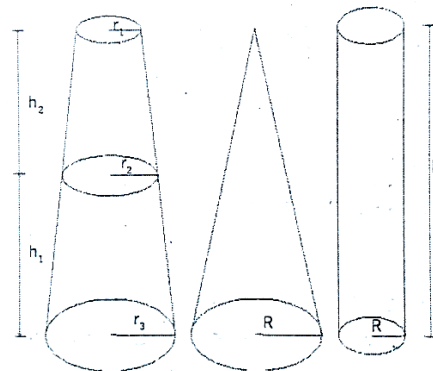


Fuente: Multistory Transmission tower Model for Lightning Surge Analysis. [30]

Cuando el modelo Multistory para torres de transmisión fue desarrollado, se planteó inicialmente para realizar simulaciones en EMTP-ATP para circuitos de transmisión a 500kV. Observando la figura 18, se puede terminar que el modelo propuesto por Ishii está conformado esencialmente por varios fragmentos, donde cada fragmento esta dado por un segmento de línea en forma parámetros distribuidos y un circuito "R-L" en paralelo, la suma de todos estos segmentos compone la impedancia total de la torre. Este modelo se puede implementar para circuitos de otras tensiones nominales, para el caso de este trabajo 230 kV.

El cálculo teórico de la impedancia total en sobretensión de la torre, la cual es una estructura vertical, se asocia a la geometría de la torre. El cálculo de esta impedancia ha sido un poco compleja debido al tiempo de viaje de la onda desde el punto más alto hasta la base de la misma, este tiempo está dado por la ecuación $t_0 = h/c$, donde h es la altura de la torre y c es la velocidad de propagación que para este caso es muy cercana a la velocidad de la luz, es decir $300 \text{ m}/\mu\text{s}$. Para una torre de 62 metros de altura el tiempo de viaje de la onda es de $0.206 \mu\text{s}$. Para el cálculo de esta impedancia se hace uso de la representación en forma geométrica básica de una torre de transmisión, entre las figuras usadas pueden estar cilindros o conos, esta implementación en forma de representación geométrica fue planteada por Almeida [31], la cual consiste en ver la representada la torre de transmisión de la siguiente forma:

Figura 19. Radio equivalente de una estructura



Fuente: El Rayo. [1]

La primera aproximación de la impedancia en sobretensión de la torre está dada por:

$$Z_0 = 60 * \text{Ln} \left\{ \cot \left[0.5 * \tan^{-1} \left(\frac{R}{h} \right) \right] \right\} \quad \text{Ec. 20}$$

Donde R es el radio equivalente de toda la estructura y h es la altura de la estructura a evaluar. Para el cálculo del radio equivalente se parte que la estructura se puede partir en una serie multietapa de conos truncados y se tiene como resultado la siguiente formula:

$$R = R_{eq} = \frac{r_1 h_2 * r_2 h * r_3 h_1}{h} \quad \text{Ec. 21}$$

Con la Fórmula 20 no se tiene una buena precisión por tal motivo se replanteo la ecuación dando como resultado la siguiente por Yamada [32]:

$$Z_0 = 60 \left[\text{Ln} \left(\frac{h}{R} \right) - 1 \right] \quad \text{Ec. 22}$$

Luego de estos avances de Almeida, Hara [33] encontró mejores resultados realizando una variación de las ecuaciones de impedancia en sobretensión la torre y del radio equivalente, las cuales se muestran a continuación:

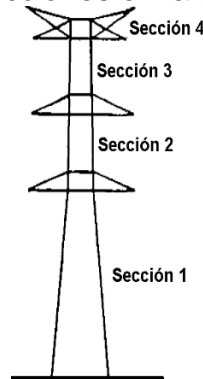
$$R = R_{eq} = \frac{r_1 h_2 * r_2 h * r_3 h_1}{2h} \quad \text{Ec. 23}$$

$$Z_0 = 60 \left[\text{Ln} \left(\frac{2h\sqrt{2}}{R} \right) - 2 \right] \quad \text{Ec. 24}$$

2.1. Ecuación desarrollada para hallar impedancias de sobretensión.

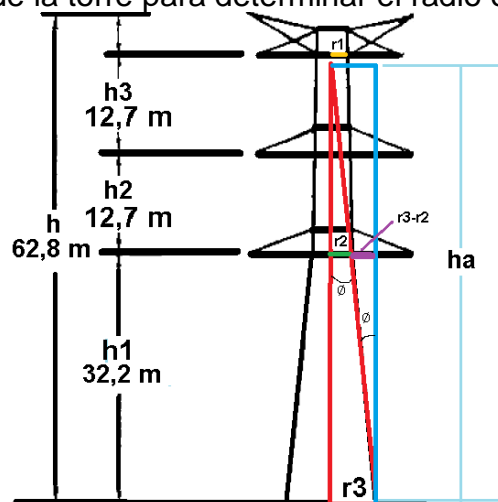
Las ecuaciones anteriores aplican de manera efectiva para la impedancia total de la torre, pero presentan errores considerables para la implementación en el modelo de Ishii, la cual necesita una impedancia de sobretensión de la torre por cada segmento, piso o paso de la torre como se muestra en la Figura 20.

Figura 20. Secciones en la torre según Ishii



Con el fin de aplicar el método Multistory a este trabajo, se desarrolló la siguiente metodología teniendo en cuenta los resultados experimentales obtenidos por Ishii en su trabajo, así como los antecedentes de cálculo de la impedancia total de la torre de transmisión, con lo cual se logró implementar unas ecuaciones que aproximan el cálculo de las impedancias de sobretensión en cada sección de la torre de transmisión.

Figura 21. Esquema de la torre para determinar el radio equivalente de sección 1



Para hallar el radio equivalente se parte de tener la vista frontal de la torre de transmisión y tener seleccionadas las diferentes secciones de la torre, con las secciones ya determinadas se realiza un ajuste a una figura trigonométrica sencilla

como un triángulo o un rectángulo. Para el caso de la sección 1 se tiene un triángulo como se ve en la Figura 21. A continuación, se muestra el procedimiento de hallar el radio equivalente en el caso de la sección 1 donde es un triángulo aproximado a la geometría de la torre en ese lugar:

$$\tan(\phi) = \frac{co}{ca}$$

$$co = r_3 - r_2 = a$$

$$ca = h_1$$

$$\tan(\phi) = \frac{r_3 - r_2}{h_1}$$

$$\tan(\phi) = \frac{r_3}{ha}$$

$$ha = \frac{r_3}{\tan(\phi)}$$

$$ha = \frac{h_1 r_3}{a}$$

limits are: $min \rightarrow ha - h_1, max \rightarrow ha$

$$R_{Section1} = \sum_{i=ha-h_1}^{ha} \frac{\frac{r_3-r_1}{h_1} * r_i}{n} ; \text{ where } n \text{ is a number of samples} \quad Ec. 25$$

La ecuación 25 es la sumatoria de todos los radios en el rango dado, pero para efectos prácticos el radio equivalente se puede dar de la siguiente forma dada la sencillez de la geometría:

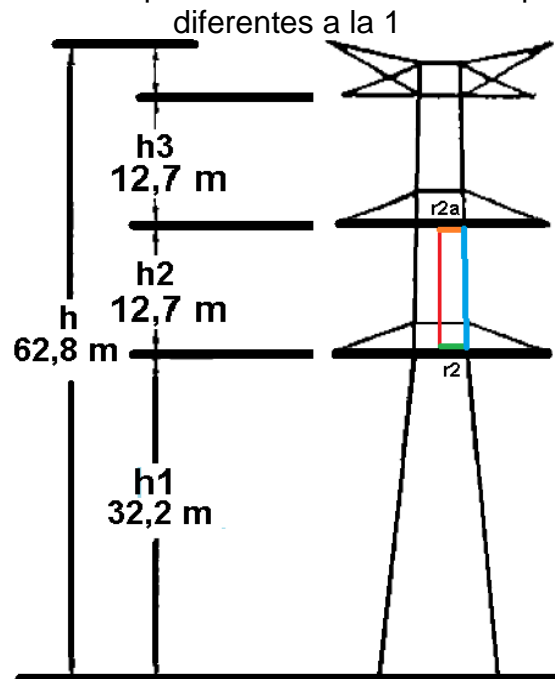
$$R_{sec1} = \frac{r_3-r_2}{2} + r_2 \quad Ec. 26$$

Ahora, cuando la geometría de la torre es como en la sección 2 (Figura 22), se puede asemejar a un rectángulo, aunque esta aproximación geométrica se puede realizar siempre y cuando la diferencia de los radios entre secciones no supere el 10% (Ecuación 27), de lo contrario se debe aplicar la Ecuación 26 como si fuera un triángulo.

$$\%_{dif} = \frac{r_{mayor} - r_{menor}}{r_{mayor}} * 100\% \quad Ec. 27$$

Cuando exista una diferencia menor al 10% y se realice una aproximación rectangular, se usa como radio equivalente el radio menor, ya que con este valor se tienen mejores resultados estadísticos y aplicado al modelo de Ishii tiene un mejor comportamiento, esto se puede ver más adelante en la Figura 23.

Figura 22. Esquema de torre para determinar el radio equivalente de secciones diferentes a la 1



El cálculo de la sección 2,3,4 tienen el mismo comportamiento, así que se realizan como si fueran un rectángulo.

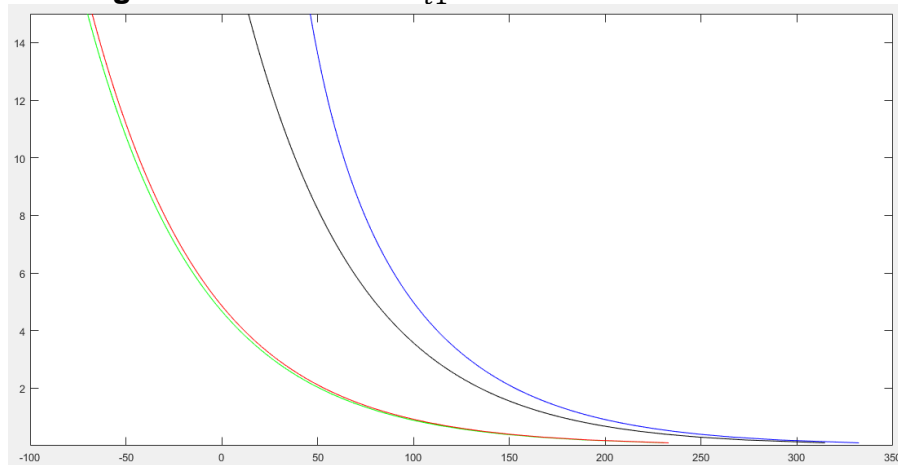
Para el cálculo de las impedancias $Z_{T1}, Z_{T2}, Z_{T3}, Z_{T4}$ en el modelo Multistory, se deben conocer primero las impedancias de sobretensión de la torre, las cuales se calcularán con la Ecuacion28, la cual presento un comportamiento adecuado para el modelo de Ishii. Para determinar la validez de la ecuación se contrastará sus resultados respecto a los otros modelos planteados por Almeida, Hara y Yamada:

$$Z_{t_{section}} = 60 \left[\text{Ln} \left(\frac{h^2 \sqrt{3}}{2R} \right) - 2 \right] \quad \text{Ec. 28}$$

Para contrastar los resultados de las diferentes ecuaciones, se tuvo en cuenta los resultados obtenidos en trabajos realizados por Ishii. A continuación, se realiza una validación de las diferentes ecuaciones con los datos presentados por Ishii en el artículo "Multistory Transmission Tower Model For Lightning Surge Analysis".

Para el cálculo de Z_{t1} se tiene una altura $h_2 = 12.7 \text{ m}$, radio equivalente para el cálculo de Z_{t1} en modelo planteado en este trabajo es 1.8 (radio menor de la sección), para los demás modelos aplica mejor un radio equivalente medio 1.96.

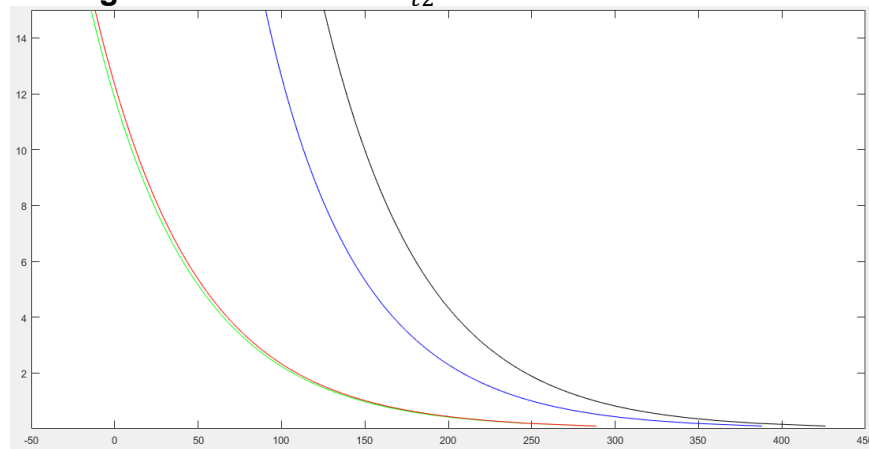
Figura 23. Cálculo de Z_{t1} con diferentes ecuaciones



Z_0 =Yamada (Verde), Z_{01} = Hara (Rojo), Z_{02} = Almeida (Azul), Z_{sec} = Ecuación planteada por autor (Negro).

Para el cálculo de Z_{t1} se tiene una altura $h_1 = 32.2 \text{ m}$, radio equivalente para el cálculo de Z_{t1} en todos los modelos es de 3.68 (radio equivalente sección como si fuera un triángulo),

Figura 24. Cálculo de Z_{t2} con diferentes ecuaciones



Z_0 =Yamada(Verde), Z_{01} = Hara(Rojo), Z_{02} = Almeida(Azul), Z_{sec} = Ecuación planteada por autor(Negro).

Datos obtenidos para las impedancias de sobretensión Z_{t1} y Z_{t2} :

Tabla 8. Valores de impedancia de sobretensión Z_{t1} para el modelo de Ishii.

Impedancia de sobretensión Z_{t1}			
Modelo	Valor	Referencia	Error %
Almeida	154,0624	150	2,71%
Yamada	52,1195	150	65,25%
Hara	54,5027	150	63,66%
<i>Planteada por autor</i>	<i>141,0624</i>	<i>150</i>	<i>5,96%</i>

Para el cálculo de la impedancia de sobretensión Z_{t1} , teniendo como referencia los valores de Ishii se puede ver que el modelo calculado en este trabajo tiene un error del 5,96% y el que tiene menor error es el de Almeida con un error de 2,71%.

Tabla 9. Valores de impedancia de sobretensión Z_{t2} para el modelo de Ishii.

Impedancia de sobretensión Z_{t2}			
Modelo	Valor	Referencia	Error %
Almeida	171,927	220	21,85%
Yamada	70,1432	220	68,12%
Hara	72,5265	220	67,03%
<i>Planteada por autor</i>	<i>209,8307</i>	<i>220</i>	<i>4,62%</i>

En lo que concierne al cálculo de la impedancia de sobretensión Z_{t2} , al igual que en el cálculo anterior, se tiene como referencia los valores de Ishii, con lo cual se puede observar que el modelo calculado en este trabajo tiene un error del 4,62% y el modelo que lo sigue es el de Almeida con un error de 21,85%.

Adicionalmente se presenta una ecuación usada para el cálculo de impedancias por secciones que encuentra en el libro "Measurement and analysis of overvoltages in power systems [34]" la cual es:

$$Z_{ti} = 60 \left[\ln \left(\frac{2\sqrt{2}H_i}{2^{1/8}(r_{ti}^{1/3}r_B^{2/3})^{1/4}(R_{ti}^{1/3}R_B^{2/3})^{3/4}} \right) - 2 \right] r_{ti}R_{ti} \quad Ec. 29$$

La anterior ecuación se aplicó al modelo de Ishii y también presento un comportamiento diferente, por lo cual se puede decir que las ecuaciones planteadas en este trabajo tienen un mejor comportamiento para hallar las impedancias de sobretensión por tramos aplicada al modelo de Ishii., en ambos casos presenta errores menores al 10%.

2.2. Cálculo de componentes en el modelo Multistory

Con las impedancias de sobretensión Z_{t1} y Z_{t2} definidas se plantea lo siguiente para hallar los valores de impedancia de la torre para la simulación como lo expresa Ishii:

$$Z_{t1} = Z_{T1} = Z_{T2} = Z_{T3}$$

$$Z_{t2} = Z_{T4}$$

Para completar el modelo de Ishii se necesita hallar la resistencia e inductancia de amortiguamiento que se encuentran en paralelo y a su vez en serie a la impedancia, estas se calculan de la siguiente manera:

Para el cálculo de las resistencias de amortiguamiento se tiene que γ corresponde al coeficiente de atenuación presentado por Ishii, el cual tiene un valor entre 0.7 y 0.8, adicionalmente se muestran dos ecuaciones, la Ecuación 30 sirve para el cálculo de las resistencias R_1, R_2, R_3 y la Ecuación 31, se usa para el cálculo de la resistencia R_4 , como se muestra abajo:

$$R_i = \frac{-2Z_{Ti}Ln(\sqrt{\gamma})}{h_1+h_2+h_3} h_i [\Omega] \quad Ec. 30$$

$$R_4 = -2Z_{T4}Ln(\sqrt{\gamma}) [\Omega] \quad Ec. 31$$

Para el cálculo de las inductancias de amortiguamiento se tiene la siguiente ecuación:

$$L_i = \alpha R_i \frac{2h}{V_t} [\mu H] \quad Ec. 32$$

Donde h es la altura total de la torre, α es el coeficiente de amortiguación el cual tiene un valor de 1 para torres de transmisión sin pérdidas en las líneas, pero este valor puede estar entre 0 y 1, V_t es la velocidad de propagación de la sobretensión que se aproxima a la velocidad de la luz la cual es $300 \text{ m}/\mu\text{s}$.

Con todos los parámetros definidos se procede a implementarlos en la línea compuesta por 7 torres de transmisión, donde se va a realizar un impacto directo de rayo en cada torre de transmisión y luego en la mitad del cable de guarda para observar y determinar el comportamiento de la corriente en estos elementos. A continuación, se muestra cada uno de estos sucesos:

2.3. Impacto de rayo en la torre 1

El modelo de fuente de corriente tipo Heidler aplicada se muestra en la Figura 26, esta se ubica de tal forma para simular un impacto de rayo en la torre número 1, como se muestra a continuación:

Figura 25. Circuito con 7 torres e impacto en la torre 1.

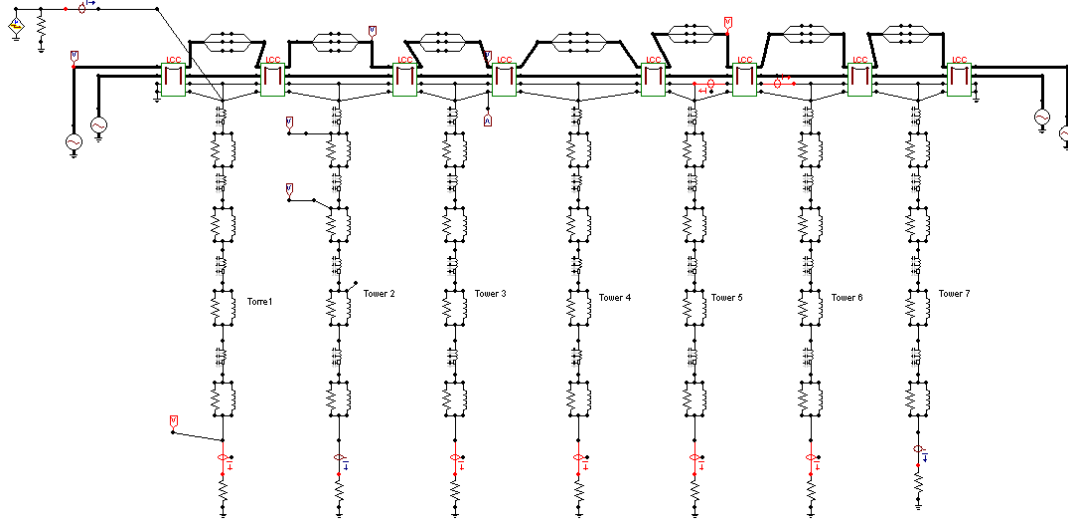
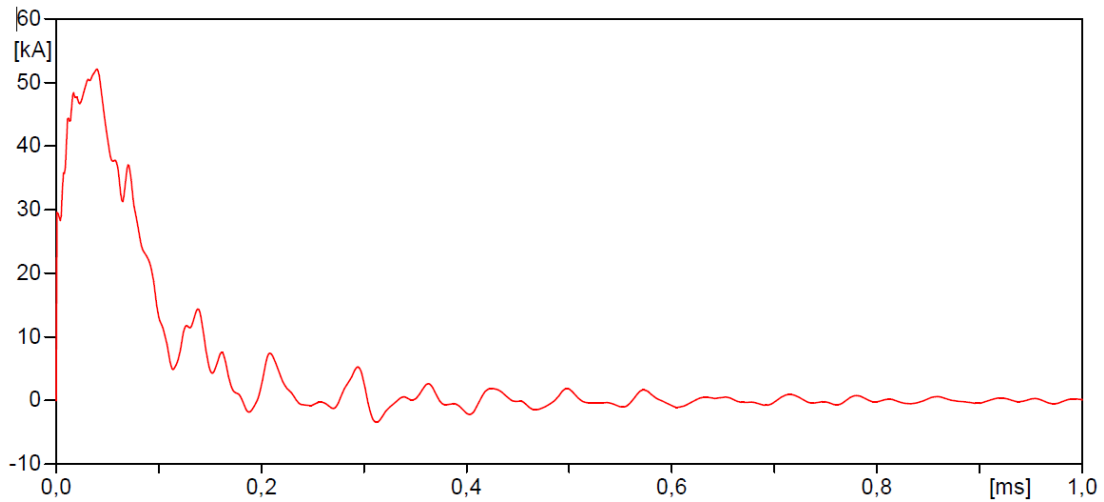


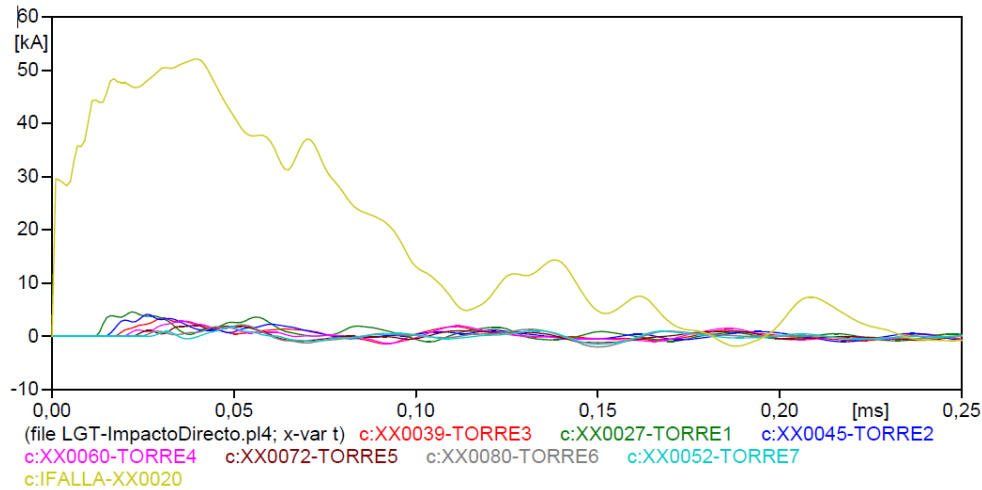
Figura 26. Modelo fuente de corriente de rayo tipo Heidler en el punto superior de la torre 1



Para ver el comportamiento y tomar decisiones relacionadas al impacto presentado en la torre 1 por una descarga eléctrica atmosférica, se realiza la correspondiente medición de cada una de las corrientes que circulan por las torres del circuito como se muestra en las siguientes graficas:

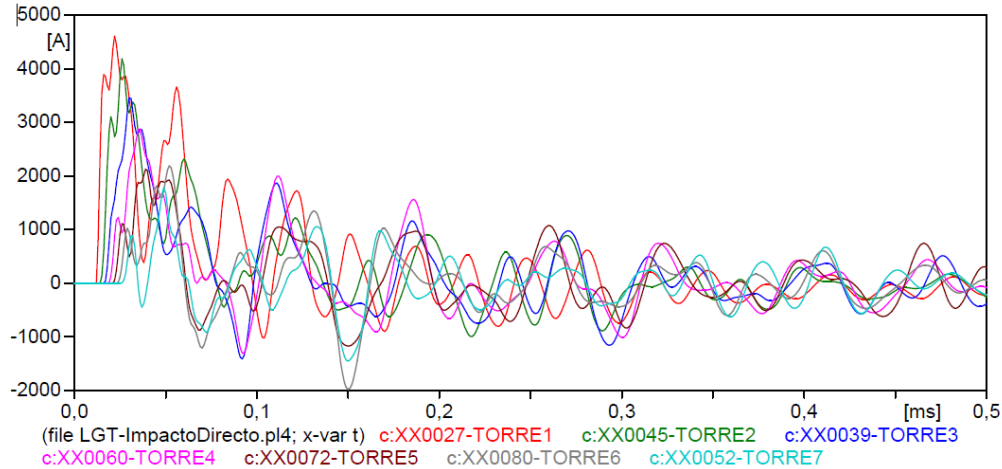
En la Figura 27 que se muestra a continuación, se presentan todas las corrientes del circuito, como lo son la corriente de impacto y las respectivas corrientes asociadas a cada torre.

Figura 27. Corriente de impacto en torre 1 y corrientes a tierra por las torres



Para buscar un patrón de comportamiento de las corrientes en las torres, se grafican estas únicamente como se muestra en la Figura 28.

Figura 28. Corrientes a tierra por cada torre cuando el impacto fue en la torre 1



Tendiendo la información de la Figura 28, se procede a hallar los valores picos de cada señal de corriente obtenida en las torres, la tabla mostrada a continuación, muestra los valores picos presentados.

Tabla 10. Valores de corriente pico cuando el impacto es en la torre 1

Maximus values [A]							
Total current	Tower 1	Tower 2	Tower 3	Tower 4	Tower 5	Tower 6	Tower 7
52114,02	4605,33	4185,616	3456,882	2877,329	2128,087	2188,412	1783,129

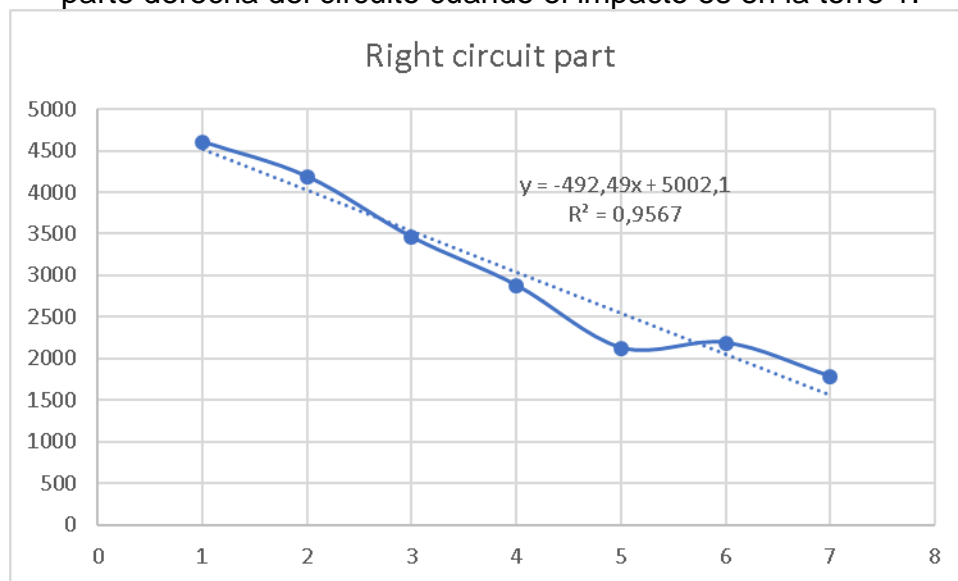
En la Tabla 10 se pudo observar los valores picos de las corrientes presentadas, teniendo en cuenta estos valores se procede a organizar los datos de mayor a menor y mostrar el porcentaje que representa cada corriente respecto a la corriente total, lo anteriormente dicho se presenta en la Tabla 11.

Tabla 11. Porcentaje de la corriente que baja por cada torre respecto a la fuente, cuando el impacto es en la torre 1.

Element	Current value [A]	Porcent %
Current total	52114,02	100
Tower 1	4605,339	8,837044
Tower 2	4185,616	8,031651
Tower 3	3456,882	6,633305
Tower 4	2877,329	5,521219
Tower 5	2128,087	4,083521
Tower 6	2188,412	4,199277
Tower 7	1783,129	3,421592

Teniendo los valores de la Tabla 11, se procede a realizar una linealización del comportamiento presentado por las corrientes en las torres de transmisión, esta curva se presenta en la Figura 49, donde se muestra la ecuación que lo relaciona y la correlación obtenida.

Figura 29. Curva de comportamiento del pico de corriente por cada torre de la parte derecha del circuito cuando el impacto es en la torre 1.



$$Current(tower) = -492.49 * tower + 5002.1 \quad Ec. 33$$

La corriente presentada en cada torre debida a un impacto de rayo en la torre 1 esta expresada en la ecuación 33, donde se remplaza el valor de "tower" de 1 a 7, siendo 1 la torre impactada y 7 la torre al final del circuito.

2.4. Impacto de rayo en la torre 2

El modelo de fuente de corriente tipo Heidler aplicada se muestra en la Figura 31, esta se ubica de tal forma para simular un impacto de rayo en la torre número 2, como se muestra a continuación:

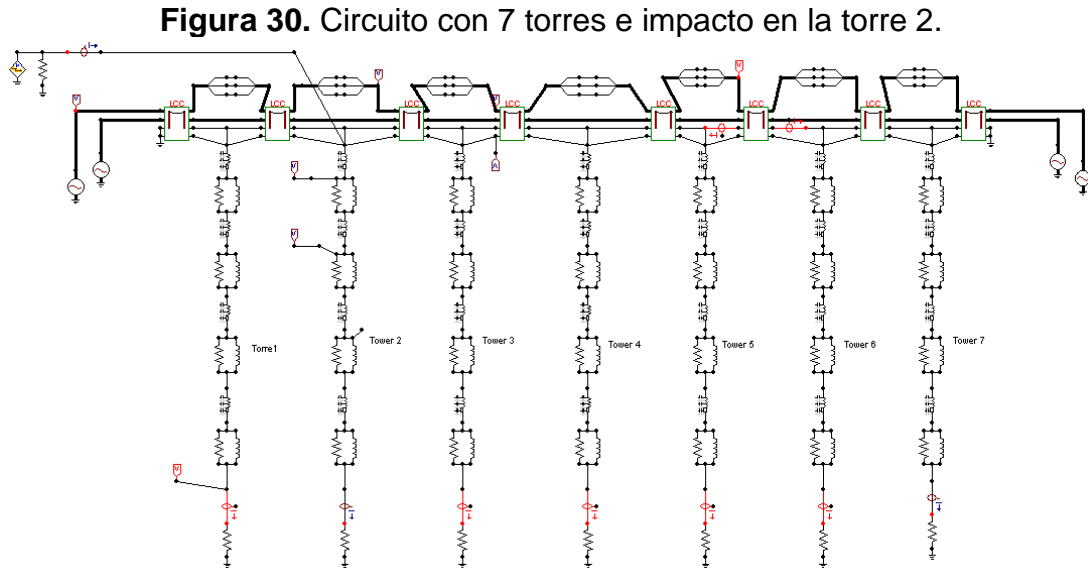
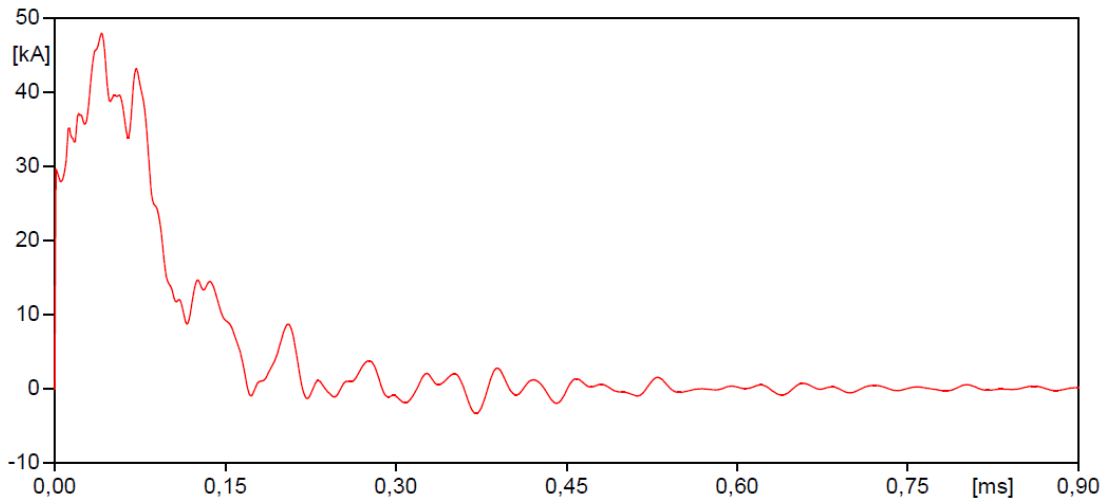


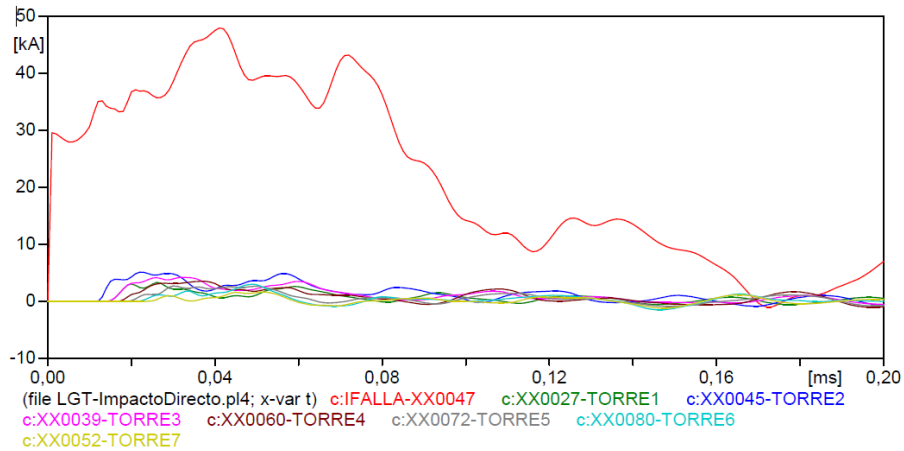
Figura 31. Modelo fuente de corriente de rayo tipo Heidler en el punto superior de la torre 2



Para ver el comportamiento y tomar decisiones relacionadas al impacto presentado en la torre 2 por una descarga eléctrica atmosférica, se realiza la correspondiente medición de cada una de las corrientes que circulan por las torres del circuito como se muestra en las siguientes graficas:

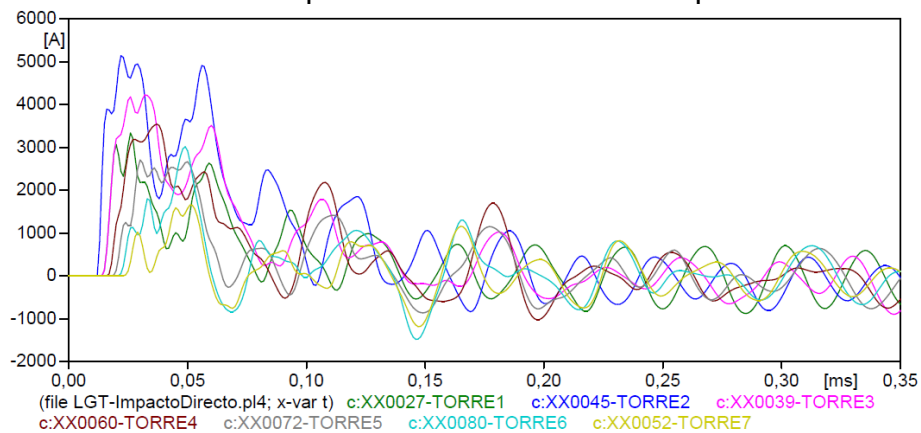
En la Figura 32 la cual se muestra a continuación, se presentan todas las corrientes del circuito, como lo son la corriente de impacto y las respectivas corrientes asociadas a cada torre.

Figura 32. Corriente de impacto en torre 2 y corrientes a tierra por las torres



Para buscar un patrón de comportamiento de las corrientes en las torres, se grafican estas únicamente como se muestra en la Figura 33.

Figura 33. Corrientes a tierra por cada torre cuando el impacto fue en la torre 2



Tendiendo la información de la Figura 33, se procede a hallar los valores picos de cada señal de corriente obtenida en las torres, la tabla mostrada a continuación, muestra los valores picos presentados.

Tabla 12. Valores de corriente pico cuando el impacto es en la torre 2

Maximus values [A]							
Total current	Tower 1	Tower 2	Tower 3	Tower 4	Tower 5	Tower 6	Tower 7
47960,99	3332,127	5139,938	4224,218	3540,443	2702,856	3012,944	1651,353

En la Tabla 12 están los valores picos de las corrientes presentadas cuando el impacto fue en la torre 2, teniendo en cuenta estos valores se procede a organizar los datos de mayor a menor y mostrar el porcentaje que representa cada corriente respecto a la corriente total, lo anteriormente dicho se presenta en la Tabla 13.

Tabla 13. Porcentaje de la corriente que baja por cada torre respecto a la fuente, cuando el impacto es en la torre 2.

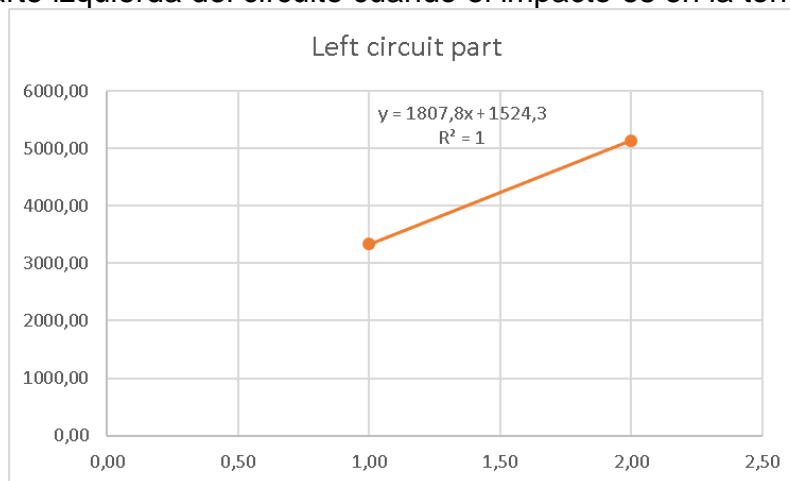
Element	Current value [A]	Porcent %
Current total	47960,99	100
Tower 2	5139,938	10,71691
Tower 3	4224,218	8,807612
Tower 4	3540,443	7,381922
Tower 1	3332,127	6,947578
Tower 5	2702,856	5,63553
Tower 6	3012,944	6,282072
Tower 7	1651,353	3,443117

En este caso a diferencia de la torre 1, se tiene un comportamiento hacia la izquierda del circuito y hacia la derecha del circuito, los cuales se analizan por aparte, primero se analiza la parte izquierda del circuito:

Tabla 14. Relación de las corrientes de la parte izquierda del circuito cuando el impacto es en la torre 2.

Relation with the left circuit part		
Tower	Current [A]	%
Tower 2	5139,938	10,71691
Tower 1	3332,127	6,947578

Figura 34. Curva de comportamiento del pico de corriente por cada torre de la parte izquierda del circuito cuando el impacto es en la torre 2.



$$Current(tower) = 1807.8 * tower + 1524.3 \quad Ec. 34$$

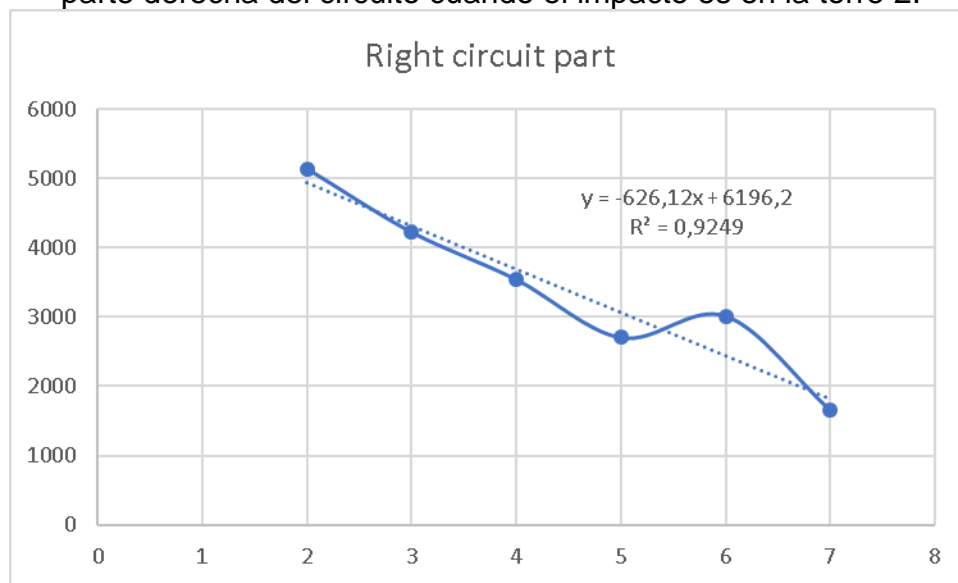
La corriente presentada en cada torre debida a un impacto de rayo en la torre 2 hacia la izquierda del circuito, esta expresada en la ecuación 34, donde se remplaza el valor de "tower" de 1 a 2, siendo 2 la torre impactada y 1 la torre al final de la parte izquierda del circuito (torre 1).

Así como hubo un comportamiento en la parte izquierda del circuito se analiza la parte derecha, teniendo como referencia la torre 2.

Tabla 15. Relación de las corrientes de la parte derecha del circuito cuando el impacto es en la torre 2.

Relation with the right circuit part		
Tower	Current	%
Tower 2	5139,938	10,71691
Tower 3	4224,218	8,807612
Tower 4	3540,443	7,381922
Tower 5	2702,856	5,63553
Tower 6	3012,944	6,282072
Tower 7	1651,353	3,443117

Figura 35. Curva de comportamiento del pico de corriente por cada torre de la parte derecha del circuito cuando el impacto es en la torre 2.



$$Current(Tower) = -626.12 * tower + 619.2 \quad Ec. 35$$

La corriente presentada en cada torre debida a un impacto de rayo en la torre 2 hacia la derecha del circuito, esta expresada en la ecuación 35, donde se remplaza el valor de "tower" de 2 a 7, siendo 2 la torre impactada (torre 2) y 7 la torre al final de la parte izquierda del circuito (torre 7).

2.5. Impacto de rayo en la torre 3

El modelo de fuente de corriente tipo Heidler aplicada se muestra en la Figura 37, esta se ubica de tal forma para simular un impacto de rayo en la torre número 3, como se muestra a continuación:

Figura 36. Circuito con 7 torres e impacto en la torre 3.

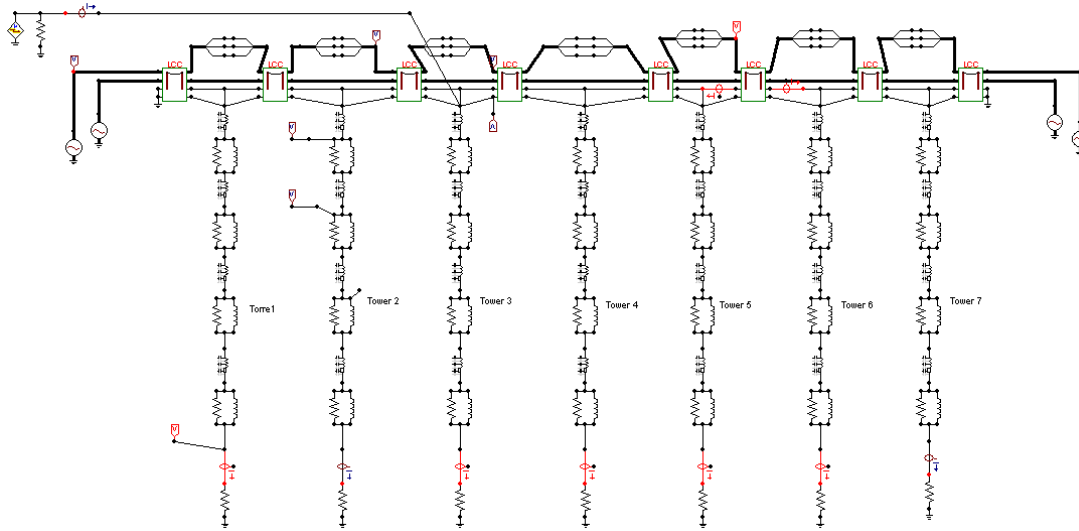
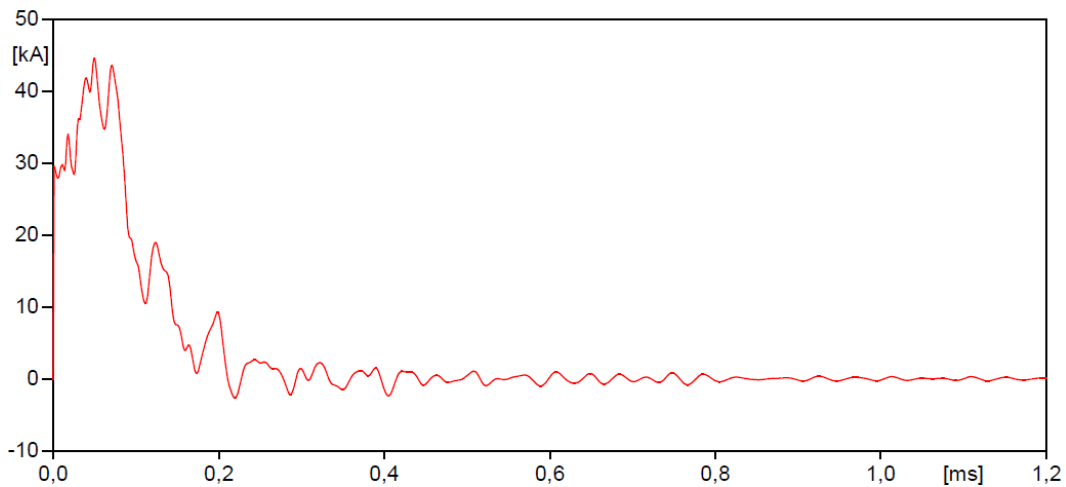


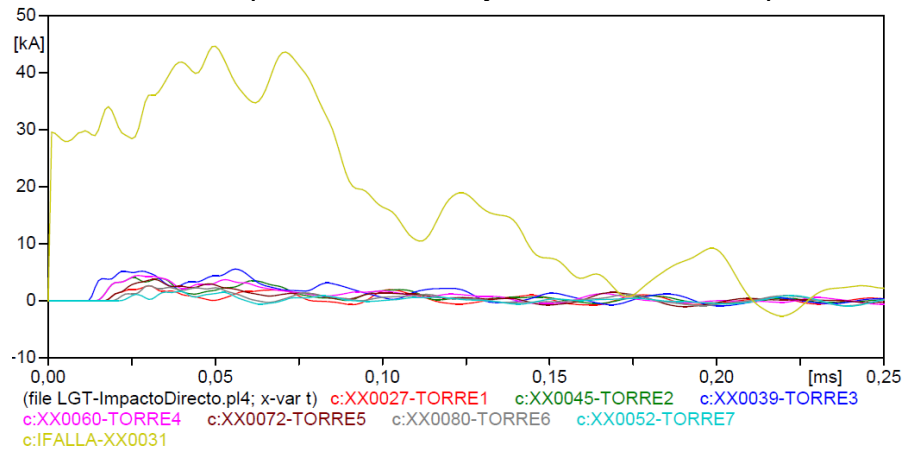
Figura 37. Modelo fuente de corriente de rayo tipo Heidler en el punto superior de la torre 3



Para ver el comportamiento y tomar decisiones relacionadas al impacto presentado en la torre 3 por una descarga eléctrica atmosférica, se realiza la correspondiente medición de cada una de las corrientes que circulan por las torres del circuito como se muestra en las siguientes graficas:

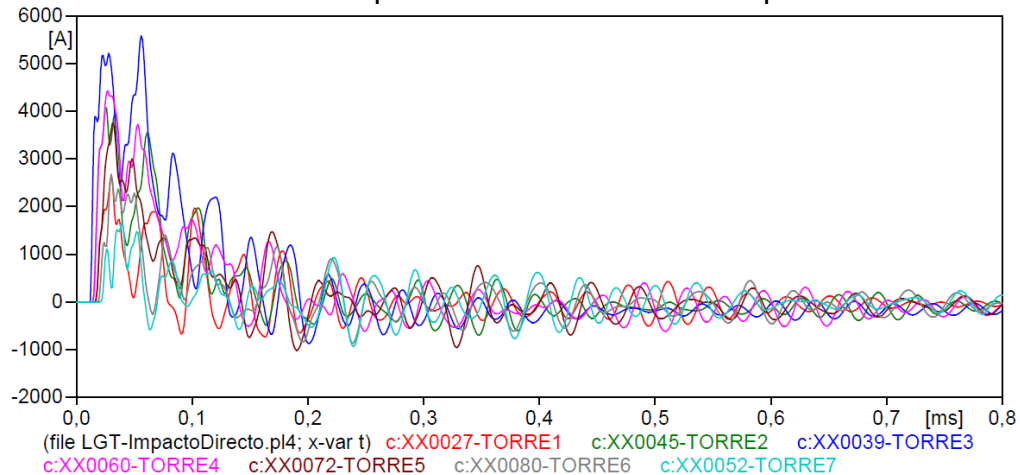
En la Figura 38, la cual se muestra a continuación, se presentan todas las corrientes del circuito, como lo son la corriente de impacto y las respectivas corrientes asociadas a cada torre cuando el impacto es en la torre 3.

Figura 38. Corriente de impacto en torre 3 y corrientes a tierra por las torres



Para buscar un patrón de comportamiento de las corrientes en las torres, se grafican estas únicamente como se muestra en la Figura 39.

Figura 39. Corrientes a tierra por cada torre cuando el impacto fue en la torre 3



Tendiendo la información de la Figura 39, se procede a hallar los valores picos de cada señal de corriente obtenida en las torres, la tabla mostrada a continuación, muestra los valores picos presentados.

Tabla 16. Valores de corriente pico cuando el impacto es en la torre 3

Maximus values [A]							
Total current	Tower 1	Tower 2	Tower 3	Tower 4	Tower 5	Tower 6	Tower 7
44638,78	2631,111	4067,828	5581,971	4428,569	3752,33	2674,049	1657,281

En la Tabla 16 están los valores picos de las corrientes presentadas cuando el impacto fue en la torre 3, teniendo en cuenta estos valores se procede a organizar los datos de mayor a menor y mostrar el porcentaje que representa cada corriente respecto a la corriente total, lo anteriormente dicho se presenta en la Tabla 17.

Tabla 17. Porcentaje de la corriente que baja por cada torre respecto a la fuente, cuando el impacto es en la torre 3.

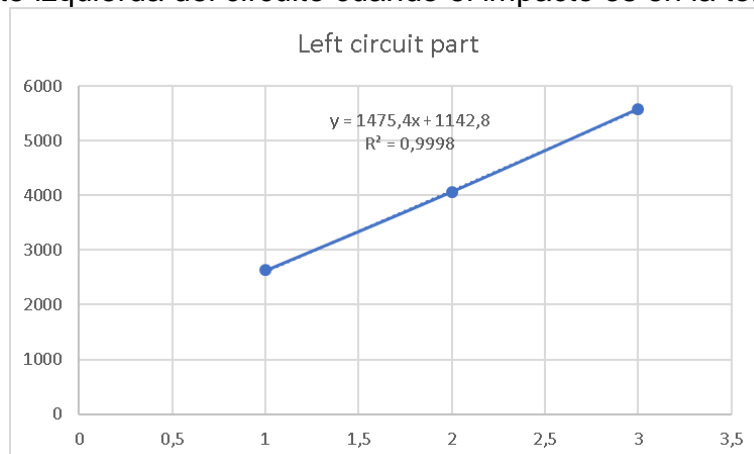
Element	Current value [A]	Porcent %
Current total	44638,78	100
Tower 3	5581,971	12,50476
Tower 4	4428,569	9,920901
Tower 2	4067,828	9,112767
Tower 5	3752,33	8,405987
Tower 6	2674,049	5,990417
Tower 1	2631,111	5,894227
Tower 7	1657,281	3,712649

Al igual que en la torre 2, se tiene un comportamiento hacia la izquierda del circuito y hacia la derecha del circuito, los cuales se analizan por aparte, primero se analiza la parte izquierda del circuito cuando el impacto es en la torre 3:

Tabla 18. Relación de las corrientes de la parte izquierda del circuito cuando el impacto es en la torre 3.

Relation with the left circuit part		
Tower	Current [A]	%
Tower 3	5581,971	12,50476
Tower 2	4067,828	9,112767
Tower 1	2631,111	5,894227

Figura 40. Curva de comportamiento del pico de corriente por cada torre de la parte izquierda del circuito cuando el impacto es en la torre 3.



$$Current(tower) = 1475.4 * tower + 1142.8 \quad Ec. 36$$

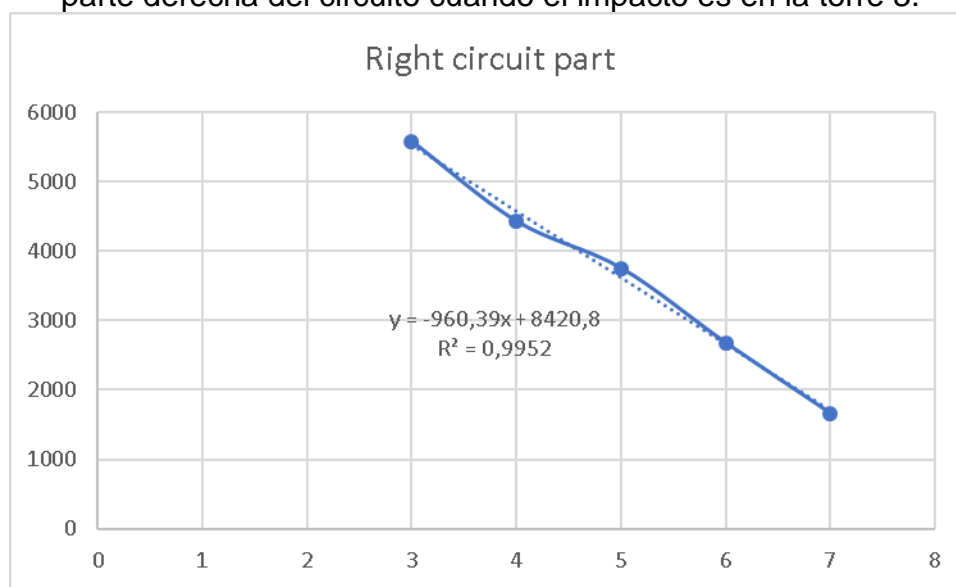
La corriente presentada en cada torre debida a un impacto de rayo en la torre 3 hacia la izquierda del circuito, esta expresada en la ecuación 36, donde se remplaza el valor de "tower" de 1 a 3, siendo 3 la torre impactada (torre 3) y 1 la torre al final de la parte izquierda del circuito (torre 1).

Así como hubo un comportamiento en la parte izquierda del circuito se analiza la parte derecha, teniendo como referencia la torre 3.

Tabla 19. Relación de las corrientes de la parte derecha del circuito cuando el impacto es en la torre 3.

Relation with the right circuit part		
Tower	Current	%
Tower 3	5581,971	12,50476
Tower 4	4428,569	9,920901
Tower 5	3752,33	8,405987
Tower 6	2674,049	5,990417
Tower 7	1657,281	3,712649

Figura 41. Curva de comportamiento del pico de corriente por cada torre de la parte derecha del circuito cuando el impacto es en la torre 3.



$$Current(tower) = -960.39 * tower + 8420.8 \quad Ec. 37$$

La corriente presentada en cada torre debida a un impacto de rayo en la torre 3 hacia la derecha del circuito, esta expresada en la ecuación 37, donde se remplaza el valor de "tower" de 3 a 7, siendo 3 la torre impactada (torre 3) y 7 la torre al final de la parte izquierda del circuito (torre 7).

2.6. Impacto de rayo en la torre 4

El modelo de fuente de corriente tipo Heidler aplicada se muestra en la Figura 43, esta se ubica de tal forma para simular un impacto de rayo en la torre número 4, como se muestra a continuación:

Figura 42. Circuito con 7 torres e impacto en la torre 4.

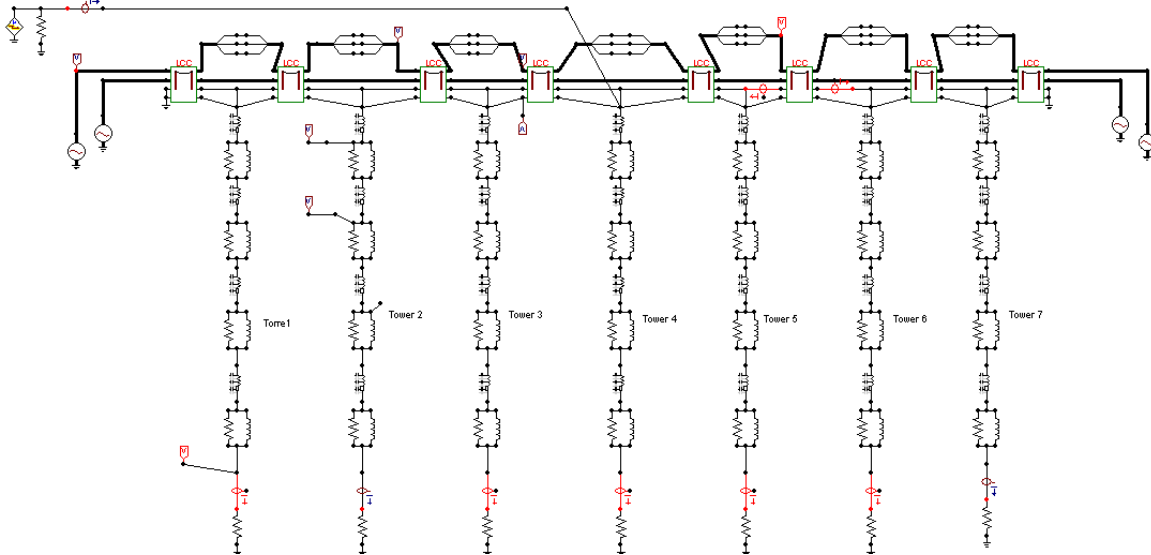
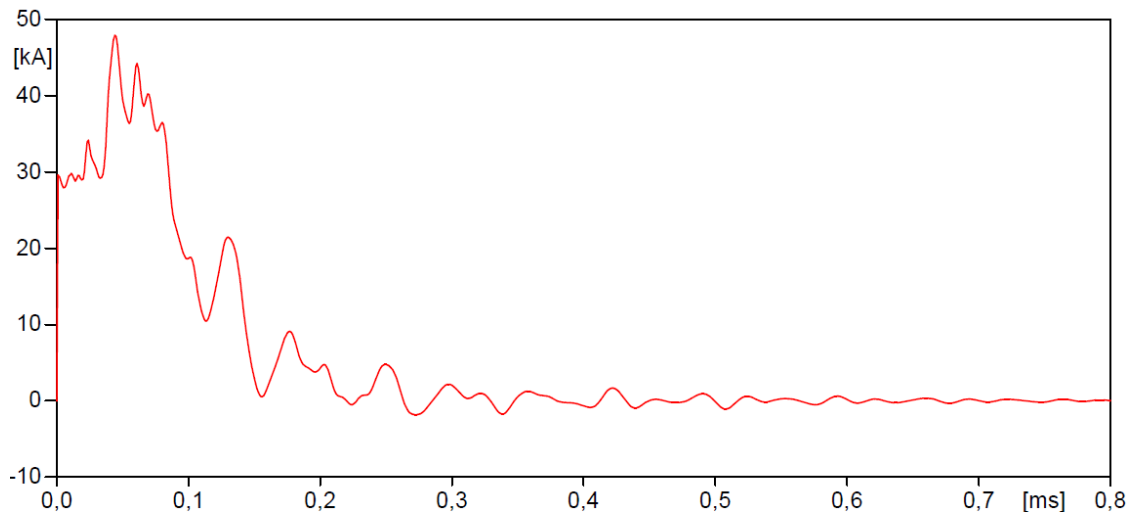


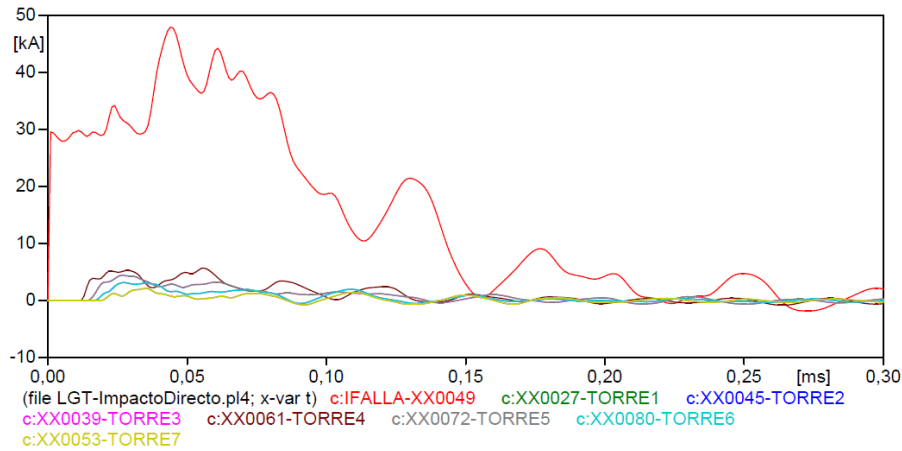
Figura 43. Modelo fuente de corriente de rayo tipo Heidler en el punto superior de la torre 4



Para ver el comportamiento y tomar decisiones relacionadas al impacto presentado en la torre 4 por una descarga eléctrica atmosférica, se realiza la correspondiente medición de cada una de las corrientes que circulan por las torres del circuito como se muestra en las siguientes graficas:

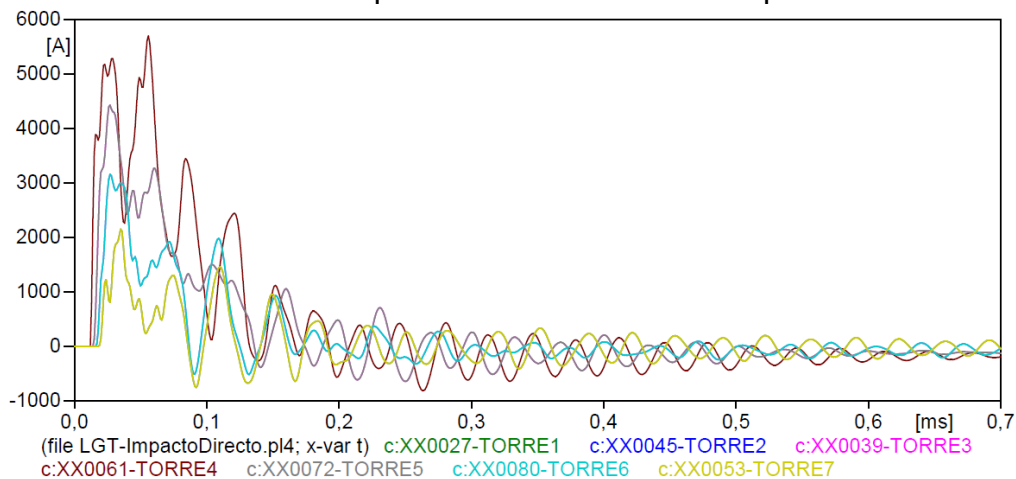
En la Figura 44, la cual se muestra a continuación, se presentan todas las corrientes del circuito, como lo son la corriente de impacto y las respectivas corrientes asociadas a cada torre cuando el impacto es en la torre 4.

Figura 44. Corriente de impacto en torre 4 y corrientes a tierra por las torres



Para buscar un patrón de comportamiento de las corrientes en las torres, se grafican estas únicamente como se muestra en la Figura 45.

Figura 45. Corrientes a tierra por cada torre cuando el impacto fue en la torre 4



Tendiendo la información de la Figura 45, se procede a hallar los valores picos de cada señal de corriente obtenida en las torres, la tabla mostrada a continuación, muestra los valores picos presentados.

Tabla 20. Valores de corriente pico cuando el impacto es en la torre 4

Maximus values [A]							
Total current	Tower 1	Tower 2	Tower 3	Tower 4	Tower 5	Tower 6	Tower 7
47949,71	2153,473	3158,946	4428,486	5699,967	4428,486	3158,972	2153,473

En la Tabla 20 están los valores picos de las corrientes presentadas cuando el impacto fue en la torre 4, teniendo en cuenta estos valores se procede a organizar los datos de mayor a menor y mostrar el porcentaje que representa cada corriente respecto a la corriente total, lo anteriormente dicho se presenta en la Tabla 21.

Tabla 21. Porcentaje de la corriente que baja por cada torre respecto a la fuente, cuando el impacto es en la torre 4.

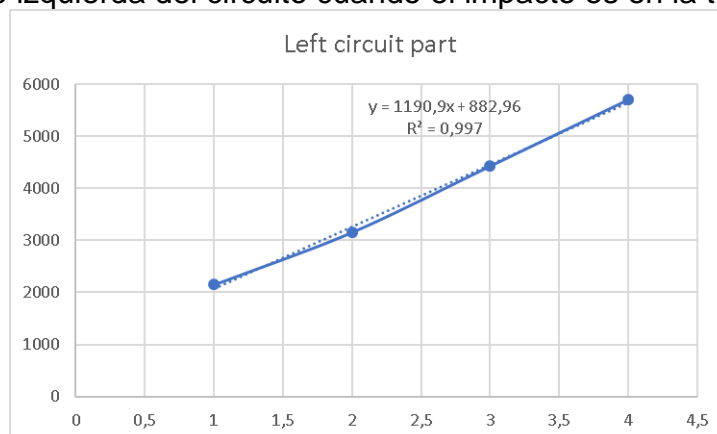
Element	Current value [A]	Porcent %
Current total	47949,71	100
Tower 4	5699,967	11,88738576
Tower 3	4428,486	9,235688808
Tower 5	4428,486	9,235688808
Tower 6	3158,972	6,588094068
Tower 2	3158,946	6,588039844
Tower 7	2153,473	4,491107454
Tower 1	2153,473	4,491107454

El impacto presentado en la torre 4, representa un comportamiento en las corrientes de las torres hacia la izquierda del circuito y hacia la derecha del circuito, los cuales se analizan por aparte, primero se analiza la parte izquierda del circuito cuando el impacto es en la torre 4:

Tabla 22. Relación de las corrientes de la parte izquierda del circuito cuando el impacto es en la torre 4.

Relation with the left circuit part		
Tower	Current [A]	%
Tower 4	5699,967	11,88738576
Tower 3	4428,486	9,235688808
Tower 2	3158,946	6,588039844
Tower 1	2153,473	4,491107454

Figura 46. Curva de comportamiento del pico de corriente por cada torre de la parte izquierda del circuito cuando el impacto es en la torre 4.



$$Current(tower) = 1190.9 * tower + 882.96 \quad Ec. 38$$

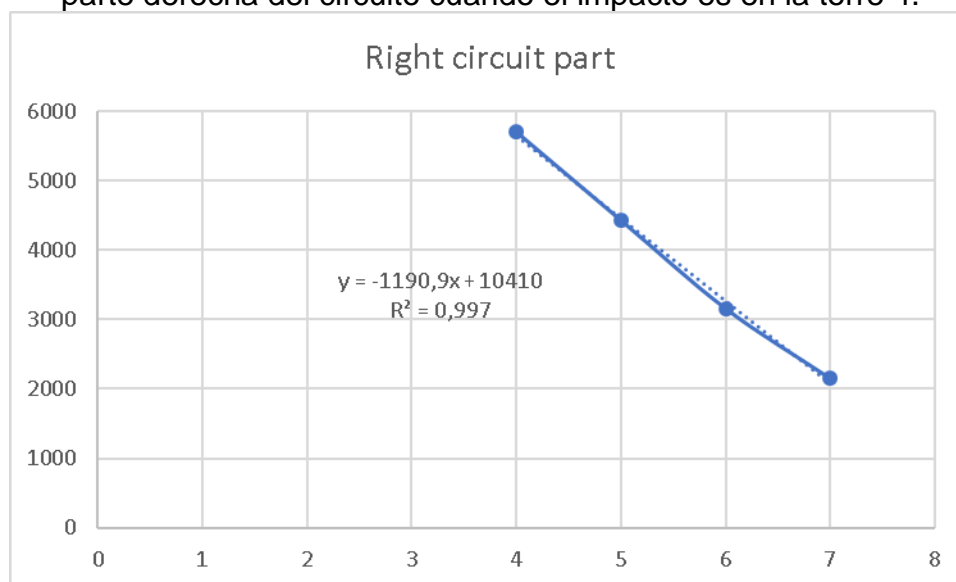
La corriente presentada en cada torre debida a un impacto de rayo en la torre 4 hacia la izquierda del circuito, esta expresada en la ecuación 38, donde se remplaza el valor de "tower" de 1 a 4, siendo 4 la torre impactada (torre 4) y 1 la torre al final de la parte izquierda del circuito (torre 1).

Así como hubo un comportamiento en la parte izquierda del circuito se analiza la parte derecha, teniendo como referencia la torre 4.

Tabla 23. Relación de las corrientes de la parte derecha del circuito cuando el impacto es en la torre 4.

Relation with the right circuit part		
Tower	Current [A]	%
Tower 4	5699,967	11,88739
Tower 5	4428,486	9,235689
Tower 6	3158,972	6,588094
Tower 7	2153,473	4,491107

Figura 47. Curva de comportamiento del pico de corriente por cada torre de la parte derecha del circuito cuando el impacto es en la torre 4.



$$Current(tower) = -1190.9 * tower + 10410 \quad Ec. 39$$

La corriente presentada en cada torre debida a un impacto de rayo en la torre 4 hacia la derecha del circuito, esta expresada en la ecuación 39, donde se remplaza el valor de "tower" de 4 a 7, siendo 4 la torre impactada (torre 4) y 7 la torre al final de la parte izquierda del circuito (torre 7).

2.7. Impacto de rayo en la torre 5

El modelo de fuente de corriente tipo Heidler aplicada se muestra en la Figura 49, esta se ubica de tal forma para simular un impacto de rayo en la torre número 5, como se muestra a continuación:

Figura 48. Circuito con 7 torres e impacto en la torre 5.

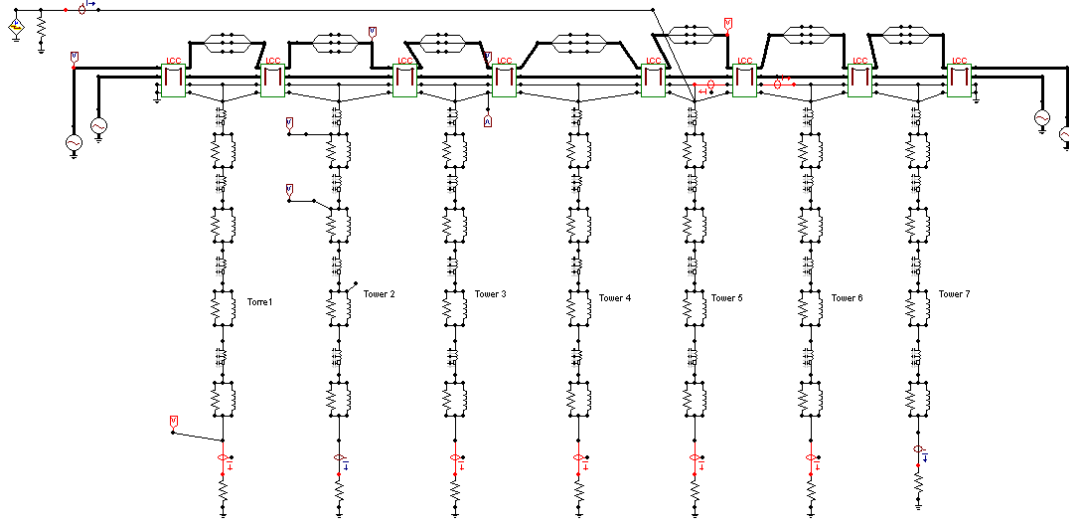
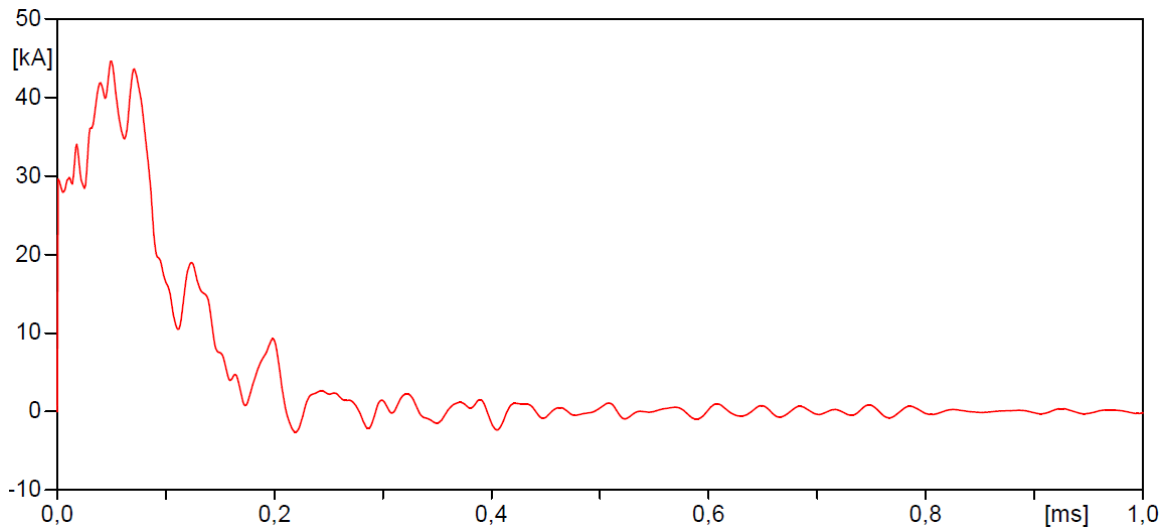


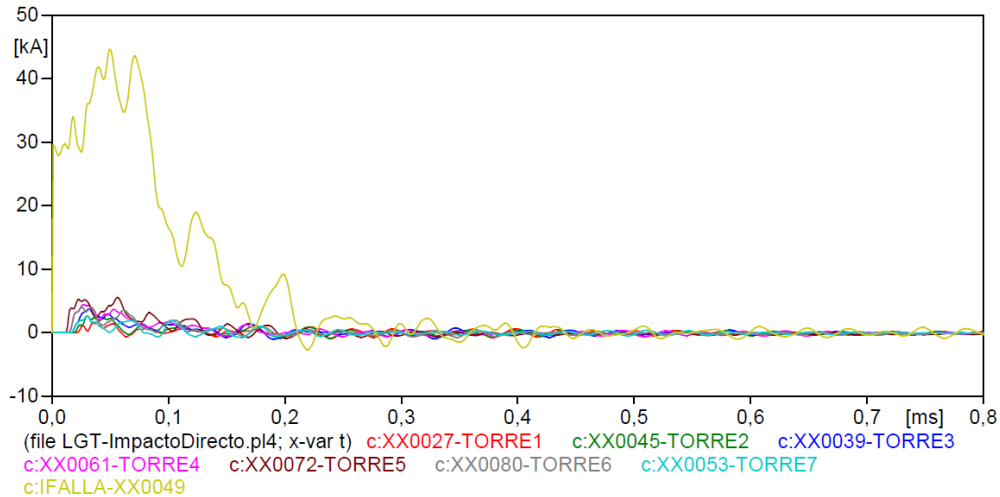
Figura 49. Modelo fuente de corriente de rayo tipo Heidler en el punto superior de la torre 5



Para ver el comportamiento y tomar decisiones relacionadas al impacto presentado en la torre 5 por una descarga eléctrica atmosférica, se realiza la correspondiente medición de cada una de las corrientes que circulan por las torres del circuito como se muestra en las siguientes graficas:

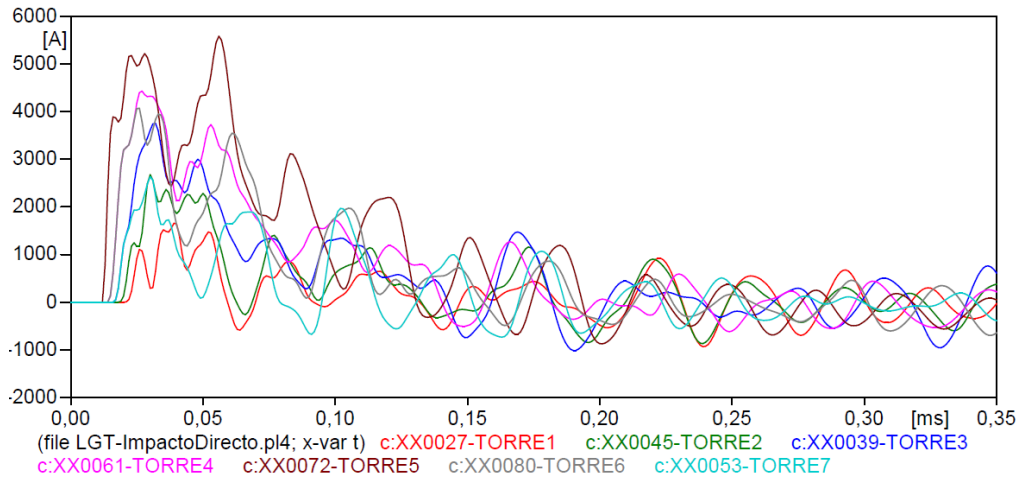
En la Figura 50, la cual se muestra a continuación, se presentan todas las corrientes del circuito, como lo son la corriente de impacto y las respectivas corrientes asociadas a cada torre cuando el impacto es en la torre 5.

Figura 50. Corriente de impacto en torre 5 y corrientes a tierra por las torres



Para buscar un patrón de comportamiento de las corrientes en las torres, se grafican estas únicamente como se muestra en la Figura 51.

Figura 51. Corrientes a tierra por cada torre cuando el impacto fue en la torre 5



Tendiendo la información de la Figura 51, se procede a hallar los valores picos de cada señal de corriente obtenida en las torres, la tabla mostrada a continuación, muestra los valores picos presentados.

Tabla 24. Valores de corriente pico cuando el impacto es en la torre 5

Maximus values [A]							
Total current	Tower 1	Tower 2	Tower 3	Tower 4	Tower 5	Tower 6	Tower 7
44638,85	1657,281	2674,027	3752,33	4428,569	5581,968	4067,856	2631,111

En la Tabla 24 están los valores picos de las corrientes presentadas cuando el impacto fue en la torre 5, teniendo en cuenta estos valores se procede a organizar los datos de mayor a menor y mostrar el porcentaje que representa cada corriente respecto a la corriente total, lo anteriormente dicho se presenta en la Tabla 25.

Tabla 25. Porcentaje de la corriente que baja por cada torre respecto a la fuente, cuando el impacto es en la torre 5.

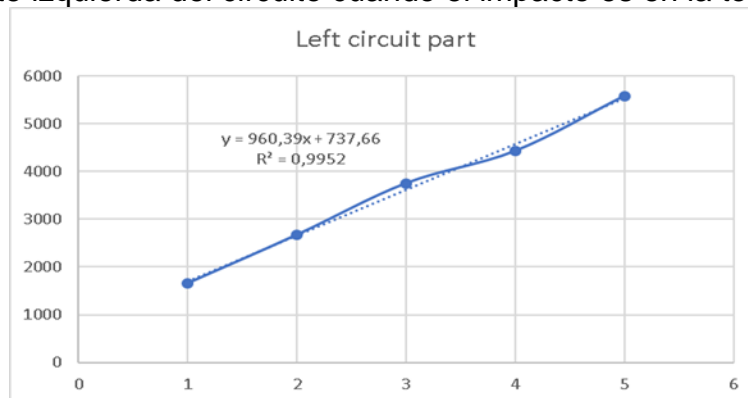
Element	Current value [A]	Porcent %
Current total	44638,85	100
Tower 5	5581,968	12,50473
Tower 4	4428,569	9,920885
Tower 6	4067,856	9,112815
Tower 3	3752,33	8,405974
Tower 2	2674,027	5,990358
Tower 7	2631,111	5,894218
Tower 1	1657,281	3,712643

El impacto presentado en la torre 5, representa un comportamiento en las corrientes de las torres hacia la izquierda del circuito y hacia la derecha del circuito, los cuales se analizan por aparte, primero se analiza la parte izquierda del circuito cuando el impacto es en la torre 5:

Tabla 26. Relación de las corrientes de la parte izquierda del circuito cuando el impacto es en la torre 5.

Relation with the left circuit part		
Tower	Current [A]	%
Tower 5	5581,968	12,50473
Tower 4	4428,569	9,920885
Tower 3	3752,33	8,405974
Tower 2	2674,027	5,990358
Tower 1	1657,281	3,712643

Figura 52. Curva de comportamiento del pico de corriente por cada torre de la parte izquierda del circuito cuando el impacto es en la torre 5.



$$Current(tower) = 960.39 * tower + 737.66 \quad Ec. 40$$

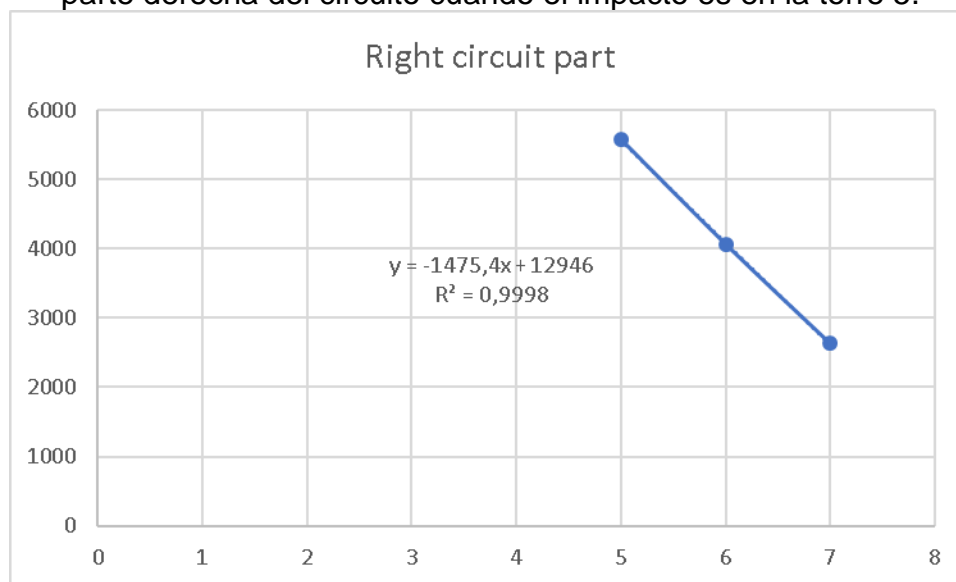
La corriente presentada en cada torre debida a un impacto de rayo en la torre 5 hacia la izquierda del circuito, esta expresada en la ecuación 50, donde se remplaza el valor de "tower" de 1 a 5, siendo 5 la torre impactada (torre 5) y 1 la torre al final de la parte izquierda del circuito (torre 1).

Así como hubo un comportamiento en la parte izquierda del circuito se analiza la parte derecha, teniendo como referencia la torre 5.

Tabla 27. Relación de las corrientes de la parte derecha del circuito cuando el impacto es en la torre 5.

Relation with the right circuit part		
Tower	Current [A]	%
Tower 5	5581,968	12,50473
Tower 6	4067,856	9,112815
Tower 7	2631,111	5,894218

Figura 53. Curva de comportamiento del pico de corriente por cada torre de la parte derecha del circuito cuando el impacto es en la torre 5.



$$Current(tower) = -1475.4 * tower + 12946 \quad (40)$$

La corriente presentada en cada torre debida a un impacto de rayo en la torre 5 hacia la derecha del circuito, esta expresada en la ecuación 41, donde se remplaza el valor de "tower" de 5 a 7, siendo 5 la torre impactada (torre 5) y 7 la torre al final de la parte izquierda del circuito (torre 7).

2.8. Impacto de rayo en la torre 6

El modelo de fuente de corriente tipo Heidler aplicada se muestra en la Figura 55, esta se ubica de tal forma para simular un impacto de rayo en la torre número 6, como se muestra a continuación:

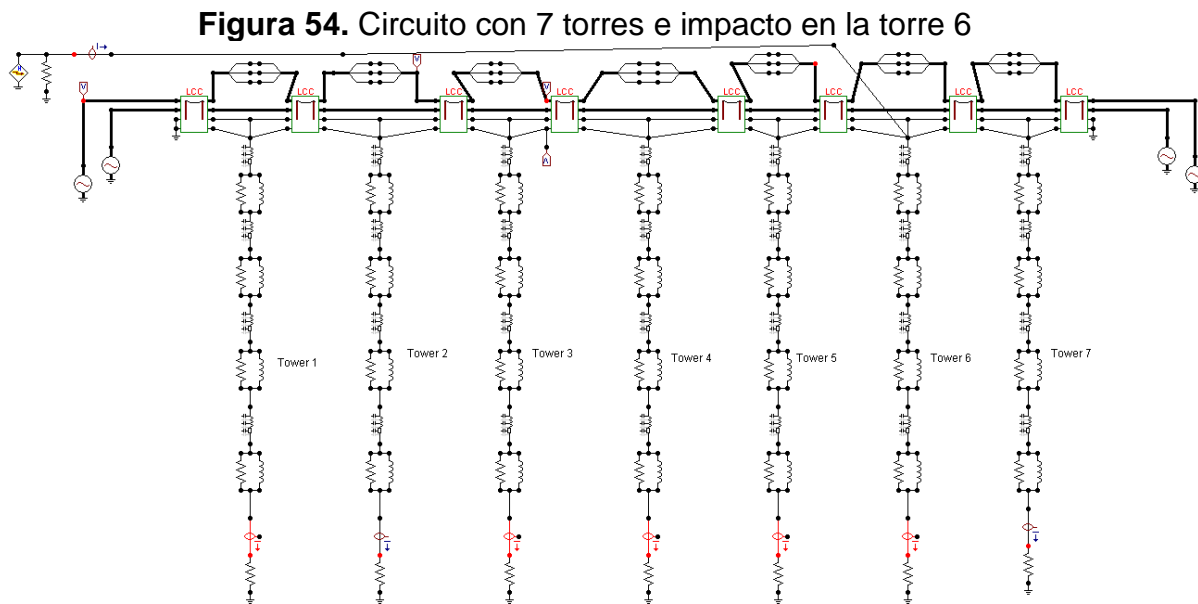
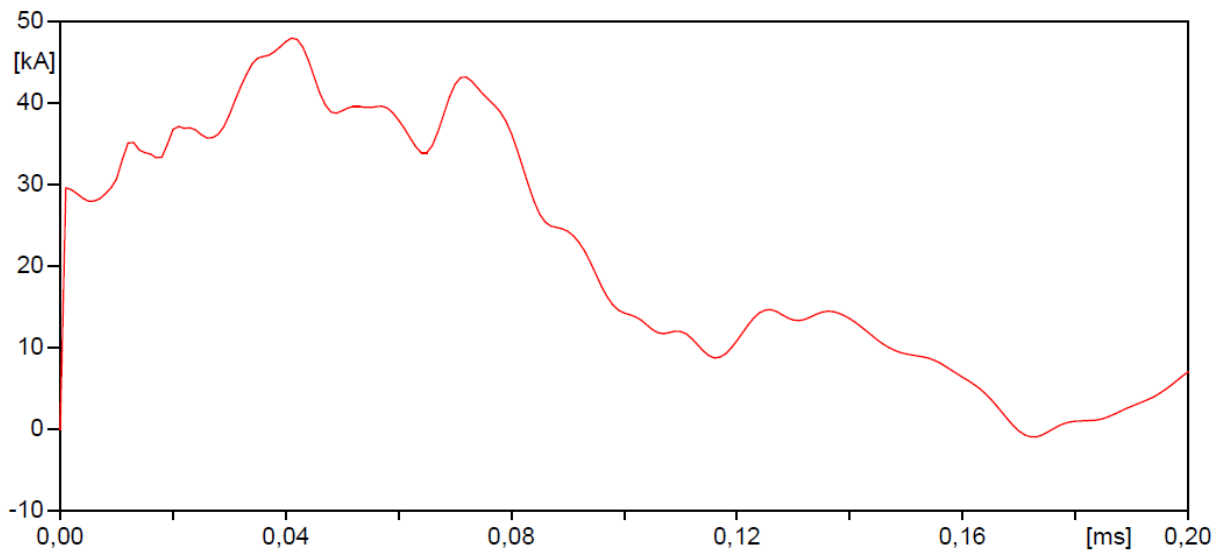


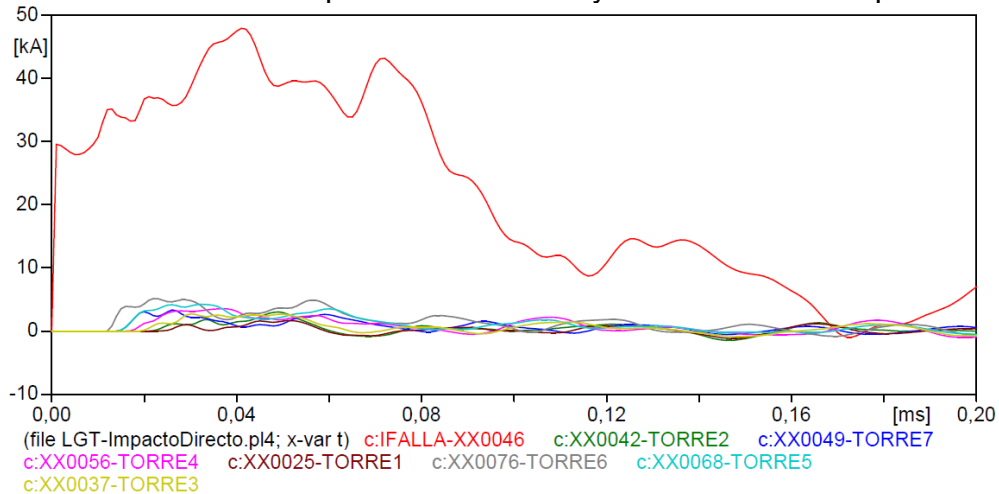
Figura 55. Modelo fuente de corriente de rayo tipo Heidler en el punto superior de la torre 6



Para ver el comportamiento y tomar decisiones relacionadas al impacto presentado en la torre 6 por una descarga eléctrica atmosférica, se realiza la correspondiente medición de cada una de las corrientes que circulan por las torres del circuito como se muestra en las siguientes graficas:

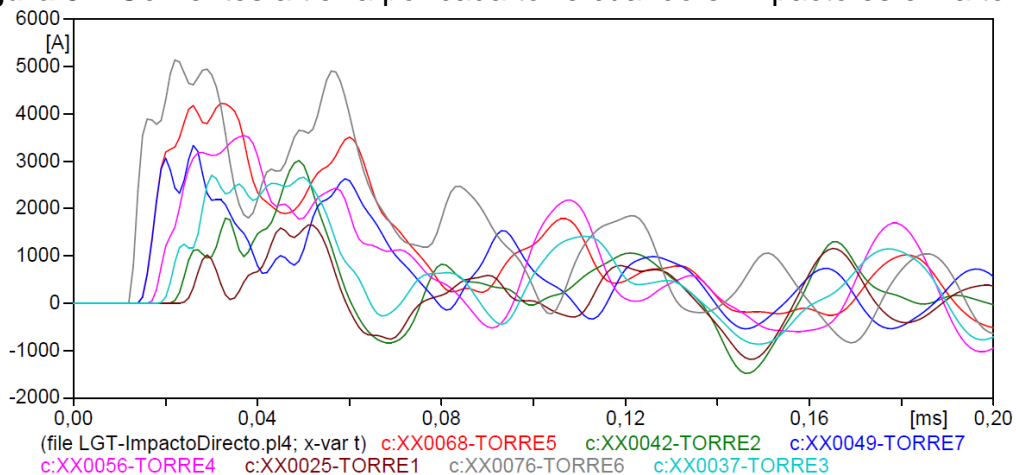
En la Figura 56, la cual se muestra a continuación, se presentan todas las corrientes del circuito, como lo son la corriente de impacto y las respectivas corrientes asociadas a cada torre cuando el impacto es en la torre 6.

Figura 56. Corriente de impacto en la torre 6 y corrientes a tierra por las torres



Para buscar un patrón de comportamiento de las corrientes en las torres, se grafican estas únicamente como se muestra en la Figura 57.

Figura 57. Corrientes a tierra por cada torre cuando el impacto es en la torre 6



Tendiendo la información de la Figura 57, se procede a hallar los valores picos de cada señal de corriente obtenida en las torres, la tabla mostrada a continuación, muestra los valores picos presentados.

Tabla 28. Valores de corriente pico cuando el impacto es en la torre 6

Maximus peak current values [A]							
Total current	Tower 1	Tower 2	Tower 3	Tower 4	Tower 5	Tower 6	Tower 7
47961,1	1651,35	3012,937	2702,856	3540,443	4224,218	5139,973	3332,127

En la Tabla 28 están los valores picos de las corrientes presentadas cuando el impacto fue en la torre 6, teniendo en cuenta estos valores se procede a organizar los datos de mayor a menor y mostrar el porcentaje que representa cada corriente respecto a la corriente total, lo anteriormente dicho se presenta en la Tabla 29.

Tabla 29. Porcentaje de la corriente que baja por cada torre respecto a la fuente, cuando el impacto es en la torre 6.

Element	Current value [A]	Porcent %
Total Current	47961,1	100
Tower 6	5139,973	10,71696
Tower 5	4224,218	8,807592
Tower 4	3540,443	7,381905
Tower 7	3332,127	6,947562
Tower 3	2702,856	5,635517
Tower 2	3012,937	6,282043
Tower 1	1651,35	3,443103

El impacto presentado en la torre 6, representa un comportamiento en las corrientes de las torres hacia la izquierda del circuito y hacia la derecha del circuito, los cuales se analizan por aparte, a continuación, se tienen las tablas con los datos para encontrar la relación en cada lado debida al impacto en la torre 6:

Tabla 30. Relación de las corrientes de la parte izquierda del circuito cuando el impacto es en la torre 6.

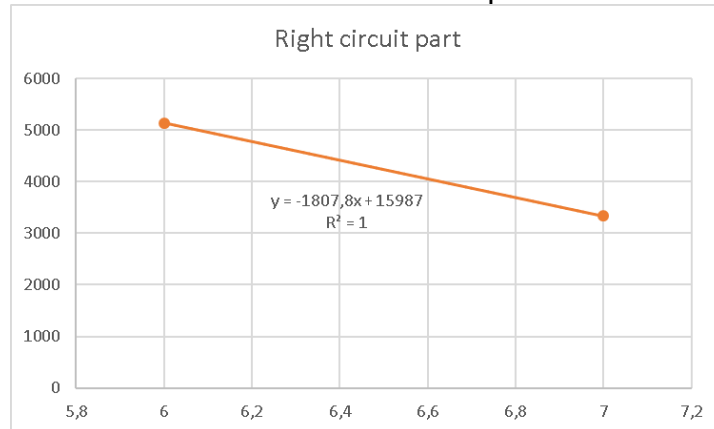
Relation with the left circuit part		
Tower	Current [A]	%
Tower 6	5139,973	10,71696
Tower 5	4224,218	8,807592
Tower 4	3540,443	7,381905
Tower 3	2702,856	5,635517
Tower 2	3012,937	6,282043
Tower 1	1651,35	3,443103

Tabla 31. Relación de las corrientes de la parte derecha del circuito cuando el impacto es en la torre 6.

Relation with the right circuit part		
Tower	Current [A]	%
Tower 6	5139,973	10,71696
Tower 7	3332,127	6,947562

Las curvas que relacionan la corriente con la torre, se muestran a continuación, donde se tiene la relación en la parte izquierda y derecha, cuando el impacto es en la torre 6.

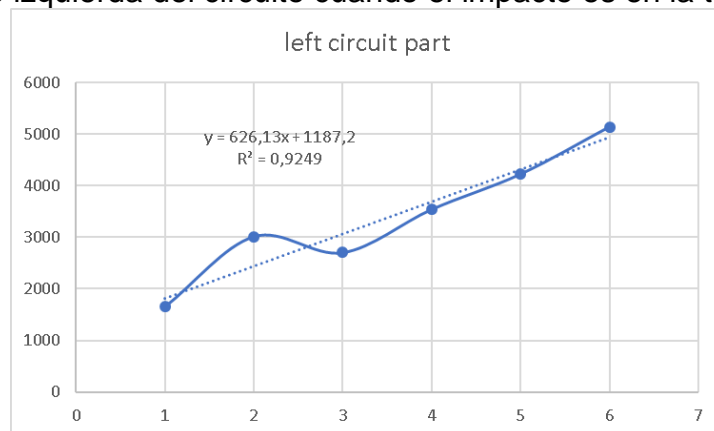
Figura 58. Curva de comportamiento del pico de corriente por cada torre de la parte derecha del circuito cuando el impacto es en la torre 6.



$$Current(tower) = -1807.8 * tower + 15987 \quad (41)$$

La corriente presentada en cada torre debida a un impacto de rayo en la torre 6 hacia la derecha del circuito, esta expresada en la ecuación 41, donde se remplaza el valor de "tower" de 6 a 7, siendo 6 la torre impactada (torre 6) y 7 la torre al final de la parte derecha del circuito (torre 7).

Figura 59. Curva de comportamiento del pico de corriente por cada torre de la parte izquierda del circuito cuando el impacto es en la torre 6.



$$Current(tower) = -626.13 * tower + 1187.2 \quad (42)$$

La corriente presentada en cada torre debida a un impacto de rayo en la torre 6 hacia la izquierda del circuito, esta expresada en la ecuación 42, donde se remplaza el valor de "tower" de 1 a 7, siendo 6 la torre impactada (torre 6) y 1 la torre al final de la parte izquierda del circuito (torre 1).

2.9. Impacto de rayo en la torre 7

El modelo de fuente de corriente tipo Heidler aplicada se muestra en la Figura 61, esta se ubica de tal forma para simular un impacto de rayo en la torre número 7, como se muestra a continuación:

Figura 60. Circuito con 7 torres e impacto en la torre 7.

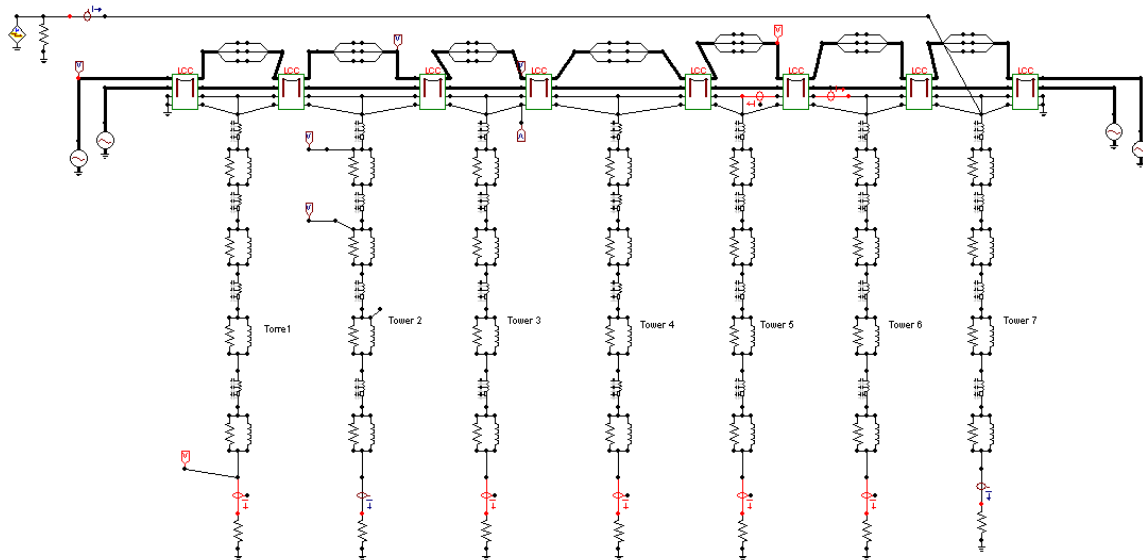
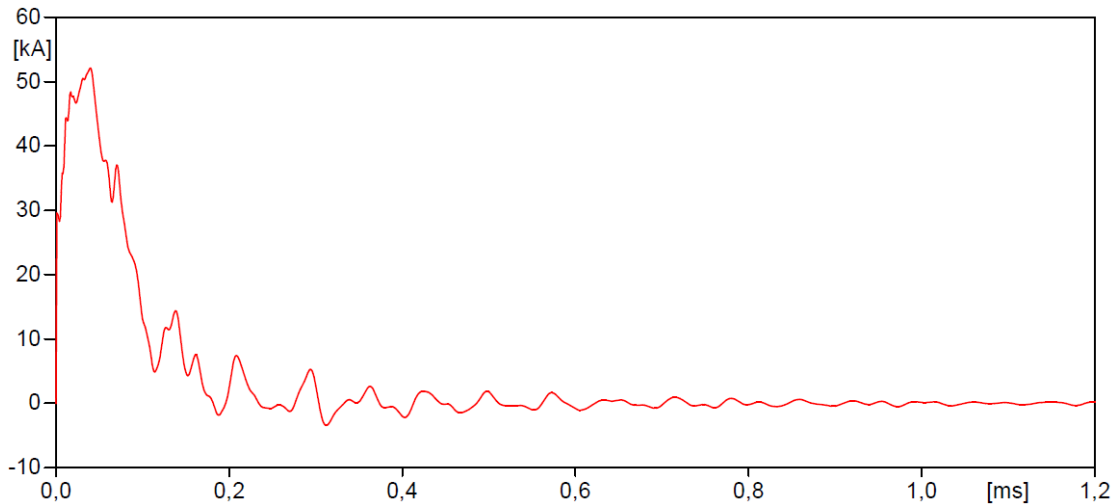


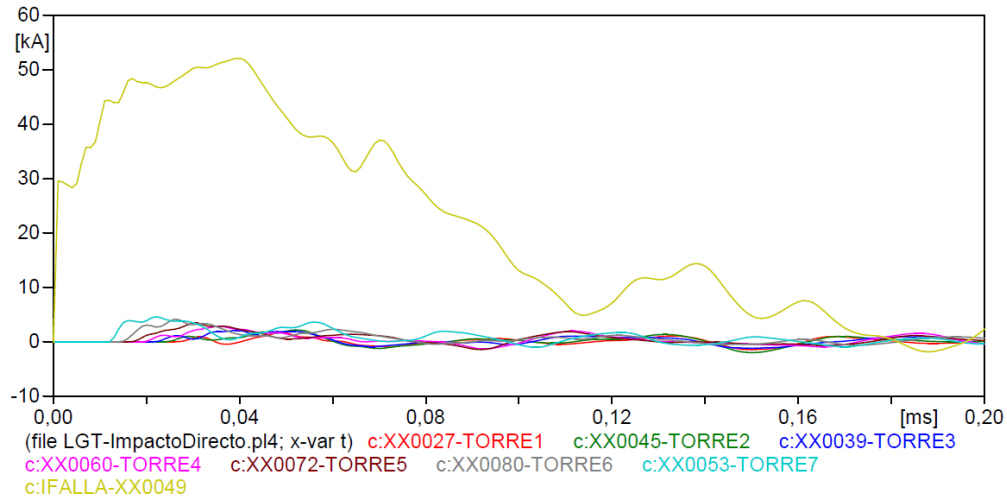
Figura 61. Modelo fuente de corriente de rayo tipo Heidler en el punto superior de la torre 7



Para ver el comportamiento y tomar decisiones relacionadas al impacto presentado en la torre 7 por una descarga eléctrica atmosférica, se realiza la correspondiente medición de cada una de las corrientes que circulan por las torres del circuito como se muestra en las siguientes graficas:

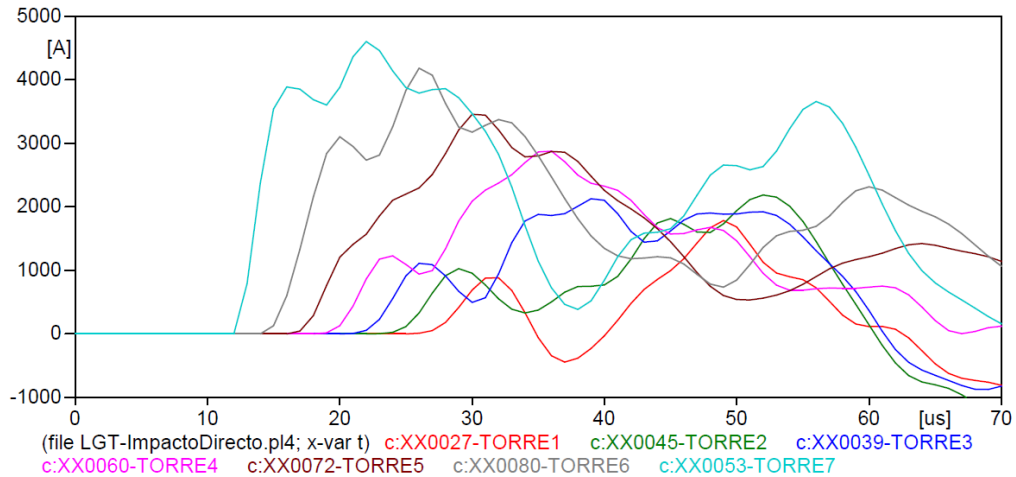
En la Figura 62, la cual se muestra a continuación, se presentan todas las corrientes del circuito, como lo son la corriente de impacto y las respectivas corrientes asociadas a cada torre cuando el impacto es en la torre 7.

Figura 62. Corriente de impacto en torre 7 y corrientes a tierra por las torres



Para buscar un patrón de comportamiento de las corrientes en las torres, se grafican estas únicamente como se muestra en la Figura 63.

Figura 63. Corrientes a tierra por cada torre cuando el impacto fue en la torre 7



Tendiendo la información de la Figura 63, se procede a hallar los valores picos de cada señal de corriente obtenida en las torres, la tabla mostrada a continuación, muestra los valores picos presentados.

Tabla 32. valores de corriente pico cuando el impacto es en la torre 7

Maximus values [A]							
Total current	Tower 1	Tower 2	Tower 3	Tower 4	Tower 5	Tower 6	Tower 7
52114,04	1783,129	2188,407	2128,087	2877,329	3456,882	4185,646	4605,339

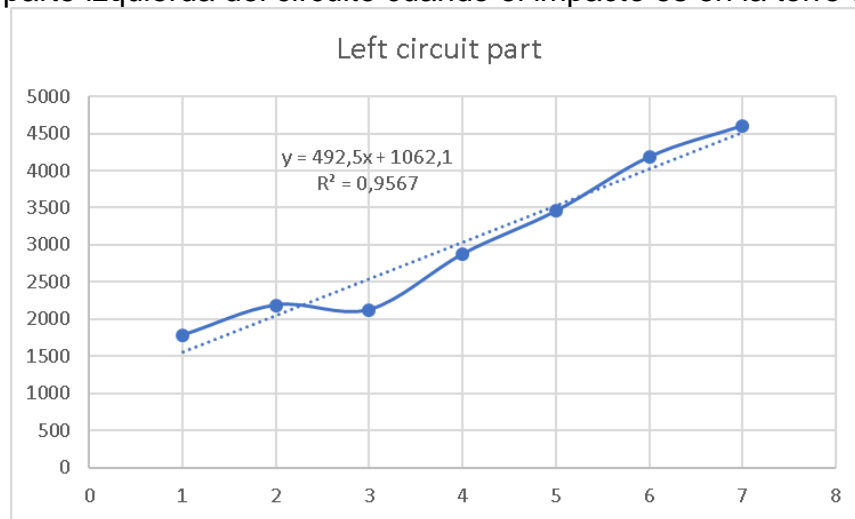
En la Tabla 32 están los valores picos de las corrientes presentadas cuando el impacto fue en la torre 7, teniendo en cuenta estos valores se procede a organizar los datos de mayor a menor y mostrar el porcentaje que representa cada corriente respecto a la corriente total, lo anteriormente dicho se presenta en la Tabla 33.

Tabla 33. Porcentaje de la corriente que baja por cada torre respecto a la fuente, cuando el impacto es en la torre 7.

Element	Current value [A]	Porcent %
Current total	52114,04	100
Tower 7	4605,339	8,837041
Tower 6	4185,646	8,031705
Tower 5	3456,882	6,633303
Tower 4	2877,329	5,521217
Tower 3	2128,087	4,08352
Tower 2	2188,407	4,199266
Tower 1	1783,129	3,42159

Teniendo los valores de la Tabla 33, se procede a realizar una linealización del comportamiento presentado por las corrientes en las torres de transmisión, esta curva se presenta en la Figura 64, donde se muestra la ecuación que lo relaciona y la correlación obtenida.

Figura 64. Curva de comportamiento del pico de corriente por cada torre de la parte izquierda del circuito cuando el impacto es en la torre 7.



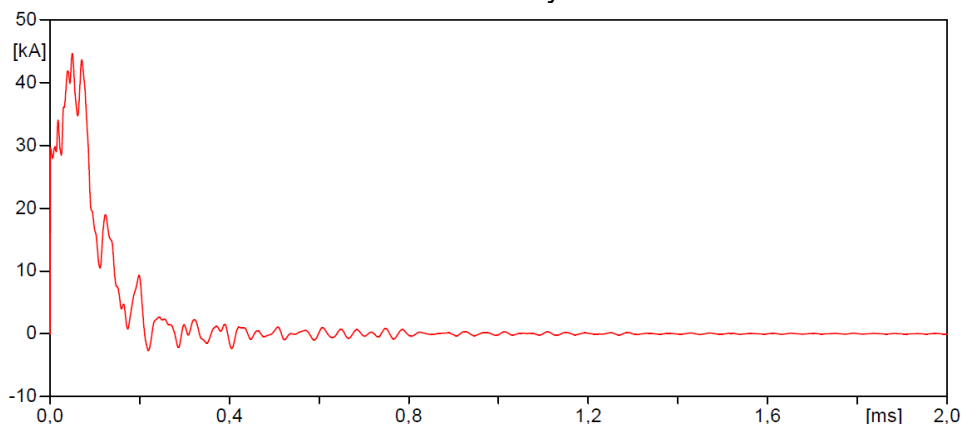
$$Current(tower) = 492.5 * tower + 1062.1 \quad (43)$$

La corriente presentada en cada torre debida a un impacto de rayo en la torre 7 hacia la izquierda del circuito, esta expresada en la ecuación 43, donde se remplace el valor de "tower" de 1 a 7, siendo 7 la torre impactada (torre 7) y 1 la torre al final de la parte izquierda del circuito (torre 1).

2.10. Impacto de rayo en la mitad del cable de guarda entre la torre 5 y 6

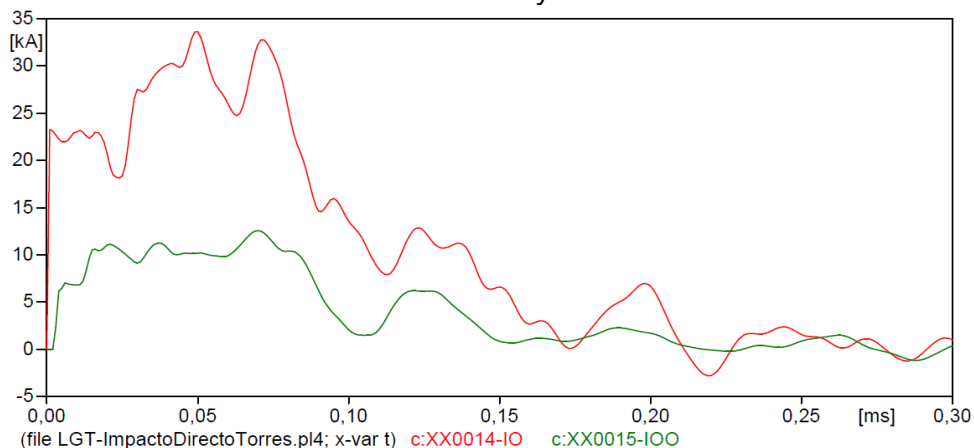
El modelo de fuente de corriente tipo Heidler aplicada se muestra en la Figura 65, esta se ubica de tal forma para simular un impacto de rayo en el cable de guarda en toda la mitad entre la torre 5 y torre 6.

Figura 65. Modelo fuente de corriente de rayo tipo Heidler en el punto medio entre las torres 5 y 6



La distribución de las corrientes en el cable de guarda cuando un rayo impacta en la mitad del cable entre la torre 5 y torre 6 se muestra a continuación:

Figura 66. Distribución de la corriente en el cable de guarda con el impacto entre la torre 5 y 6



Curva de color rojo es la corriente que va hacia la izquierda del circuito, es decir hacia la torre 5 y la curva verde es la corriente que va hacia la torre 6.

Tabla 34. Picos de corriente que van hacia torre 5 y torre 6 luego del impacto en el cable de guarda.

Grounding wire currents between tower 5 and 6		
Max. total current	Max. Current to tower 5	Max. Current to tower 6
44638,86	33615,2	12565,97

La mayor parte de la corriente se dirige hacia la parte izquierda del circuito como se muestra en la tabla siguiente:

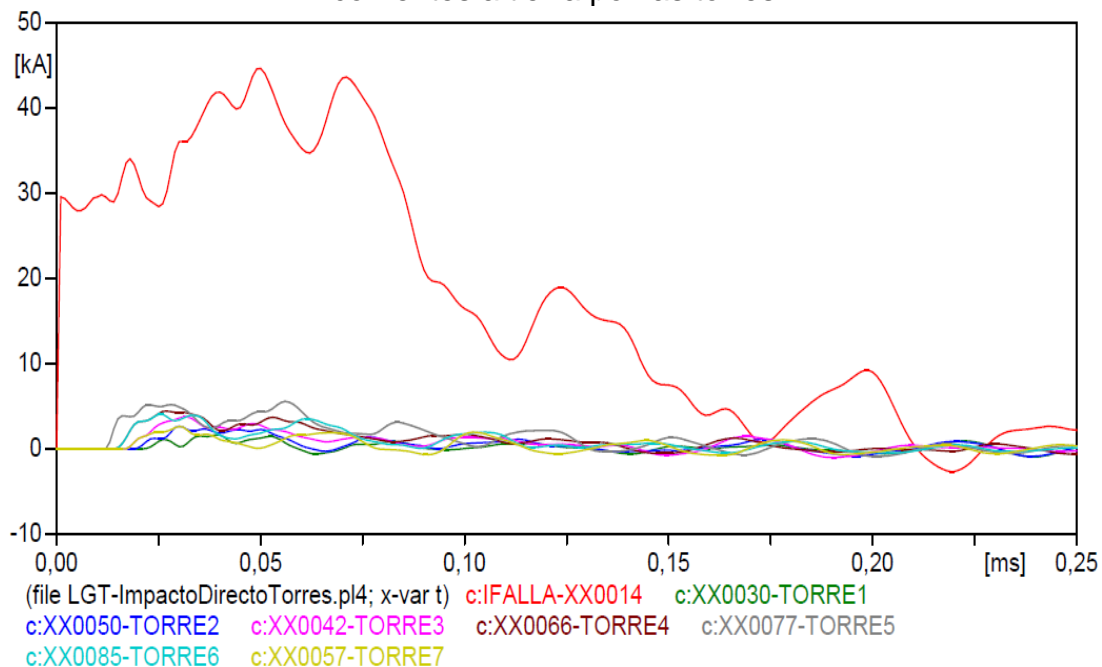
Tabla 35. Porcentaje de corriente que viaja por el cable de guarda luego del impacto entre la torre 5 y 6

Current	Value [A]	%
Max. total current	44638,86	100
Max. Current to tower 5	33615,2	75,30479049
Max. Current to tower 6	12565,97	28,15029326

Para ver el comportamiento y tomar decisiones relacionadas al impacto presentado en el cable de guarda entre la torre 5 y torre 6 por un rayo, se realiza la correspondiente medición de cada una de las corrientes que circulan por las torres del circuito como se muestra en las siguientes graficas:

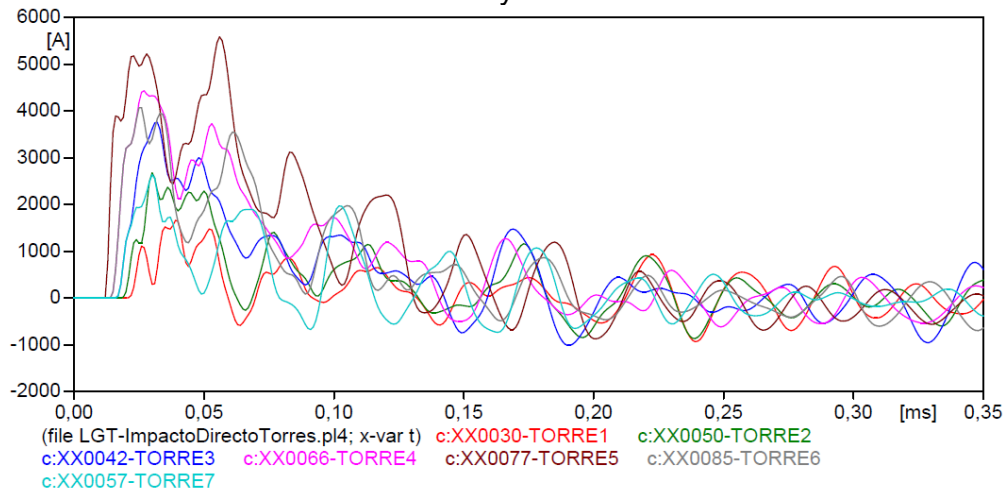
En la Figura 67, se presentan todas las corrientes del circuito, como lo son la corriente de impacto y las respectivas corrientes asociadas a cada torre cuando el impacto es en el cable de guarda entre la torre 5 y torre 6.

Figura 67. Corriente de impacto en el cable de guarda entre las torres 5-6 y corrientes a tierra por las torres



Para buscar un patrón de comportamiento de las corrientes en las torres, se grafican estas únicamente como se muestra en la Figura 68.

Figura 68. Corrientes a tierra por cada torre cuando el impacto fue entre las torres 5 y 6



Tendiendo la información de la Figura 68, se procede a hallar los valores picos de cada señal de corriente obtenida en las torres, la tabla mostrada a continuación, muestra los valores picos presentados.

Tabla 36. valores de corriente pico cuando el impacto es entre las torres 5 y 6

Maximus values [A]							
Total current	Tower 1	Tower 2	Tower 3	Tower 4	Tower 5	Tower 6	Tower 7
44638,86	1657,281	2674,049	3752,33	4428,569	5581,969	4067,856	2631,111

En la Tabla 36 están los valores picos de las corrientes presentadas cuando el impacto fue en el cable de guarda entre la torre 5 y torre 6, teniendo en cuenta estos valores se procede a organizar los datos de mayor a menor y mostrar el porcentaje que representa cada corriente respecto a la corriente total, lo anteriormente dicho se presenta en la Tabla 37.

Tabla 37. Porcentaje de la corriente que baja por cada torre respecto a la fuente, cuando el impacto es entre las torres 5 y 6.

Element	Current value [A]	Porcent %
Current total	44638,86	100
Tower 5	5581,969	12,50473
Tower 4	4428,569	9,920883
Tower 6	4067,856	9,112813
Tower 3	3752,33	8,405972
Tower 2	2674,049	5,990406
Tower 7	2631,111	5,894216
Tower 1	1657,281	3,712642

El impacto presentado en el cable de guarda, representa un comportamiento en las corrientes de las torres hacia la izquierda del circuito y hacia la derecha del circuito,

los cuales se analizan por aparte, a continuación, se tienen las tablas con los datos para encontrar la relación en cada lado debida al impacto en el cable de guarda entre la torre 5 y torre 6:

Tabla 38. Relación de las corrientes de la parte izquierda del circuito cuando el impacto es entre las torres 5 y 6.

Relation with the left circuit part		
Tower	Current [A]	%
Tower 5	5581,969	12,50473
Tower 4	4428,569	9,920883
Tower 3	3752,33	8,405972
Tower 2	2674,049	5,990406
Tower 1	1657,281	3,712642

Así como hubo un comportamiento en la parte izquierda del circuito se analiza la parte derecha, teniendo como referencia la torre 5 que tiene una corriente más elevada que las demás.

Tabla 39. Relación de las corrientes de la parte derecha del circuito cuando el impacto es entre las torres 5 y 6

Relation with the right circuit part		
Tower	Current [A]	%
Tower 5	5581,969	12,50473
Tower 6	4067,856	9,112813
Tower 7	2631,111	5,894216

3. Consideraciones a tener en cuenta respecto al lugar donde se realice la medición de corriente en el grupo de torres

Para tomar la decisión en que torre o en que ubicación tener el equipo, se realiza un análisis de los datos obtenidos en las simulaciones en el literal 2, donde se realizaron impactos de rayo en las diferentes torres de transmisión. Como primera medida es saber qué porcentaje de la corriente de rayo va a bajar por la torre impactada, en artículos publicados por Ishii [30] la corriente que obtuvo el en sus simulaciones era de un 10% bajando por la torre, en el caso de este trabajo se obtuvo un porcentaje entre 8,83% y 12,504%, valores presentados en la Tabla 40.

Tabla 40. Valores pico de corriente en la torre impactada por rayo

Valores máximos de corriente en la torre impactada		
Torre	Corriente [A]	% respecto a la corriente de impacto
1	4605,33	8,837
2	5139,938	10,716
3	5581,971	12,504
4	5699,967	11,8873
5	5581,968	12,504
6	5139,938	10,716
7	4605,33	8,837

Teniendo como referencia un 10% de otros artículos, los valores que se obtuvieron en este trabajo son relativamente cercanos, los que tienen menos porcentaje del total de la corriente son las torres que están más próximas a los extremos de la línea. Si se realiza un promedio de todas las torres se obtiene un 10,857% del porcentaje de la corriente que baja por la torre impactada por un rayo.

3.1. Impacto en la torre 1

Para realizar un estudio detallado de las corrientes que atraviesan cada torre de transmisión, se plantea hacer un barrido de información que corresponde al comportamiento de las corrientes que fluyen en todas las torres cada vez que un rayo impacta cada torre.

Para el inicio de este estudio, se plantea el impacto de un rayo en la torre 1, para cada impacto se analizan las corrientes que cruzan por cada torre de la línea, se hace una primera aproximación con factor de corrección de amplitud el cual se halla de la siguiente manera:

$$Factor = \frac{\text{Peak of original current}}{\text{peak of current for each tower}} \quad Ec. 41$$

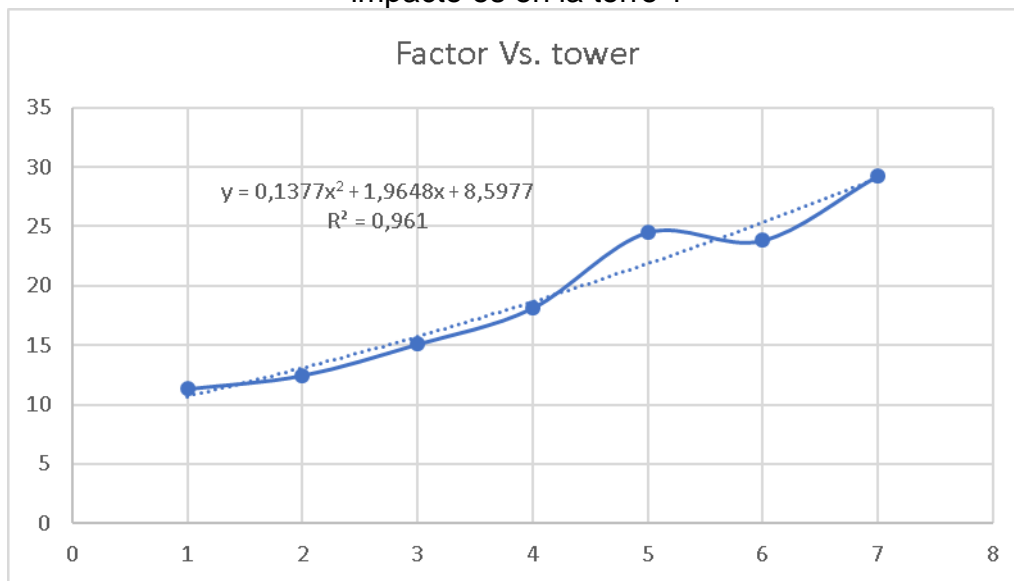
En la siguiente tabla se relaciona la corriente que atraviesa cada torre cuando el impacto fue en la torre 1, adicionalmente se encuentra el primer factor de corrección que para este caso solo se plante hacia el lado derecho del circuito debido a que se analiza la torre 1:

Tabla 41. Relación de corrientes cuando el impacto es en la torre 1

Relation with the right circuit part		
Tower	Current [A]	Factor
Tower 1	4605,339	11,3160008
Tower 2	4185,616	12,4507408
Tower 3	3456,882	15,0754408
Tower 4	2877,329	18,1119434
Tower 5	2128,087	24,4886699
Tower 6	2188,412	23,8136238
Tower 7	1783,129	29,2261637

Teniendo en cuenta el factor que relacionaba la amplitud del pico de corriente de la señal de corriente de retorno de rayo con el pico de corriente que se tiene por cada torre se busca un comportamiento general, por tal razón, se tiene la siguiente curva que ayuda a buscar una tendencia en su comportamiento y dar así una primera generalización de esta amplitud:

Figura 69. Curva del comportamiento de las corrientes en las torres cuando el impacto es en la torre 1

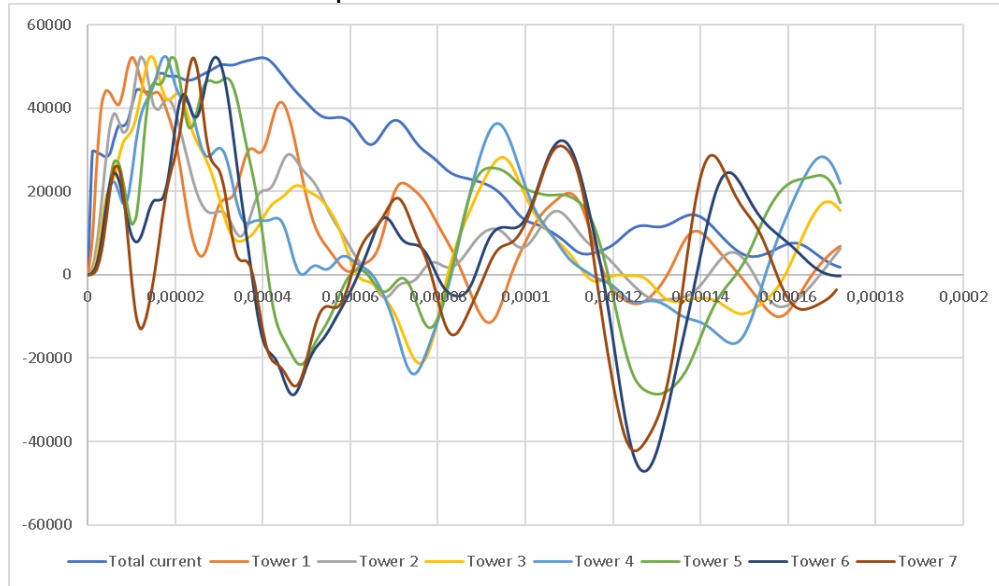


Con lo anterior se encontró un comportamiento exponencial que generaliza la primera aproximación con un factor amplitud que se muestra en la siguiente fórmula para cuando el impacto es en la torre 1:

$$Factor = 0,1377 * tower^2 + 1,9648 * tower + 8,8577 \quad Ec. 42$$

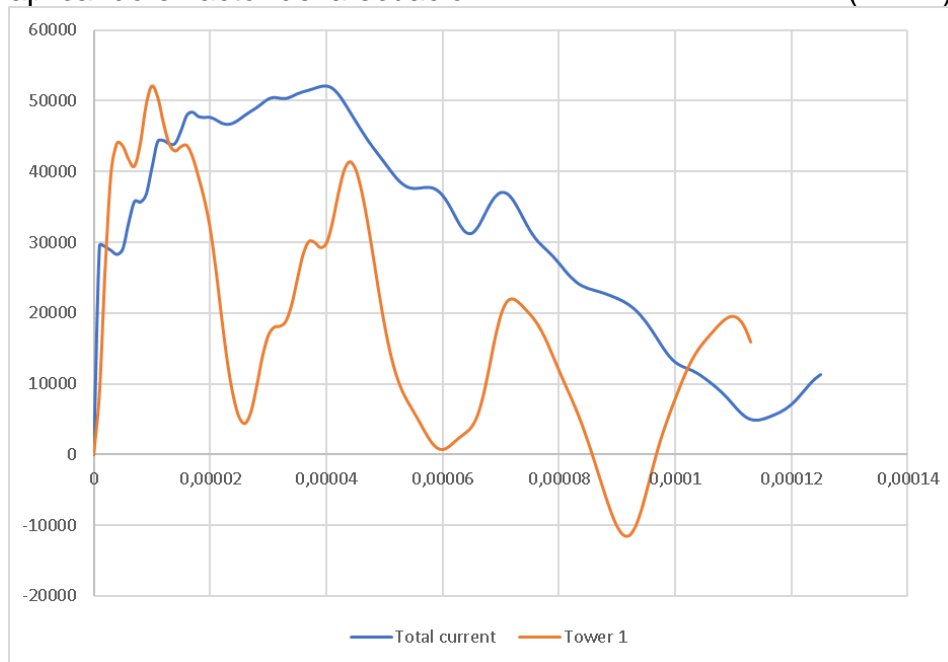
Se aplica el factor a cada corriente que baja por las torres y se tiene el siguiente comportamiento:

Figura 70. Corrientes por las torres cuando el impacto es en la torre 1 y aplicando el primer factor de corrección



A continuación, con el fin de observar un poco mejor la forma de onda obtenida después de aplicar la primera aproximación con el uso de un factor corrección de amplitud simple, se tiene:

Figura 71. Curva original de corriente y la corriente que pasa por la torre 1 aplicando el factor de la ecuación 42 “curva torre 1 * factor (torre1)”



Con la primera aproximación de la señal, aplicando el uso de la corrección simple de la amplitud se tienen las siguientes correlaciones entre la señal original de corriente “corriente de retorno de rayo” y las que bajan por cada torre:

Tabla 42. Correlación existente entre la corriente total y la corriente que circula por cada una de las torres, cuando el impacto es en la torre 1

	Total Current	Tower 1	Tower 2	Tower 3	Tower 4	Tower 5	Tower 6	Tower 7
Total Current	1,000	0,642	0,632	0,489	0,361	0,259	0,147	0,106
Tower 1	0,642	1,000	0,788	0,462	0,277	0,226	0,204	0,183
Tower 2	0,632	0,788	1,000	0,827	0,625	0,448	0,278	0,187
Tower 3	0,489	0,462	0,827	1,000	0,910	0,623	0,260	0,130
Tower 4	0,361	0,277	0,625	0,910	1,000	0,809	0,395	0,205
Tower 5	0,259	0,226	0,448	0,623	0,809	1,000	0,783	0,560
Tower 6	0,147	0,204	0,278	0,260	0,395	0,783	1,000	0,905
Tower 7	0,106	0,183	0,187	0,130	0,205	0,560	0,905	1,000

Con los resultados obtenidos de correlación cuando el impacto es en la torre 1, se tiene que la correlación más alta aplicando la primera aproximación por amplitud es de 64,2% siendo esta la torre impactada (torre 1) y la menor correlación 10,6% siendo esta la torre más lejana al lugar de impacto (torre 7)

3.2. Impacto en la torre 2

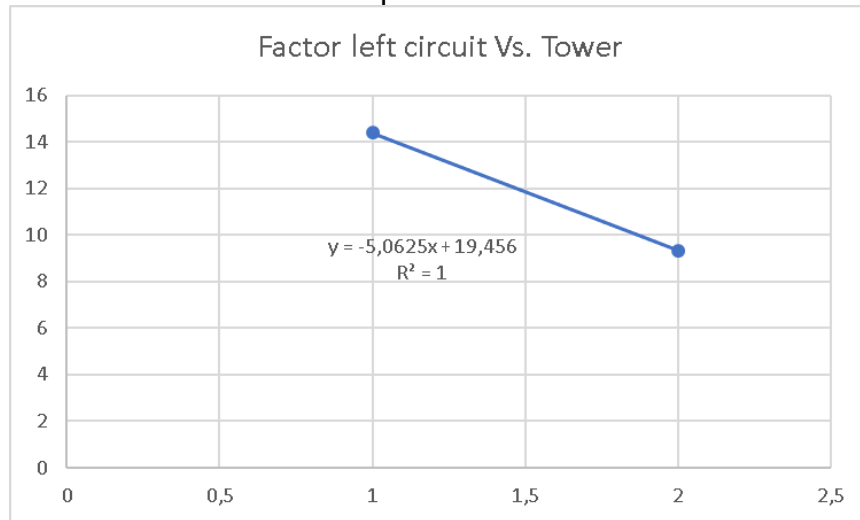
Cuando el impacto es en la torre 2, se procede a hacer el mismo proceso que se realizó cuando el impacto fue en la torre 1, solo que para este caso se tienen dos relaciones, una para el lado izquierdo del circuito y una para el lado derecho del circuito, como se muestra a continuación:

Tabla 43. Relación de las corrientes en la parte izquierda y derecha cuando el impacto es en la torre 2

Relation with the left circuit part			Relation with the right circuit part		
Tower	Current [A]	Factor	Tower	Current [A]	Factor
Tower 2	5139,938	9,33104446	Tower 2	5139,938	9,33104446
Tower 1	3332,127	14,393506	Tower 3	4224,218	11,3538151
			Tower 4	3540,443	13,546607
			Tower 5	2702,856	17,7445598
			Tower 6	3012,944	15,9183144
			Tower 7	1651,353	29,043451

Se realiza la gráfica de cada parte del circuito, buscando una relación y una ecuación que relacione la amplitud en función de la torre, primero se analiza la parte izquierda:

Figura 72. Curva del comportamiento de las corrientes hacia el lado izquierdo, cuando el impacto es en la torre 2

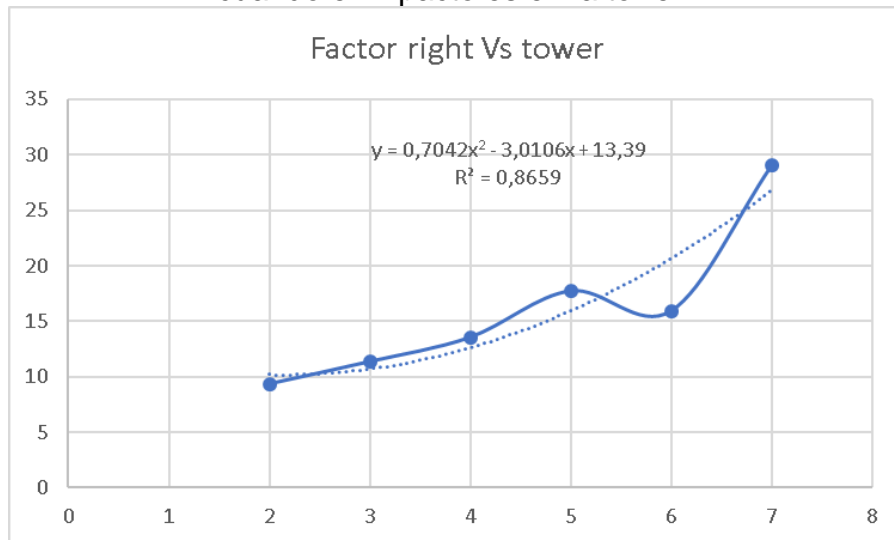


Para el comportamiento en la parte izquierda del circuito se tiene un factor de corrección con la siguiente fórmula:

$$Factor = -5.0625 * Tower + 19,456 \quad Ec. 43$$

Analizando la parte derecha del circuito se tiene la siguiente curva del factor en función de la torre:

Figura 73. Curva del comportamiento de las corrientes hacia el lado derecho, cuando el impacto es en la torre 2

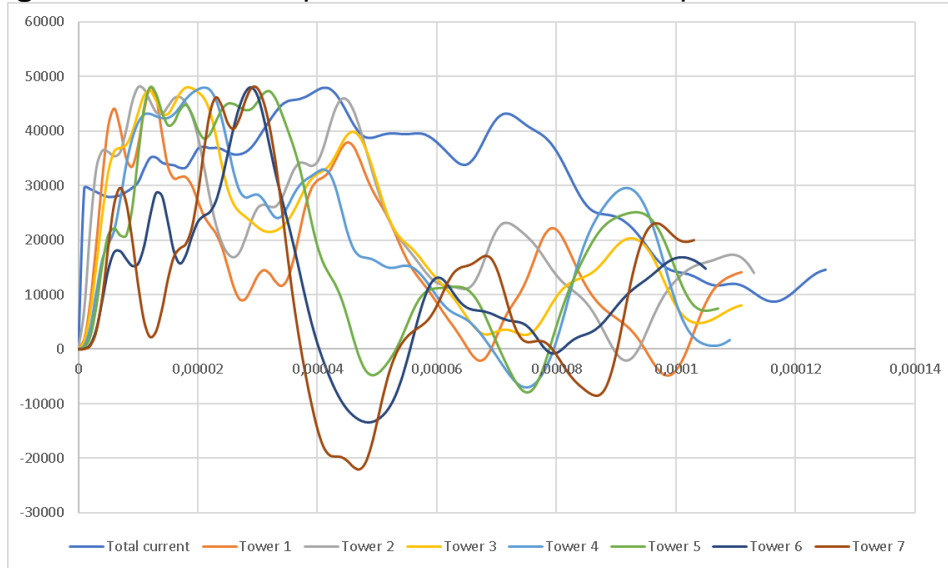


Para el comportamiento en la parte derecha del circuito se tiene un factor de corrección con la siguiente fórmula:

$$Factor = 0,7042 * tower^2 - 3,0106 * tower + 13,39 \quad Ec. 44$$

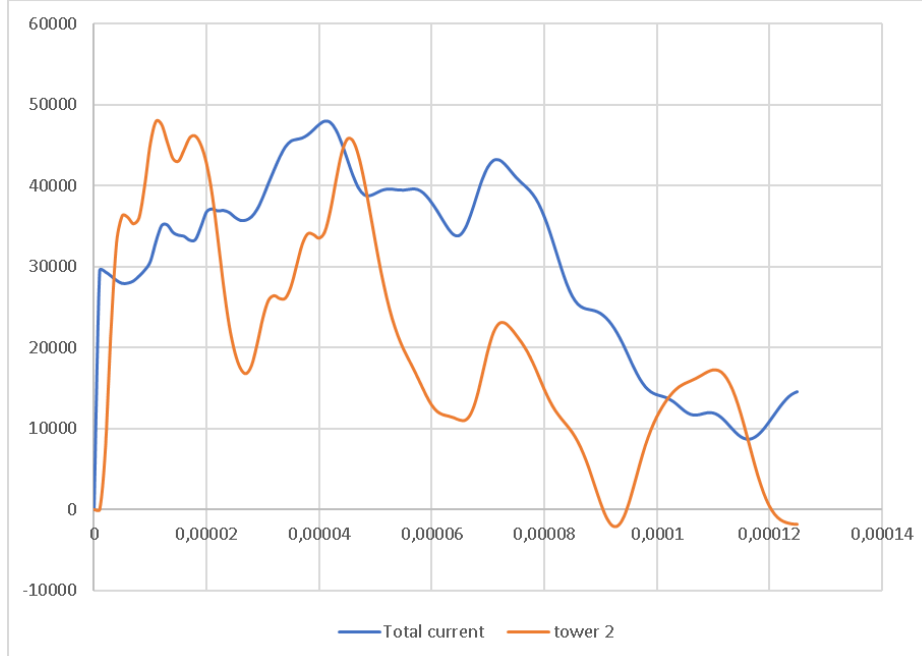
Aplicando el factor de corrección simple a las corrientes que bajan por cada torre y comparándolas con la corriente de impacto de rayo se tiene:

Figura 74. Corrientes por las torres cuando el impacto es en la torre 2



A continuación, con el fin de observar un poco mejor la forma de onda obtenida después de aplicar la primera aproximación con el uso de un factor corrección de amplitud simple, se tiene:

Figura 75. Curva original de corriente y la corriente que pasa por la torre 1 aplicando el factor de la ecuación 43 “curva torre 2 * factor (torre2)”



Con la primera aproximación de la señal, aplicando el uso de la corrección simple de la amplitud se tienen las siguientes correlaciones entre la señal original de corriente “corriente de retorno de rayo” y las que bajan por cada torre:

Tabla 44. Correlación existente entre la corriente total y la corriente que circula por cada una de las torres, cuando el impacto es en la torre 2.

	Total current	Tower 1	Tower 2	Tower 3	Tower 4	Tower,5	Tower,6	Tower,7
Total current	1,000	0,600	0,738	0,655	0,534	0,464	0,317	0,199
Tower 1	0,600	1,000	0,819	0,784	0,543	0,413	0,243	0,083
Tower 2	0,738	0,819	1,000	0,839	0,604	0,494	0,368	0,286
Tower 3	0,655	0,784	0,839	1,000	0,905	0,727	0,401	0,226
Tower 4	0,534	0,543	0,604	0,905	1,000	0,879	0,477	0,230
Tower 5	0,464	0,413	0,494	0,727	0,879	1,000	0,789	0,524
Tower 6	0,317	0,243	0,368	0,401	0,477	0,789	1,000	0,885
Tower 7	0,199	0,083	0,286	0,226	0,230	0,524	0,885	1,000

Con los resultados obtenidos de correlación cuando el impacto es en la torre 2, se tiene que la correlación más alta aplicando la primera aproximación por amplitud es de 73,8% siendo esta la torre impactada (torre 2) y la menor correlación 19,9% siendo esta la torre más lejana al lugar de impacto (torre 7)

3.3. Impacto en la torre 3

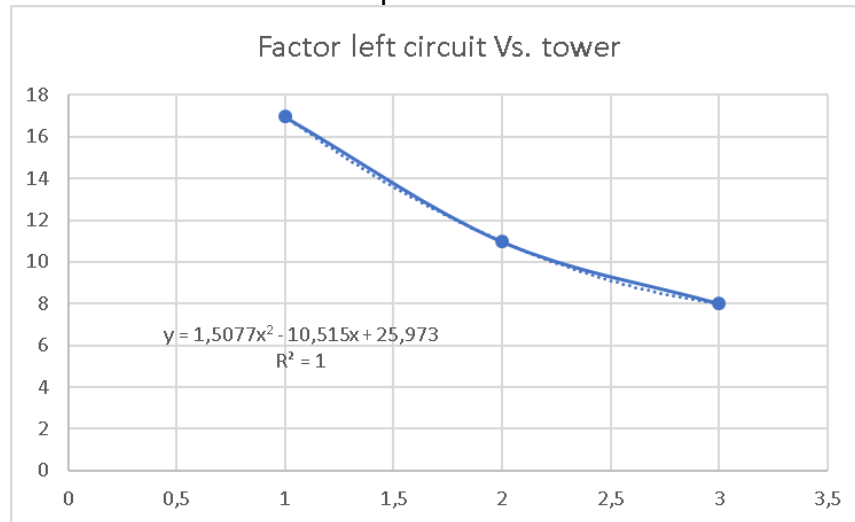
Cuando el impacto es en la torre 3, se procede a hacer el mismo proceso que en la torre 2, donde también se tienen dos relaciones, una para el lado izquierdo del circuito y una para el lado derecho del circuito, como se muestra a continuación:

Tabla 45. Relación de las corrientes en la parte izquierda y derecha cuando el impacto es en la torre 3

Relation with the left circuit part			Relation with the right circuit part		
Tower	Current [A]	Factor	Tower	Current [A]	Factor
Tower 3	5581,971	7,99695663	Tower 3	5581,971	7,99695663
Tower 2	4067,828	10,9736154	Tower 4	4428,569	10,07973
Tower 1	2631,111	16,9657533	Tower 5	3752,33	11,8962831
			Tower 6	2674,049	16,6933291
			Tower 7	1657,281	26,9349495

Se realiza la gráfica de cada parte del circuito, buscando una relación y una ecuación que relacione la amplitud en función de la torre, primero se analiza la parte izquierda:

Figura 76. Curva del comportamiento de las corrientes hacia el lado izquierdo, cuando el impacto es en la torre 3

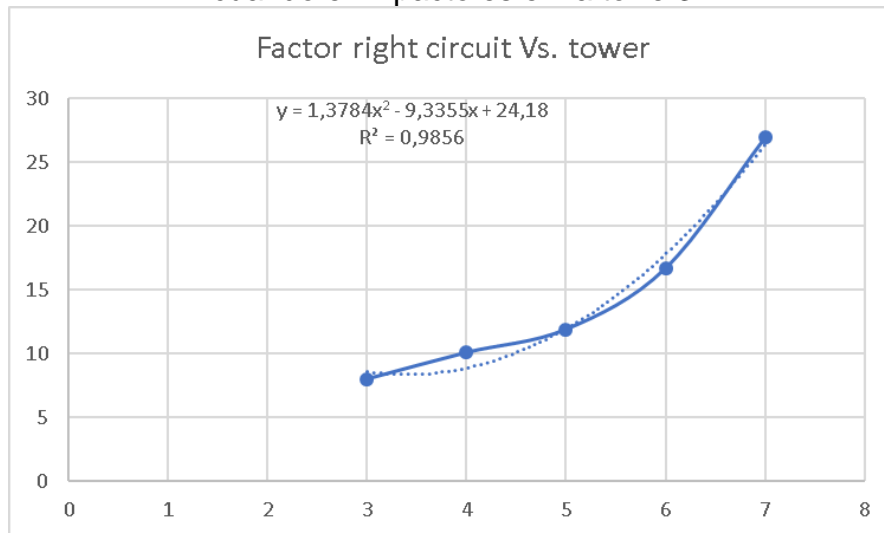


Para el comportamiento en la parte izquierda del circuito se tiene un factor de corrección con la siguiente fórmula:

$$Factor = 1,5077 * tower^2 - 10,515 * tower + 25,973 \quad Ec. 45$$

Analizando la parte derecha del circuito se tiene la siguiente curva del factor en función de la torre:

Figura 77. Curva del comportamiento de las corrientes hacia el lado derecho, cuando el impacto es en la torre 3

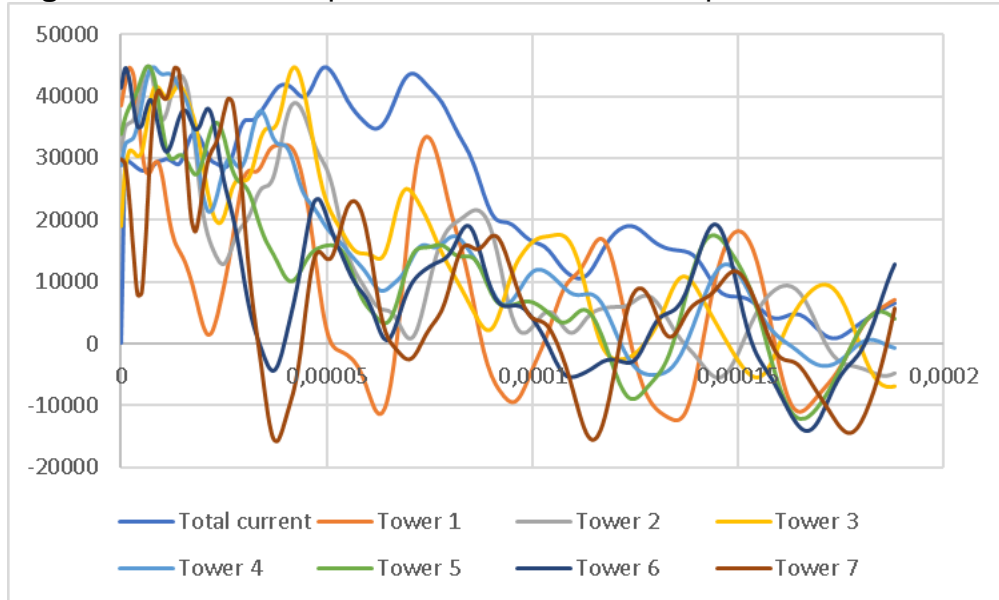


Para el comportamiento en la parte derecha del circuito se tiene un factor de corrección con la siguiente fórmula:

$$Factor = 1,37784 * tower^2 - 9,3355 * tower + 24,18 \quad Ec. 46$$

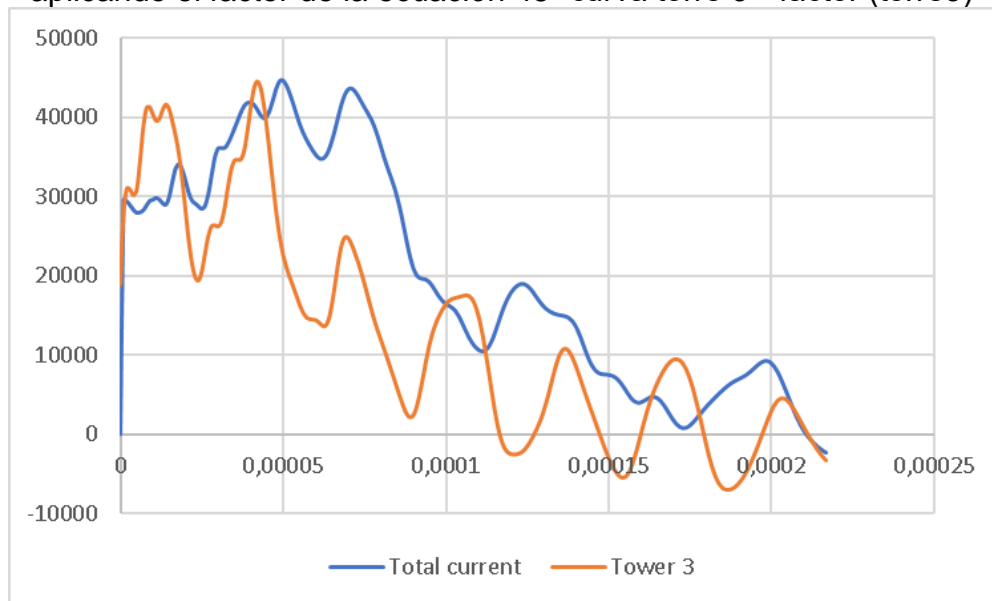
Aplicando el factor de corrección simple a las corrientes que bajan por cada torre y comparándolas con la corriente de impacto de rayo se tiene:

Figura 78. Corrientes por las torres cuando el impacto es en la torre 3



A continuación, con el fin de observar un poco mejor la forma de onda obtenida después de aplicar la primera aproximación con el uso de un factor corrección de amplitud simple, se tiene:

Figura 79. Curva original de corriente y la corriente que pasa por la torre 1 aplicando el factor de la ecuación 45 “curva torre 3 * factor (torre3)”



Con la primera aproximación de la señal, aplicando el uso de la corrección simple de la amplitud se tienen las siguientes correlaciones entre la señal original de corriente “corriente de retorno de rayo” y las que bajan por cada torre:

Tabla 46. Correlación existente entre la corriente total y la corriente que circula por cada una de las torres, cuando el impacto es en la torre 3.

	Total current	Tower 1	Tower 2	Tower 3	Tower 4	Tower 5	Tower 6	Tower 7
Total current	1,000	0,456	0,670	0,746	0,676	0,565	0,506	0,386
Tower 1	0,456	1,000	0,553	0,533	0,726	0,640	0,437	0,108
Tower 2	0,670	0,553	1,000	0,814	0,843	0,673	0,617	0,480
Tower 3	0,746	0,533	0,814	1,000	0,864	0,687	0,529	0,342
Tower 4	0,676	0,726	0,843	0,864	1,000	0,880	0,674	0,474
Tower 5	0,565	0,640	0,673	0,687	0,880	1,000	0,871	0,634
Tower 6	0,506	0,437	0,617	0,529	0,674	0,871	1,000	0,793
Tower 7	0,386	0,108	0,480	0,342	0,474	0,634	0,793	1,000

Con los resultados obtenidos de correlación cuando el impacto es en la torre 3, se tiene que la correlación más alta aplicando la primera aproximación por amplitud es de 74,6% siendo esta la torre impactada (torre 3) y la menor correlación 38,6% siendo esta la torre más lejana al lugar de impacto (torre 7)

3.4. Impacto en la torre 4

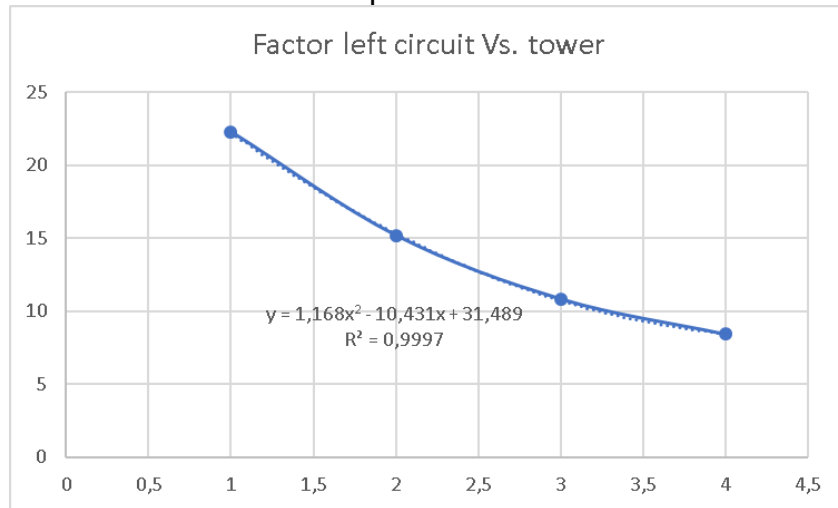
Cuando el impacto es en la torre 4, se procede a hacer el mismo proceso que en las dos torres anteriores, se tienen dos relaciones, una para el lado izquierdo del circuito y una para el lado derecho del circuito, como se muestra a continuación:

Tabla 47. Relación de las corrientes en la parte izquierda y derecha cuando el impacto es en la torre 4

Relation with the left circuit part			Relation with the right circuit part		
Tower	Current [A]	Factor	Tower	Current [A]	Factor
Tower 4	5699,967	8,412279	Tower 4	5699,967	8,41227853
Tower 3	4428,486	10,82756	Tower 5	4428,486	10,8275627
Tower 2	3158,946	15,17902	Tower 6	3158,972	15,1788968
Tower 1	2153,473	22,26622	Tower 7	2153,473	22,266223

Se realiza la gráfica de cada parte del circuito, buscando una relación y una ecuación que relacione la amplitud en función de la torre, primero se analiza la parte izquierda:

Figura 80. Curva del comportamiento de las corrientes hacia el lado izquierdo, cuando el impacto es en la torre 4

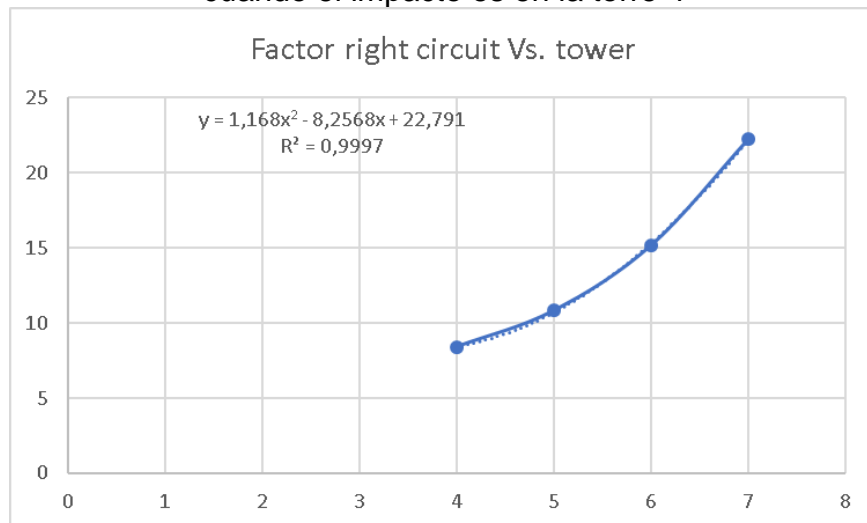


Para el comportamiento en la parte izquierda del circuito se tiene un factor de corrección con la siguiente fórmula:

$$Factor = 1,168 * tower^2 - 10,431 * tower + 31,489 \quad Ec. 47$$

Analizando la parte derecha del circuito se tiene la siguiente curva del factor en función de la torre:

Figura 81. Curva del comportamiento de las corrientes hacia el lado derecho, cuando el impacto es en la torre 4

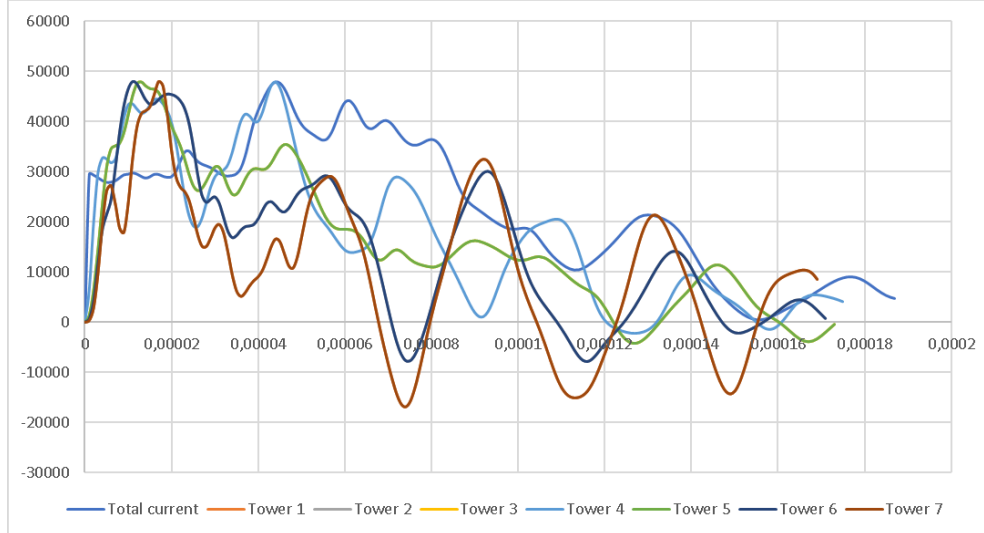


Para el comportamiento en la parte derecha del circuito se tiene un factor de corrección con la siguiente fórmula:

$$Factor = 1,168 * tower^2 - 8,2568 * tower + 22,791 \quad Ec. 48$$

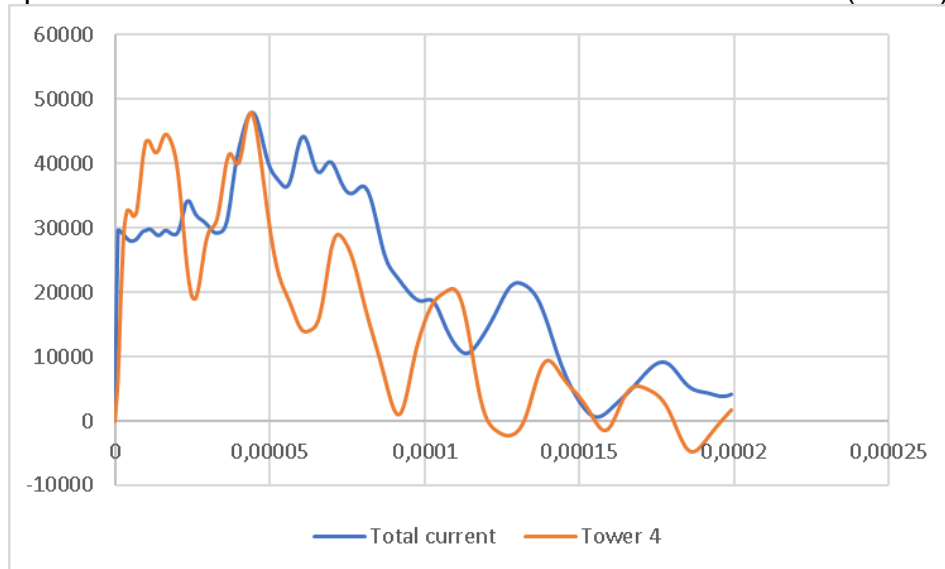
Aplicando el factor de corrección simple a las corrientes que bajan por cada torre y comparándolas con la corriente de impacto de rayo se tiene:

Figura 82. Corrientes por las torres cuando el impacto es en la torre 4



A continuación, con el fin de observar un poco mejor la forma de onda obtenida después de aplicar la primera aproximación con el uso de un factor corrección de amplitud simple, se tiene:

Figura 83. Curva original de corriente y la corriente que pasa por la torre 1 aplicando el factor de la ecuación 47 “curva torre 4 * factor (torre4)”



Con la primera aproximación de la señal, aplicando el uso de la corrección simple de la amplitud se tienen las siguientes correlaciones entre la señal original de corriente “corriente de retorno de rayo” y las que bajan por cada torre:

Tabla 48. Correlación existente entre la corriente total y la corriente que circula por cada una de las torres, cuando el impacto es en la torre 4.

	Total current	Tower 1	Tower 2	Tower 3	Tower 4	Tower 5	Tower 6	Tower 7
Total current	1,000	0,453	0,601	0,694	0,743	0,694	0,601	0,453
Tower 1	0,453	1,000	0,890	0,591	0,384	0,591	0,890	1,000
Tower 2	0,601	0,890	1,000	0,844	0,638	0,844	1,000	0,890
Tower 3	0,694	0,591	0,844	1,000	0,890	1,000	0,844	0,591
Tower 4	0,743	0,384	0,638	0,890	1,000	0,890	0,638	0,384
Tower 5	0,694	0,591	0,844	1,000	0,890	1,000	0,844	0,591
Tower 6	0,601	0,890	1,000	0,844	0,638	0,844	1,000	0,890
Tower 7	0,453	1,000	0,890	0,591	0,384	0,591	0,890	1,000

Con los resultados obtenidos de correlación cuando el impacto es en la torre 4, se tiene que la correlación más alta aplicando la primera aproximación por amplitud es de 74,3% siendo esta la torre impactada (torre 4) y las menores correlaciones de 45,3% siendo estas las torres más lejanas al lugar de impacto (torre 1 y torre 7)

3.5. Espectro de la serie de Fourier en señales medidas de forma directa en Colombia y Brasil

Aunque la serie de Fourier es aplicada a señales periódicas en este trabajo se va a usar y las consideraciones a tomar para un uso adecuado. Para el caso actual se plantea inicialmente el uso de la serie de Fourier a señales reales que se midieron de forma directa en Colombia y Brasil, con lo cual se quiere mirar el espectro de la señal específicamente la amplitud. La serie de Fourier plantea la suma de señales senoidales de diferentes frecuencias, siendo como siempre una frecuencia fundamental. Las ecuaciones a usar para determinar la serie de Fourier y su espectro son las siguientes:

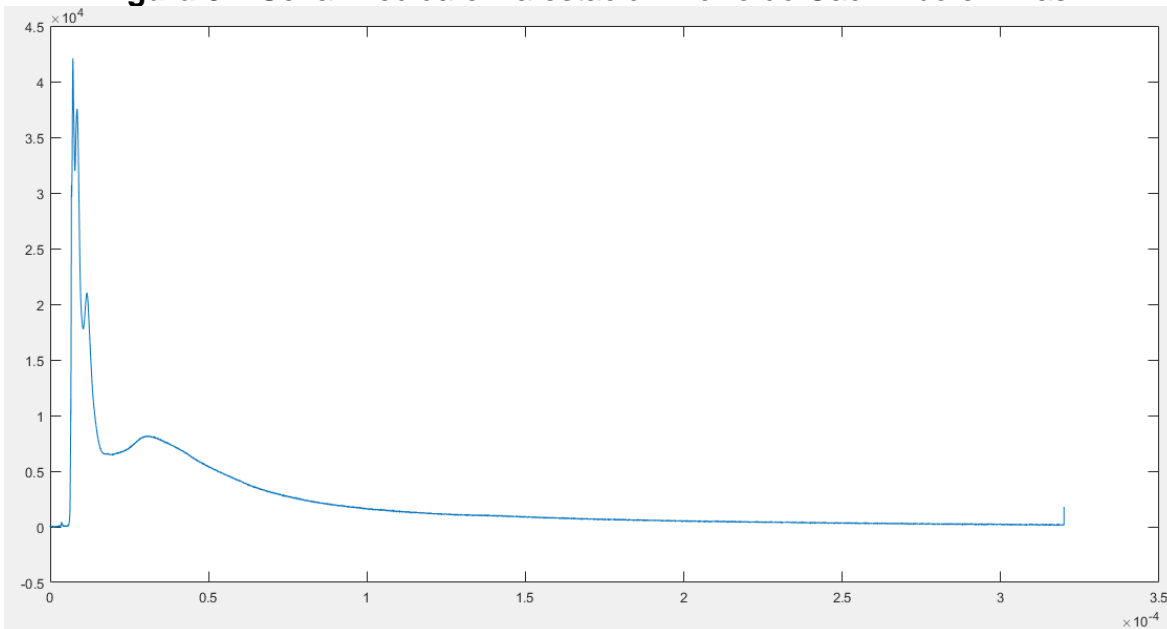
Tabla 49. Ecuaciones usadas en la serie de Fourier

Ecuación 1	$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt$
Ecuación 2	$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(n\omega_0 t) dt$
Ecuación 3	$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(n\omega_0 t) dt$
Ecuación 4	$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$
Ecuación 5	$\phi_n = -\tan\left(\frac{b_n}{a_n}\right)$
Consideraciones	$n = 1, 2, 3, \dots, \omega_0 = \frac{2\pi}{T}, T \text{ periodo}$

Usando las anteriores ecuaciones y planteando la serie de Fourier de forma discreta a las siguientes ecuaciones se tiene:

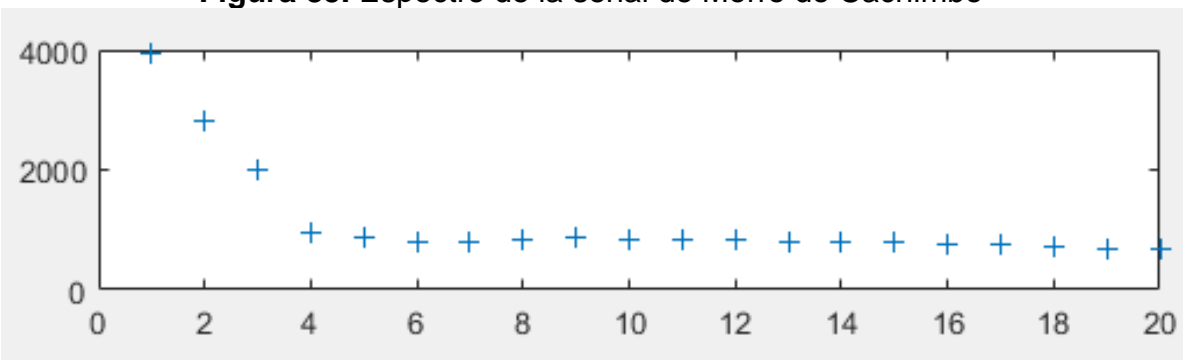
La señal obtenida en la estación de medición directa de rayos en Morro do Cachimbo en Brasil se muestra a continuación:

Figura 84. Señal medida en la estación Morro do Cachimbo en Brasil



Al aplicar la serie de Fourier a la señal medida en Morro do Cachimbo, las amplitudes del espectro de la señal son:

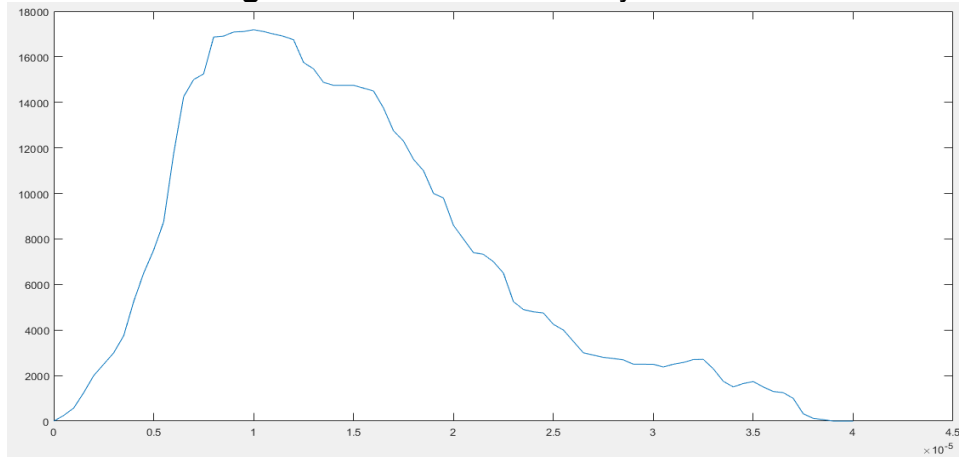
Figura 85. Espectro de la señal de Morro do Cachimbo



Observando las amplitudes del espectro de la señal anterior se tiene que los tres primeros armónicos de la señal tienen un mayor peso respecto a los otros.

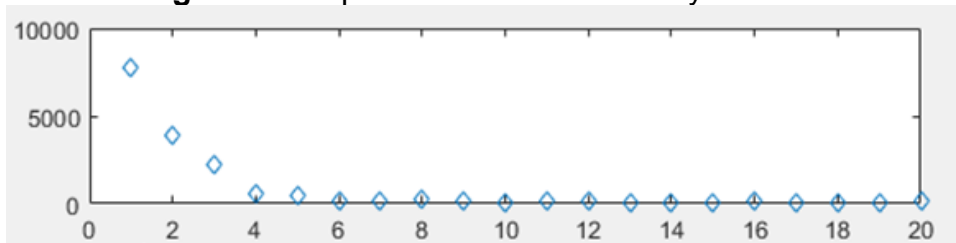
Como segunda medición directa a analizar se tiene la señal Rayo de Oro, la cual se muestra a continuación:

Figura 86. Señal medida Rayo de Oro



Al aplicar la serie de Fourier a la señal Rayo de Oro, las amplitudes del espectro de la señal son:

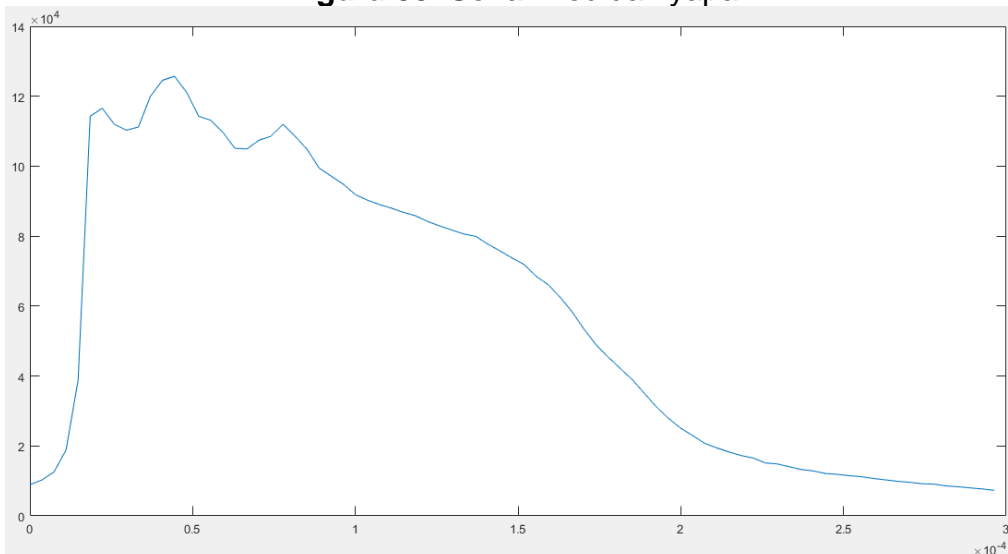
Figura 87. Espectro de la señal de Rayo de Oro



Observando las amplitudes del espectro de la señal anterior se tiene que los tres primeros armónicos de la señal tienen un mayor peso respecto a los demás.

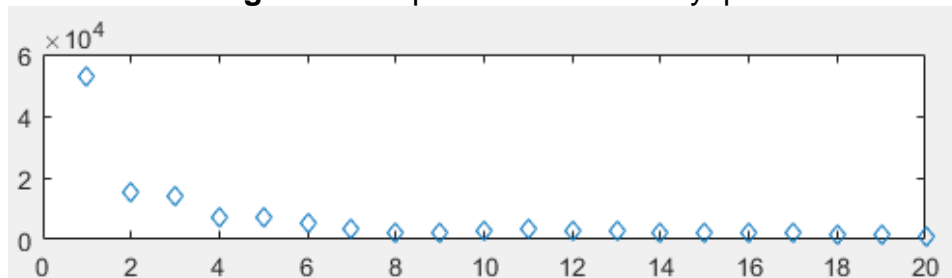
Como segunda medición directa a analizar se tiene la señal Ilyapa, la cual se muestra a continuación:

Figura 88. Señal medida Ilyapa



Al aplicar la serie de Fourier a la señal Ilyapa, las amplitudes del espectro de la señal son:

Figura 89. Espectro de la señal Ilyapa

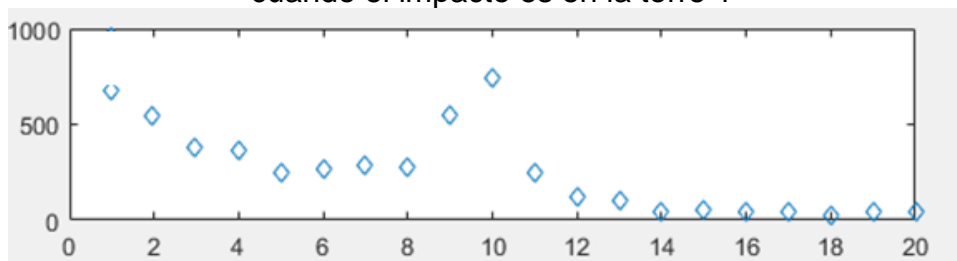


Observando las amplitudes del espectro de la señal anterior se tiene que los tres primeros armónicos de la señal tienen un mayor peso respecto a los demás.

3.6. Corrección aplicada a las señales

Lo primero a tener en cuenta es mejorar la correlación obtenida como primera opción en los literales 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4, para esto se va a tener en cuenta el comportamiento presentado en las señales reales literal 3.5. Por tal razón, se procede a conseguir una reconstrucción de las señales obtenidas en cada torre y llegar a reconstruirlas de tal forma que se parezcan a la corriente de retorno total, para esto se planteó el uso de la serie de Fourier en cada señal presentada en todas las torres. Cuando se modelo las señales reales se vio que los tres primeros armónicos tienen mayor amplitud respecto a los demás, por tal motivo se espera que las señales a reconstruir tengan un comportamiento similar, pero al momento de realizar la serie de Fourier y su espectro, se presentó que algunos armónicos diferentes a los 3 primeros eran mayores o muy cercanos, como se muestra a continuación cuando el impacto es en la torre 1 y la señal también en dicha torre:

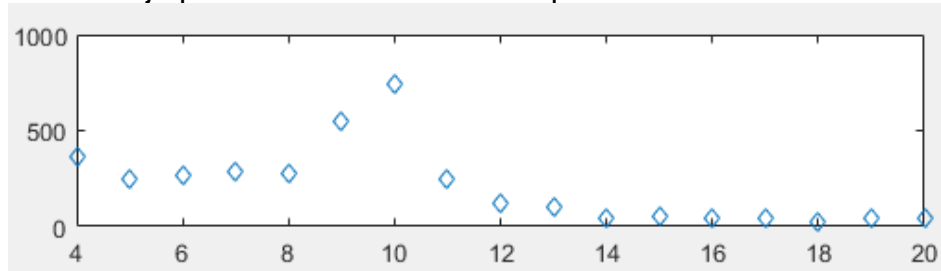
Figura 90. Amplitud de los armónicos de la señal original que baja por la torre 1 cuando el impacto es en la torre 1



El comportamiento de los armónicos 9 y 10 especialmente se convierten en un error considerable al momento de reconstruir la señal, por tal motivo se tomó la decisión de suavizar y corregir este comportamiento para poder reconstruir la señal. Para llevar a cabo esta corrección se plantea hacer un suavizamiento de la curva con un decaimiento exponencial, esto es llevado a cabo con un ajuste exponencial de la

curva desde el armónico 4, como se muestra a continuación se toman los datos de magnitud de los armónicos desde el 4:

Figura 91. Amplitud de los armónicos a partir del 4to armónico de la señal que baja por la torre 1 cuando el impacto es en la torre 1



Teniendo estos datos a partir del armónico 4 se hace el ajuste de la curva a una exponencial en decaimiento, usando Matlab, se puede calcular esta curva de la siguiente manera:

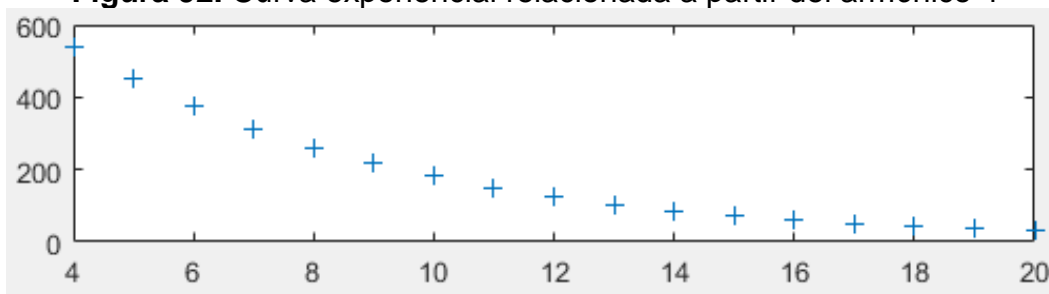
```
x=Valores en el eje x
y=valores en el eje y
p=polyfit(x,log(y),1)
```

Aplicando el ajuste de la curva para los datos anteriores, se tiene la siguiente ecuación:

```
z=exp(p(2))*exp(x*p(1))
```

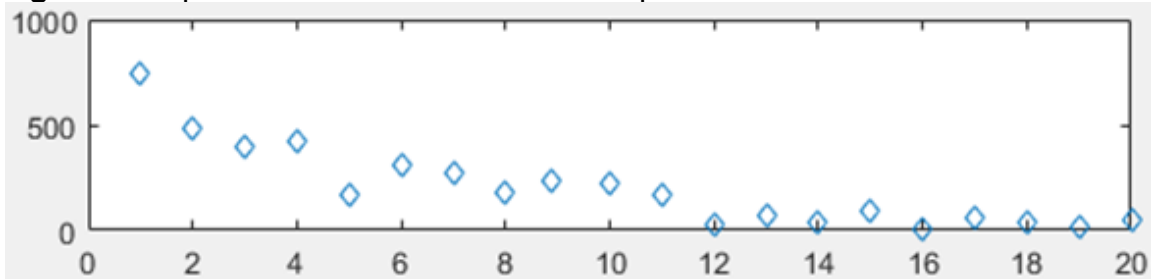
La grafica de la curva exponencial decreciente obtenida es la siguiente:

Figura 92. Curva exponencial relacionada a partir del armónico 4



Con el ajuste lineal de la curva, se procede a remplazar los valores de los armónicos elevados y se ajusta, para tal fin se hace una comparación entre los datos reales y los datos presentados en el ajuste de la curva, los valores que estén por encima de la curva anterior, se ajustan para estar para que no sobrepase el comportamiento de la curva exponencial dada anteriormente, con lo cual se obtiene el siguiente resultado:

Figura 93. Aplicación de la corrección de amplitud de los armónicos 4 en adelante



Solo se ajusta a los valores que son muy elevados “iguales o mayores a las magnitudes de los tres primeros armónicos”, para valores menores a la curva de ajuste no se hace ninguna corrección.

La correlación dada entre la señal original y la que baja por la torre 1 originalmente es de 0.6420, aplicando la corrección hasta el momento se tiene una correlación:

Signal	Correlation
Original	0.6420
Correction 1	0.7978

Cuando se ve la curva de espectro en la señal con la corrección 1, se puede ver que la amplitud del armónico 4 es parecido al armónico 2 y 3, por ende, se va a realizar un barrido para hallar un valor de corrección de amplitud de los armónicos 1,2 y 3 para darles un mayor peso a estos y conseguir mejores resultados

Tabla 50. Primera correlación de amplitud

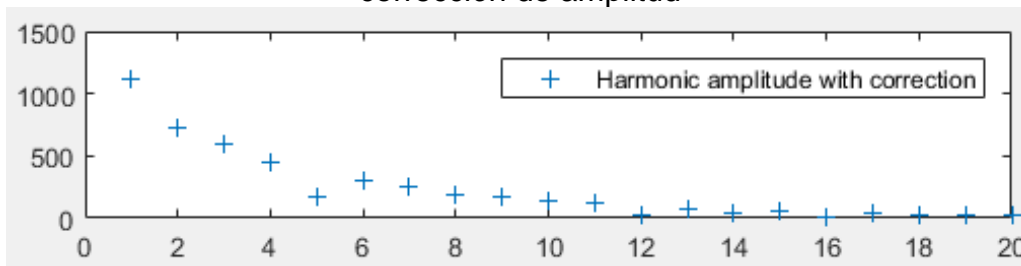
Factor	Correlation
correction 1	79,78
1,10	80,01
1,20	81,67
1,30	83,78
1,40	86,48
1,50	87,77
1,60	86,45
1,70	86,35
1,80	85,67
1,90	84,32
2,00	80,13

La mejor correlación que se consigue es con el valor de 1.5, cuando se aumenta la amplitud de los 3 primeros armónicos en 1.5 veces la correlación se mejora considerablemente.

Signal	Correlation
Original	0.6420
Correction 1	0.8777

Las magnitudes del espectro de la señal que baja por la torre 1 con la corrección de amplitud y de suavizado tiene como resultado la siguiente:

Figura 94. Amplitudes de armónicos aplicando el suavizado y la primera corrección de amplitud



Ahora, Para realizar la corrección de las señales que bajan por cada torre y teniendo en cuenta el comportamiento de las amplitudes del espectro de la serie de Fourier de señales reales, se plantea darles peso a los tres primeros armónicos, es decir, se llevara a cabo una corrección de amplitud de los tres primeros armónicos en todas las señales respecto al valor más alto, es decir donde hubo el impacto directo de rayo.

Para tal motivo se calcula el espectro de todas las señales de corriente que bajan por las torres cuando el impacto es en una torre determinada, es decir, se plantea el impacto en la torre 1 y se analiza el espectro de las señales que bajan por todas las torres y así sucesivamente cuando el impacto sea en las demás torres. Cuando el impacto es en la torre 1, el valor de amplitud del primer armónico en todas las torres es:

Tabla 51. Amplitudes del primer armónico de las señales de cada torre cuando el impacto es en la torre 1

Tower	Amplitude
1	946,278
2	732,7031
3	550,6
4	395,8447
5	274,9928
6	176,7437
7	87,7092

Cuando se tiene estos datos, se plantea normalizar todos los datos teniendo como dato de referencia la magnitud del primer armónico en la torre impactada (mayor magnitud), cuando se llevan todos los datos a la amplitud del primer armónico, se

asume el dato como si el impacto hubiese sido en esta torre. La corrección se realizó de la siguiente manera:

$$Correction = \frac{Max. Aplitude}{Amplitude of each tower} \quad Ec. 49$$

Tower	Amplitude	%	correction
1	946,278	100,000	1,000
2	732,703	77,430	1,291
3	550,600	58,186	1,719
4	395,845	41,832	2,391
5	274,993	29,060	3,441
6	176,744	18,678	5,354
7	87,709	9,269	10,789

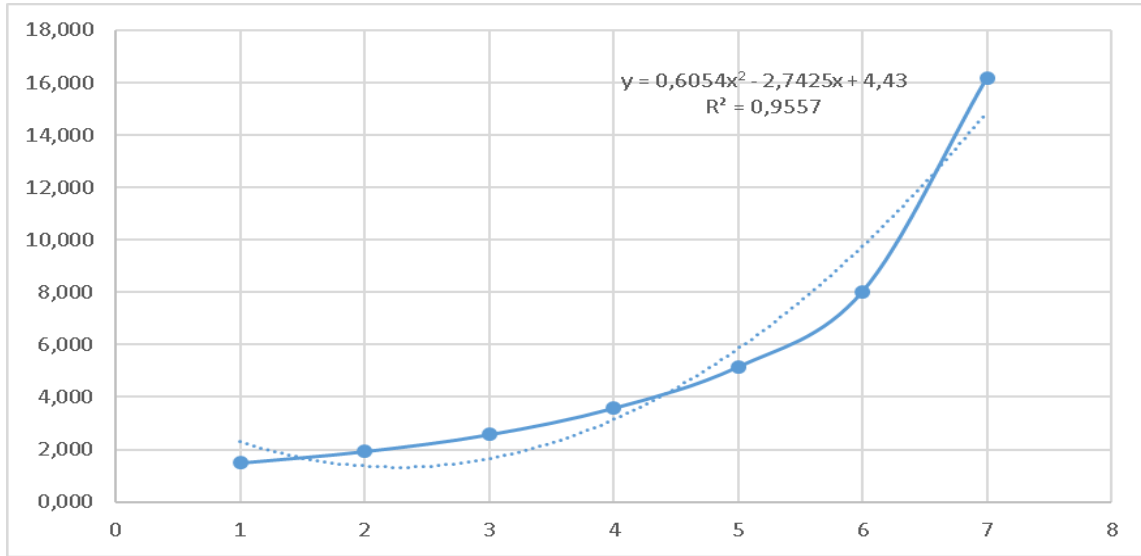
Se puede ver en la anterior tabla que la amplitud máxima (100%) es de 946,278, y la mínima presentada en la torre 7 como era de esperar corresponde a un 9,269% respecto a la amplitud del armónico 1 presentada en la torre 1. Cuando se realiza la esta corrección de amplitud se puede llevar los datos de todas las torres a la amplitud mayor, para el cas de la torre 7, si se multiplica la amplitud presentada que es 87,709 y se multiplica por el factor de corrección de 10,789 se obtendrá el valor de 946,278 presentado en la torre 1 donde fue el impacto y la magnitud es mayor.

Como ya se había realizado una corrección de amplitud de armónicos donde 1.5 mejoraba la correlación, se volvió a comprobar esta corrección en todas las torres donde se corrobora que este valor mejoraba la correlación considerablemente, por tal razón se aplicó de la siguiente manera para la torre 1:

Tabla 52. Factor completo de amplitud

Tower	Amplitude	%	correction	New value	factor	New Amplitude	Complete factor
1	946,278	100,000	1,000	946,278	1,500	1419,417	1,500
2	732,703	77,430	1,291	946,278	1,500	1419,417	1,937
3	550,600	58,186	1,719	946,278	1,500	1419,417	2,578
4	395,845	41,832	2,391	946,278	1,500	1419,417	3,586
5	274,993	29,060	3,441	946,278	1,500	1419,417	5,162
6	176,744	18,678	5,354	946,278	1,500	1419,417	8,031
7	87,709	9,269	10,789	946,278	1,500	1419,417	16,183

Figura 95. Curva del factor completo de amplitud cuando el impacto es en la torre 1



$$Complete_factor = ((0.6054 * (tower^2)) - (2.7425 * tower) + 4.43) \quad Ec. 50$$

Al momento de reconstruir la señal el valor DC también se corrige en función del factor completo:

$$Dc_new = sum((a) * (1/T)) * ((0.6054 * (tower^2)) - (2.7425 * tower) + 4.43) \quad Ec. 51$$

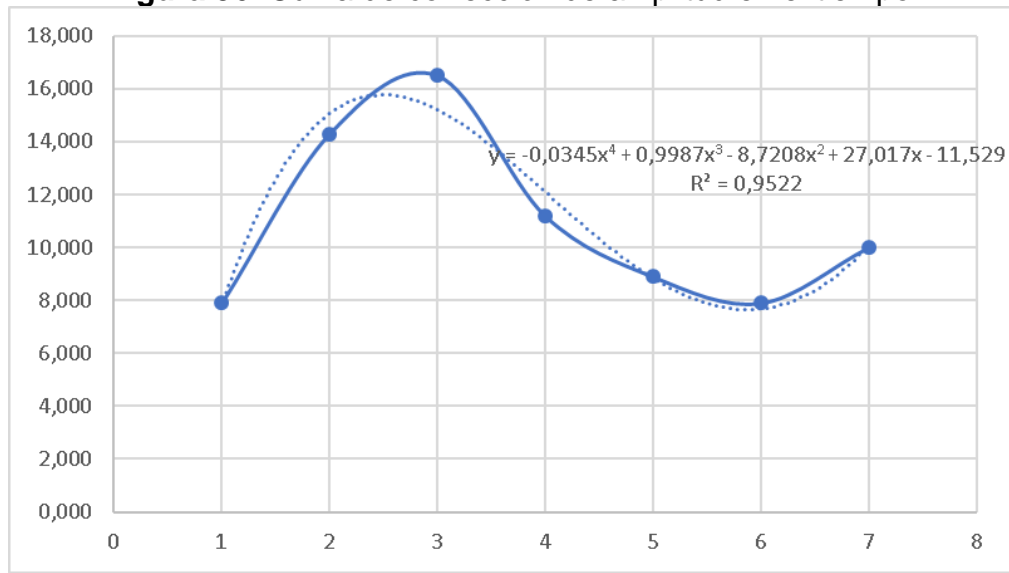
Aplicando la corrección total se tiene la siguiente correlación en la forma de onda:

Tabla 53. Correlación obtenida de las señales de cada torre con las correcciones de amplitud de armónicos y suavizado

Tower	Correlation
1	93,680
2	85,760
3	81,770
4	82,170
5	82,460
6	81,640
7	79,930

Ya teniendo una correlación en la forma de onda ahora hay que realizar una corrección de la amplitud de la señal en el tiempo:

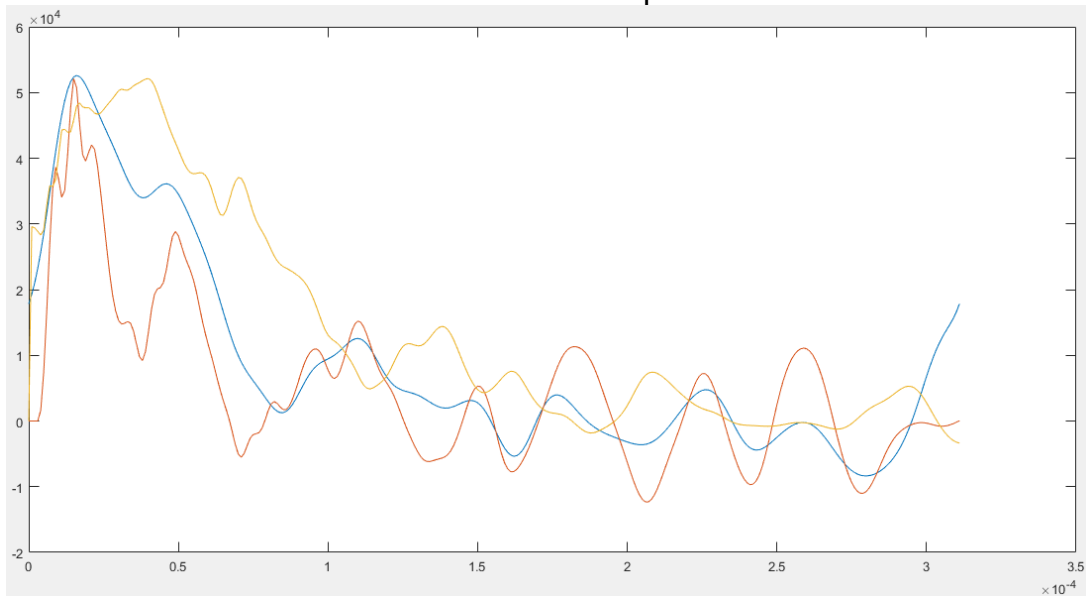
Figura 96. Curva de corrección de amplitud en el tiempo



$$Amplitude_{time\ factor} = -0,0345 * tower^4 + 0,9987 * tower^3 - 8,7208 * tower^2 + 27,017 * tower - 11,529 \quad Ec. 52$$

Dando como resultado lo siguiente para la torre 1 con impacto en ella misma:

Figura 97. Aplicación de corrección de amplitud de armónicos y amplitud de la señal en el tiempo



Curva amarilla - corriente de retorno de rayo, curva naranja – curva con corrección simple usada en 3.1, curva azul - reconstruida con las correcciones de amplitud de armónicos, amplitud en el tiempo y suavizado

3.7. Uso del factor de corrección de amplitud de armónicos y de amplitud en el tiempo

El modelo hallado en 3.6 se va a aplicar para un impacto en cada torre, para cada caso se analizará la corriente que pasa por todas las torres, con lo cual se validará el modelo.

3.7.1. Impacto en la torre 1

El factor de corrección de amplitud de los armónicos y de tiempo se muestran a continuación:

Figura 98. Factor de corrección de amplitud de armónicos

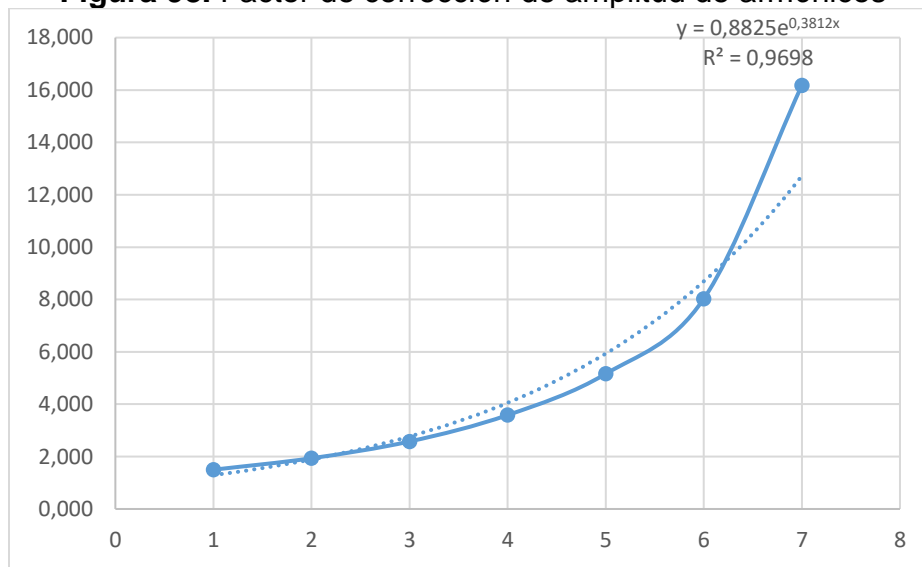
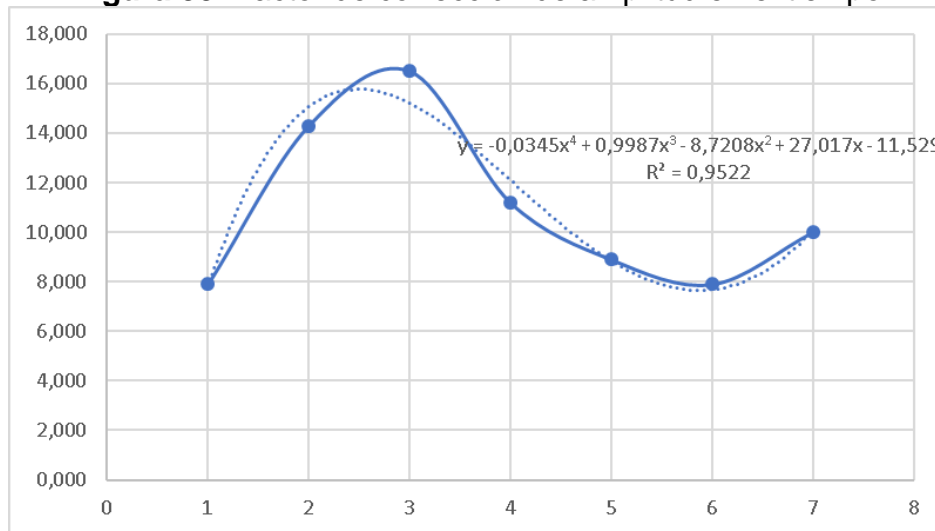


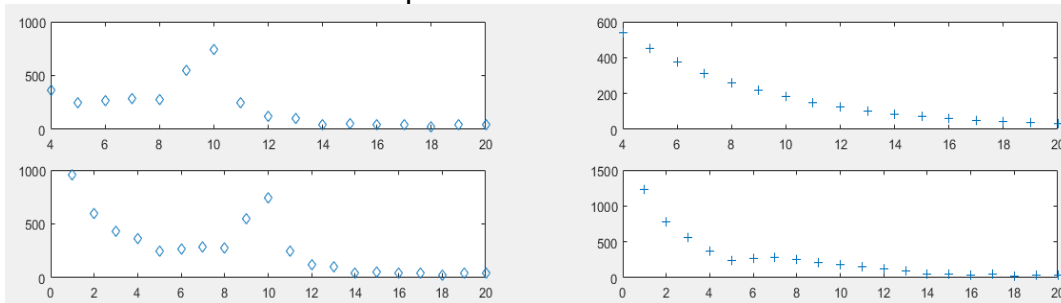
Figura 99. Factor de corrección de amplitud en el tiempo



3.7.1.1. Corriente por la torre 1

Analizando el espectro de a señal que baja por la torre 1 se analiza a continuación:

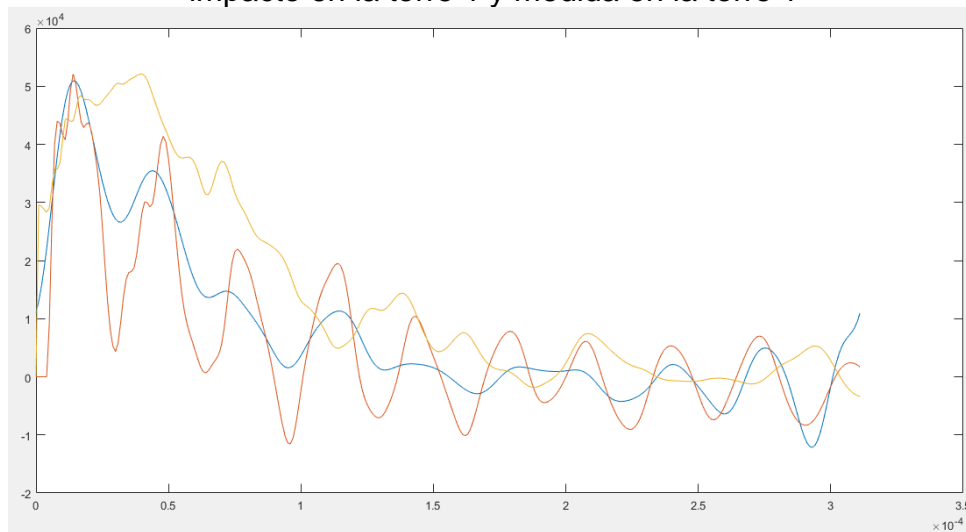
Figura 100. Amplitud del espectro de la señal que baja por la torre 1 cuando el impacto es en la torre 1



Izquierda superior - amplitud de los armónicos a partir del 4, Izquierda inferior- amplitud de la señal original que baja por la torre 1, Derecha superior - curva exponencial para suavizado, Derecha inferior: señal nueva con suavizado y amplitud de armónicos

Grafica obtenida después de la corrección, comparada con la primera aproximación:

Figura 101. Graficas de corrección y señal de corriente de retorno de rayo original, impacto en la torre 1 y medida en la torre 1



Curva amarilla - corriente de retorno de rayo, curva naranja – curva con corrección simple usada en 3.1, curva azul - reconstruida con las correcciones de amplitud de armónicos, amplitud en el tiempo y suavizado

Correlación obtenida después de la corrección total a usar:

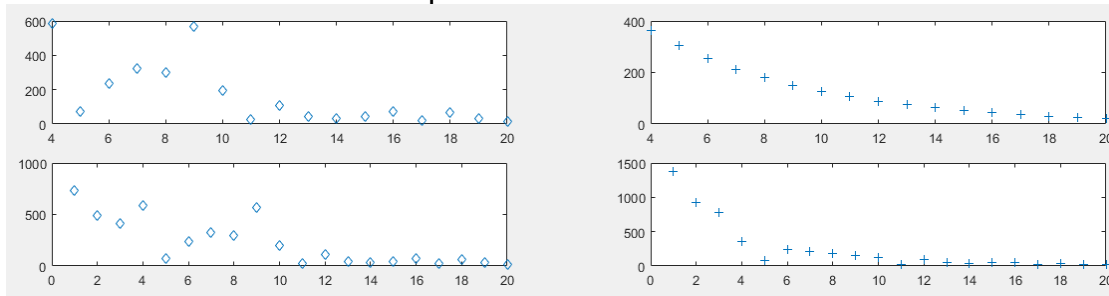
Tabla 54. Correlación con la corrección total “amplitud de armónicos y en el tiempo” comparada con la correlación obtenida con corrección de amplitud simple

Signal	Correlation
Simple correction of amplitude	0.6420
Total Correction	0.9368

3.7.1.2. Corriente por la torre 2

Analizando el espectro de a señal que baja por la torre 2 se analiza a continuación:

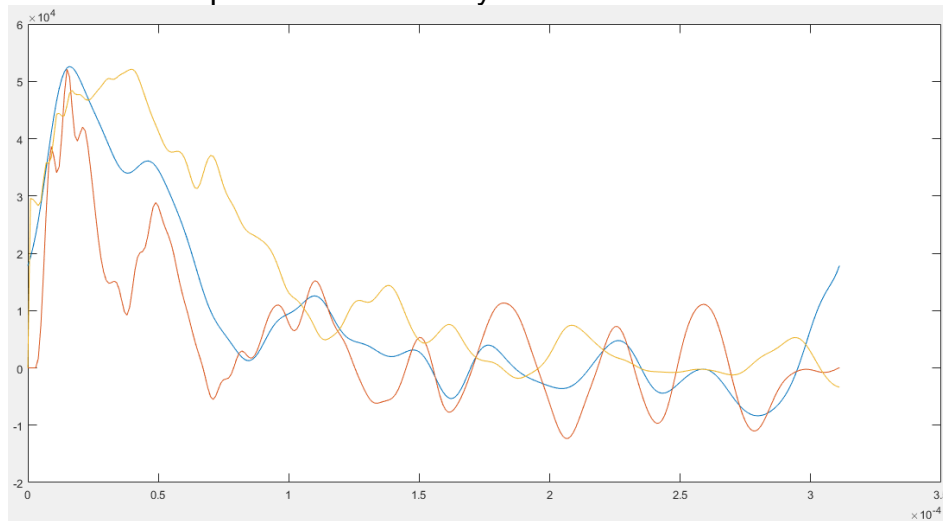
Figura 102. Amplitud del espectro de la señal que baja por la torre 2 cuando el impacto es en la torre 1



Izquierda superior - amplitud de los armónicos a partir del 4, Izquierda inferior- amplitud de la señal original que baja por la torre 2, Derecha superior - curva exponencial para suavizado, Derecha inferior: señal nueva con suavizado y amplitud de armónicos

Grafica obtenida después de la corrección, comparada con la primera aproximación:

Figura 103. Graficas de corrección y señal de corriente de retorno de rayo original, impacto en la torre 1 y medida en la torre 2



Curva amarilla - corriente de retorno de rayo, curva naranja – curva con corrección simple usada en 3.1, curva azul - reconstruida con las correcciones de amplitud de armónicos, amplitud en el tiempo y suavizado

Correlación obtenida después de la corrección total a usar:

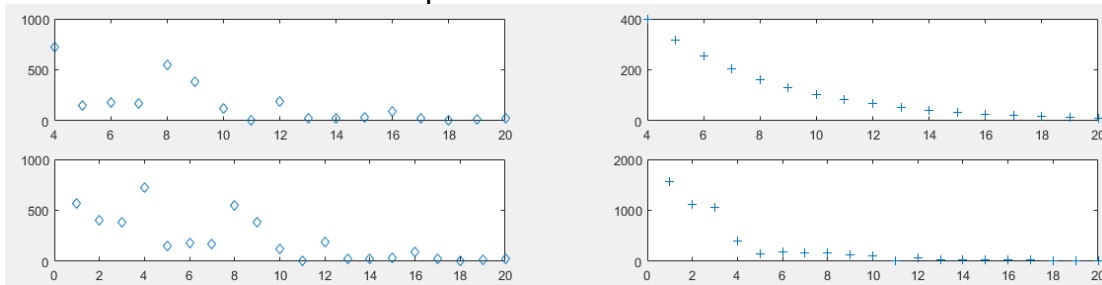
Tabla 55. Correlación con la corrección total “amplitud de armónicos y en el tiempo” comparada con la correlación obtenida con corrección de amplitud simple

Signal	Correlation
Simple correction of amplitude	0.6320
Total Correction	0.8576

3.7.1.3. Corriente por la torre 3

Analizando el espectro de a señal que baja por la torre 3 se analiza a continuación:

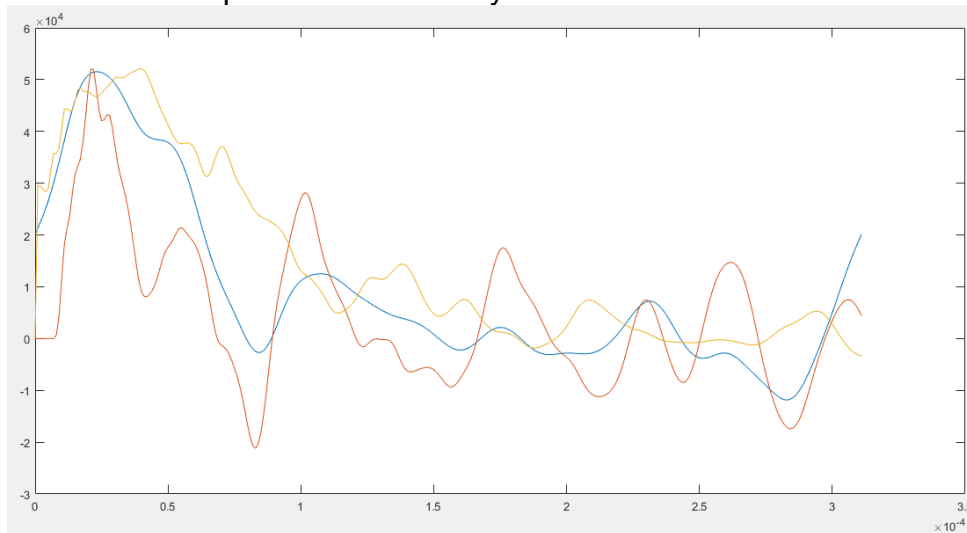
Figura 104. Amplitud del espectro de la señal que baja por la torre 3 cuando el impacto es en la torre 1



Izquierda superior - amplitud de los armónicos a partir del 4, Izquierda inferior- amplitud de la señal original que baja por la torre 3, Derecha superior - curva exponencial para suavizado, Derecha inferior: señal nueva con suavizado y amplitud de armónicos

Grafica obtenida después de la corrección, comparada con la primera aproximación:

Figura 105. Graficas de corrección y señal de corriente de retorno de rayo original, impacto en la torre 1 y medida en la torre 3



Curva amarilla - corriente de retorno de rayo, curva naranja – curva con corrección simple usada en 3.1, curva azul - reconstruida con las correcciones de amplitud de armónicos, amplitud en el tiempo y suavizado

Correlación obtenida después de la corrección total a usar:

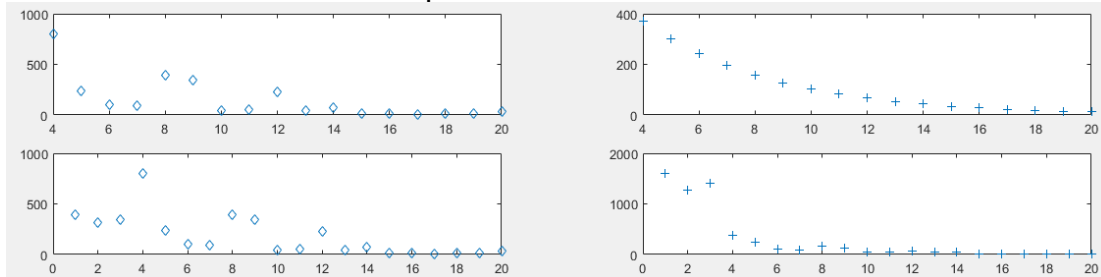
Tabla 56. Correlación con la corrección total “amplitud de armónicos y en el tiempo” comparada con la correlación obtenida con corrección de amplitud simple

Signal	Correlation
Simple correction of amplitude	0.4890
Total Correction	0.8177

3.7.1.4. Corriente por la torre 4

Analizando el espectro de a señal que baja por la torre 4 se analiza a continuación:

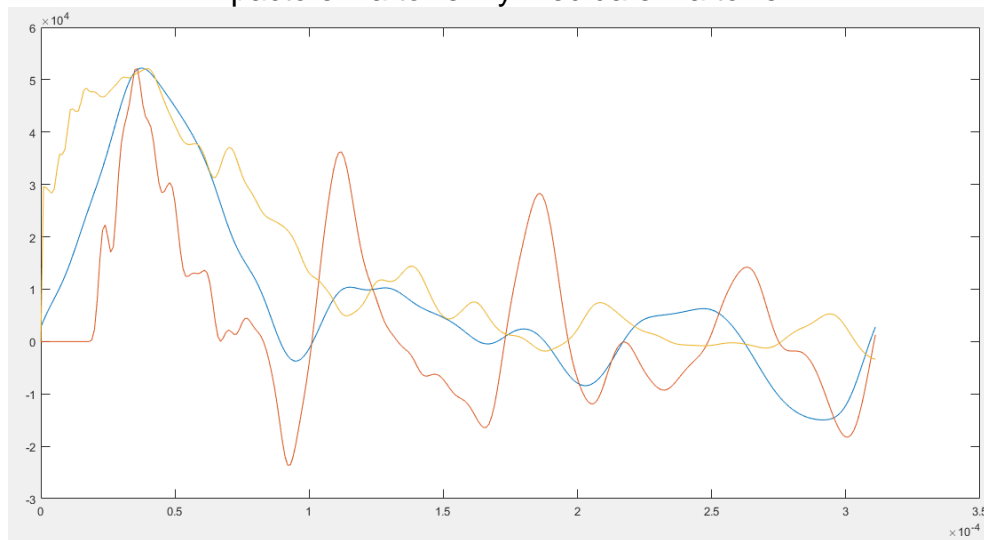
Figura 106. Amplitud del espectro de la señal que baja por la torre 4 cuando el impacto es en la torre 1



Izquierda superior - amplitud de los armónicos a partir del 4, Izquierda inferior- amplitud de la señal original que baja por la torre 4, Derecha superior - curva exponencial para suavizado, Derecha inferior: señal nueva con suavizado y amplitud de armónicos

Grafica obtenida después de la corrección, comparada con la primera aproximación:

Figura 107. Graficas de corrección y señal de corriente de retorno de rayo original, impacto en la torre 1 y medida en la torre 4



Curva amarilla - corriente de retorno de rayo, curva naranja – curva con corrección simple usada en 3.1, curva azul - reconstruida con las correcciones de amplitud de armónicos, amplitud en el tiempo y suavizado

Correlación obtenida después de la corrección total a usar:

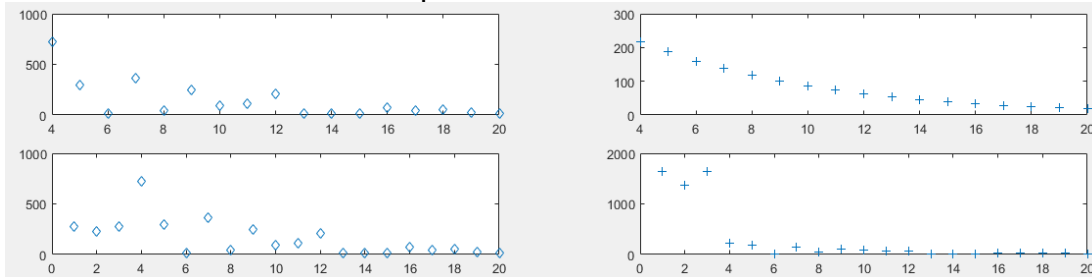
Tabla 57. Correlación con la corrección total “amplitud de armónicos y en el tiempo” comparada con la correlación obtenida con corrección de amplitud simple

Signal	Correlation
Simple correction of amplitude	0.3610
Total Correction	0.8514

3.7.1.5. Corriente por la torre 5

Analizando el espectro de a señal que baja por la torre 5 se analiza a continuación:

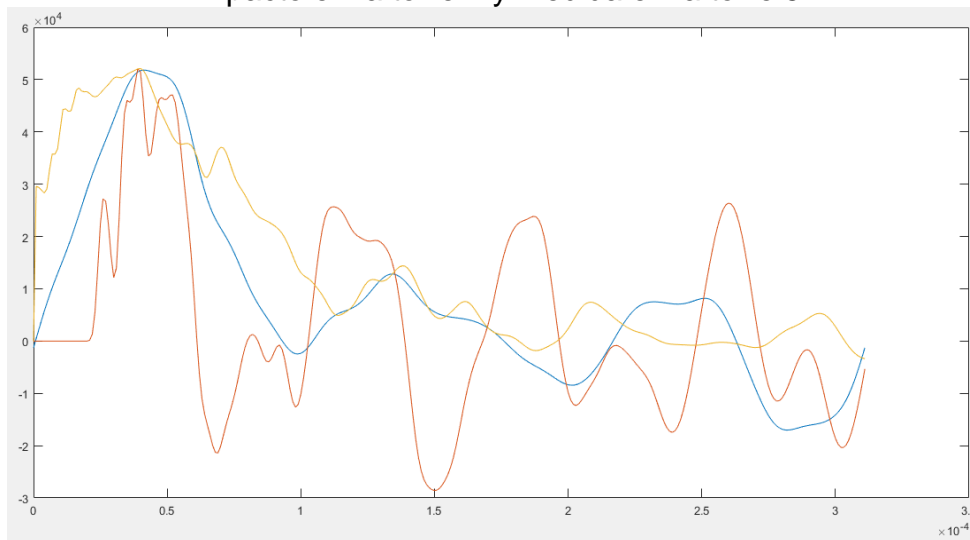
Figura 108. Amplitud del espectro de la señal que baja por la torre 5 cuando el impacto es en la torre 1



Izquierda superior - amplitud de los armónicos a partir del 4, Izquierda inferior- amplitud de la señal original que baja por la torre 5, Derecha superior - curva exponencial para suavizado, Derecha inferior: señal nueva con suavizado y amplitud de armónicos

Grafica obtenida después de la corrección, comparada con la primera aproximación:

Figura 109. Graficas de corrección y señal de corriente de retorno de rayo original, impacto en la torre 1 y medida en la torre 5



Curva amarilla - corriente de retorno de rayo, curva naranja – curva con corrección simple usada en 3.1, curva azul - reconstruida con las correcciones de amplitud de armónicos, amplitud en el tiempo y suavizado

Correlación obtenida después de la corrección total a usar:

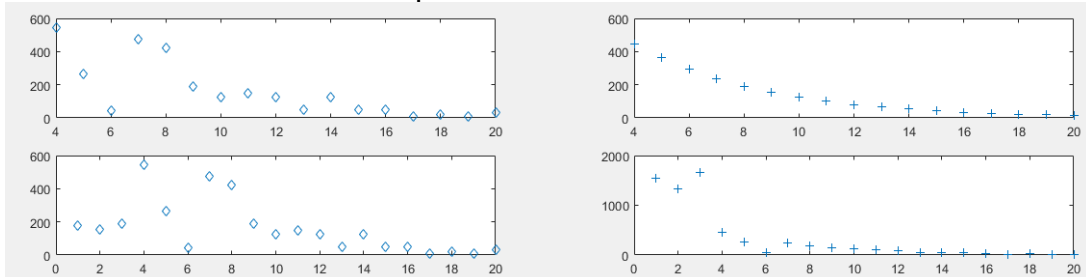
Tabla 58. Correlación con la corrección total “amplitud de armónicos y en el tiempo” comparada con la correlación obtenida con corrección de amplitud simple

Signal	Correlation
Simple correction of amplitude	0.2590
Total Correction	0.8419

3.7.1.6. Corriente por la torre 6

Analizando el espectro de a señal que baja por la torre 6 se analiza a continuación:

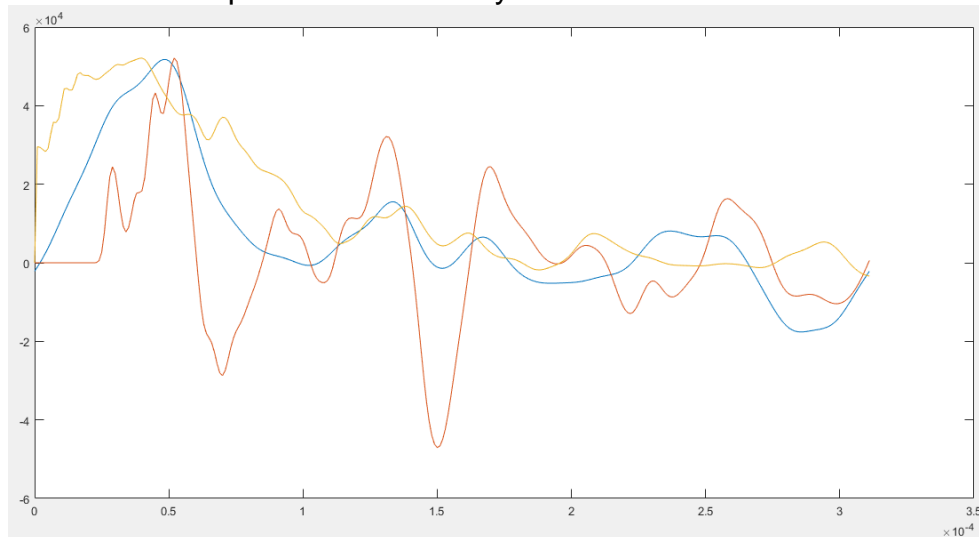
Figura 110. Amplitud del espectro de la señal que baja por la torre 6 cuando el impacto es en la torre 1



Izquierda superior - amplitud de los armónicos a partir del 4, Izquierda inferior- amplitud de la señal original que baja por la torre 6, Derecha superior - curva exponencial para suavizado, Derecha inferior: señal nueva con suavizado y amplitud de armónicos

Grafica obtenida después de la corrección, comparada con la primera aproximación:

Figura 111. Graficas de corrección y señal de corriente de retorno de rayo original, impacto en la torre 1 y medida en la torre 6



Curva amarilla - corriente de retorno de rayo, curva naranja – curva con corrección simple usada en 3.1, curva azul - reconstruida con las correcciones de amplitud de armónicos, amplitud en el tiempo y suavizado

Correlación obtenida después de la corrección total a usar:

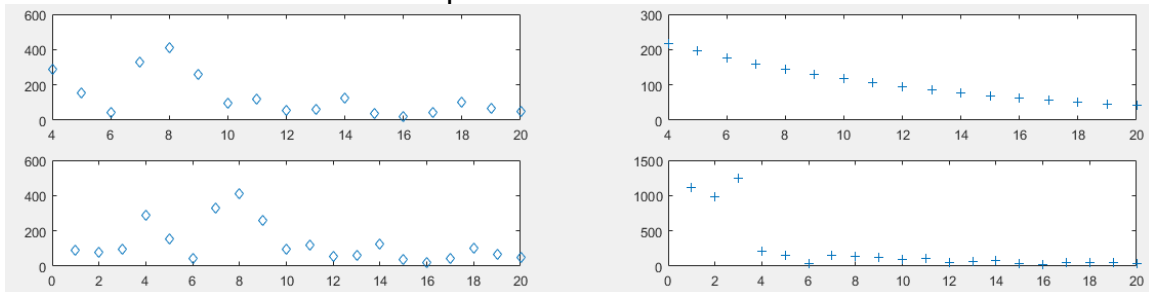
Tabla 59. Correlación con la corrección total “amplitud de armónicos y en el tiempo” comparada con la correlación obtenida con corrección de amplitud simple

Signal	Correlation
Simple correction of amplitude	0.1470
Total Correction	0.8105

3.7.1.7. Corriente por la torre 7

Analizando el espectro de a señal que baja por la torre 7 se analiza a continuación:

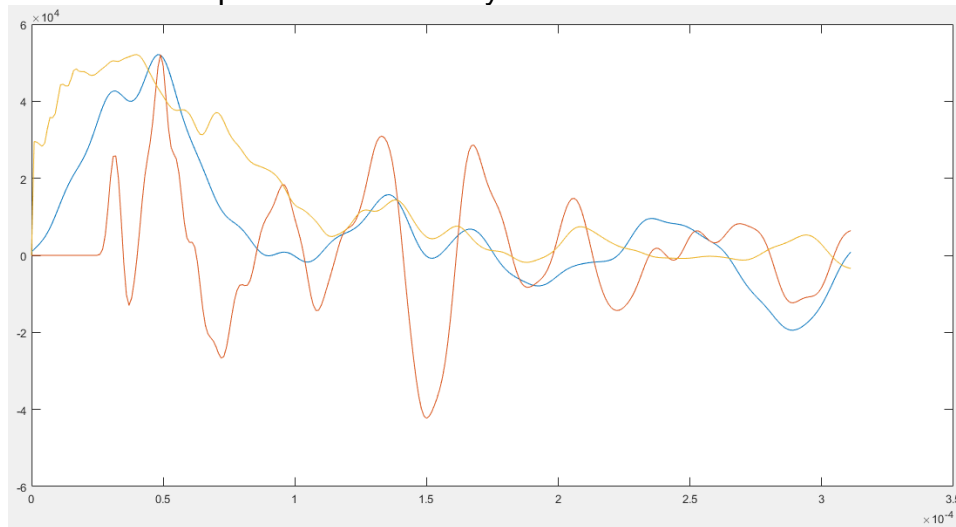
Figura 112. Amplitud del espectro de la señal que baja por la torre 7 cuando el impacto es en la torre 1



Izquierda superior - amplitud de los armónicos a partir del 4, Izquierda inferior- amplitud de la señal original que baja por la torre 7, Derecha superior - curva exponencial para suavizado, Derecha inferior: señal nueva con suavizado y amplitud de armónicos

Grafica obtenida después de la corrección, comparada con la primera aproximación:

Figura 113. Graficas de corrección y señal de corriente de retorno de rayo original, impacto en la torre 1 y medida en la torre 7



Curva amarilla - corriente de retorno de rayo, curva naranja – curva con corrección simple usada en 3.1, curva azul - reconstruida con las correcciones de amplitud de armónicos, amplitud en el tiempo y suavizado

Correlación obtenida después de la corrección total a usar:

Tabla 60. Correlación con la corrección total “amplitud de armónicos y en el tiempo” comparada con la correlación obtenida con corrección de amplitud simple

Signal	Correlation
Simple correction of amplitude	0.1060
Total Correction	0.8124

3.7.2. Impacto en la torre 2

El factor de corrección de amplitud de los armónicos y de tiempo se muestran a continuación:

Figura 114. Factor de corrección de amplitud de armónicos

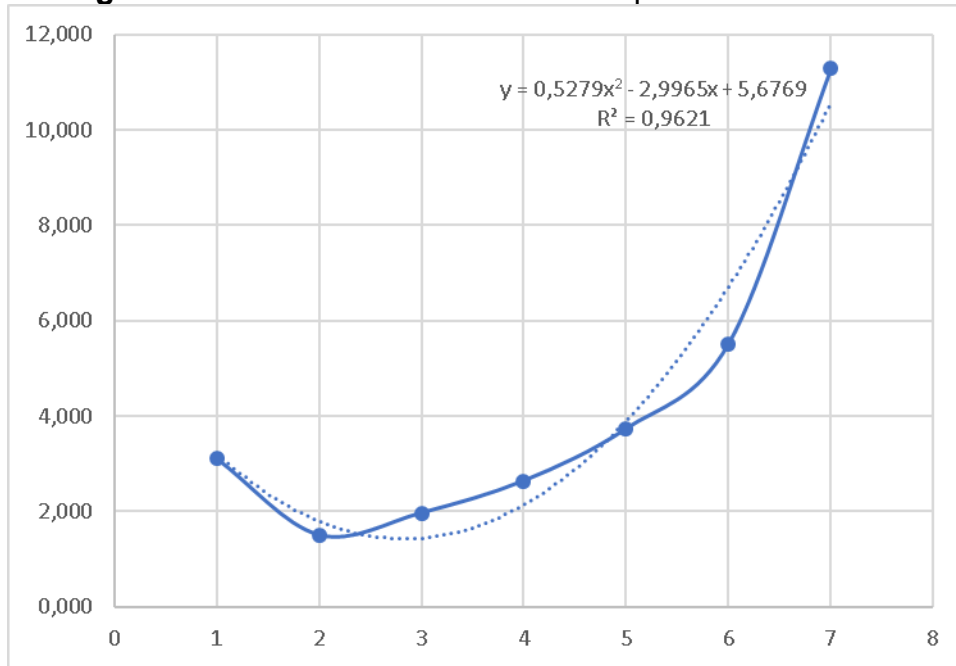
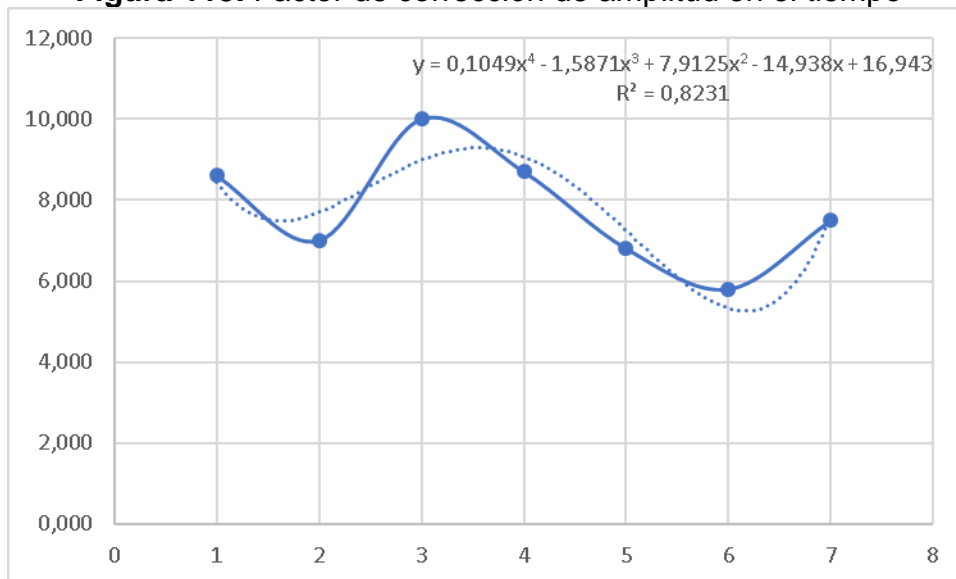


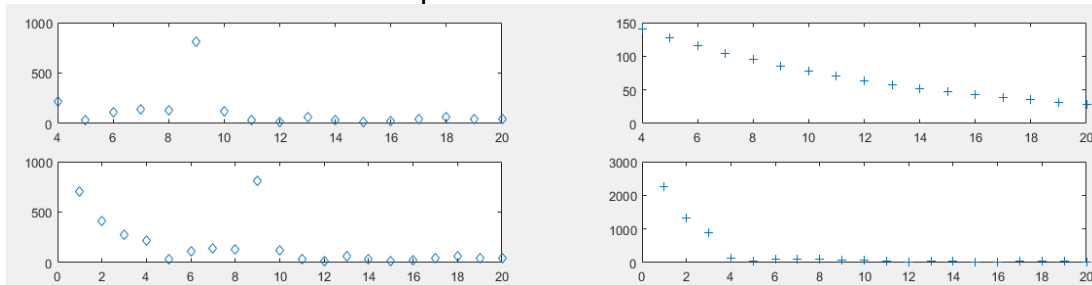
Figura 115. Factor de corrección de amplitud en el tiempo



3.7.2.1. Corriente por la torre 1

Analizando el espectro de a señal que baja por la torre 1 se analiza a continuación:

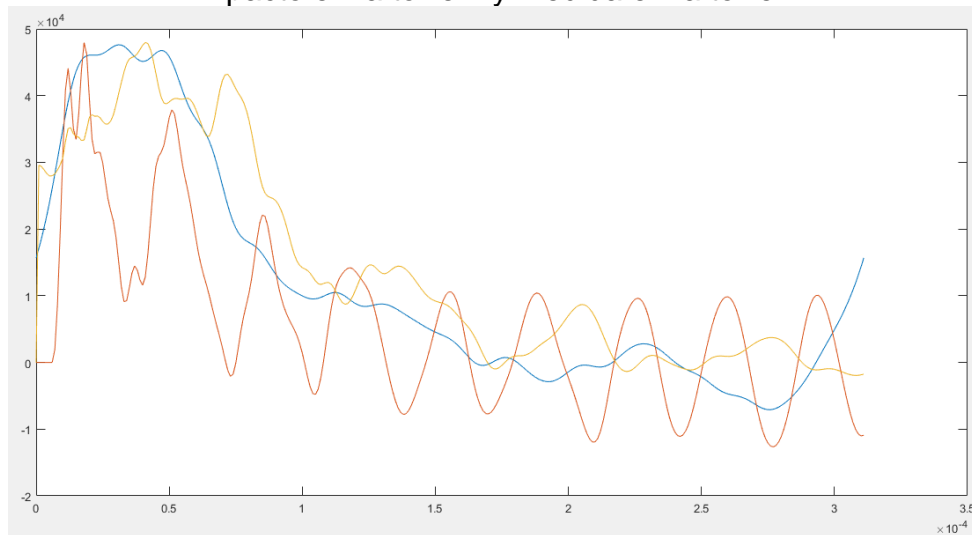
Figura 116. Amplitud del espectro de la señal que baja por la torre 1 cuando el impacto es en la torre 2



Izquierda superior - amplitud de los armónicos a partir del 4, Izquierda inferior- amplitud de la señal original que baja por la torre 1, Derecha superior - curva exponencial para suavizado, Derecha inferior: señal nueva con suavizado y amplitud de armónicos

Grafica obtenida después de la corrección, comparada con la primera aproximación:

Figura 117. Graficas de corrección y señal de corriente de retorno de rayo original, impacto en la torre 2 y medida en la torre 1



Curva amarilla - corriente de retorno de rayo, curva naranja – curva con corrección simple usada en 3.1, curva azul - reconstruida con las correcciones de amplitud de armónicos, amplitud en el tiempo y suavizado

Correlación obtenida después de la corrección total a usar:

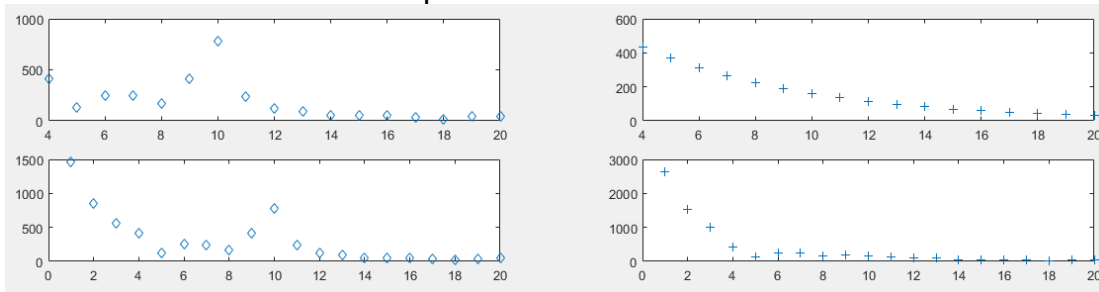
Tabla 61. Correlación con la corrección total “amplitud de armónicos y en el tiempo” comparada con la correlación obtenida con corrección de amplitud simple

Signal	Correlation
Simple correction of amplitude	0.6000
Total Correction	0.9140

3.7.2.2. Corriente por la torre 2

Analizando el espectro de a señal que baja por la torre 2 se analiza a continuación:

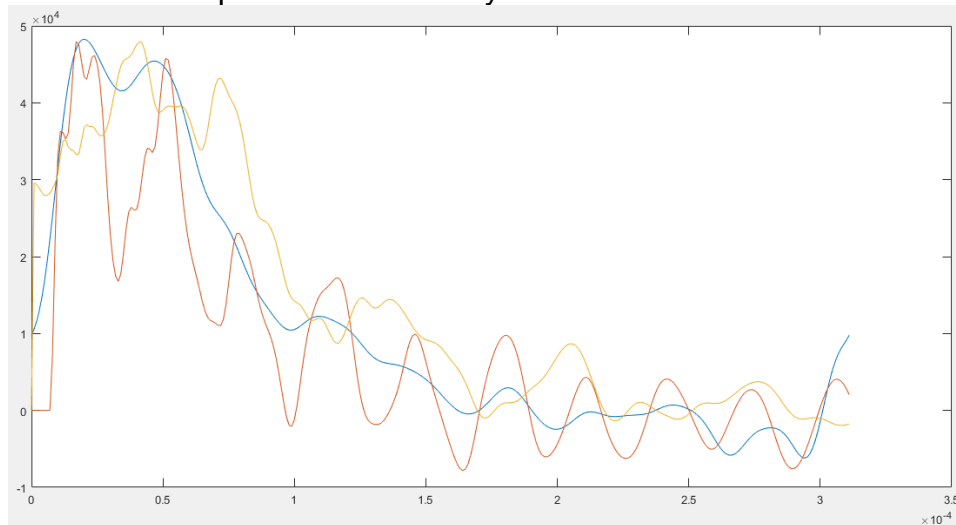
Figura 118. Amplitud del espectro de la señal que baja por la torre 2 cuando el impacto es en la torre 2



Izquierda superior - amplitud de los armónicos a partir del 4, Izquierda inferior- amplitud de la señal original que baja por la torre 2, Derecha superior - curva exponencial para suavizado, Derecha inferior: señal nueva con suavizado y amplitud de armónicos

Grafica obtenida después de la corrección, comparada con la primera aproximación:

Figura 119. Graficas de corrección y señal de corriente de retorno de rayo original, impacto en la torre 2 y medida en la torre 2



Curva amarilla - corriente de retorno de rayo, curva naranja – curva con corrección simple usada en 3.1, curva azul - reconstruida con las correcciones de amplitud de armónicos, amplitud en el tiempo y suavizado

Correlación obtenida después de la corrección total a usar:

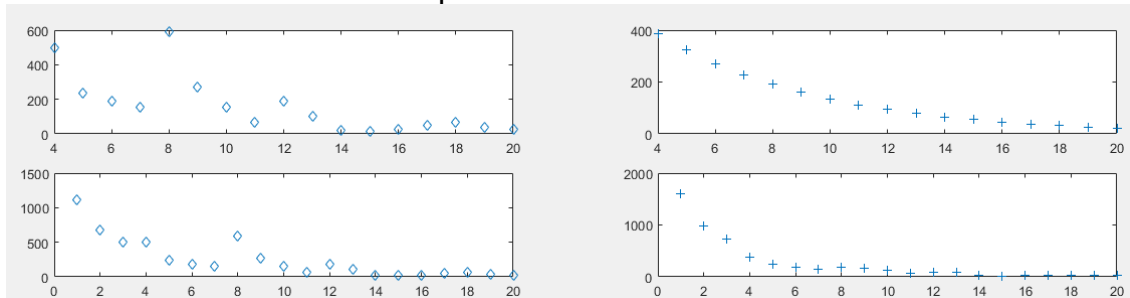
Tabla 62. Correlación con la corrección total “amplitud de armónicos y en el tiempo” comparada con la correlación obtenida con corrección de amplitud simple

Signal	Correlation
Simple correction of amplitude	0.7380
Total Correction	0.9232

3.7.2.3. Corriente por la torre 3

Analizando el espectro de a señal que baja por la torre 3 se analiza a continuación:

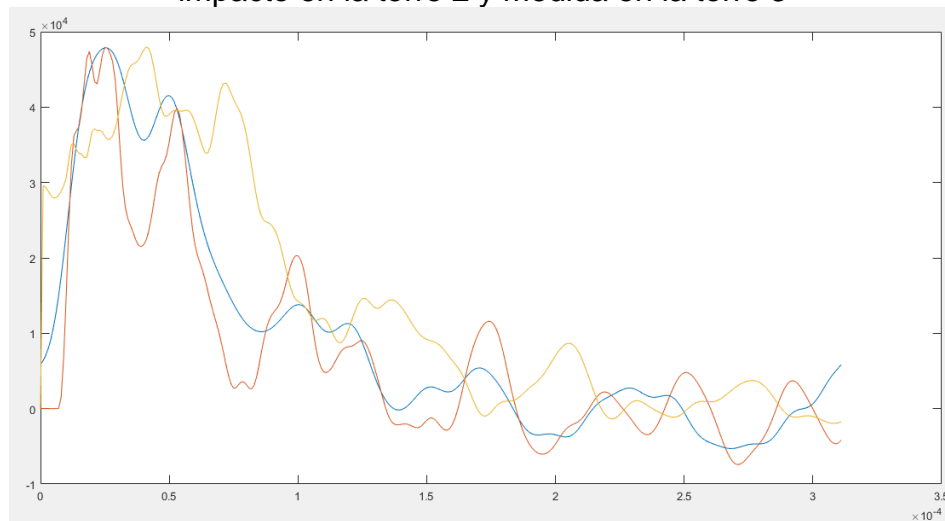
Figura 120. Amplitud del espectro de la señal que baja por la torre 3 cuando el impacto es en la torre 2



Izquierda superior - amplitud de los armónicos a partir del 4, Izquierda inferior- amplitud de la señal original que baja por la torre 3, Derecha superior - curva exponencial para suavizado, Derecha inferior: señal nueva con suavizado y amplitud de armónicos

Grafica obtenida después de la corrección, comparada con la primera aproximación:

Figura 121. Graficas de corrección y señal de corriente de retorno de rayo original, impacto en la torre 2 y medida en la torre 3



Curva amarilla - corriente de retorno de rayo, curva naranja – curva con corrección simple usada en 3.1, curva azul - reconstruida con las correcciones de amplitud de armónicos, amplitud en el tiempo y suavizado

Correlación obtenida después de la corrección total a usar:

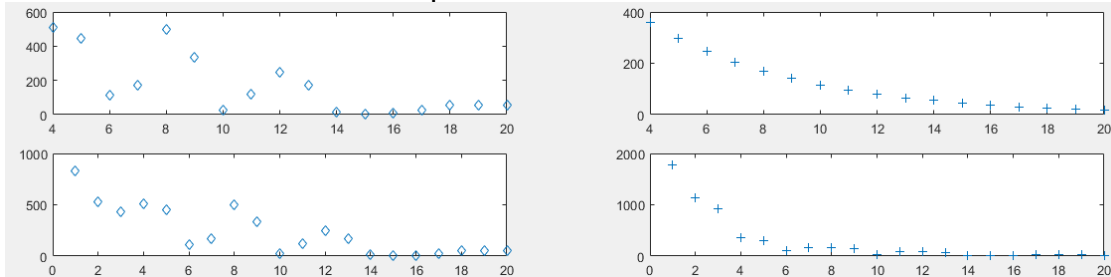
Tabla 63. Correlación con la corrección total “amplitud de armónicos y en el tiempo” comparada con la correlación obtenida con corrección de amplitud simple

Signal	Correlation
Simple correction of amplitude	0.6550
Total Correction	0.8579

3.7.2.4. Corriente por la torre 4

Analizando el espectro de a señal que baja por la torre 4 se analiza a continuación:

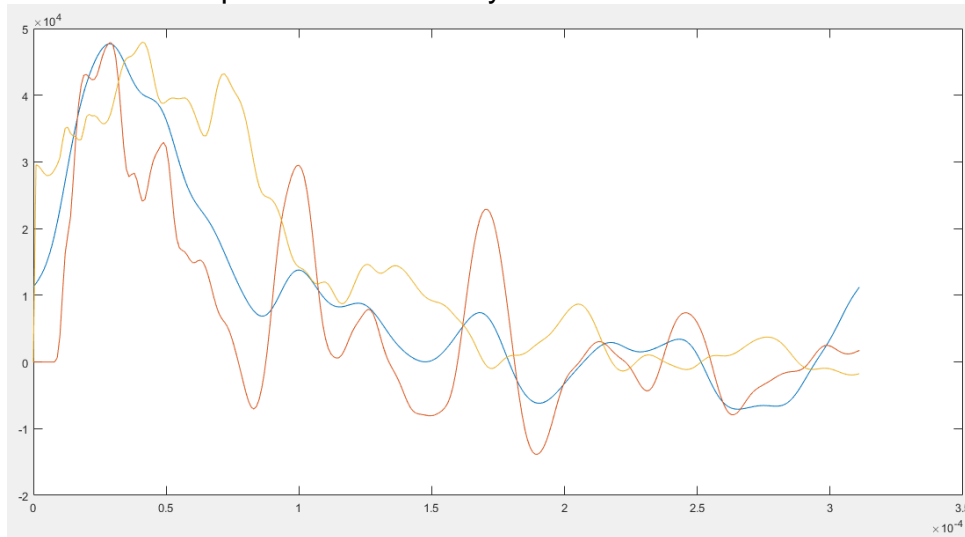
Figura 122. Amplitud del espectro de la señal que baja por la torre 4 cuando el impacto es en la torre 2



Izquierda superior - amplitud de los armónicos a partir del 4, Izquierda inferior- amplitud de la señal original que baja por la torre 4, Derecha superior - curva exponencial para suavizado, Derecha inferior: señal nueva con suavizado y amplitud de armónicos

Grafica obtenida después de la corrección, comparada con la primera aproximación:

Figura 123. Graficas de corrección y señal de corriente de retorno de rayo original, impacto en la torre 2 y medida en la torre 4



Curva amarilla - corriente de retorno de rayo, curva naranja – curva con corrección simple usada en 3.1, curva azul - reconstruida con las correcciones de amplitud de armónicos, amplitud en el tiempo y suavizado

Correlación obtenida después de la corrección total a usar:

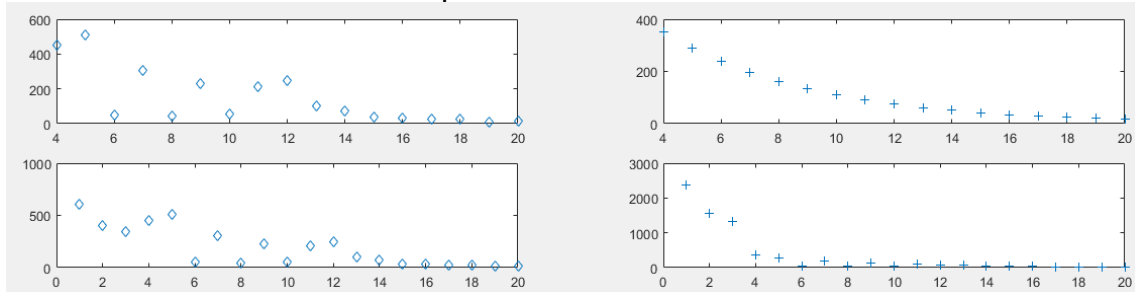
Tabla 64. Correlación con la corrección total “amplitud de armónicos y en el tiempo” comparada con la correlación obtenida con corrección de amplitud simple

Signal	Correlation
Simple correction of amplitude	0.5340
Total Correction	0.8485

3.7.2.5. Corriente por la torre 5

Analizando el espectro de a señal que baja por la torre 5 se analiza a continuación:

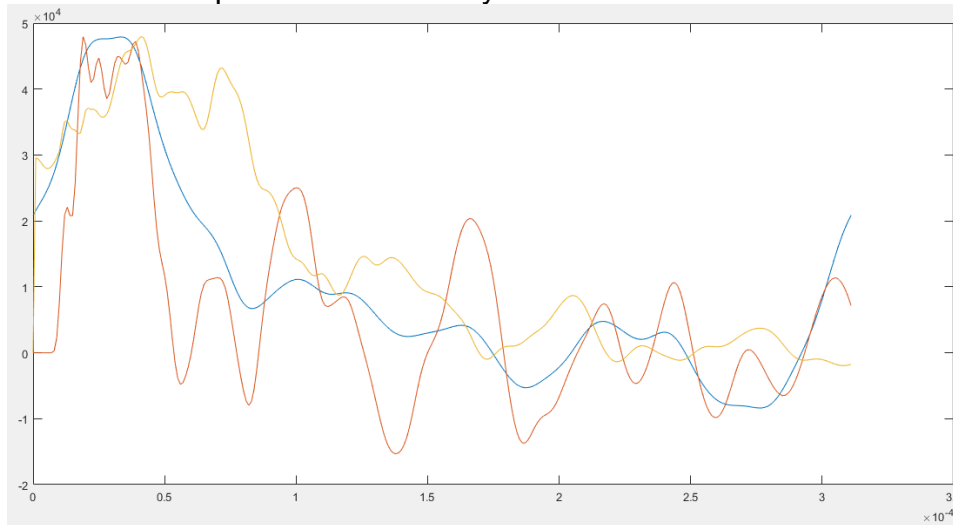
Figura 124. Amplitud del espectro de la señal que baja por la torre 5 cuando el impacto es en la torre 2



Izquierda superior - amplitud de los armónicos a partir del 4, Izquierda inferior- amplitud de la señal original que baja por la torre 5, Derecha superior - curva exponencial para suavizado, Derecha inferior: señal nueva con suavizado y amplitud de armónicos

Grafica obtenida después de la corrección, comparada con la primera aproximación:

Figura 125. Graficas de corrección y señal de corriente de retorno de rayo original, impacto en la torre 2 y medida en la torre 5



Curva amarilla - corriente de retorno de rayo, curva naranja – curva con corrección simple usada en 3.1, curva azul - reconstruida con las correcciones de amplitud de armónicos, amplitud en el tiempo y suavizado

Correlación obtenida después de la corrección total a usar:

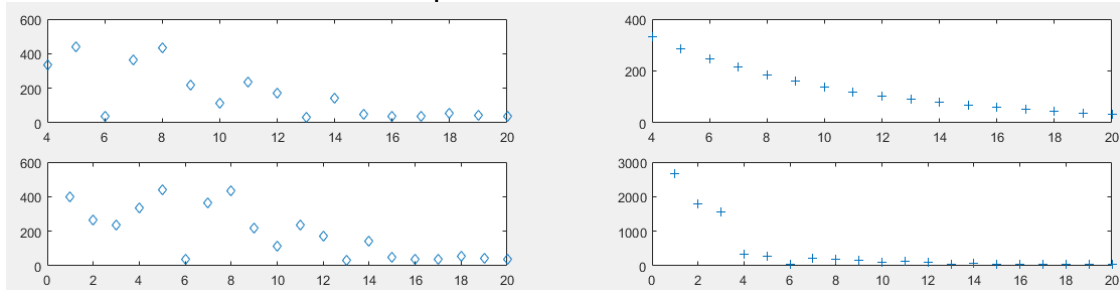
Tabla 65. Correlación con la corrección total “amplitud de armónicos y en el tiempo” comparada con la correlación obtenida con corrección de amplitud simple

Signal	Correlation
Simple correction of amplitude	0.4640
Total Correction	0.8159

3.7.2.6. Corriente por la torre 6

Analizando el espectro de a señal que baja por la torre 6 se analiza a continuación:

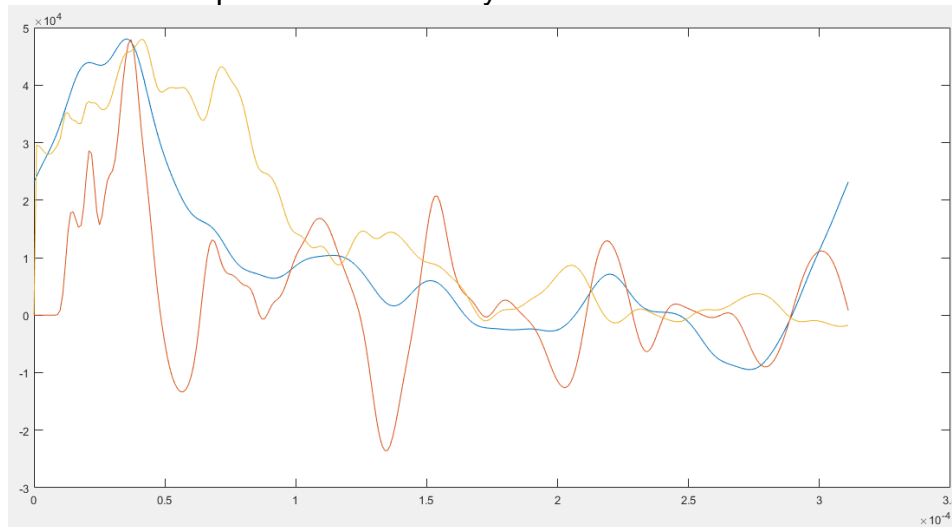
Figura 126. Amplitud del espectro de la señal que baja por la torre 6 cuando el impacto es en la torre 2



Izquierda superior - amplitud de los armónicos a partir del 4, Izquierda inferior- amplitud de la señal original que baja por la torre 6, Derecha superior - curva exponencial para suavizado, Derecha inferior: señal nueva con suavizado y amplitud de armónicos

Grafica obtenida después de la corrección, comparada con la primera aproximación:

Figura 127. Graficas de corrección y señal de corriente de retorno de rayo original, impacto en la torre 2 y medida en la torre 6



Curva amarilla - corriente de retorno de rayo, curva naranja – curva con corrección simple usada en 3.1, curva azul - reconstruida con las correcciones de amplitud de armónicos, amplitud en el tiempo y suavizado

Correlación obtenida después de la corrección total a usar:

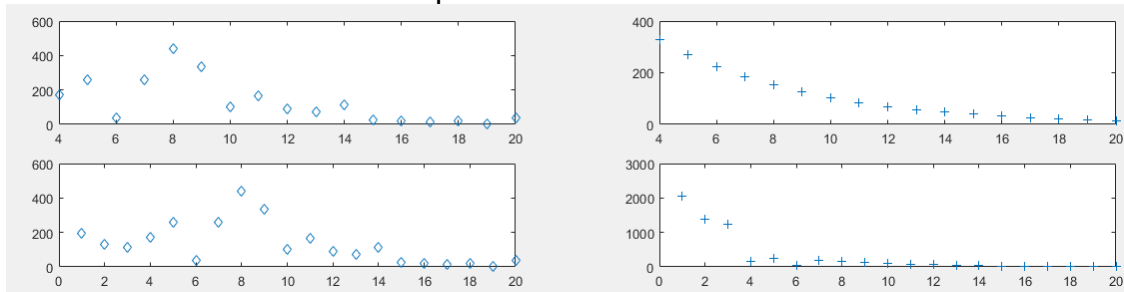
Tabla 66. Correlación con la corrección total “amplitud de armónicos y en el tiempo” comparada con la correlación obtenida con corrección de amplitud simple

Signal	Correlation
Simple correction of amplitude	0.3170
Total Correction	0.7843

3.7.2.7. Corriente por la torre 7

Analizando el espectro de a señal que baja por la torre 7 se analiza a continuación:

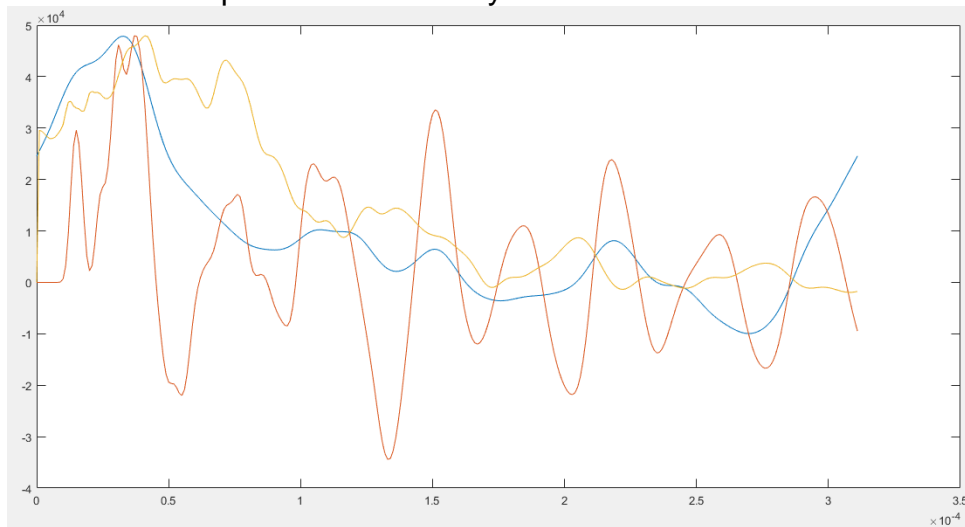
Figura 128. Amplitud del espectro de la señal que baja por la torre 7 cuando el impacto es en la torre 2



Izquierda superior - amplitud de los armónicos a partir del 4, Izquierda inferior- amplitud de la señal original que baja por la torre 7, Derecha superior - curva exponencial para suavizado, Derecha inferior: señal nueva con suavizado y amplitud de armónicos

Grafica obtenida después de la corrección, comparada con la primera aproximación:

Figura 129. Graficas de corrección y señal de corriente de retorno de rayo original, impacto en la torre 2 y medida en la torre 7



Curva amarilla - corriente de retorno de rayo, curva naranja – curva con corrección simple usada en 3.1, curva azul - reconstruida con las correcciones de amplitud de armónicos, amplitud en el tiempo y suavizado

Correlación obtenida después de la corrección total a usar:

Tabla 67. Correlación con la corrección total “amplitud de armónicos y en el tiempo” comparada con la correlación obtenida con corrección de amplitud simple

Signal	Correlation
Simple correction of amplitude	0.1990
Total Correction	0.7488

3.7.3. Impacto en la torre 3

El factor de corrección de amplitud de los armónicos y de tiempo se muestran a continuación:

Figura 130. Factor de corrección de amplitud de armónicos

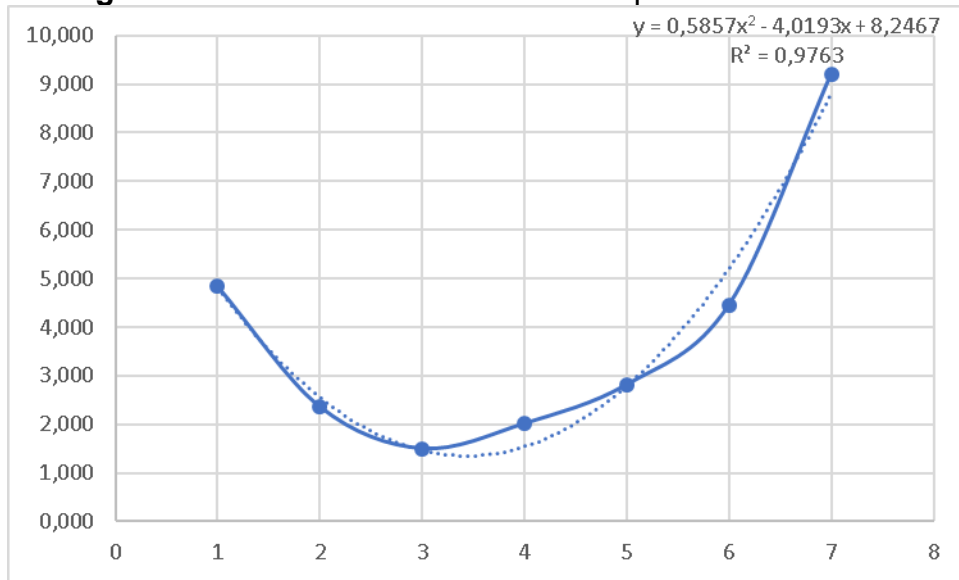
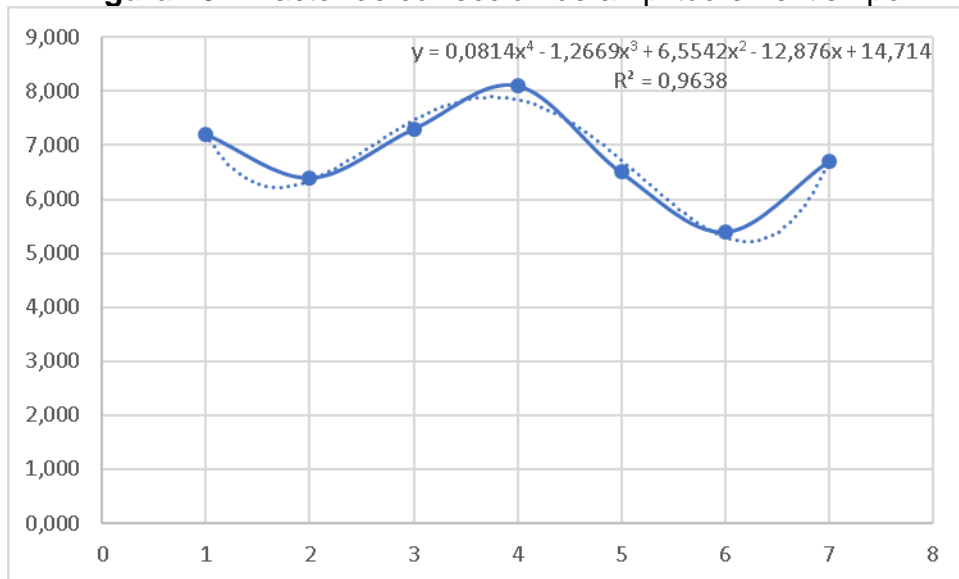


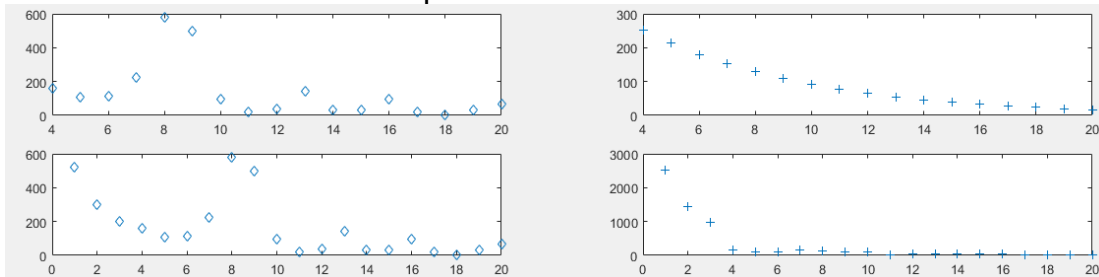
Figura 131. Factor de corrección de amplitud en el tiempo



3.7.3.1. Corriente por la torre 1

Analizando el espectro de a señal que baja por la torre 1 se analiza a continuación:

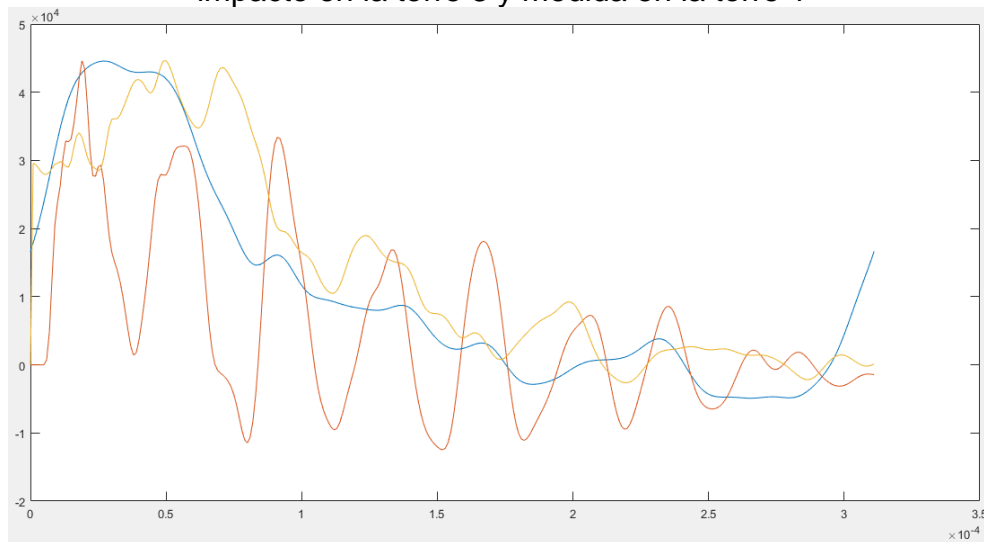
Figura 132. Amplitud del espectro de la señal que baja por la torre 1 cuando el impacto es en la torre 3



Izquierda superior - amplitud de los armónicos a partir del 4, Izquierda inferior- amplitud de la señal original que baja por la torre 1, Derecha superior - curva exponencial para suavizado, Derecha inferior: señal nueva con suavizado y amplitud de armónicos

Grafica obtenida después de la corrección, comparada con la primera aproximación:

Figura 133. Graficas de corrección y señal de corriente de retorno de rayo original, impacto en la torre 3 y medida en la torre 1



Curva amarilla - corriente de retorno de rayo, curva naranja – curva con corrección simple usada en 3.1, curva azul - reconstruida con las correcciones de amplitud de armónicos, amplitud en el tiempo y suavizado

Correlación obtenida después de la corrección total a usar:

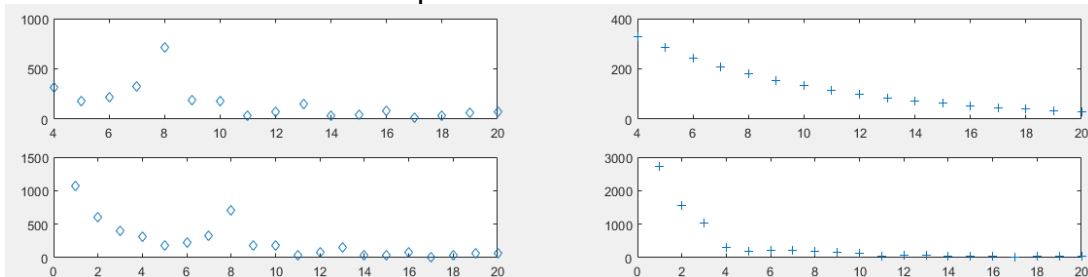
Tabla 68. Correlación con la corrección total “amplitud de armónicos y en el tiempo” comparada con la correlación obtenida con corrección de amplitud simple

Signal	Correlation
Simple correction of amplitude	0.4560
Total Correction	0.8864

3.7.3.2. Corriente por la torre 2

Analizando el espectro de a señal que baja por la torre 2 se analiza a continuación:

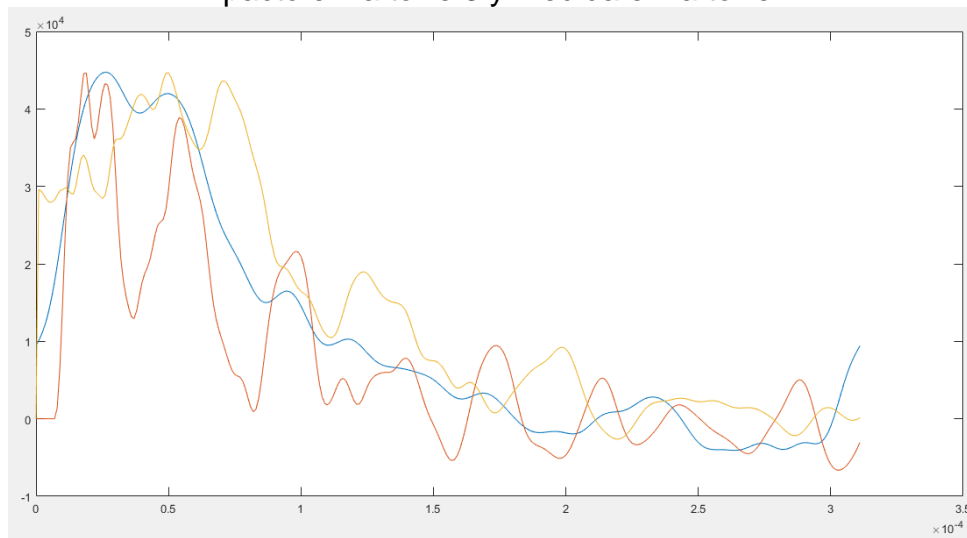
Figura 134. Amplitud del espectro de la señal que baja por la torre 2 cuando el impacto es en la torre 3



Izquierda superior - amplitud de los armónicos a partir del 4, Izquierda inferior- amplitud de la señal original que baja por la torre 2, Derecha superior - curva exponencial para suavizado, Derecha inferior: señal nueva con suavizado y amplitud de armónicos

Grafica obtenida después de la corrección, comparada con la primera aproximación:

Figura 135. Graficas de corrección y señal de corriente de retorno de rayo original, impacto en la torre 3 y medida en la torre 2



Curva amarilla - corriente de retorno de rayo, curva naranja – curva con corrección simple usada en 3.1, curva azul - reconstruida con las correcciones de amplitud de armónicos, amplitud en el tiempo y suavizado

Correlación obtenida después de la corrección total a usar:

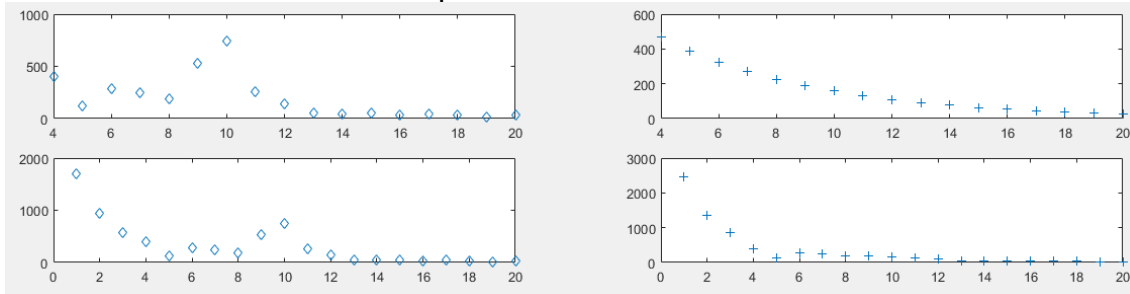
Tabla 69. Correlación con la corrección total “amplitud de armónicos y en el tiempo” comparada con la correlación obtenida con corrección de amplitud simple

Signal	Correlation
Simple correction of amplitude	0.6700
Total Correction	0.9035

3.7.3.3. Corriente por la torre 3

Analizando el espectro de a señal que baja por la torre 3 se analiza a continuación:

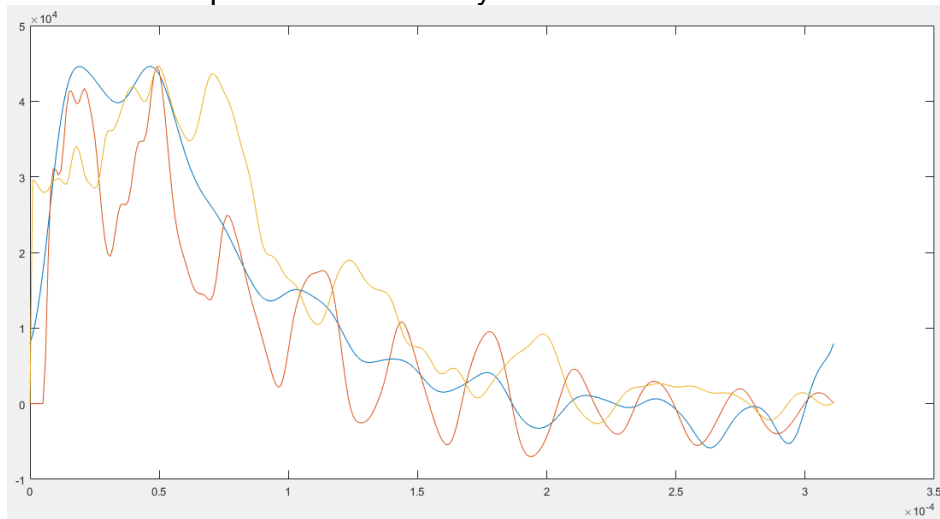
Figura 136. Amplitud del espectro de la señal que baja por la torre 3 cuando el impacto es en la torre 3



Izquierda superior - amplitud de los armónicos a partir del 4, Izquierda inferior- amplitud de la señal original que baja por la torre 3, Derecha superior - curva exponencial para suavizado, Derecha inferior: señal nueva con suavizado y amplitud de armónicos

Grafica obtenida después de la corrección, comparada con la primera aproximación:

Figura 137. Graficas de corrección y señal de corriente de retorno de rayo original, impacto en la torre 3 y medida en la torre 3



Curva amarilla - corriente de retorno de rayo, curva naranja – curva con corrección simple usada en 3.1, curva azul - reconstruida con las correcciones de amplitud de armónicos, amplitud en el tiempo y suavizado

Correlación obtenida después de la corrección total a usar:

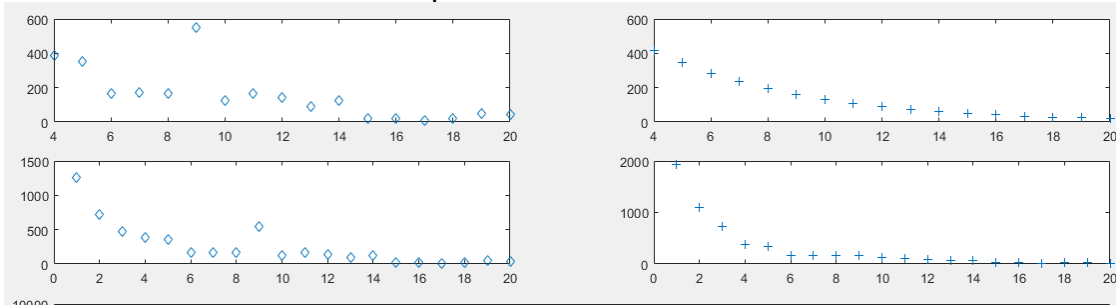
Tabla 70. Correlación con la corrección total “amplitud de armónicos y en el tiempo” comparada con la correlación obtenida con corrección de amplitud simple

Signal	Correlation
Simple correction of amplitude	0.7460
Total Correction	0.9044

3.7.3.4. Corriente por la torre 4

Analizando el espectro de a señal que baja por la torre 4 se analiza a continuación:

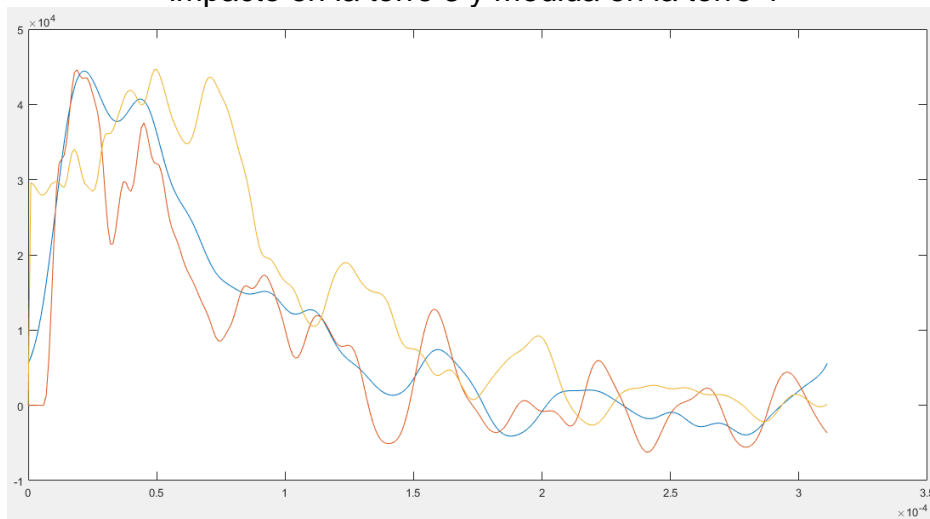
Figura 138. Amplitud del espectro de la señal que baja por la torre 4 cuando el impacto es en la torre 3



Izquierda superior - amplitud de los armónicos a partir del 4, Izquierda inferior- amplitud de la señal original que baja por la torre 4, Derecha superior - curva exponencial para suavizado, Derecha inferior: señal nueva con suavizado y amplitud de armónicos

Grafica obtenida después de la corrección, comparada con la primera aproximación:

Figura 139. Graficas de corrección y señal de corriente de retorno de rayo original, impacto en la torre 3 y medida en la torre 4



Curva amarilla - corriente de retorno de rayo, curva naranja – curva con corrección simple usada en 3.1, curva azul - reconstruida con las correcciones de amplitud de armónicos, amplitud en el tiempo y suavizado

Correlación obtenida después de la corrección total a usar:

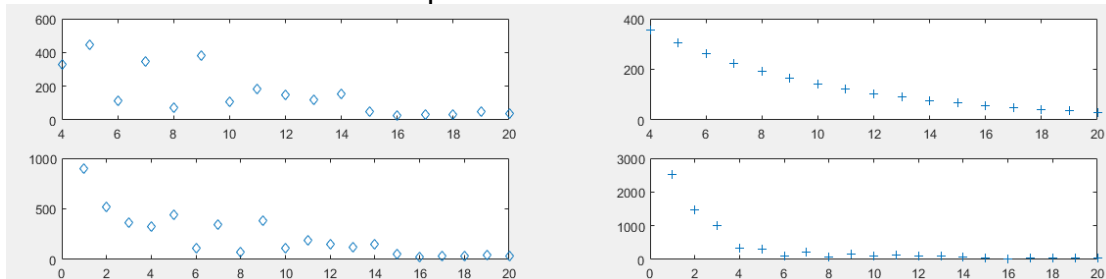
Tabla 71. Correlación con la corrección total “amplitud de armónicos y en el tiempo” comparada con la correlación obtenida con corrección de amplitud simple

Signal	Correlation
Simple correction of amplitude	0.6760
Total Correction	0.8631

3.7.3.5. Corriente por la torre 5

Analizando el espectro de a señal que baja por la torre 5 se analiza a continuación:

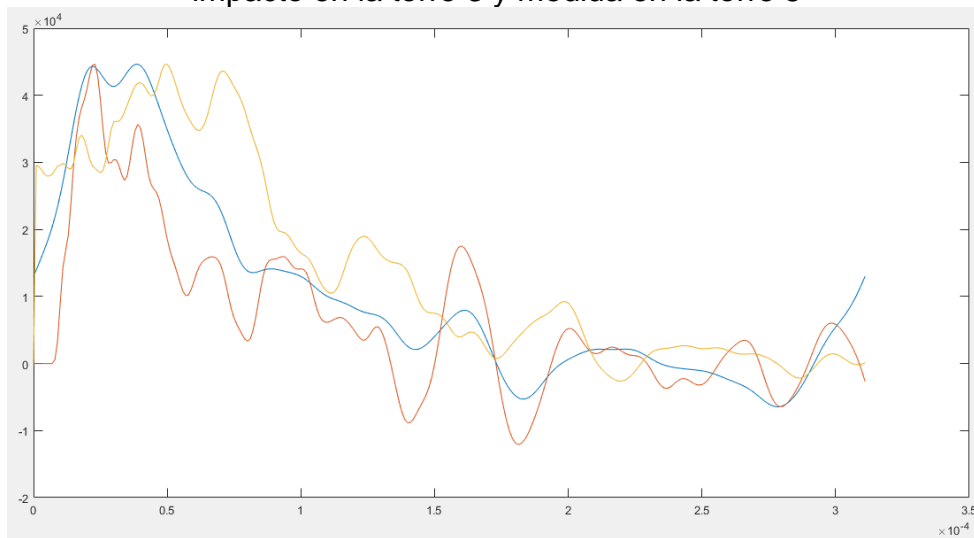
Figura 140. Amplitud del espectro de la señal que baja por la torre 5 cuando el impacto es en la torre 3



Izquierda superior - amplitud de los armónicos a partir del 4, Izquierda inferior- amplitud de la señal original que baja por la torre 5, Derecha superior - curva exponencial para suavizado, Derecha inferior: señal nueva con suavizado y amplitud de armónicos

Grafica obtenida después de la corrección, comparada con la primera aproximación:

Figura 141. Graficas de corrección y señal de corriente de retorno de rayo original, impacto en la torre 3 y medida en la torre 5



Curva amarilla - corriente de retorno de rayo, curva naranja – curva con corrección simple usada en 3.1, curva azul - reconstruida con las correcciones de amplitud de armónicos, amplitud en el tiempo y suavizado

Correlación obtenida después de la corrección total a usar:

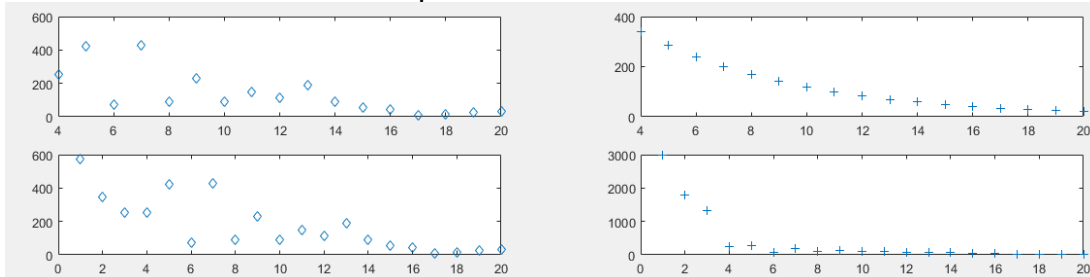
Tabla 72. Correlación con la corrección total “amplitud de armónicos y en el tiempo” comparada con la correlación obtenida con corrección de amplitud simple

Signal	Correlation
Simple correction of amplitude	0.5650
Total Correction	0.8658

3.7.3.6. Corriente por la torre 6

Analizando el espectro de a señal que baja por la torre 6 se analiza a continuación:

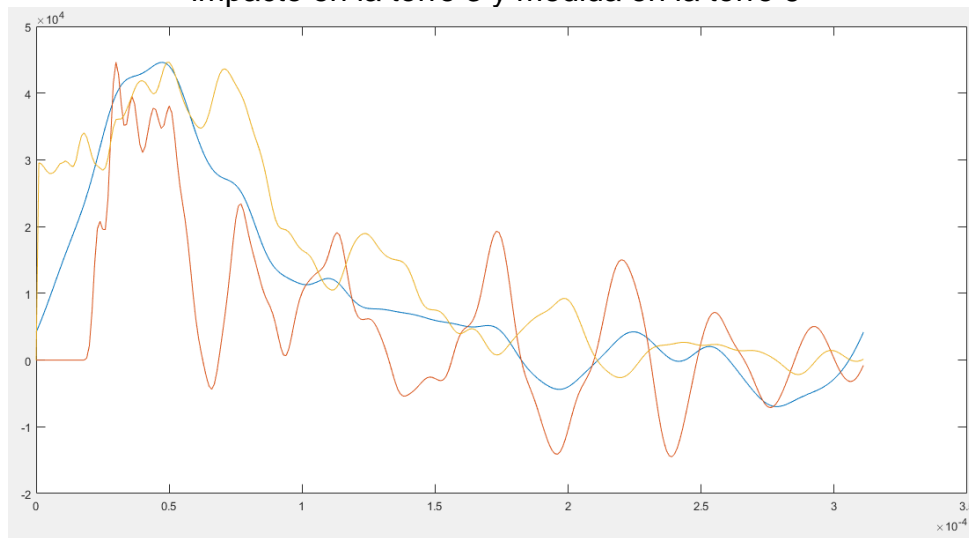
Figura 142. Amplitud del espectro de la señal que baja por la torre 6 cuando el impacto es en la torre 3



Izquierda superior - amplitud de los armónicos a partir del 4, Izquierda inferior- amplitud de la señal original que baja por la torre 6, Derecha superior - curva exponencial para suavizado, Derecha inferior: señal nueva con suavizado y amplitud de armónicos

Grafica obtenida después de la corrección, comparada con la primera aproximación:

Figura 143. Graficas de corrección y señal de corriente de retorno de rayo original, impacto en la torre 3 y medida en la torre 6



Curva amarilla - corriente de retorno de rayo, curva naranja – curva con corrección simple usada en 3.1, curva azul - reconstruida con las correcciones de amplitud de armónicos, amplitud en el tiempo y suavizado

Correlación obtenida después de la corrección total a usar:

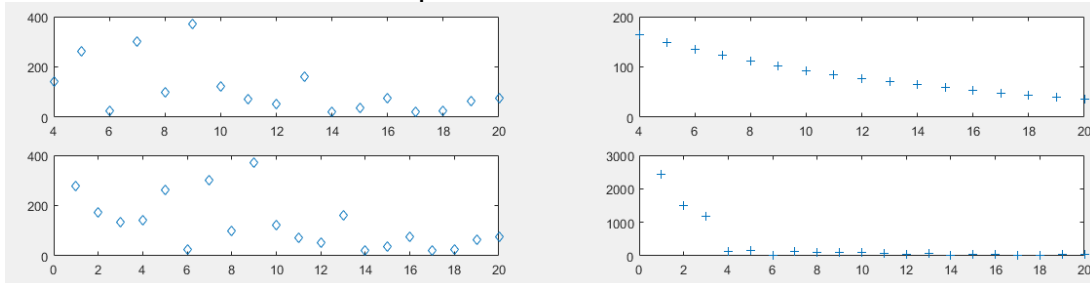
Tabla 73. Correlación con la corrección total “amplitud de armónicos y en el tiempo” comparada con la correlación obtenida con corrección de amplitud simple

Signal	Correlation
Simple correction of amplitude	0.5060
Total Correction	0.8643

3.7.3.7. Corriente por la torre 7

Analizando el espectro de a señal que baja por la torre 7 se analiza a continuación:

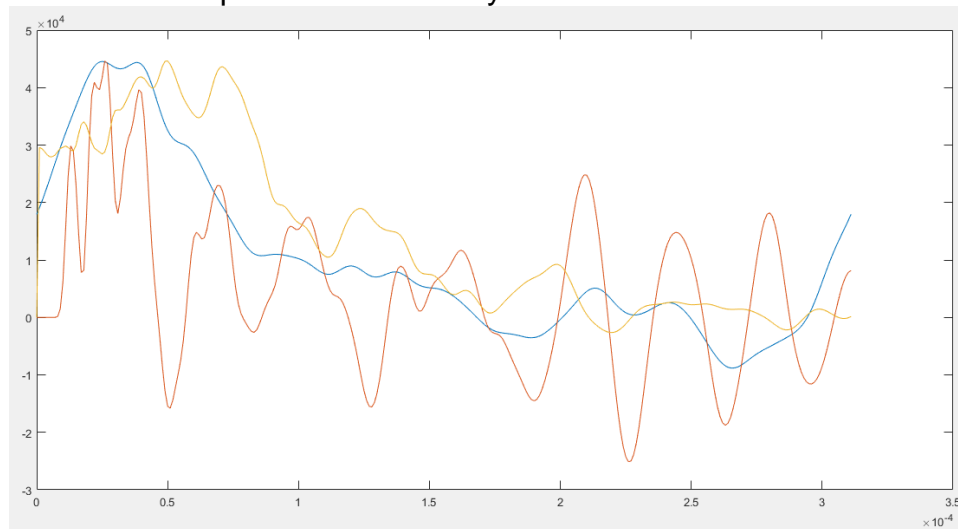
Figura 144. Amplitud del espectro de la señal que baja por la torre 7 cuando el impacto es en la torre 3



Izquierda superior - amplitud de los amónicos a partir del 4, Izquierda inferior- amplitud de la señal original que baja por la torre 7, Derecha superior - curva exponencial para suavizado, Derecha inferior: señal nueva con suavizado y amplitud de armónicos

Grafica obtenida después de la corrección, comparada con la primera aproximación:

Figura 145. Graficas de corrección y señal de corriente de retorno de rayo original, impacto en la torre 3 y medida en la torre 7



Curva amarilla - corriente de retorno de rayo, curva naranja – curva con corrección simple usada en 3.1, curva azul - reconstruida con las correcciones de amplitud de armónicos, amplitud en el tiempo y suavizado

Correlación obtenida después de la corrección total a usar:

Tabla 74. Correlación con la corrección total “amplitud de armónicos y en el tiempo” comparada con la correlación obtenida con corrección de amplitud simple

Signal	Correlation
Simple correction of amplitude	0.3860
Total Correction	0.8445

3.7.4. Impacto en la torre 4

El factor de corrección de amplitud de los armónicos y de tiempo se muestran a continuación:

Figura 146. Factor de corrección de amplitud de armónicos

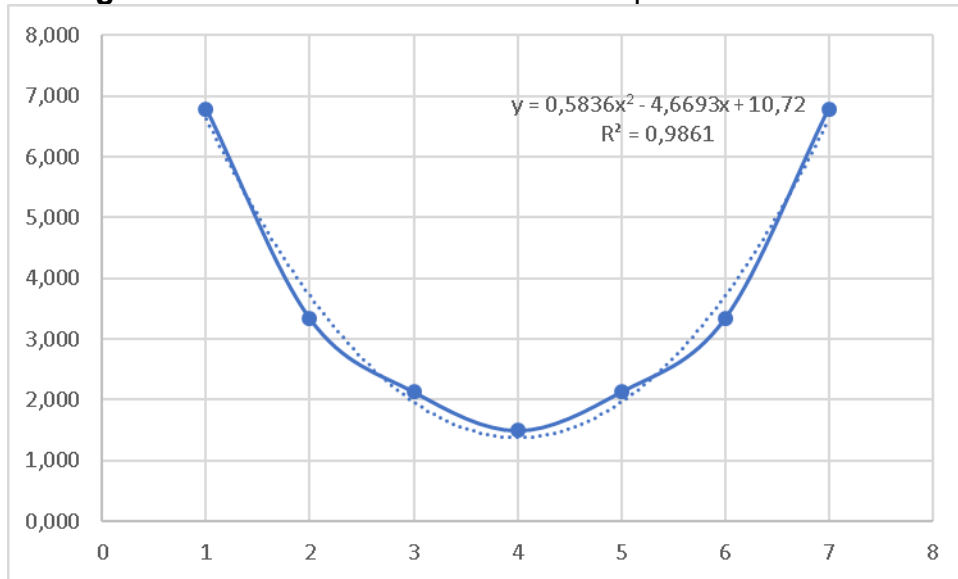
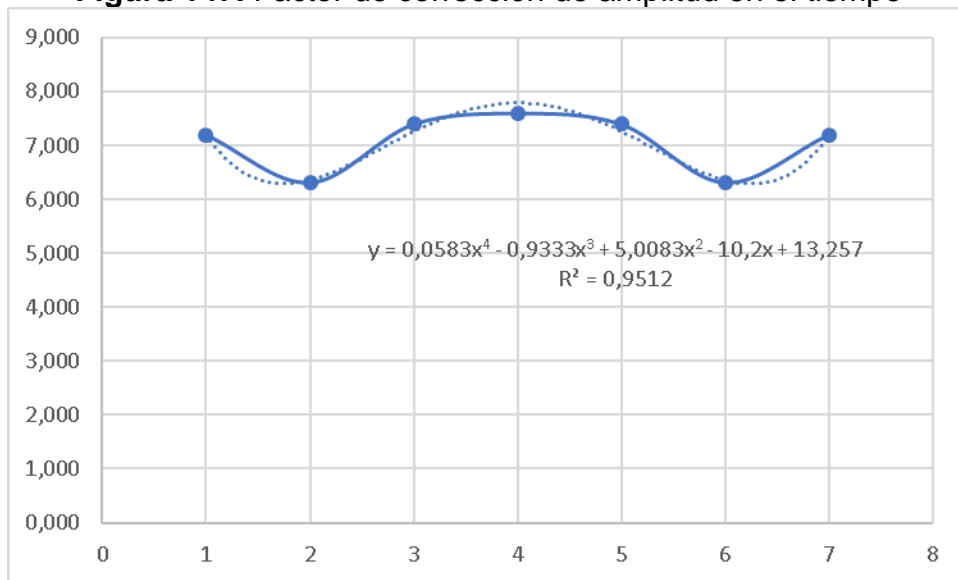


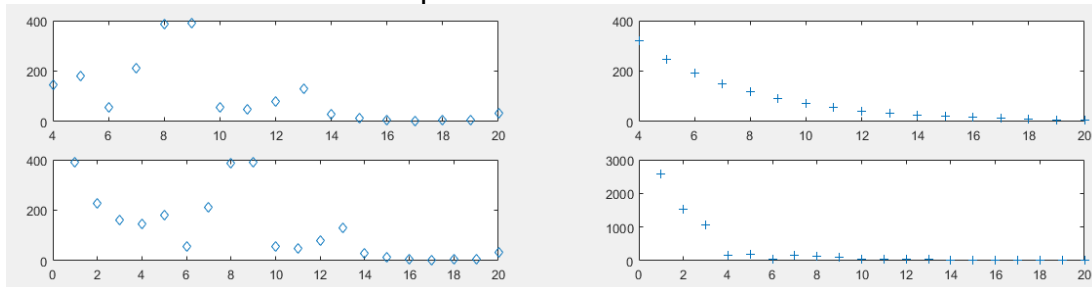
Figura 147. Factor de corrección de amplitud en el tiempo



3.7.4.1. Corriente por la torre 1

Analizando el espectro de a señal que baja por la torre 1 se analiza a continuación:

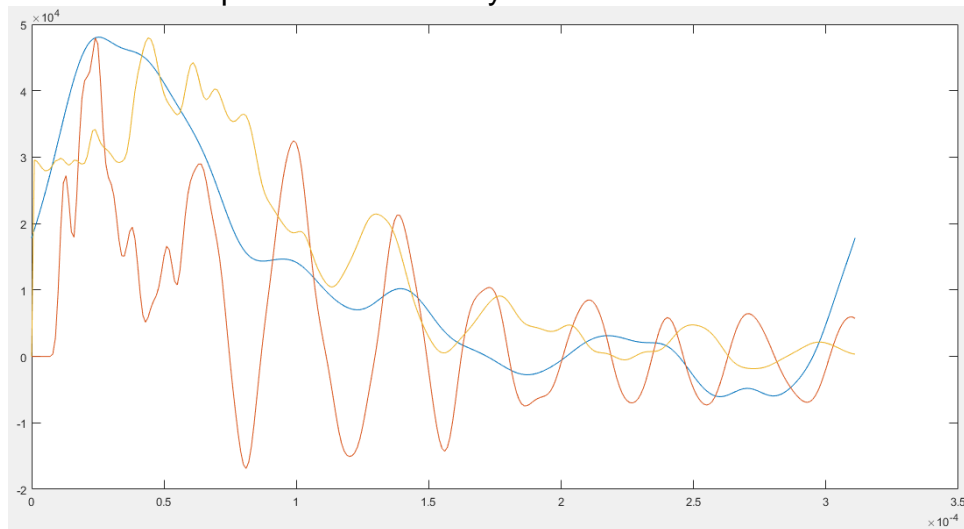
Figura 148. Amplitud del espectro de la señal que baja por la torre 1 cuando el impacto es en la torre 4



Izquierda superior - amplitud de los amónicos a partir del 4, Izquierda inferior- amplitud de la señal original que baja por la torre 1, Derecha superior - curva exponencial para suavizado, Derecha inferior: señal nueva con suavizado y amplitud de armónicos

Grafica obtenida después de la corrección, comparada con la primera aproximación:

Figura 149. Graficas de corrección y señal de corriente de retorno de rayo original, impacto en la torre 4 y medida en la torre 1



Curva amarilla - corriente de retorno de rayo, curva naranja – curva con corrección simple usada en 3.1, curva azul - reconstruida con las correcciones de amplitud de armónicos, amplitud en el tiempo y suavizado

Correlación obtenida después de la corrección total a usar:

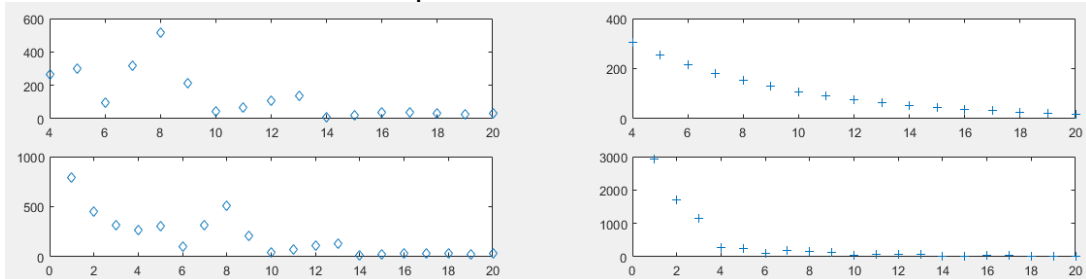
Tabla 75. Correlación con la corrección total “amplitud de armónicos y en el tiempo” comparada con la correlación obtenida con corrección de amplitud simple

Signal	Correlation
Simple correction of amplitude	0.453
Total Correction	0.8712

3.7.4.2. Corriente por la torre 2

Analizando el espectro de a señal que baja por la torre 2 se analiza a continuación:

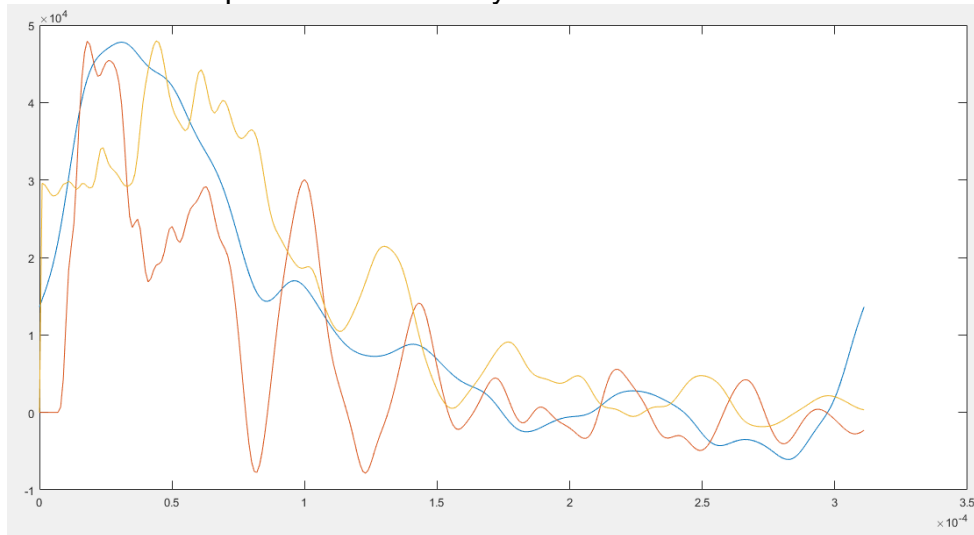
Figura 150. Amplitud del espectro de la señal que baja por la torre 2 cuando el impacto es en la torre 4



Izquierda superior - amplitud de los armónicos a partir del 4, Izquierda inferior- amplitud de la señal original que baja por la torre 2, Derecha superior - curva exponencial para suavizado, Derecha inferior: señal nueva con suavizado y amplitud de armónicos

Grafica obtenida después de la corrección, comparada con la primera aproximación:

Figura 151. Graficas de corrección y señal de corriente de retorno de rayo original, impacto en la torre 4 y medida en la torre 2



Curva amarilla - corriente de retorno de rayo, curva naranja – curva con corrección simple usada en 3.1, curva azul - reconstruida con las correcciones de amplitud de armónicos, amplitud en el tiempo y suavizado

Correlación obtenida después de la corrección total a usar:

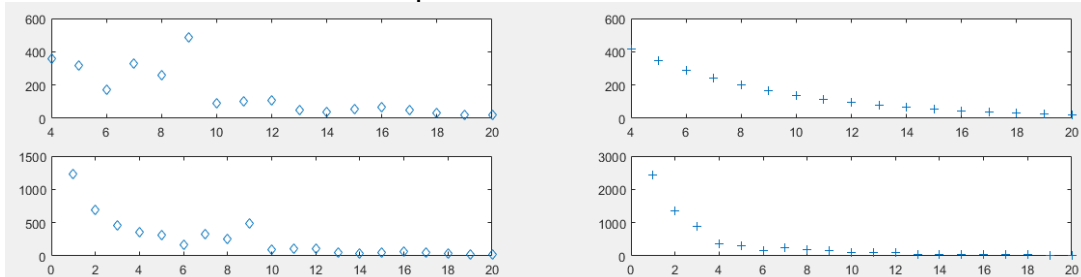
Tabla 76. Correlación con la corrección total “amplitud de armónicos y en el tiempo” comparada con la correlación obtenida con corrección de amplitud simple

Signal	Correlation
Simple correction of amplitude	0.6010
Total Correction	0.8845

3.7.4.3. Corriente por la torre 3

Analizando el espectro de a señal que baja por la torre 3 se analiza a continuación:

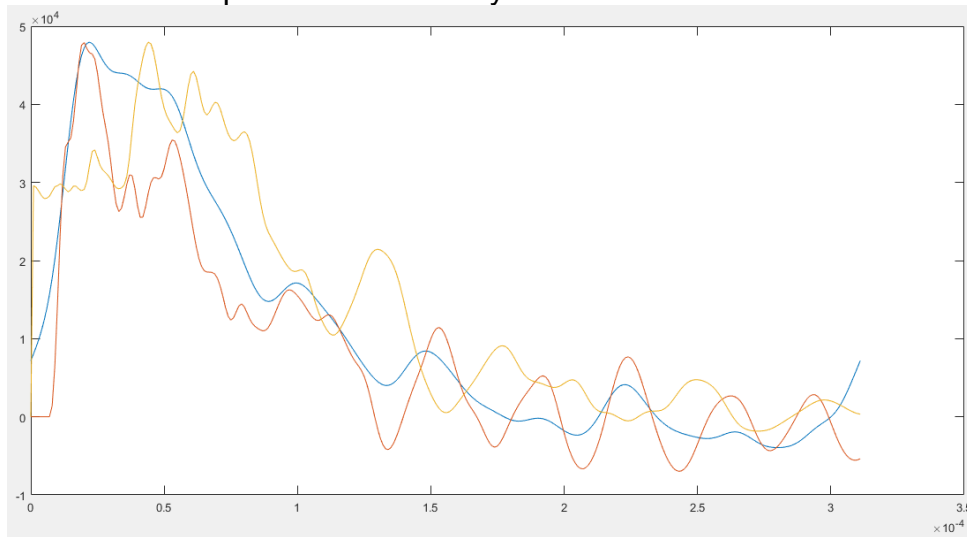
Figura 152. Amplitud del espectro de la señal que baja por la torre 3 cuando el impacto es en la torre 4



Izquierda superior - amplitud de los armónicos a partir del 4, Izquierda inferior- amplitud de la señal original que baja por la torre 3, Derecha superior - curva exponencial para suavizado, Derecha inferior: señal nueva con suavizado y amplitud de armónicos

Grafica obtenida después de la corrección, comparada con la primera aproximación:

Figura 153. Graficas de corrección y señal de corriente de retorno de rayo original, impacto en la torre 4 y medida en la torre 3



Curva amarilla - corriente de retorno de rayo, curva naranja – curva con corrección simple usada en 3.1, curva azul - reconstruida con las correcciones de amplitud de armónicos, amplitud en el tiempo y suavizado

Correlación obtenida después de la corrección total a usar:

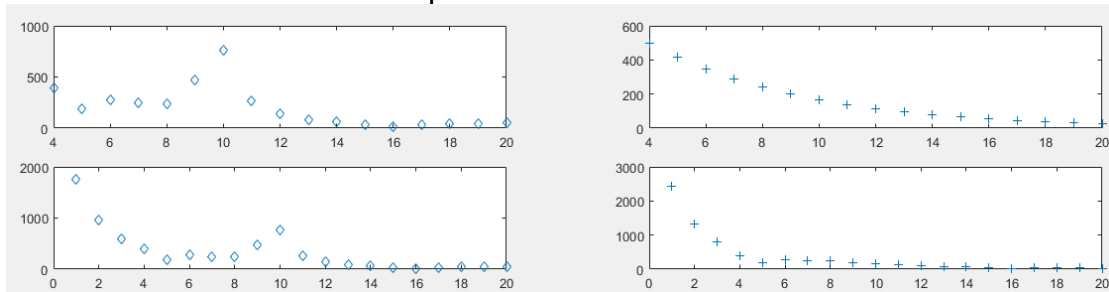
Tabla 77. Correlación con la corrección total “amplitud de armónicos y en el tiempo” comparada con la correlación obtenida con corrección de amplitud simple

Signal	Correlation
Simple correction of amplitude	0.6940
Total Correction	0.8795

3.7.4.4. Corriente por la torre 4

Analizando el espectro de a señal que baja por la torre 4 se analiza a continuación:

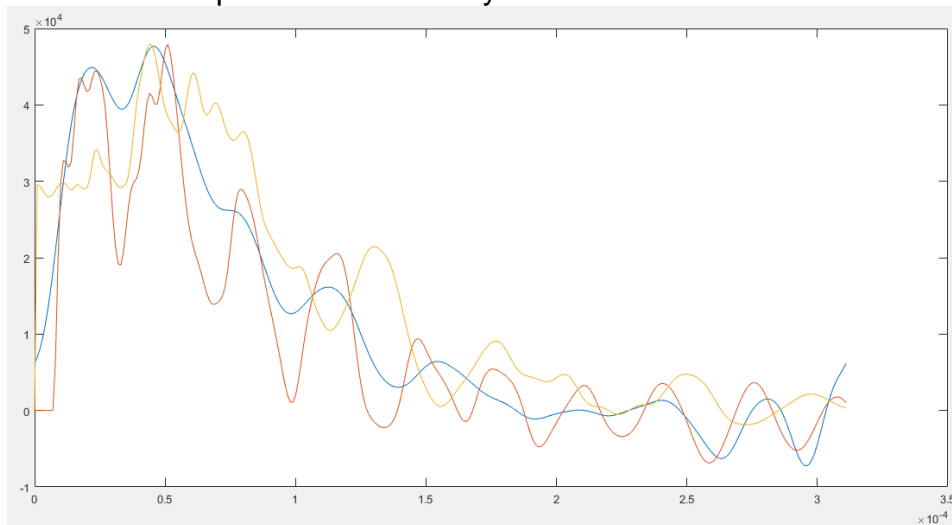
Figura 154. Amplitud del espectro de la señal que baja por la torre 4 cuando el impacto es en la torre 4



Izquierda superior - amplitud de los armónicos a partir del 4, Izquierda inferior- amplitud de la señal original que baja por la torre 4, Derecha superior - curva exponencial para suavizado, Derecha inferior: señal nueva con suavizado y amplitud de armónicos

Grafica obtenida después de la corrección, comparada con la primera aproximación:

Figura 155. Graficas de corrección y señal de corriente de retorno de rayo original, impacto en la torre 4 y medida en la torre 4



Curva amarilla - corriente de retorno de rayo, curva naranja – curva con corrección simple usada en 3.1, curva azul - reconstruida con las correcciones de amplitud de armónicos, amplitud en el tiempo y suavizado

Correlación obtenida después de la corrección total a usar:

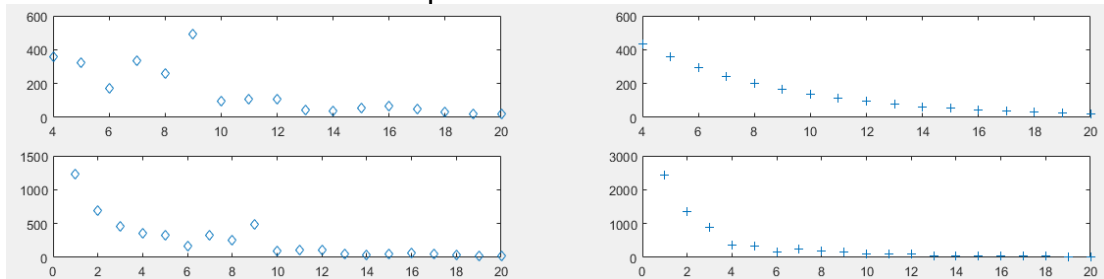
Tabla 78. Correlación con la corrección total “amplitud de armónicos y en el tiempo” comparada con la correlación obtenida con corrección de amplitud simple

Signal	Correlation
Simple correction of amplitude	0.7430
Total Correction	0.9037

3.7.4.5. Corriente por la torre 5

Analizando el espectro de a señal que baja por la torre 5 se analiza a continuación:

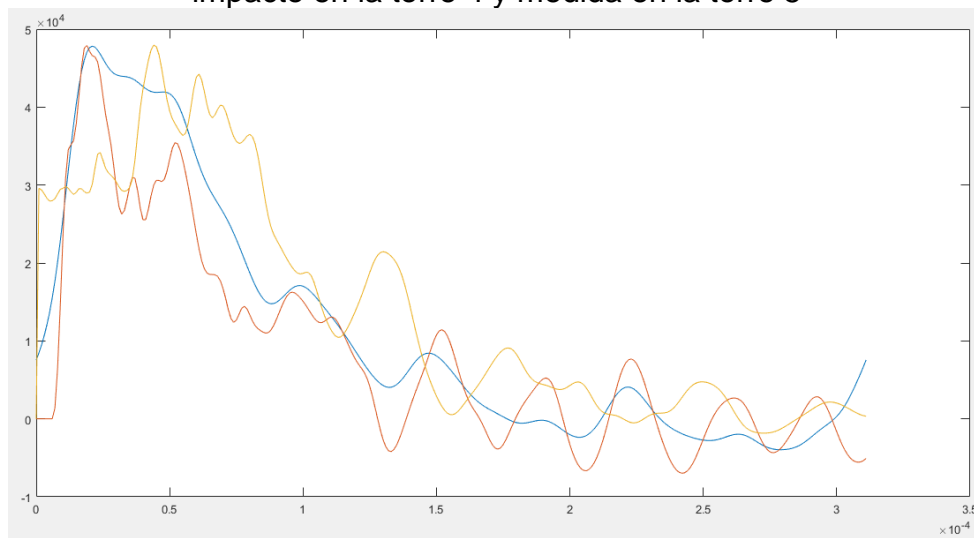
Figura 156. Amplitud del espectro de la señal que baja por la torre 5 cuando el impacto es en la torre 4



Izquierda superior - amplitud de los armónicos a partir del 4, Izquierda inferior- amplitud de la señal original que baja por la torre 5, Derecha superior - curva exponencial para suavizado, Derecha inferior: señal nueva con suavizado y amplitud de armónicos

Grafica obtenida después de la corrección, comparada con la primera aproximación:

Figura 157. Graficas de corrección y señal de corriente de retorno de rayo original, impacto en la torre 4 y medida en la torre 5



Curva amarilla - corriente de retorno de rayo, curva naranja – curva con corrección simple usada en 3.1, curva azul - reconstruida con las correcciones de amplitud de armónicos, amplitud en el tiempo y suavizado

Correlación obtenida después de la corrección total a usar:

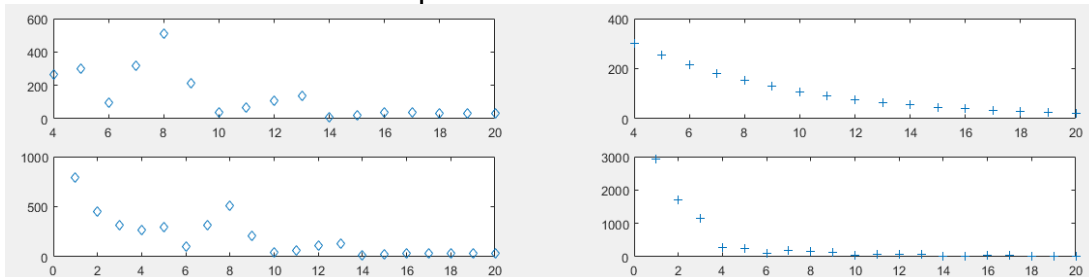
Tabla 79. Correlación con la corrección total “amplitud de armónicos y en el tiempo” comparada con la correlación obtenida con corrección de amplitud simple

Signal	Correlation
Simple correction of amplitude	0.6940
Total Correction	0.8771

3.7.4.6. Corriente por la torre 6

Analizando el espectro de a señal que baja por la torre 6 se analiza a continuación:

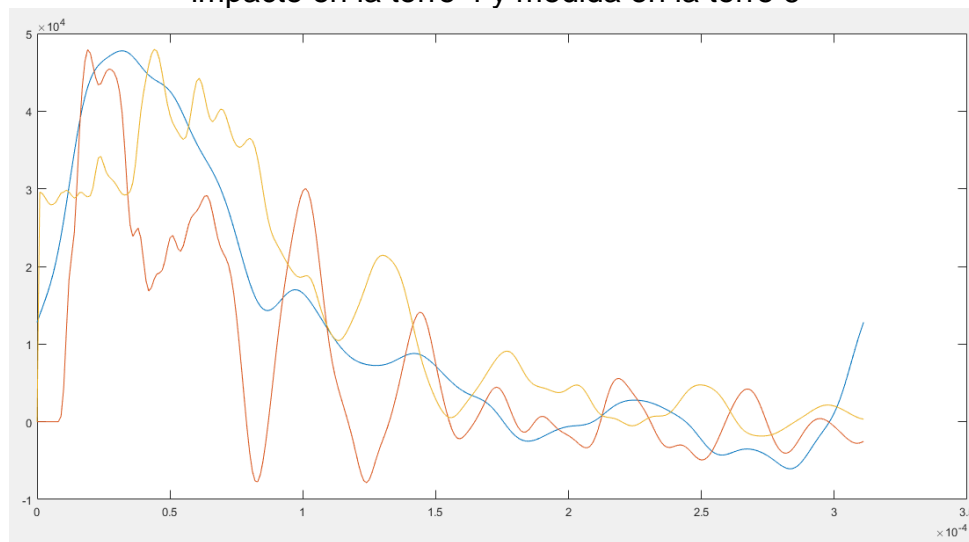
Figura 158. Amplitud del espectro de la señal que baja por la torre 6 cuando el impacto es en la torre 4



Izquierda superior - amplitud de los armónicos a partir del 4, Izquierda inferior- amplitud de la señal original que baja por la torre 6, Derecha superior - curva exponencial para suavizado, Derecha inferior: señal nueva con suavizado y amplitud de armónicos

Grafica obtenida después de la corrección, comparada con la primera aproximación:

Figura 159. Graficas de corrección y señal de corriente de retorno de rayo original, impacto en la torre 4 y medida en la torre 6



Curva amarilla - corriente de retorno de rayo, curva naranja – curva con corrección simple usada en 3.1, curva azul - reconstruida con las correcciones de amplitud de armónicos, amplitud en el tiempo y suavizado

Correlación obtenida después de la corrección total a usar:

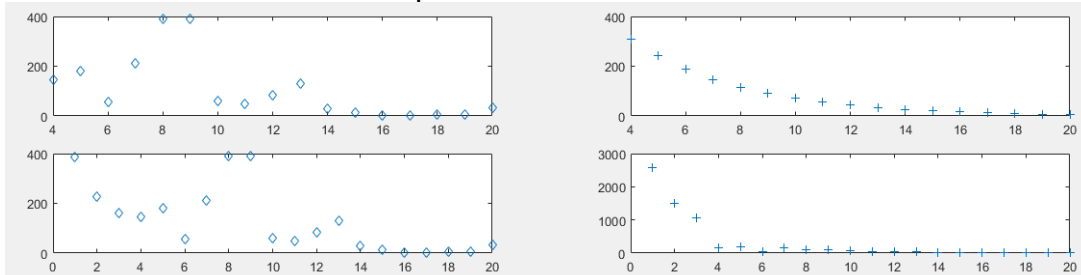
Tabla 80. Correlación con la corrección total “amplitud de armónicos y en el tiempo” comparada con la correlación obtenida con corrección de amplitud simple

Signal	Correlation
Simple correction of amplitude	0.6010
Total Correction	0.8895

3.7.4.7. Corriente por la torre 7

Analizando el espectro de a señal que baja por la torre 7 se analiza a continuación:

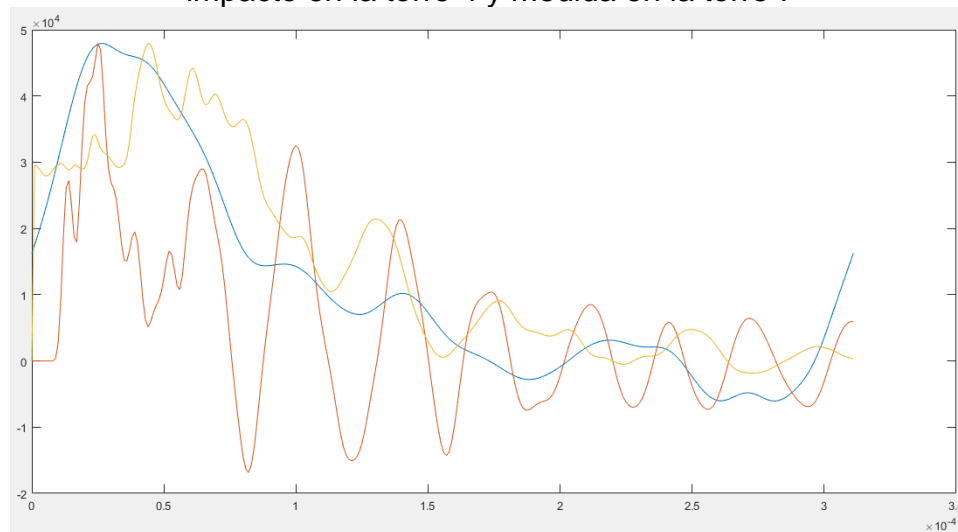
Figura 160. Amplitud del espectro de la señal que baja por la torre 7 cuando el impacto es en la torre 4



Izquierda superior - amplitud de los armónicos a partir del 4, Izquierda inferior- amplitud de la señal original que baja por la torre 7, Derecha superior - curva exponencial para suavizado, Derecha inferior: señal nueva con suavizado y amplitud de armónicos

Grafica obtenida después de la corrección, comparada con la primera aproximación:

Figura 161. Graficas de corrección y señal de corriente de retorno de rayo original, impacto en la torre 4 y medida en la torre 7



Curva amarilla - corriente de retorno de rayo, curva naranja – curva con corrección simple usada en 3.1, curva azul - reconstruida con las correcciones de amplitud de armónicos, amplitud en el tiempo y suavizado

Correlación obtenida después de la corrección total a usar:

Tabla 81. Correlación con la corrección total “amplitud de armónicos y en el tiempo” comparada con la correlación obtenida con corrección de amplitud simple

Signal	Correlation
Simple correction of amplitude	0.4530
Total Correction	0.8793

Para todos los casos la correlación aumento significativamente, por tal razón, se va a generalizar este modelo, ya que se corrobora este modelo para diferente número de torres tanto pares como impares.

3.8. Corrección generalizada

Se parte del comportamiento presentado en 3.7, el cual arrojo un ajuste de curva en forma de parábola para el factor de amplitud de armónicos, para completar este inciso se harán las parábolas completas “espejo en forma vertical” correspondientes al impacto presentado en cada torre y conseguir una mayor aproximación cuando se lea una señal en una torre determinada, este comportamiento vario en el corrimiento y en la concavidad de cada parábola, como se muestra a continuación:

Figura 162. Factor de corrección de amplitud de armónicos en función de la torre de medición cuando el Impacto es en la torre 1

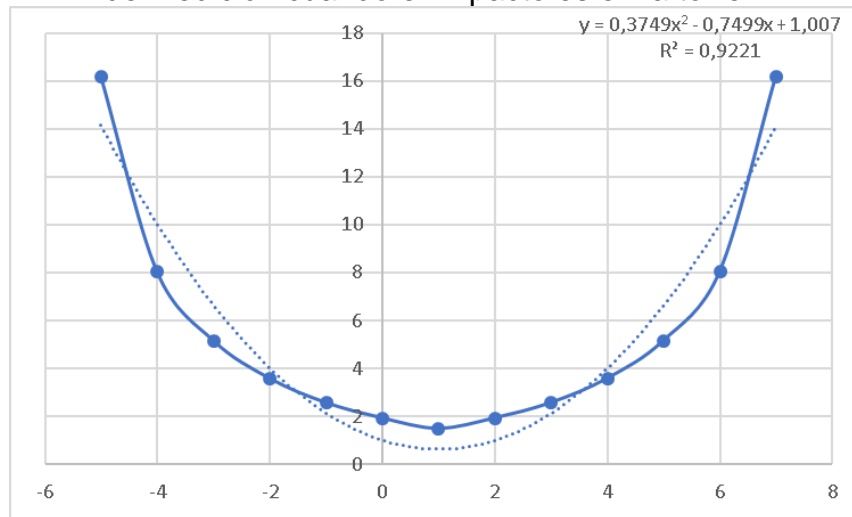


Figura 163. Factor de corrección de amplitud de armónicos en función de la torre de medición cuando el Impacto es en la torre 2

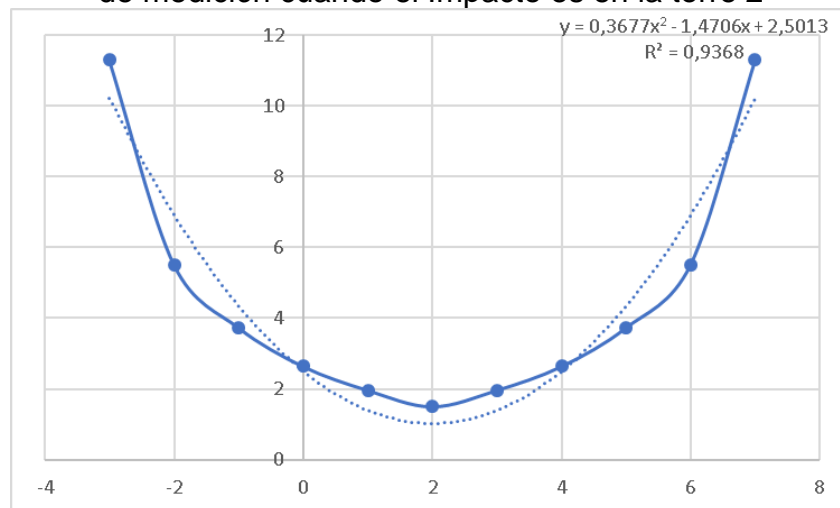


Figura 164. Factor de corrección de amplitud de armónicos en función de la torre de medición cuando el Impacto es en la torre 3

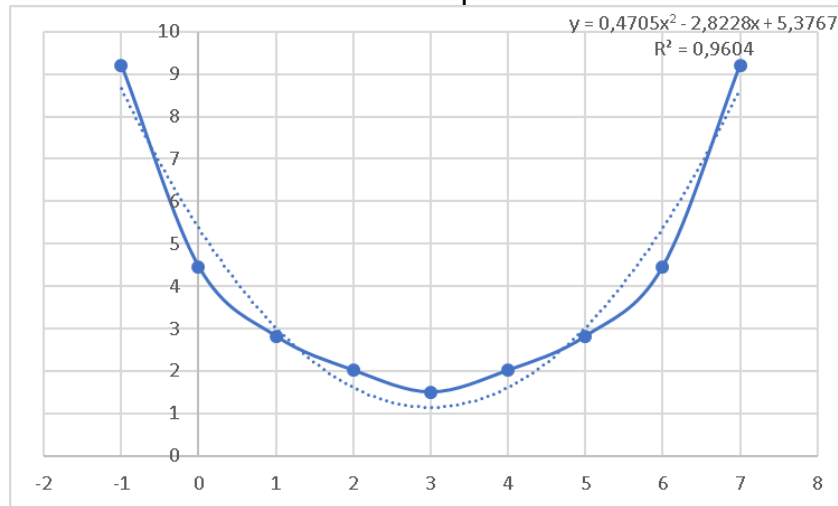
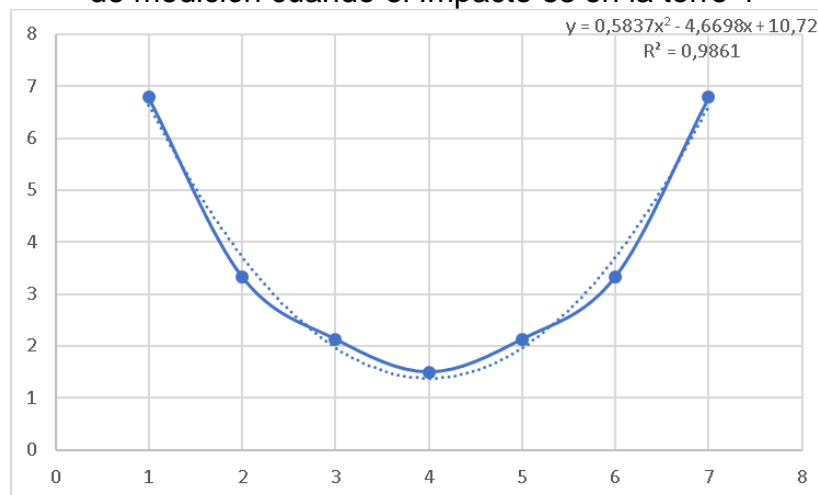


Figura 165. Factor de corrección de amplitud de armónicos en función de la torre de medición cuando el Impacto es en la torre 4



Dado lo anterior, se puede generalizar que el factor de amplitud de armónicos en función de la torre de instalación del equipo de medición esta dado por:

$$Factor_{amplitude\ of\ harmonics} = a * tower_{installed}^2 + b * tower_{installed} + c \quad Ec. 53$$

Para generalizar una normalización del factor de amplitud de los armónicos se debe buscar los coeficientes a, b y c, estos factores están en función de la torre de impacto.

Para hallar el valor de “a” b” y” c” en función de la torre de impacto se tiene:

$$a = 0.0729 * tower_{impact} + 0.2669 \quad Ec. 54$$

$$b = -1.3112 * tower_{impact} + 0.8497 \quad \text{Ec. 55}$$

$$c = 3.2228 * e^{0.3025*tower_{impact}} \quad \text{Ec. 56}$$

Al tener los valores de a, b y c para normalizar el factor de corrección de amplitud de los armónicos, solo se remplazan en la ecuación 53, para así tener el factor de corrección de amplitud de armónicos generalizado para cualquier configuración de líneas y numero de torres.

Lo anterior se puede afirmar ya que la influencia de armónicos no depende del número de torres, contrario a la amplitud de corriente en el tiempo que baja por cada torre, las cuales varían dependiendo el número de torres como se va a ver a continuación, por el contrario, el comportamiento armónico no depende del número de torres, es decir que la forma de onda no cambia, pero si varia su amplitud en el tiempo. Lo anteriormente dicho se puede observar en las figuras 166, 167, 168 y 169.

Figura 166. Señales cuando el impacto es en la torre 6 con 10 torres

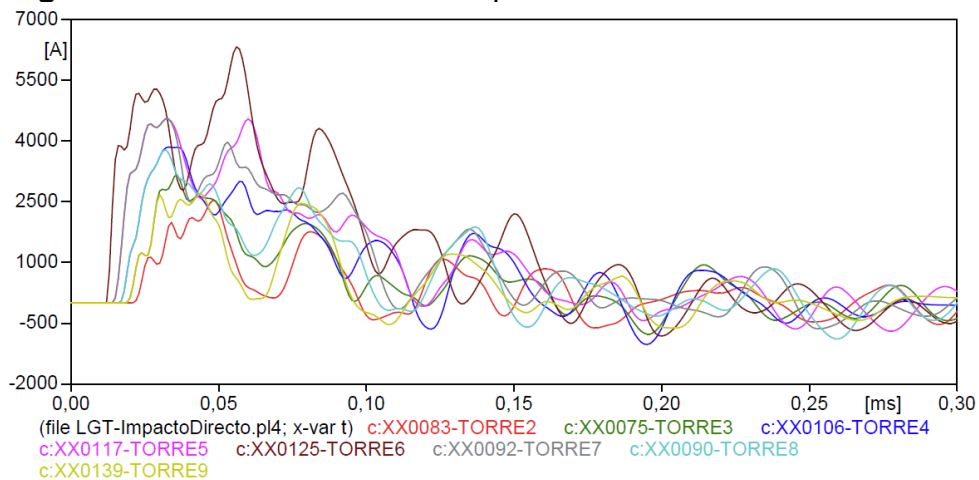


Figura 167. Señales cuando el impacto es en la torre 6 con 21 torres

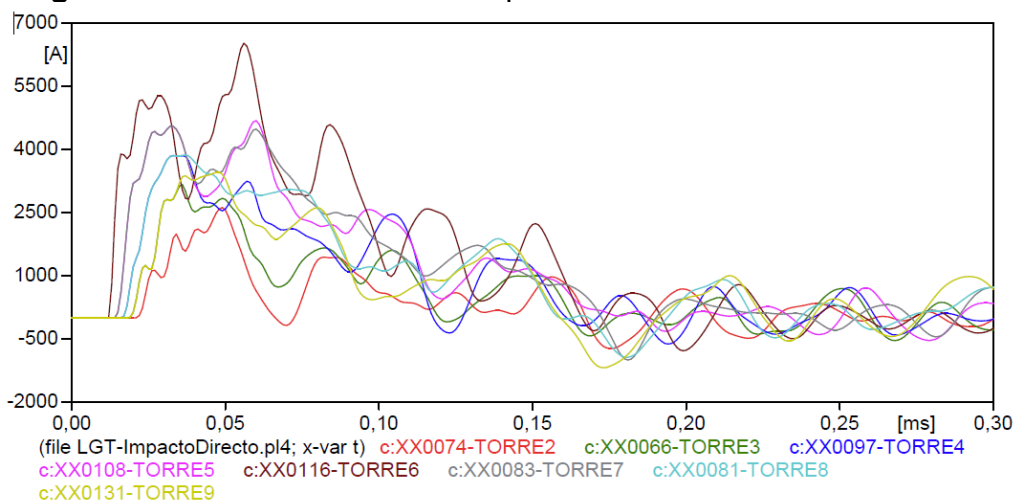


Figura 168. Señales cuando el impacto es en la torre 6 con 35 torres

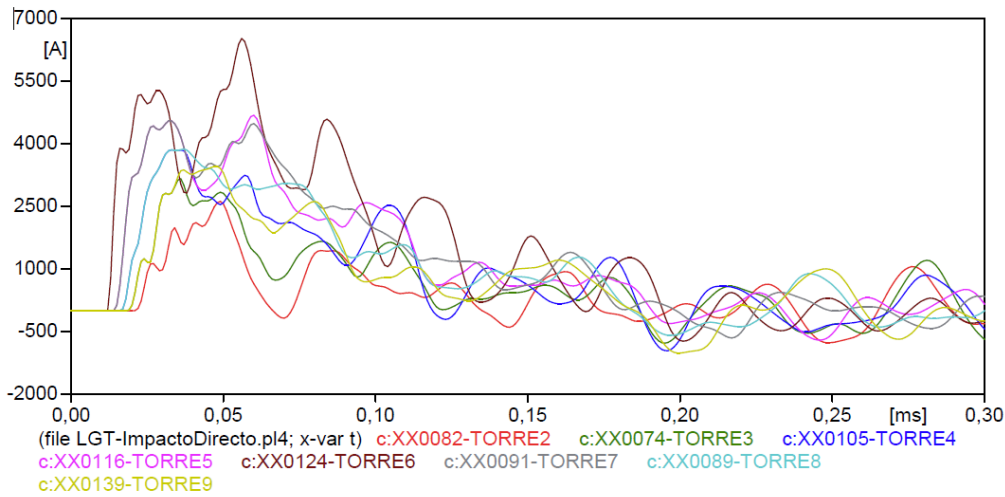
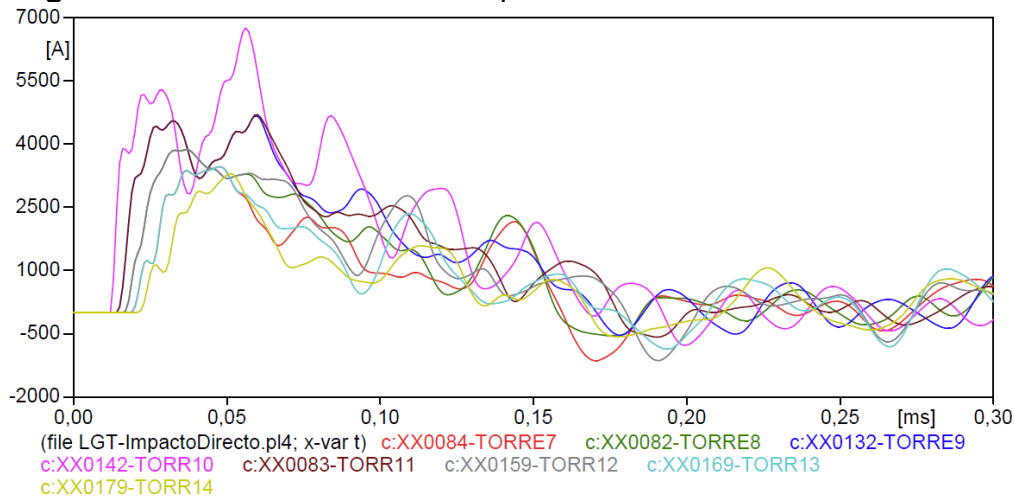


Figura 169. Señales cuando el impacto es en la torre 16 con 35 torres



En las figuras 166, 167, 168 y 169 se puede observar que las formas de onda no varían según el número de torres ni tampoco varía las formas de onda del lugar impactado y las señales aledañas, pero si sus amplitudes, por lo tanto, la forma de hallar la corrección de armónicos es válida para cualquier número de torres.

Respecto a la corrección de amplitud de la señal en el tiempo, la cual se realiza después de corregir la amplitud de los armónicos de la señal obtenida se van a tener las siguientes consideraciones:

- Al usar la configuración obtenida para realizar la corrección de amplitud en el tiempo mostrada en 3.7, se puede convertir un proceso complejo, ya que se debe usar un polinomio de grado 4, adicionalmente este polinomio cambia fuertemente cuando varía el número de torres.

- Por motivos de optimización y facilidad, se va a llevar el pico de la señal reconstruida luego de hacer el tratamiento de armónicos al mismo valor la señal original, de tal manera se puede usar una corrección de amplitud sencilla como se muestra en 3.1 donde se tomaba directamente los factores y se puede generalizar un comportamiento para datos hacia la derecha o izquierda del punto de impacto, dado este arreglo se puede encontrar una adecuada generalización como se va a ver después. La corrección de amplitud para dejar la señal corregida de armónicos a la misma amplitud de la señal original se muestra a continuación:

$$\text{factor Amplitude}_{\text{new harmonics}} = \frac{\text{peak new harmonics}}{\text{peak original signal}} \quad \text{Ec. 57}$$

$$\text{total correcion}_{\text{harmonics}} = \frac{\text{total signal correction harmonics}}{\text{factor Amplitude}_{\text{new harmonics}}} \quad \text{Ec. 58}$$

Luego de obtener la magnitud de la señal corregida de armónicos al mismo valor de la señal original, se aplicará la corrección de amplitud en el tiempo, pero a comparación de la corrección de armónicos está si varía con el número de torres, por tal motivo se realizará la generalización de la amplitud en el tiempo según e número de torres:

Para demostrar el cambio que se tiene de la amplitud de la corriente cuando varía el número de torres se muestra a continuación cuando un rayo impacta en una torre dada se muestra el cambio de la amplitud de la corriente que baja por cada torre aledaña dependiendo el número de torres:

Figura 170. Impacto de rayo en la torre 1, varía el número total de torres entre 7 y 100, se tiene el factor de corrección desde la torre 1 hasta la 7

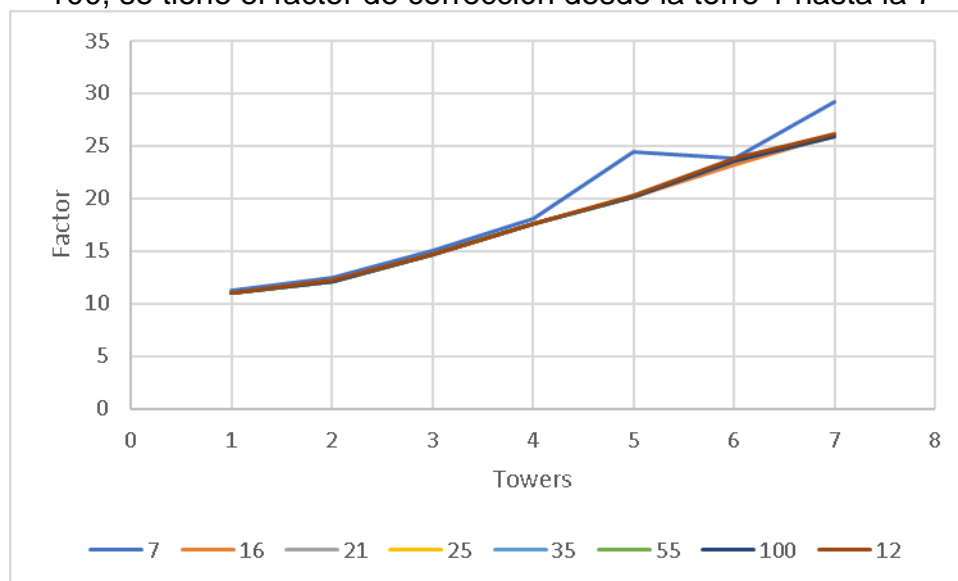


Figura 171. Impacto de rayo en la torre 2, varia el número total de torres entre 7 y 100, se tiene el factor de corrección desde la torre 1 hasta la 8

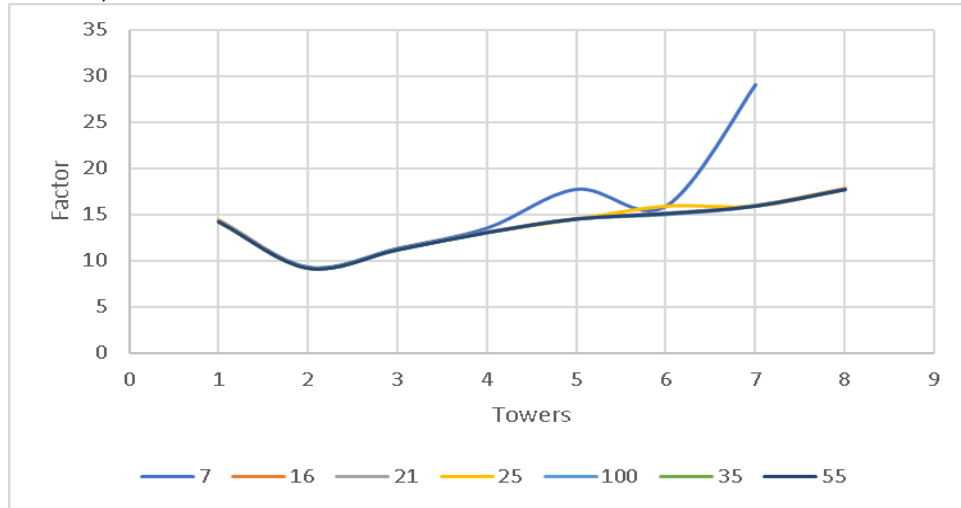


Figura 172. Impacto de rayo en la torre 5, varia el número total de torres entre 10 y 100, se tiene el factor de corrección desde la torre 1 hasta la 10

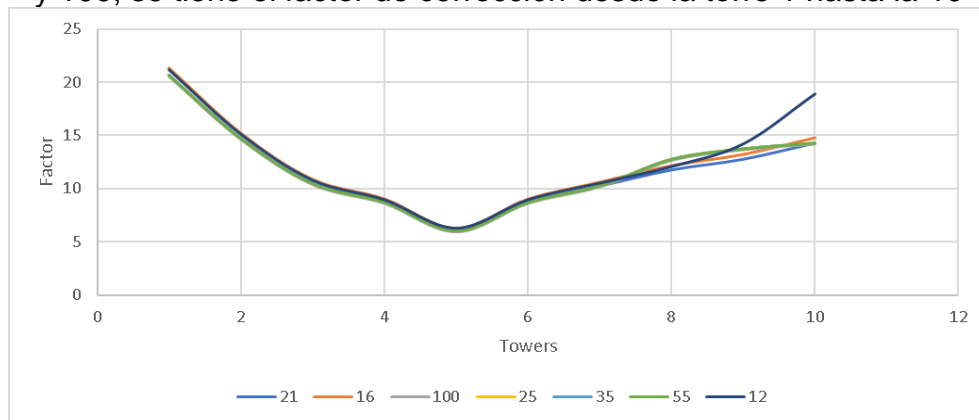
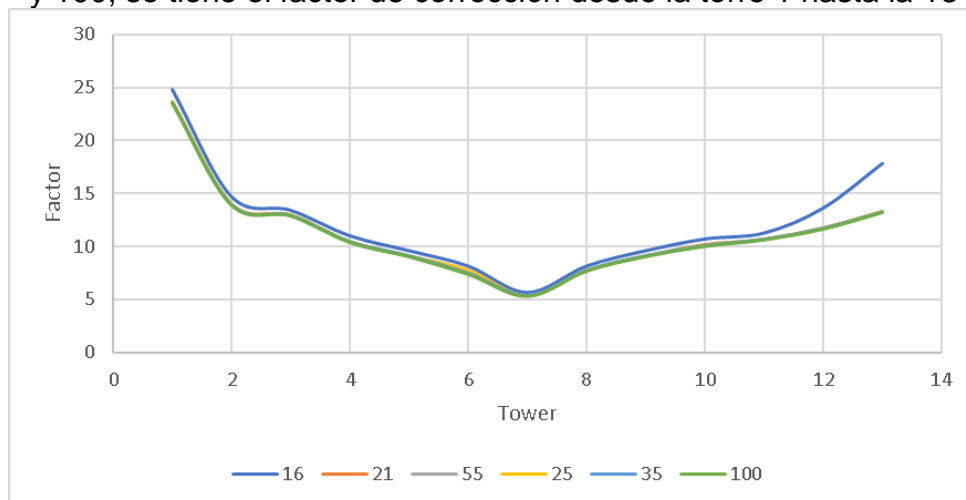


Figura 173. Impacto de rayo en la torre 7, varia el número total de torres entre 10 y 100, se tiene el factor de corrección desde la torre 1 hasta la 13



Con el comportamiento mostrado anteriormente y el barrido hecho hasta 100 torres se logró desarrollar las siguientes ecuaciones que describen el comportamiento del factor de amplitud en el tiempo según las siguientes variables: número de torres, torre de impacto del rayo y torre donde se está realizando la medición, a continuación, se describen las ecuaciones de amplitud en el tiempo cuando el impacto es a la izquierda de la torre de medición y cuando el impacto es a la derecha de la torre de medición:

Para el desarrollo de la ecuación de factor de amplitud en el tiempo, se tiene que, tanto para el comportamiento presentado hacia la izquierda como hacia la derecha del punto de impacto del rayo, su comportamiento describe una forma exponencial de la forma $A * e^{BX}$ donde X es la torre donde se está realizando la medición, ahora A y B , tienen un comportamiento que se describe como $C * \ln(X) + D$, donde X en este caso es el número de torres, este comportamiento presentado del \ln es dado a partir de ver el comportamiento de las constantes A y B , ahora para completar se debe analizar el comportamiento de C y D que estas se ven respecto a la torre de impacto y la curva que mejor se aproxima a este comportamiento es $E * X + F$ donde X en este caso es la torre de impacto, este comportamiento se halló al analizar los datos de C y D en cada torre impactada, teniendo lo anterior claro ahora se muestra el resultado final de las ecuaciones de corrección de amplitud en el tiempo.

Ecuación de la amplitud en el tiempo cuando el impacto es hacia la derecha de la torre de medición

$$Amplitude_{correction\ time} = [(-0.0039 * tower_{impact} + 0.0184) * \ln(nt) + (-0.9138 * tower_{impact} + 8.9316)] * e^{tower * [(-0.0004 * tower_{impact} + 0.0009) * \ln(nt) + (0.001 * tower_{impact} + 0.1403)]} \quad Ec. 59$$

Ecuación de la amplitud en el tiempo cuando el impacto es hacia la izquierda de la torre de medición

$$Amplitude_{correction\ time} = [(-0.064 * tower_{impact} + 0.0897) * \ln(nt) + (0.9603 * tower_{impact} + 21.507)] * e^{tower * [(-2x10^{-8} * tower_{impact} + 1x10^{-6}) * \ln(nt) + (0.0394 * tower_{impact} - 0.5027)]} \quad Ec. 60$$

Donde:

$tower_{impact} \rightarrow$ torre de impacto
 $tower \rightarrow$ torre donde esta instalado el equipo de medición
 $nt \rightarrow$ número total de torres

La normalización del factor de corrección de amplitud en el tiempo de pende del número de torres, torre donde ocurrió el impacto de rayo y torre donde está ubicado el equipo, con lo cual se puede generalizar este factor para cualquier configuración de líneas y número de torres.

Para usar las fórmulas 53, 59 y 69 se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones para un correcto uso:

- Aplican para cualquier número de torres
- Para el uso se debe tener en cuenta el “**punto de referencia**”, donde este punto de referencia o **torre 1** siempre va a ser la torre de remate más cercana, con lo cual el equipo se debe instalar respecto a este punto antes de la mitad o antes según el número de torres.
El lugar a instalar el equipo si el número de torres es impar como se muestra a continuación, se debe instalar en las primeras 4 torres o en su defecto en las últimas 4 pero ahora dando como referencia la primera torre de derecha a izquierda como torre 1.

1 2 3 4 5 6 7

Ahora, si se requiere el lugar para instalar el equipo si el número de torres es par como se muestra a continuación, se debe instalar en las primeras 4 torres o en su defecto en las últimas 4 pero ahora dando como referencia la primera torre de derecha a izquierda como torre 1.

1 2 3 4 5 6

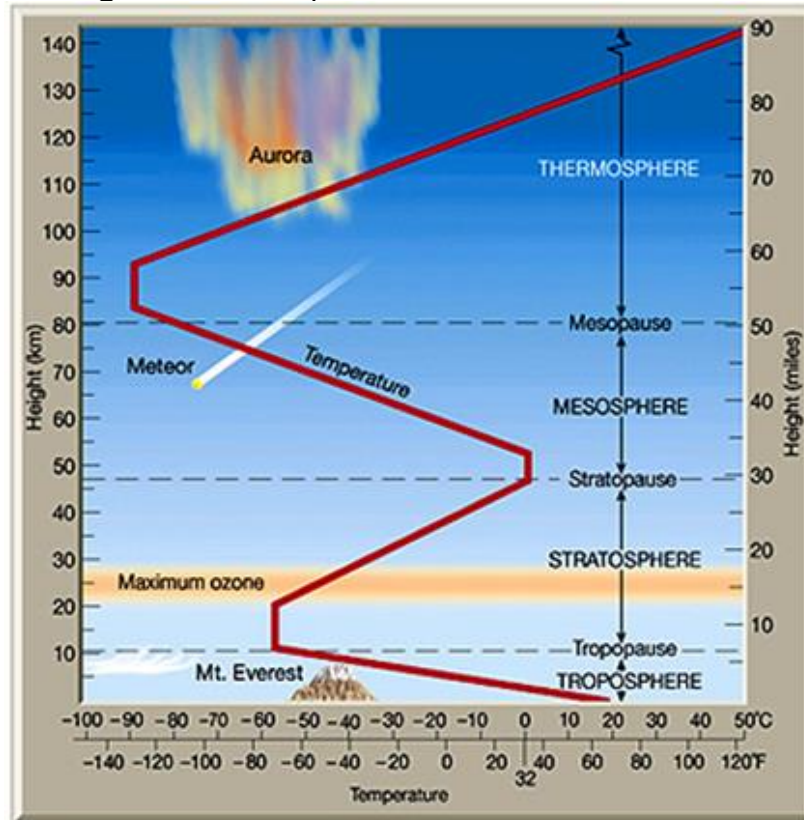
Para dejar claro este inciso se debe tener un punto de referencia siempre, donde este punto de referencia o torre 1 siempre va a ser la torre de remate más cercana.

- Si el impacto es en una torre hacia la derecha de la cual está instalado el equipo se usará la ecuación 59 para hacer la corrección de amplitud.
- Si el impacto es en una torre hacia la izquierda de la cual está instalado el equipo se usará la ecuación 59 para hacer la corrección de amplitud.

4. Velocidad del sonido en Colombia

Para hallar la velocidad del sonido en Colombia, primero se va a relacionar la temperatura como función de la altitud

Figura 174. Temperatura en función de la altitud



Fuente: Ozone and UV Light. [35]

Estudios realizados en Estados Unidos por la NASA "National Aeronautics and Space Administration" determina una relación matemática a la temperatura en función de la altitud [36], estas relaciones se muestran abajo:

$$\text{Para } h > 82345 \text{ (upper Stratosphere), } T(h) = -205.05 + 0.00164 h \quad \text{Ec. 61}$$

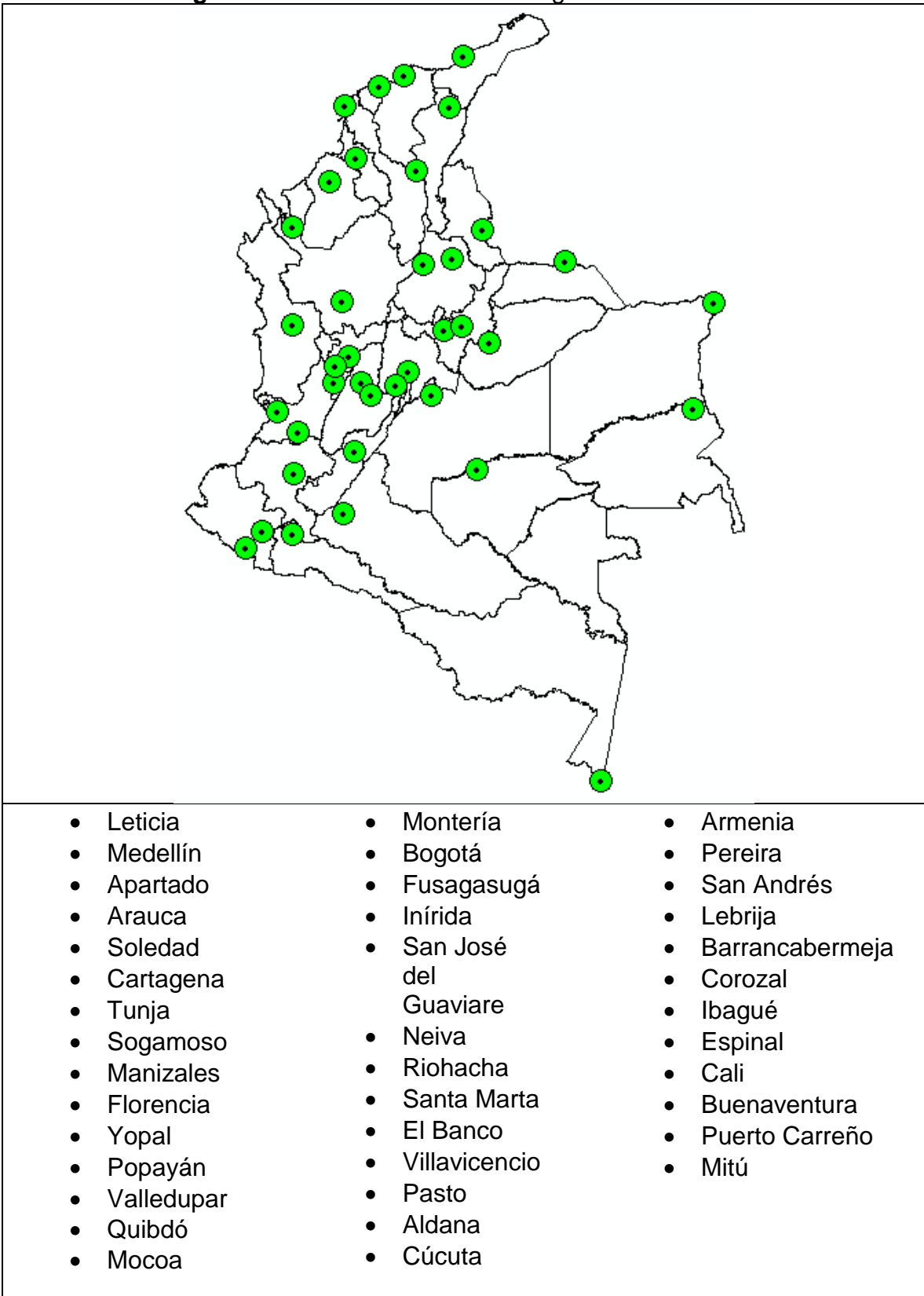
$$\text{Para } 36152 < h < 82345 \text{ (Lower Stratosphere), } T(h) = -70 \quad \text{Ec. 62}$$

$$\text{Para } h < 36152 \text{ (Troposphere), } T(h) = 59 - 0.00356 h \quad \text{Ec. 63}$$

Para los tres casos la temperatura "T" está dada en grados Fahrenheit (°F) y la altitud en pies (ft).

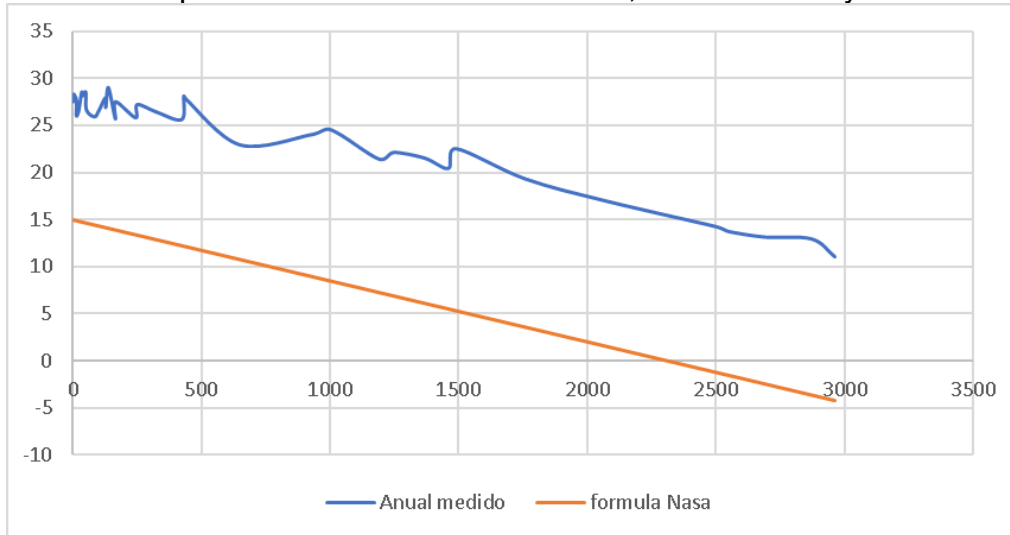
Para el caso de altitudes menores a la troposfera se tiene un comportamiento lineal en la temperatura en función de la altitud, teniendo como referencia estos datos preliminares, se contrasta la ecuación presentada por la NASA para altitudes menores a 36152 pies y los datos medidos de temperatura por las 41 estaciones meteorológicas distribuidas en el territorio de Colombia.

Figura 175. Estaciones meteorológicas en Colombia



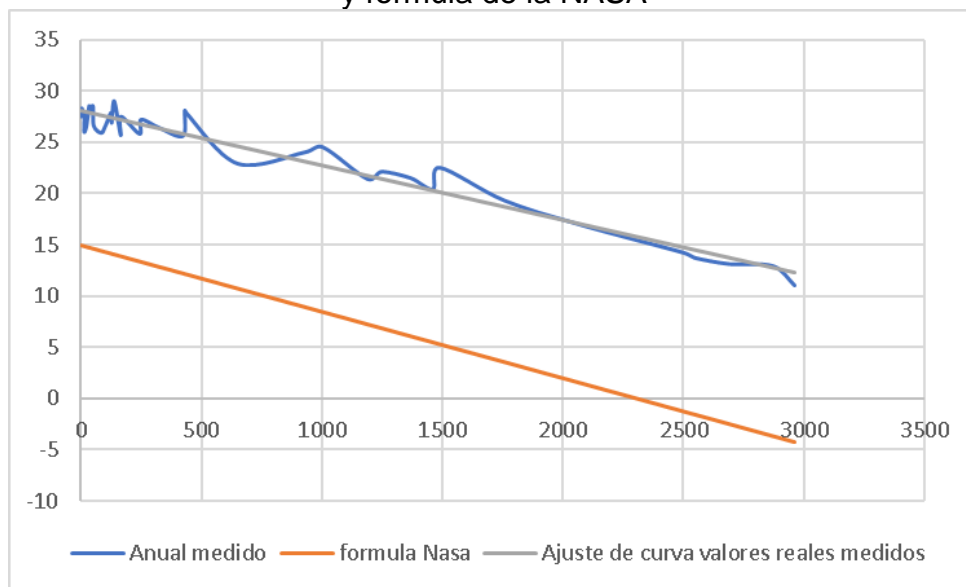
Teniendo los datos de temperatura y altitud de las estaciones meteorológicas de Colombia presentados por el IDEAM se procede a comparar estos datos medidos respecto a la fórmula dada por la NASA que relaciona estas dos variables, teniendo en cuenta que la fórmula de la NASA está dado en grados Fahrenheit y la altitud en pies, entonces se realiza la conversión a metros y grados centígrados.

Figura 176. Temperatura en función de la altitud, datos IDEAM y ecuación NASA



Con los datos de temperatura en función de la altitud en Colombia se procede a hallar el ajuste de curva más adecuado:

Figura 177. Temperatura en función de la altitud en Colombia con ajuste de curva y fórmula de la NASA

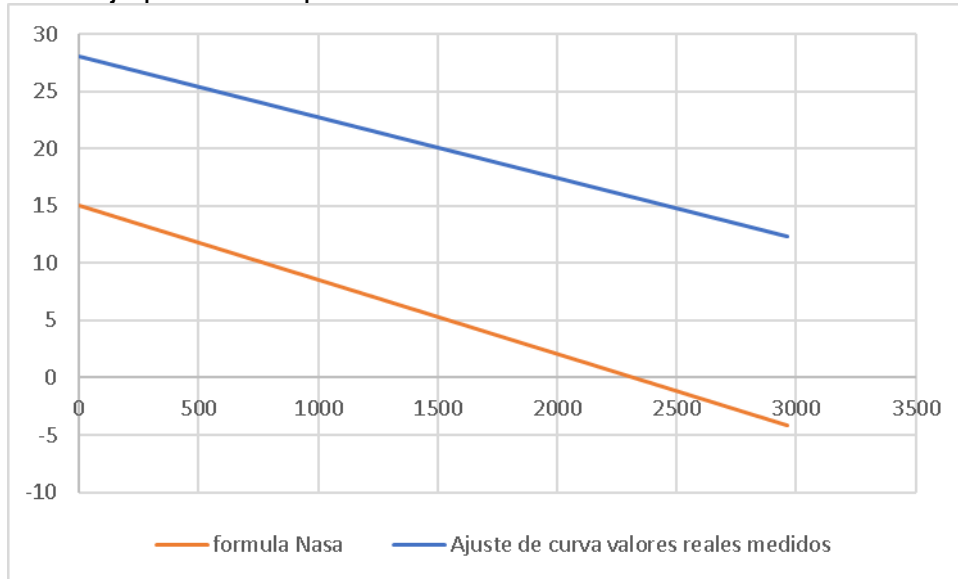


La ecuación que relaciona la temperatura en función de la altitud en Colombia es la siguiente:

$$T(h) = 28,045 - 0,0053 * h \quad \text{Ec. 64}$$

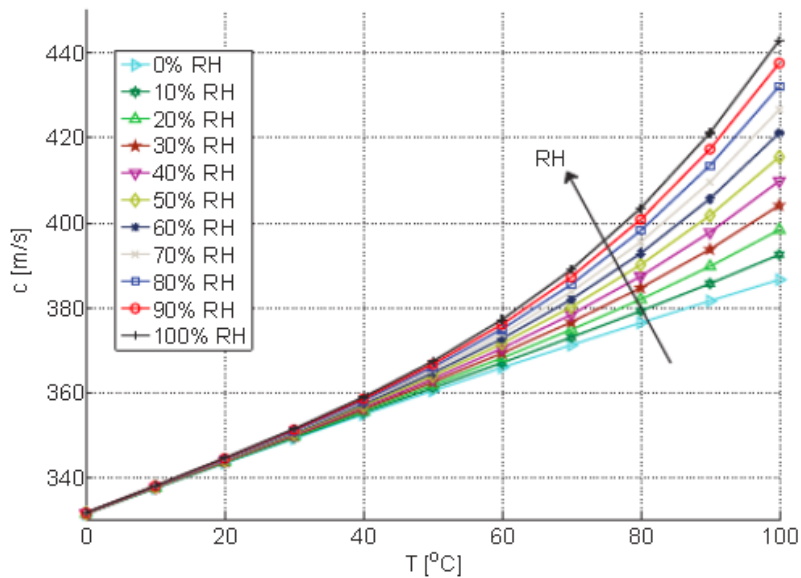
Para el uso de la anterior ecuación la temperatura dada en grados centígrados y altitud en metros.

Figura 178. Contraste entre la ecuación de la NASA y la ecuación hallada en este trabajo para la temperatura en función de la altitud en Colombia



Otro aspecto a tener en cuenta es la variación de la velocidad del sonido en función de la temperatura y la humedad relativa.

Figura 179. Variación de la velocidad del sonido en función de la humedad relativa y la temperatura



Fuente: High Accuracy Acoustic Relative Humidity Measurement in Duct Flow with Air. [37]

Para el cálculo aproximado de la velocidad del sonido en aire seco al nivel del mar [38], se hace uso de la siguiente formula:

$$C = 331.4 + 0.6 T \quad \text{Ec. 65}$$

El cambio presentado por la velocidad del sonido cuando varia la humedad no es despreciable, por esta razón, se presentó una nueva aproximación de la velocidad del sonido en función de la temperatura y la humedad relativa [39], la cual se presenta a continuación:

$$C = 331.4 + 0.6 T + 0.0124 RH \quad \text{Ec. 66}$$

La velocidad del sonido no es constante, esta depende de la altitud, en la actualidad de la temperatura presentada en aquella altitud [40]. La temperatura en función de la altitud está dada la ecuación 64, la cual fue hallada en este trabajo con datos de temperatura medidos en Colombia.

Con lo anterior se procede al cálculo de la velocidad del sonido en Colombia, donde los datos de humedad relativa "RH" se encuentran en la página del IDEAM "Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales" para las 41 estaciones presentes en el país, estos valores son los medios multianuales de Humedad Relativa en % en el periodo transcurrido entre 1981 – 2010 [41]. Por parte la temperatura se halla con la altitud del país y la formula hallada en este trabajo para Colombia, con los datos y cálculos realizados se procede a ingresarlos al programa ArcGIS. El histograma y el mapa de velocidad del sonido en Colombia se presentan a continuación:

Figura 180. Histograma de velocidad del sonido en Colombia

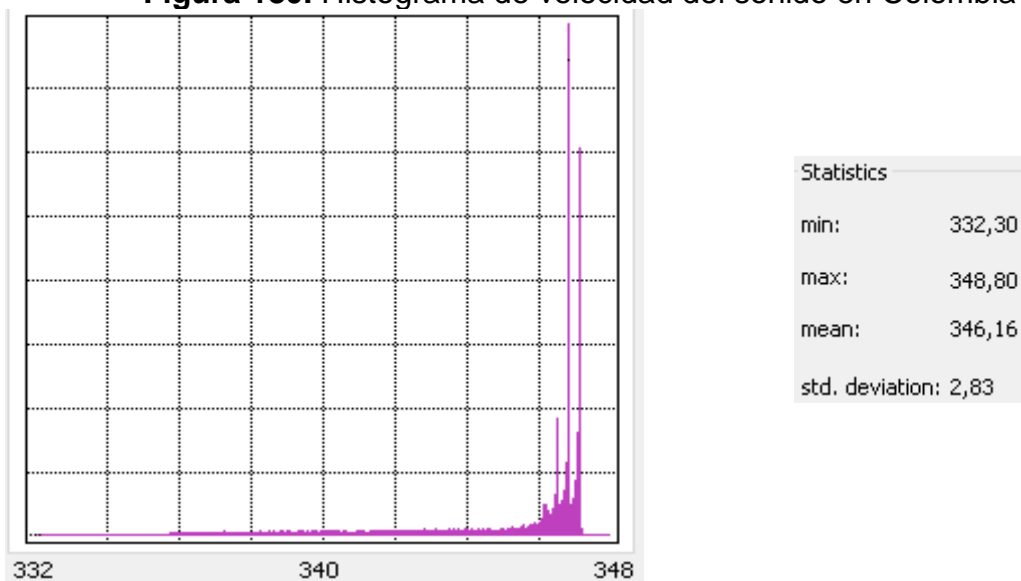
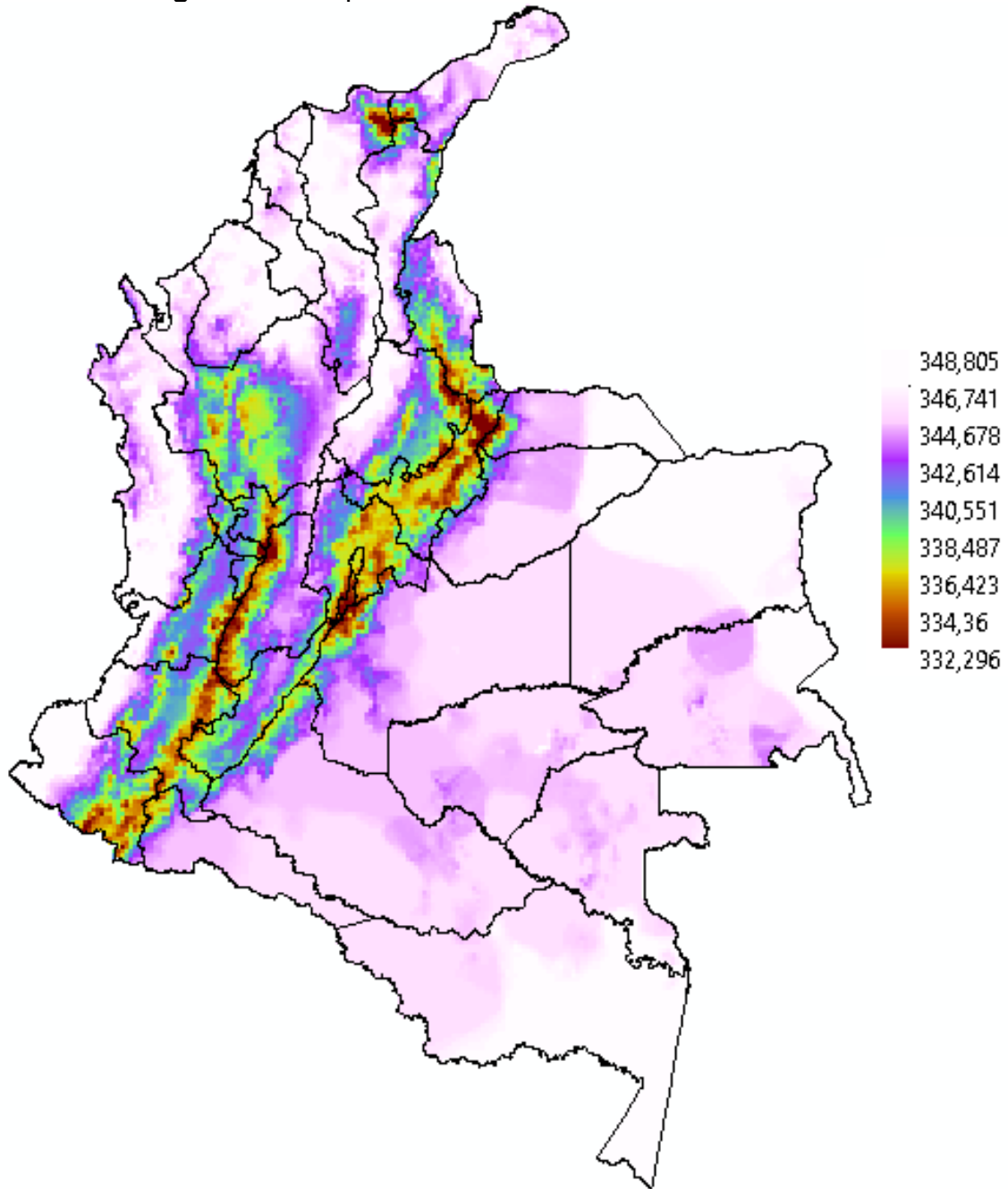


Figura 181. Mapa de velocidad del sonido en Colombia



Con el mapa y el histograma presentado, se muestra que la velocidad mínima es de 332 m/s , la velocidad máxima es $348,80\text{ m/s}$ y la media presentada en el país es de $346,16\text{ m/s}$.

5. Relación de la velocidad del sonido y el impacto en la torre o el cable de guarda

Con el fin de relacionar el sonido producido por el trueno y el impacto de rayo en el cable de guarda o en la torre directamente, se tendrán en cuenta los siguientes aspectos:

5.1. Distancia entre torres

este parámetro es importante para determinar los factores de corrección adecuados, no es relevante la distancia entre torres para algún calculo, pero si es necesario saber cuántas torres hay en una longitud determinada. para tener un ejemplo de esto se puede hablar de la línea a 230 kV, de la reconfiguración Paraíso – Nueva Esperanza y Nueva Esperanza – Circo y San Mateo y de la subestación nueva esperanza. Para este caso en específico, las principales características de las líneas son:

Tabla 82. Línea de transmisión 230 kV subestación Guavio – subestación Nueva Esperanza.

Descripción	Unidad	Valor
longitud de la línea	km	148,1
numero de torres por kilometro	unidad	2,1

Tabla 83. Reconfiguración Paraíso – Nueva Esperanza 230 kV

Descripción	Unidad	Valor
longitud de la línea	km	5,46
numero de torres por kilometro	unidad	1,8

Tabla 84. Reconfiguración Nueva Esperanza – circo y Nueva Esperanza – San Mateo

Descripción	Unidad	Valor
longitud de la línea	km	5,45
numero de torres por kilometro	unidad	2

En las tres tablas anteriores se puede observar que la distancia entre torres es diferente y el número de torres también lo es, por tal motivo es importante saber esta distancia para tener un cálculo acertado de los factores de corrección. Como se mencionó anteriormente “este dato es importante para saber en una distancia determinada cuantas torres hay”.

5.2. Velocidad del sonido en el lugar

Otro aspecto a tener en cuenta para determinar los factores de corrección adecuadamente es la velocidad del sonido en el lugar donde está instalado el dispositivo, como se vio en el capítulo anterior cuando se habló de la velocidad del

sonido en Colombia, se puede observar que en el país se tiene una velocidad mínima de 332 m/s , una velocidad máxima de $348,80\text{ m/s}$ y una velocidad media de $346,16\text{ m/s}$, por tal razón un calculo puede variar si se toma una velocidad diferente, se puede llegar a tener un error mayor a 14 m/s .

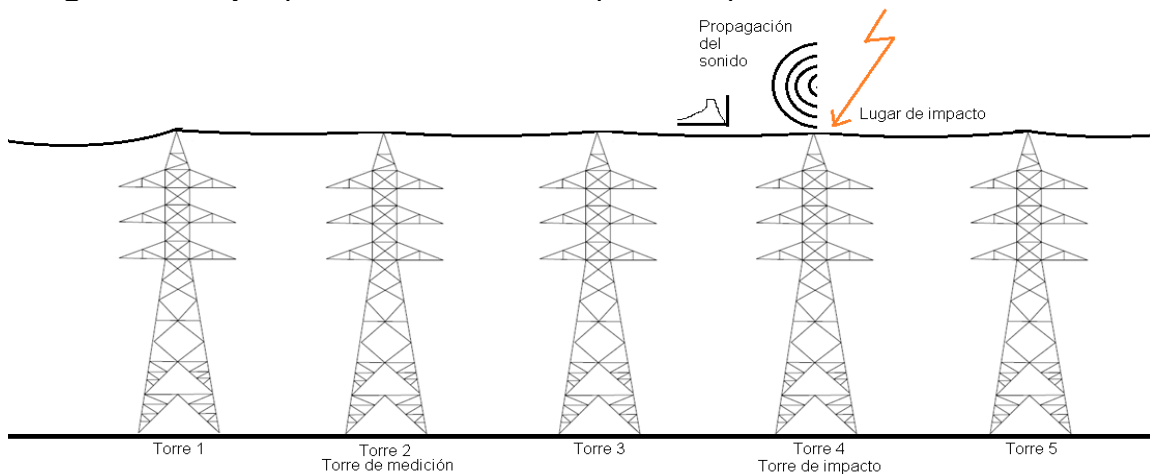
Para determinar el lugar exacto de instalación del dispositivo, se usará un dispositivo GPS “global position system” o en español un sistema de posicionamiento global, con el fin de obtener la coordenada exacta del lugar y así encontrar la velocidad media del lugar de instalación obtenida en el literal 4.

5.3. Determinar la dirección de impacto

Como antesala se va a hablar algo sobre la medición del sonido producido por el trueno en el lugar de medición, para esto se va a usar un micrófono que puede medir y ayudar a registrar una señal de sonido.

Se puede decir que un solo sensor está en la capacidad de medir y registrar la onda de sonido producida por el trueno, pero, en el caso hipotético que un rayo impacte el cable de guarda estando mi dispositivo en la torre 2 y el impacto cerca de la torre 3, el sensor registrara la onda producida por el trueno pero no me diría si el impacto fue de izquierda a derecha o de derecha a izquierda, es decir, no sé tendría información si esta señal sonora se acerca por el lado de la torre 3 o por el lado de la torre 1, solo la registra sin darme otra información de dirección. Por tal motivo se necesita más de un sensor de sonido para determinar la dirección del impacto.

Figura 182. Ejemplo de dirección de impacto respecto a un sensor de sonido



La información correspondiente a la dirección del impacto es necesaria para determinar de manera acertada los factores de corrección, para el cálculo de estos factores se necesita el dato de torre impactada y el de torre donde es instalado el dispositivo, por tal razón debo saber si el rayo respecto al lugar de instalación viene de la izquierda o de la derecha, para el caso del ejemplo de la figura 207, el impacto fue en la torre 4 y la medición en la torre 2, totalmente diferente a asumir medición en la torre 2 e impacto en la torre 1.

5.4. Determinación del lugar del impacto del rayo respecto al lugar de impacto

Para determinar la hora de inicio de la medida de corriente, se busca el punto donde la corriente de retorno de rayo inicia en el que llamaremos ahora el registrador de corriente “inicia a registrar valores diferentes de cero”, con este punto de referencia se mira el valor de inicio de la señal medida de sonido, para este apartado de sonido se mira cual señal de las dos registradas por los sensores de sonido fue primero, descartando la segunda señal de sonido, cuando se tenga la señal de corriente medida por el registrador de corriente y la señal de sonido escogida, se tendrán en cuenta las siguientes consideraciones:

Para determinar las consideraciones se tiene como ejemplo el impacto en la torre 1 de un rayo, con lo cual se obtienen los siguientes datos:

Tabla 85. Tiempos de señal de corriente y sonido en cada torre cuando el impacto del rayo es en la torre 1

Impact in Tower 1			
Arrival time to	Current Signal	sound	% of signal respect to sound
Tower 1	0,0000010	0,0860092	0,1163%
Tower 2	0,0000030	1,8635321	0,0161%
Tower 3	0,0000050	3,7270642	0,0134%
Tower 4	0,0000070	5,5905963	0,0125%
Tower 5	0,0000090	7,4541284	0,0121%
Tower 6	0,0000110	9,3176606	0,0118%
Tower 7	0,0000130	11,1811927	0,0116%

Teniendo el impacto en la torre 1 el tiempo que se demora en llegar la señal de corriente a cada torre se presenta en la columna 2 de la Tabla 90; donde el tiempo más alto presentado es el que se demora en llegar la corriente a la torre 7 cuando el impacto es en la torre 1, donde este tiempo es de $13\mu s$, ahora si se observa el tiempo más bajo de sonido presentado en la columna 3, se puede decir que el sensor se demora en leer la señal de sonido siendo el impacto en la misma torre 1 un tiempo de $86,0092ms$, si se hiciera una comparación entre el menor tiempo de sonido y el mayor tiempo de la corriente en ser leída por un sensor se puede decir que el sonido en comparación a la señal solo es un $0,01511\%$, por tal razón siendo este un caso de referencia no real pero asumiendo el valor más favorable del sonido frente a la señal de corriente medida según los datos presentados en la tabla 90, se puede concluir que la señal de sonido en ninguna condición puede ser considerable respecto a la señal de corriente medida, por tal razón, cuando se tengan las señales de corriente y de sonido en el punto de medida se aplicara lo siguiente:

$$\Delta t = tiempo_{inicio\ sonido} - tiempo_{inicio\ corriente} \quad Ec. 67$$

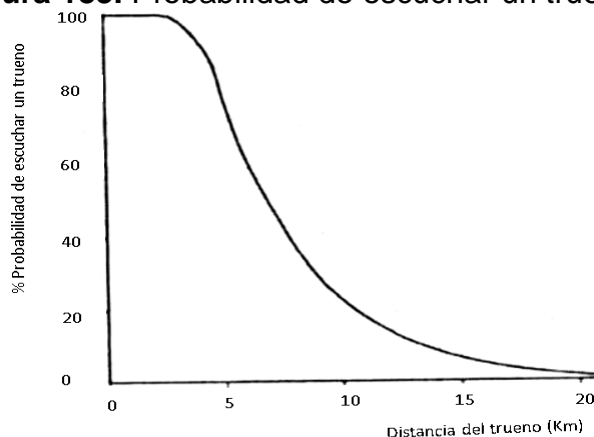
$$distancia_{impacto\ rayo} = velocidad\ del\ sonido\ en\ el\ lugar * \Delta t \quad Ec. 68$$

Teniendo la distancia de impacto se procede a determinar la torre de impacto, esto con el valor de distancias entre torres de la línea:

$$torre_{impactada} = \frac{distancia_{impacto\ rayo}}{separacion\ entre\ torres} \quad Ec. 69$$

El valor de la torre impactada puede ser decimal, este dato se puede aplicar en las ecuaciones de factores de corrección de armónicos y de amplitud.

Figura 183. Probabilidad de escuchar un trueno



Fuente: adaptada de [1]

En la Figura anterior se puede observar la probabilidad de que un observador pueda oír un trueno dependiendo la distancia según [42], en este caso la curva nos indica que un observador ubicado a una distancia de 10km tiene una probabilidad aproximada de un 23% de escuchar el trueno, por tal razón con un equipo en vez de un observador puede aumentar esta probabilidad, ya que el equipo estará el 100% del tiempo registrando valores, más adelante se verán estas ventajas de usar un equipo para medir sonido.

Como referencia de medición de truenos se tiene recientemente artículos presentador por J. Bodhika, Mahendra Fernando and Vernon Cooray, usando una tasa de muestreo de 100 kS/s [43]. Teniendo los anteriores artículos como referencia, se puede decir que la medición del tiempo diferencia de sonido entre dos sensores ubicados cerca es viable de hacer, por lo cual, se puede decir que el tiempo de diferencia entre los sensores a usar en este trabajo para la medición del sonido es de 433,5μs, este dato aparece teniendo en cuenta que la diferencia entre los sensores es de 15 cm, velocidad del sonido a usar es de 346,16m/s la más alta en Colombia dada en la Figura 180. Por ende, el tiempo que existe en medir el sonido entre ambos sensores es de 433,5μs y se podría medir con facilidad esta diferencia y determinar la dirección de impacto en la línea de transmisión.

6. Ubicación del dispositivo de medición en la torre de transmisión y consideraciones a tener en cuenta en este lugar de instalación de la torre

La ubicación del dispositivo de medida de corriente y de sonido se establecerá en la parte inferior de la torre en una de las patas como lo muestra la Figura 184.



Figura 184. Ubicación del equipo de medida en la torre de transmisión

La ubicación se estableció en ese lugar ya que más arriba no se tiene el permiso para la instalación, adicionalmente por seguridad es más fácil su instalación en ese punto bajo, otro punto a favor que tiene este lugar de instalación es la facilidad para realizar mantenimiento o cambio del equipo. Una imagen real donde se muestran las patas se muestra a continuación:



Figura 185. Lugar de instalación en la torre de transmisión

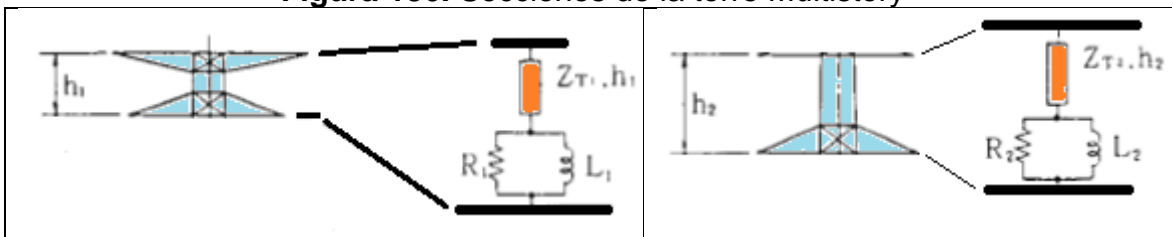
Teniendo en cuenta el lugar de instalación del equipo de medida en la torre de transmisión se tienen las siguientes consideraciones para poder usar los factores de corrección de armónicos y de amplitud, adicionalmente de seguridad:

6.1. Comportamiento de la corriente en la torre a realizar la medición

Hasta el momento se ha aplicado modelos y se ha manejado una única corriente por la torre de transmisión como lo indica el modelo de Ishi, pero para el caso de este trabajo lo anterior funciona como referencia ya que el equipo no va a estar alrededor de toda la torre sino alrededor de una pata de la torre, por tal motivo se plantea un modelo partiendo del presentado por Ishi para determinar la corriente que pasa por cada pata de las cuatro que tienen las torres de transmisión. Inicialmente y por teoría de circuitos se asumiría que la corriente que llega a cada pata de la torre debe ser la misma, es decir $I_{pata} = I_{total}/4$ [A], lo cual se tratará de modelar de la siguiente manera:

Para la modelación de la torre de transmisión se tomará el modelo Multistory como referencia ya que se partirá de niveles en la torre,

Figura 186. Secciones de la torre Multistory



En el dibujo de la izquierda se ve la parte superior de la torre donde están los dos cables de guarda, en la parte derecha una cruceta de conductores.

Para cada caso o nivel de la torre se tiene una impedancia de sobretensión y una resistencia con una inductancia en paralelo como ya se había visto en el capítulo 2.

El primer paso es seguir tomando la torre por partes, es decir por niveles o pisos como lo hace el modelo de Ishi, así como la Figura 186, teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

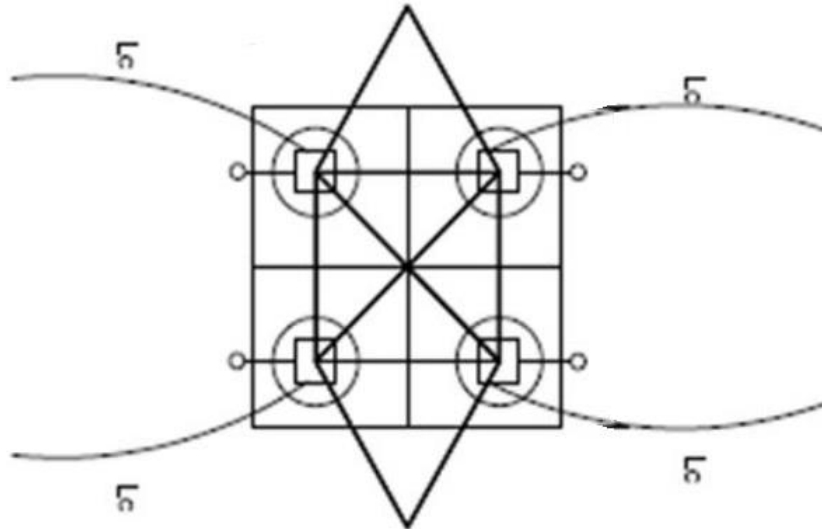
- El nivel a tener en cuenta el nivel más cercano al piso, donde la corriente viene en 4 puntos “4 patas”. Para lo cual llamaremos pata al conjunto de elementos metálicos presentados en la figura 187.
- Se analizará ese último nivel como si fuera un circuito paralelo compuesto de 4 patas
- La corriente llega a tierra en 4 puntos, en este punto entre la torre y la tierra se asumirá la tierra como un solo punto y con valor conocido, aunque el sistema de puesta a tierra de una torre es como se muestra en la figura 188

Figura 187. Pata de una torre



La pata de la torre está compuesta de varios elementos metálicos, cada uno de estos elementos son en forma de ángulo o “L”, unidos entre sí para dar mayor rigidez mecánica a la estructura.

Figura 188. Esquema de sistema de puesta a tierra para una torre de transmisión

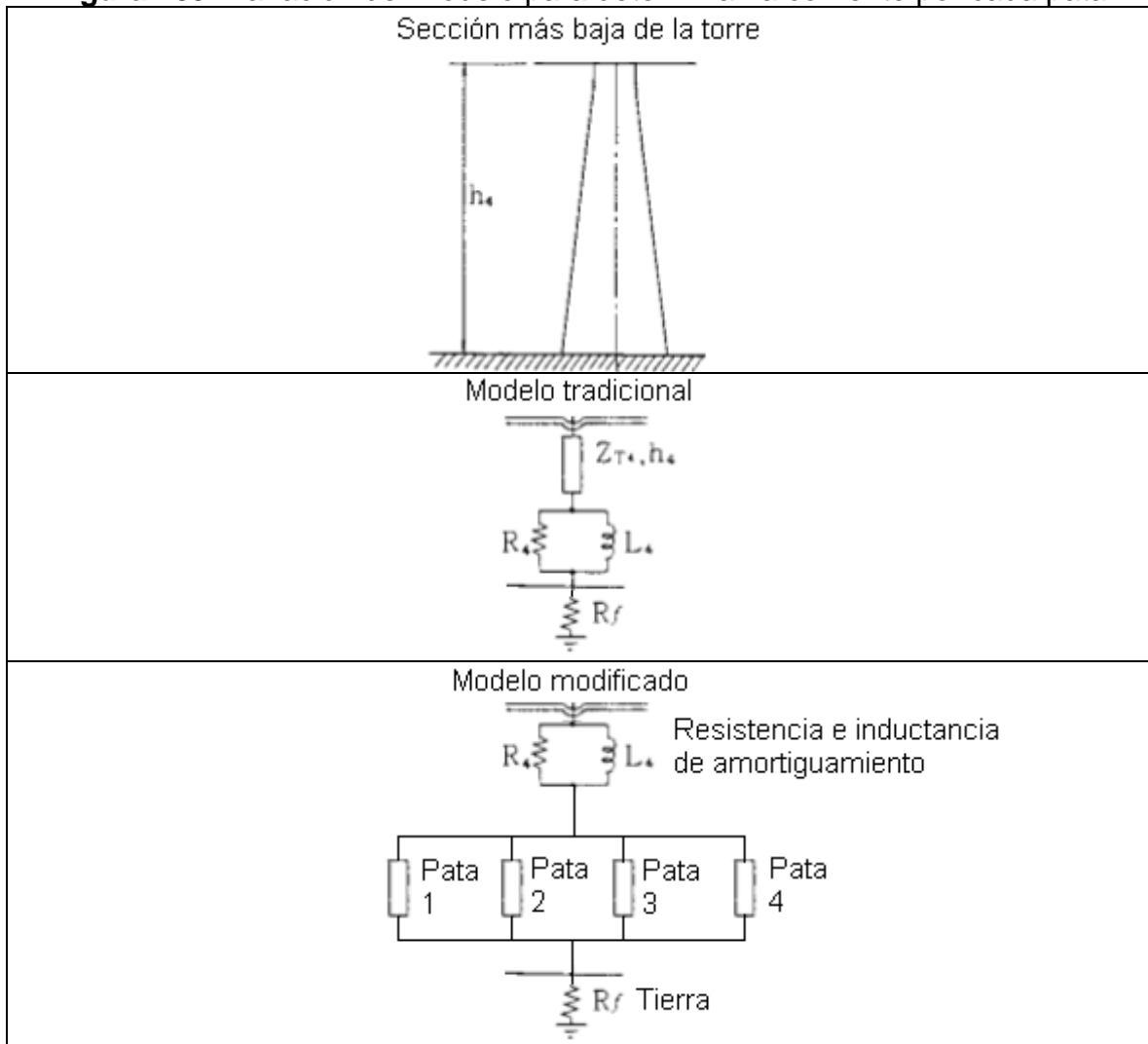


Fuente: Modelamiento y estandarización del sistema de puesta a tierra para líneas de transmisión a 110kV [44]

La malla de puesta a tierra está compuesta generalmente de un cuadrado que rodea la torre, un anillo que rodea cada pata de la torre, bajante por cada para y sus respectivos contrapesos si se llegaran a necesitar por cuestiones de control de la resistencia de puesta a tierra.

Para la modelización de las patas de la torre se aplicará teoría de circuitos para determinar el valor de cada pata partiendo de los valores hallados de impedancias de sobretensión del modelo Multistory, asumiendo una única componente de amortiguamiento (resistencia - inductancia).

Figura 189. Variación del modelo para determinar la corriente por cada pata



Aplicando lo siguiente se tiene:

$$Z_{equi} = Z_{Tx} * h_x$$

$$V_{pata1} = V_{pata2} = V_{pata3} = V_{pata4} = V$$

$$I_T = I_1 + I_2 + I_3 + I_4$$

$$I_T = \frac{V_{pata1}}{Z_1} + \frac{V_{pata2}}{Z_2} + \frac{V_{pata3}}{Z_3} + \frac{V_{pata4}}{Z_4}$$

$$I_T = \frac{V}{Z_1} + \frac{V}{Z_2} + \frac{V}{Z_3} + \frac{V}{Z_4}$$

$$I_T = V \left(\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} + \frac{1}{Z_4} \right)$$

$$V = I * Z$$

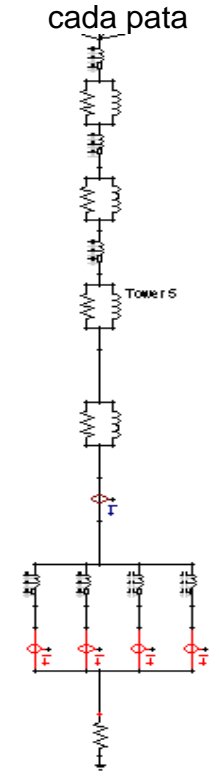
$$V = I * \left(\frac{1}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} + \frac{1}{Z_4}} \right)$$

$$\frac{1}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} + \frac{1}{Z_4}} = Z_{Tx} * h_x$$

$$Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z_4 = Z_{pata}$$

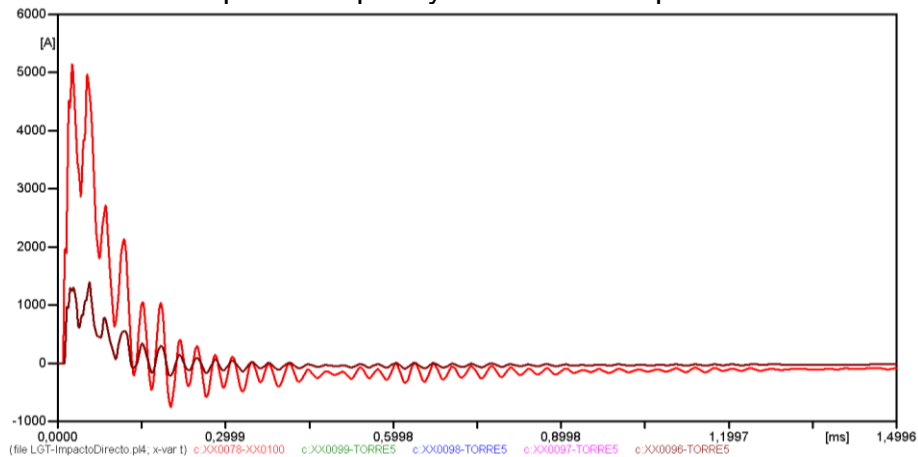
$$Z_{pata} = 4 * Z_{Tx} * h_x \quad \text{Ec. 70}$$

Figura 190. Torre de transmisión con modificación para determinar la corriente por cada pata



Realizando la simulación con la modificación en la torre 5 de transmisión para observar la corriente por cada pata se tiene los siguientes resultados:

Figura 191. Corriente por cada pata y corriente total por la torre de transmisión



Observando la gráfica anterior se puede observar que la corriente por cada una de las patas tiene la misma forma y magnitud, por tal razón se puede concluir que:

$$I_{torre} = I_{medida\ por\ pata} * 4 \quad Ec. 71$$

Para el análisis y la aplicación de los factores de corrección de armónicos y amplitud en el tiempo se deben aplicar a la corriente de la torre calculada en la ecuación 71, para así encontrar la corriente total de impacto.

Si se quisiera hacer un modelo más detallado del problema se puede hacer, pero el resultado puede ser equivalente, ya que las corrientes por las secciones horizontales son muy pequeñas respecto a las verticales, por tal motivo se puede simplificar a solo componentes verticales como el modelo Multistory, para confirmar lo anterior mente dicho se muestra el siguiente modelo y las respectivas corrientes:

Figura 192. Corrientes por diferentes lugares de la torre teniendo en cuenta las componentes verticales y horizontales

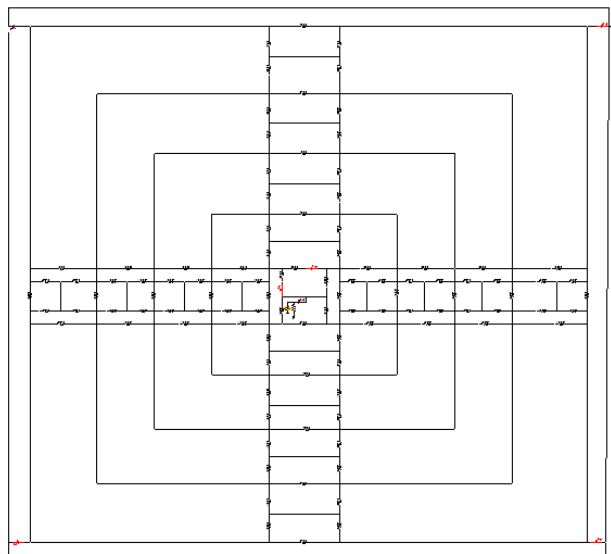
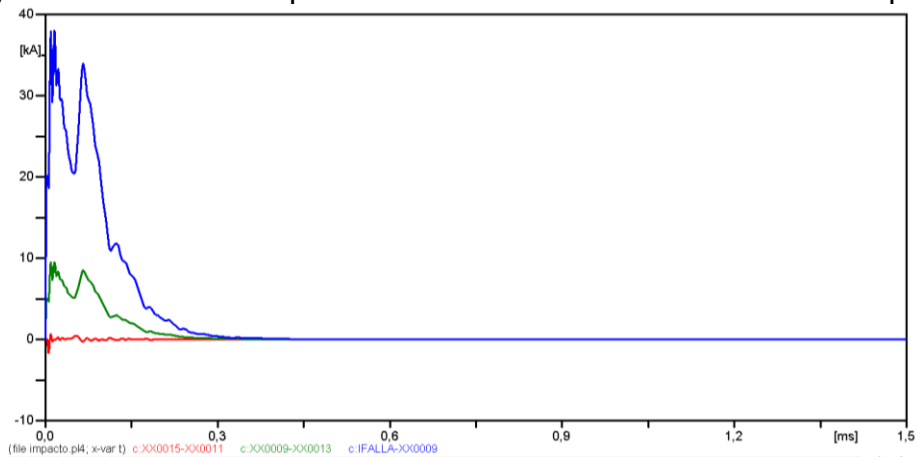


Figura 193. Corrientes por la torre de transmisión con modelo ampliado



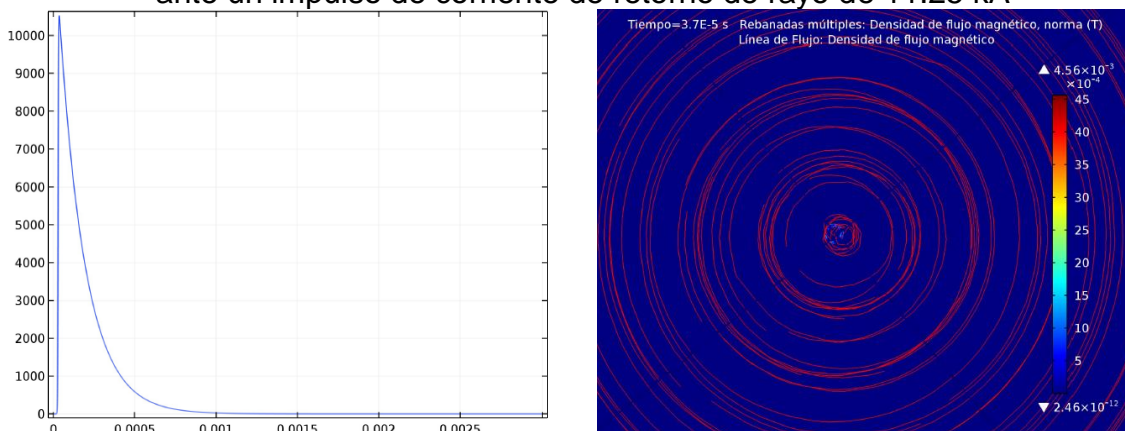
Curva azul es la corriente total, curva verde es la corriente por la pata, curva roja es la corriente por la componente horizontal más baja

La corriente que va por la componente horizontal más baja de la torre es muy pequeña respecto a la que baja por la pata, el porcentaje de la corriente horizontal respecto a la que baja por la pata es de 5.1%, por ende el modelo simplificado sin las componentes horizontales es adecuado para este trabajo, el modelo Multistory con la modificación del ultimo nivel donde están ubicadas las patas aplica de buena forma para este trabajo, por tal motivo siempre se va a aplicar la Ecuación 71.

6.2. Campo magnético en conductores, caso especial (Ángulos de la torre de transmisión)

Como se planea medir una corriente, por ende, hay que tener en cuenta el campo magnético que se produce, para el caso de este trabajo la corriente tiene es una onda de impulso tipo rayo, por tal razón se realiza simulaciones en el software COMSOL. Para tener un punto de referencia se hará una simulación de una corriente tipo rayo atravesando un conductor cilíndrico tradicional y luego se tomará un conductor en forma de ángulo o en “L”. Para el primer caso se tiene:

Figura 194. Densidad de campo magnético B asociado a un conductor cilíndrico ante un impulso de corriente de retorno de rayo de 11.25 kA



En el caso del conductor cilíndrico se tiene que el comportamiento del campo magnético era como se preveía, un comportamiento circular alrededor del conductor, cuando la magnitud de la corriente que lo atraviesa es de 11.25kA el campo magnético máximo es de $4.56^{-3}T$. Para el caso de conductores en forma de ángulo o “L” se tiene el siguiente comportamiento:

Figura 195. Densidad de campo magnético B asociado a una corriente de retorno de rayo de 1.25 kA en el ángulo de la pata de la torre

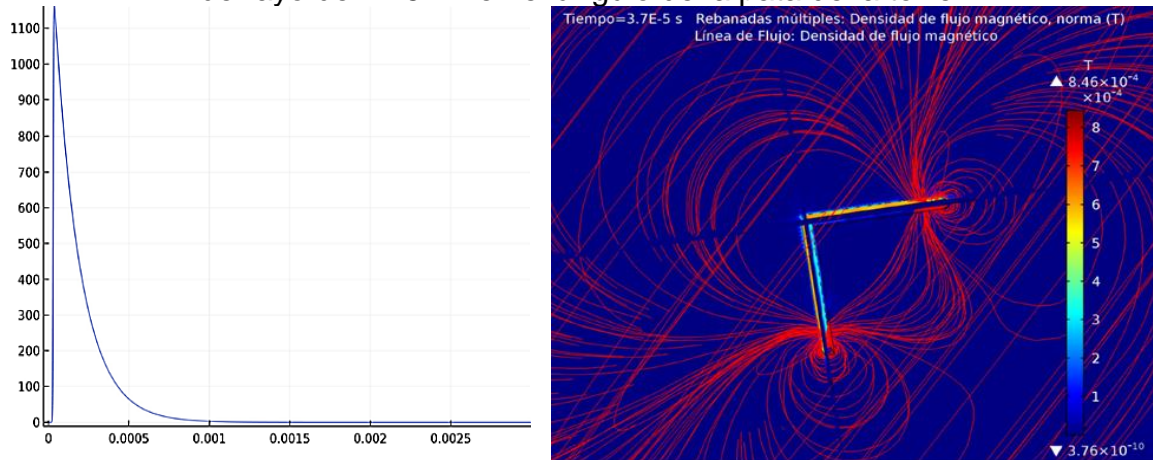
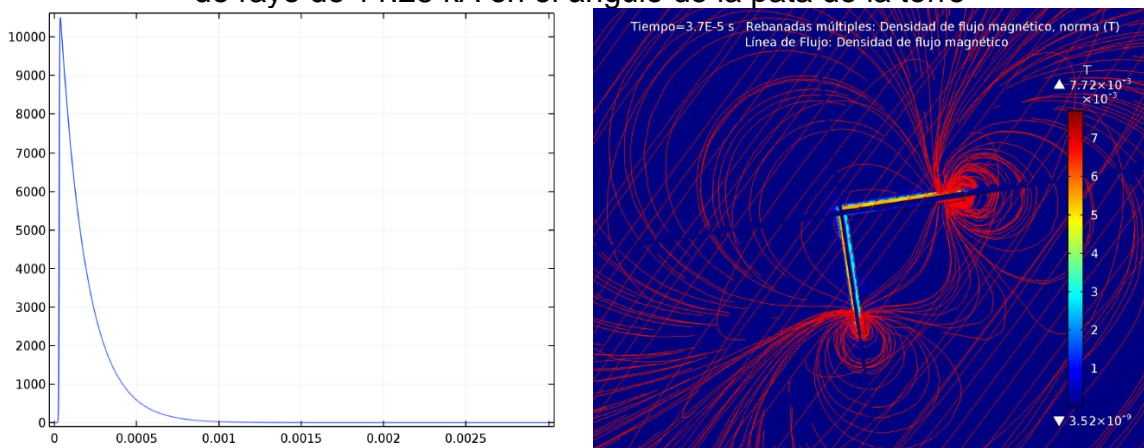


Figura 196. Densidad de campo magnético B asociado a una corriente de retorno de rayo de 11.25 kA en el ángulo de la pata de la torre



El comportamiento del campo magnético cuando la corriente atraviesa un conductor en forma de ángulo o “L” presenta un se presenta de forma diferente por la geometría del conductor, este comportamiento se muestra en las Figuras 195 y 196, en cuanto a las magnitudes presentadas se puede decir que cuando una corriente de 11.25kA pasa por el conductor en L se tiene una máxima magnitud de campo magnético de $7.72^{-3}T$ y cuando la corriente es de 1.25kA es de $8.46^{-3}T$. Cuando pasa la misma corriente por ambos conductores cilíndrico y en ángulo, se puede decir que son valores cercanos de campo magnético, solo que las puntas en el caso del ángulo hacen que exista una mayor concentración de campo magnético en ellas “puntos calientes o puntos de concentración de campo magnético”

7. Criterio con el cual se determina la ubicación idónea para realizar la medición directa (escoger la torre adecuada para la instalación del equipo de medida)

La metodología aplicada para determinar la ubicación de la torre se debe a la variación espacial y temporal del rayo, buscando encontrar un lugar que cumpla con los requisitos de seguridad, forma fácil de acceso y una densidad de descargas a tierra alta. En esta medida, por medio de la investigación del grupo PAAS de la Universidad Nacional de Colombia se identificaron tres áreas con la mayor actividad de rayo en Colombia que se encuentran ubicadas entre Antioquia-Caldas, Antioquia-Córdoba y Cesar-Magdalena [45]. Si se quiere observar con mayor detenimiento los lugares en Colombia con mayor actividad eléctrica atmosférica en el país se puede ver el mapa de densidad de descargas a tierra mostrado en la Figura 4, en el cual se pueden ver los lugares con mayor densidad de descargas a tierra en el país, hay que tener claro que este valor puede variar en espacios relativamente cortos, si se analiza el DDT para la ciudad de Bogotá se puede observar que este varía entre diferentes sectores de la ciudad, donde al sur presenta valores bajos y en el norte de esta presenta valores más elevados, por eso es muy importante saber la ubicación exacta del lugar a instalar el equipo.

Para encontrar el lugar adecuado no solo basta con mirar el DDT, también hay que observar donde existen torres de transmisión en la actualidad, para eso hay que mirar las líneas de transmisión existentes en el país, esta información se puede encontrar en los mapas presentados en la página WEB de la Unidad de Planeación Minero Energética "UPME", con los mapas de DDT y de líneas de transmisión existentes se puede escoger un lugar adecuado para la instalación del equipo.

Ahora, para determinar una torre en específico, no se tiene argumento como tal, la única condición es que la diferencia entre la torre impactada la torre de medición sean 7 entre las dos, teniendo como ejemplo, si el impacto es en la torre 1 y la medición en la torre 8, la diferencia sería $8-1=7$, con lo cual el porcentaje de corriente que baja por esa torre es del 3% por ende, el porcentaje de la corriente que va a baja por una pata es de 0,75%, cuando se aleja más, la corriente que se va a medir por la pata sería muy baja, por ejemplo si hay un impacto de rayo de magnitud de 10000A entonces la corriente que bajaría por una pata de la torre 8 sería 75A, por ende, 8 torres de diferencia entre

Otro punto a tener en cuenta es la época del año en la cual se espera un mayor número de impacto en las estructuras, por ejemplo, para la zona andina de Colombia los picos de actividad eléctrica atmosférica se registran en los meses de abril y octubre, donde estos tienen relación directa con los a los valores altos de precipitación en esas fechas.

A continuación, se presentan los mapas del sistema nacional de transmisión en Colombia y el del sistema interconectado nacional presentados por la UPME:

Figura 197. Sistema nacional de transmisión en Colombia actual UPME 2016



Fuente: Unidad de planeación minero-energética UPME [46]
Línea fucsia 500kV, Línea verde 220kV

Figura 198. Sistema interconectado nacional SIN actual 2016 UPME



Fuente: Unidad de planeación minero-energética UPME [47]
 Línea fucsia 500 kV, Línea verde 220 kV, Línea café 110 – 115 kV, Línea naranja 66 kV

8. Diseño de la bobina de Rogowski

Para el diseño de la bobina de Rogowski se entrará a observar los diferentes tipos de bobina que existen, con lo cual se determinara el tipo de bobina a usar para este trabajo. Luego de tener seleccionado el tipo de bobina de Rogowski a usar, se procede al cálculo teórico de la bobina teniendo unas consideraciones de diseño, luego de realizado el diseño se realizar el montaje físico de la bobina para así conseguir como resultado final la bobina con la cual se planea medir la corriente de retorno de rayo.

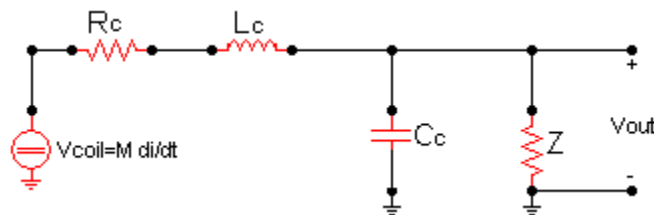
8.1. Clases de bobina de Rogowski

Cuando se habla de la bobina de Rogowski, se puede decir que esta cuenta con diferentes modelos de construcción, los cuales se mencionan a continuación:

8.1.1. Bobina de Rogowski (Parámetros concentrados)

Este modelo presentado para hacer la bobina de Rogowski, se puede considerar un modelo sencillo, donde retiene en el modelo una resistencia propia de la bobina, una inductancia, una capacitancia [48]. El circuito que describió con anterioridad se muestra a continuación:

Figura 199. Bobina de Rogowski, modelo de parámetros concentrados



Incluyendo la impedancia Z que se ubica a la salida del circuito, da como resultado la siguiente función de transferencia $tf = V_{out}/V_{in}$:

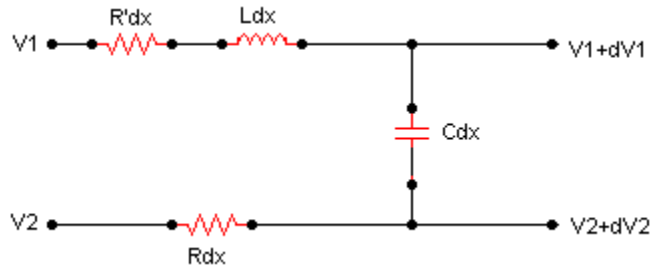
$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{Z}{L_c Z C_c S^2 + (L_c + R_c Z C_c) S + R_c + Z} \quad \text{Ec. 72}$$

8.1.2. Bobina de Rogowski (Parámetros distribuidos)

Este segundo modelo para hacer una bobina de Rogowski propone hacer la bobina bajo un modelo de parámetros concentrados como los vistos en líneas, para este caso al igual que en las líneas la bobina de conforma de varias longitudes infinitesimales que se sumadas tienen como resultado el comportamiento total de la bobina. El modelo al igual que en parámetros concentrados cuenta con un elemento diferencial de resistencia debido a la resistencia propia de la bobina, un elemento diferencial de inductancia debido a la bobina, un elemento diferencial de capacitancia entre espiras y un elemento diferencial de resistencia debido al alambre que tiene como retorno dentro de la bobina, este método fue desarrollado

por Cooper [49]. En la siguiente imagen se puede ver el circuito que representa el modelo de parámetros distribuidos:

Figura 200. Bobina de Rogowski, modelo de parámetros distribuidos



Realizando la función de transferencia del circuito anterior $tf = V_{out}/V_{in}$ se tiene como resultado lo siguiente:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{l} \frac{\frac{Z}{sL_d + R_d}}{1 + \frac{Z}{Z_0} \frac{1 + e^{-2l\gamma}}{1 - e^{-2l\gamma}}} \quad Ec. 73$$

Donde l es la longitud de la bobina, Z_0 y γ son:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{sL_d + R_d}{sC_d}} \quad Ec. 74$$

$$\gamma = \sqrt{sC_d (sL_d + R_d)} \quad Ec. 75$$

8.1.3. Bobina de Rogowski (Auto-integradora)

El modelo de la bobina auto integradora como su nombre lo dice, se caracteriza por integrar la señal de tensión que obtiene de la inductancia propia de la bobina y de la impedancia de salida [49]. Ahora, considerando que se está integrando la tensión de salida de la bobina y de la impedancia de salida en conjunto, se puede hacer la siguiente consideración, que la impedancia de salida Z sea mucho mejor que la impedancia de la bobina Z_0 , la ecuación 73 tiene como resultado:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{l} \frac{Z}{sL_d + R_d} \quad Ec. 76$$

Como es de esperar, este modelo integra si la constante de tiempo correspondiente al sistema τ , es mayor que el pulso de corriente que se quiere medir.

$$\tau = \frac{L_d}{R_d} \quad Ec. 77$$

Para el caso que se está analizando, R_d puede ser despreciable respecto a sL_d por lo tanto se tiene:

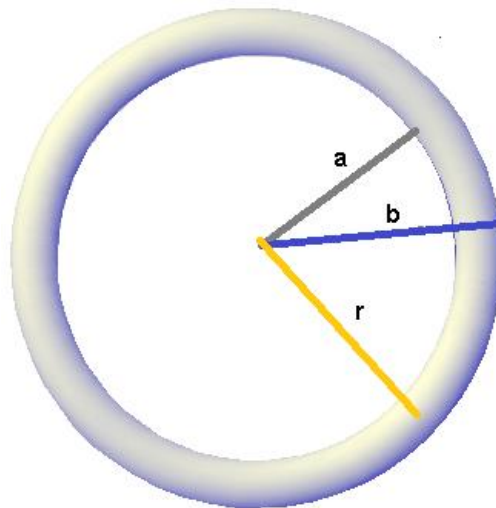
$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{l} \frac{Z}{sL_d} \quad Ec. 78$$

Adicionalmente, si asumimos una impedancia Z netamente resistiva, la bobina tendría un comportamiento de integrador, por tal razón para medir corrientes con una alta frecuencia, no sería necesario usar un circuito diferente a la bobina. Ahora, si en el modelo de parámetros concentrados se usa una impedancia de salida Z muy pequeña, el modelo tendrá un comportamiento similar a este, por tal motivo la bobina integrará en un rango de frecuencias determinado [49].

8.2. Cálculo teórico de la bobina de Rogowski

Para el cálculo de la bobina se escogió el modelo de parámetros concentrados en su adecuación para un modelo de bobina auto-integradora, este modelo se explicará de manera detallada y se explicarán las ventajas que se tienen al usarlo. A continuación, se mostrará el cálculo para un núcleo de sección transversal cuadrada y circular:

Figura 201. Núcleo bobina de Rogowski



Función de transferencia

En la Figura 199 se tiene el circuito equivalente de parámetros concentrados de la bobina de Rogowski, la función de transferencia para este circuito se realiza a continuación:

$$FT = \frac{V_{salida}}{V_{entrada}}$$

$$-V_{sal} + RI_1 + LSI_1 + \frac{1}{SC}(I_1 - I_2) = 0$$

$$-V_{sal} + RI_1 + LSI_1 + \frac{1}{SC}I_1 - \frac{1}{SC}I_2 = 0$$

$$-V_{sal} + I_1 \left(R + SL + \frac{1}{SC} \right) + I_2 \left(-\frac{1}{SC} \right) = 0 \quad *$$

$$\frac{1}{SC} (I_2 - I_1) + V_Z = 0 \quad **$$

$$I_2 = \frac{V_Z}{Z} \quad ***$$

*** en **

$$\frac{1}{SC} \frac{V_Z}{Z} - \frac{1}{SC} I_1 + V_Z = 0$$

$$\frac{1}{SC} \frac{V_Z}{Z} + V_Z = \frac{1}{SC} I_1$$

$$I_1 = \frac{V_Z}{Z} + SC V_Z \quad ****$$

**** "y" *** "en" *

$$V_{sal} + \left(\frac{V_Z}{Z} + SC V_Z \right) \left(R + SL + \frac{1}{SC} \right) + \frac{V_Z}{Z} \left(-\frac{1}{SC} \right) = 0$$

$$V_{sal} = \frac{R V_Z}{Z} + \frac{V_Z}{Z} LS + \frac{V_Z}{Z} \frac{1}{SC} + V_Z SC R + V_Z SC LS + V_Z SC \frac{1}{SC} + \frac{V_Z}{Z} \left(-\frac{1}{SC} \right)$$

$$\frac{V_Z}{V_{sal}} = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{Z}{L_c Z C_c S^2 + (L_c + R_c Z C_c) S + R_c + Z}$$

La función de transferencia para la bobina de Rogowski en el modelo de parámetros concentrados es la siguiente

$$\frac{V_{salida}}{V_{entrada}} = \frac{Z}{L_c Z C_c S^2 + (L_c + R_c Z C_c) S + R_c + Z}$$

Frecuencia de resonancia

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L C}}$$

Impedancia

$$Z = \sqrt{R_d^2 + (\omega L)^2}$$

Resistencia del alambre

$R \rightarrow$ Resistencia en función de la resistividad, área y longitud

$$R = \frac{\rho L}{A}$$

$R_d \rightarrow$ Resistencia del alambre del devanado

$$R_d = \frac{\rho_d L_d}{A_d}$$

$\rho_d \rightarrow$ Resistividad del alambre del devanado

$L_d \rightarrow$ Longitud del alambre del devanado

$A_d \rightarrow$ Área de la sección transversal del alambre del devanado

$$R_d = \frac{\rho_d L_d}{\pi r_d^2}$$

$r_d \rightarrow$ Radio de la sección transversal del alambre del devanado

Resistencia del alambre, cuando la sección trasversal del núcleo es cuadrada

$$R_d = \frac{\rho_d 4 h N}{\pi r_d^2}$$

$N \rightarrow$ Número de espiras

$h \rightarrow$ Altura del nucleo cuadrado

Resistencia del alambre, cuando la sección trasversal del núcleo es circular

$$R_d = \frac{\rho_d N 2 r_n}{r_d^2}$$

$r_n \rightarrow$ Radio del nucleo

$N \rightarrow$ Número de espiras

Cálculos de inductancia, capacitancia, inductancia mutua y tensión inducida

$$\oint_c B \cdot dl = \mu_0 I_{enc}$$

$$\oint_c |B| |dl| \cos(\theta) = \mu_0 I_{enc}$$

$$\oint_c |B| |dl| = \mu_0 I_{enc}$$

$$B 2 \pi r = \mu_0 I_{enc}$$

$$B = \frac{\mu_0 I_{enc}}{2 \pi r}$$

$$I_{enc} = N * i$$

$N =$ numero de vueltas o espiras

$$B = \frac{\mu_0 N i}{2 \pi r}$$

$$\Phi = \int B \cdot dA$$

$$\Phi = \int |B| |dA| \cos(\theta)$$

$$\Phi = \int |B| |dA|$$

$$\Phi = \int \frac{\mu_0 N i}{2 \pi r} dA$$

$A \rightarrow$ Área

$\mu_0 \rightarrow$ Permeabilidad del vacio

$B \rightarrow$ Densidad de flujo magnético

$$\mu_0 = 4 \pi \times 10^{-12} \left[\frac{H}{m} \right]$$

Flujo cuando el núcleo es de sección transversal cuadrada

$$\Phi = \mu_0 N i \int \frac{1}{2 \pi r} dA$$

$$\Phi = \mu_0 N i \int_a^b \frac{1}{2 \pi r} h dr$$

$$\Phi = \frac{\mu_0 N i h}{2 \pi} \int_a^b \frac{1}{r} dr$$

$$\Phi = \frac{\mu_0 N i h}{2 \pi} (\ln(b) - \ln(a))$$

$$\Phi = \frac{\mu_0 N i h}{2 \pi} \left(\ln\left(\frac{b}{a}\right) \right)$$

$$\Phi = \frac{\mu_0 N i h}{2 \pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right)$$

Flujo cuando el núcleo es de sección transversal es circular

$$\begin{aligned}\Phi &= \int B \cdot dA \\ \Phi &= \int \frac{\mu_0 N i}{2 \pi r} \hat{a}_\phi \cdot dA \\ \Phi &= \int \frac{\mu_0 N i}{2 \pi r} \hat{a}_\phi \cdot dr dz \hat{a}_\phi \\ & \quad b, \sqrt{(b-r)(r-a)} \\ \Phi &= \iint_{a, -\sqrt{(b-r)(r-a)} }^{\quad b, \sqrt{(b-r)(r-a)}} \frac{\mu_0 N i}{2 \pi r} dz dr \\ \Phi &= \frac{\mu_0 N i}{\pi} \int_a^b \frac{\sqrt{-r^2 + (a+b)r - ab}}{r} dr \\ \Phi &= \frac{\mu_0 N i (a + b - 2\sqrt{ab})}{2}\end{aligned}$$

Inductancia

$$L = \frac{\Phi N}{i}$$

Inductancia cuando el núcleo es de sección transversal cuadrada

$$\begin{aligned}L &= \frac{\mu_0 N i h}{2 \pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \frac{N}{i} \\ L &= \frac{\mu_0 N^2 h}{2 \pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right)\end{aligned}$$

Inductancia cuando el núcleo es de sección transversal circular

$$\begin{aligned}L &= \frac{\mu_0 N i (a + b - 2\sqrt{ab})}{2} \frac{N}{i} \\ L &= \frac{\mu_0 N^2 (a + b - 2\sqrt{ab})}{2}\end{aligned}$$

Inductancia mutua

$$M_{21} = \frac{\Phi_2}{i_1}$$

$\Phi_2 \rightarrow$ Flujo en el secundario

$i_1 \rightarrow$ Corriente en el primario, corriente que pasa por el conductor a medir

Inductancia mutua cuando el núcleo es de sección transversal cuadrada

$$M_{21} = \frac{\mu_0 N i h}{2 \pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right)$$

$$M_{21} = \frac{\mu_0 N h}{2 \pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right)$$

$$M = \frac{\mu_0 N h}{2 \pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right)$$

Inductancia mutua cuando el núcleo es de sección transversal circular

$$M_{21} = \frac{\mu_0 N i (a + b - 2\sqrt{ab})}{2 i}$$

$$M_{21} = \frac{\mu_0 N i (a + b - 2\sqrt{ab})}{2 i}$$

$$M_{21} = \frac{\mu_0 N (a + b - 2\sqrt{ab})}{2}$$

Tensión inducida

$$V_{ind} = L \frac{di}{dt}$$

$$V_{ind} = - \frac{d\Phi}{dt}$$

$$V_{ind} = - \frac{d}{dt} \left(\int B \cdot ds \right)$$

$$V_{ind} = - \frac{d}{dt} (\mu_0 \bar{H} \bar{ds})$$

$$V_{ind \text{ espira}} = - \mu_0 A \cos(\alpha) \frac{dH}{dt}$$

$$V_{bobina} = \int_0^L V_{ind \text{ espira}} N dl$$

$$V_{bobina} = -\mu_0 A N \int_0^L \frac{dH}{dt} \cos(\alpha) dl$$

$$V_{bobina} = -\mu_0 A N \frac{d}{dt} \int_0^L dH \cos(\alpha) dl$$

$$V_{bobina} = -\mu_0 A N \frac{di}{dt}$$

Tensión inducida cuando el núcleo es de sección transversal cuadrada

$$A = \frac{h}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right)$$

$$V_{bobina} = -\mu_0 \frac{h}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right) N \frac{di}{dt}$$

$$V_{bobina} = -\frac{\mu_0 N h}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \frac{di}{dt}$$

$$M = \frac{\mu_0 N h}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right)$$

$$V_{bobina} = -M \frac{di}{dt}$$

Tensión inducida cuando el núcleo es de sección transversal circular

$$V_{bobina} = -M \frac{di}{dt}$$

$$V_{bobina} = -\frac{\mu_0 N (a + b - 2\sqrt{ab})}{2} \frac{di}{dt}$$

Capacitancia

$$\int E \cdot ds = \frac{q}{\epsilon_0}$$

$$\int |E| |ds| \cos(\theta) = \frac{q}{\epsilon_0}$$

$$\int |E| |ds| = \frac{q}{\epsilon_0}$$

$$E S = \frac{q}{\epsilon_0}$$

$$E = \frac{q}{\epsilon_0 S}$$

$$S = 2 \pi r L$$

$$E = \frac{q}{\epsilon_0 2 \pi r L}$$

$$r = \frac{b+a}{2}$$

$$L = 2 \pi r$$

$$L = 2 \pi \left(\frac{b+a}{2} \right)$$

$$L = \pi (b+a)$$

$$E = \frac{q}{\epsilon_0 2 \pi r (\pi (b+a))}$$

$$E = \frac{q}{2 \pi^2 \epsilon_0 r (b+a)}$$

$$C = \frac{q}{\Delta V}$$

$$r_1 = \frac{b-a}{2}$$

$$\Delta V = \int_{r_1}^r E \cdot dr$$

$$\Delta V = \int_{r_1}^r |E| |dr| \cos(\theta)$$

$$\Delta V = \int_{r_1}^r |E| |dr|$$

$$\Delta V = \frac{q}{2 \pi^2 \epsilon_0 (b+a)} \int_{r_1}^r \frac{1}{r} dr$$

$$\Delta V = \frac{q}{2 \pi^2 \epsilon_0 (b+a)} (\ln(r) - \ln(r_1))$$

$$\Delta V = \frac{q}{2 \pi^2 \epsilon_0 (b+a)} \ln\left(\frac{r}{r_1}\right)$$

$$r = \frac{b+a}{2}$$

$$r_1 = \frac{b-a}{2}$$

$$\Delta V = \frac{q}{2 \pi^2 \varepsilon_0 (b + a)} \ln \left(\frac{\frac{b+a}{2}}{\frac{b-a}{2}} \right)$$

$$\Delta V = \frac{q}{2 \pi^2 \varepsilon_0 (b + a)} \ln \left(\frac{b+a}{b-a} \right)$$

$$C = \frac{q}{\Delta V}$$

$$C = \frac{q}{\frac{q}{2 \pi^2 \varepsilon_0 (b + a)} \ln \left(\frac{b+a}{b-a} \right)}$$

$$C = \frac{2 \pi^2 \varepsilon_0 (b + a)}{\ln \left(\frac{b+a}{b-a} \right)}$$

Esta ecuación de capacitancia tiene en cuenta el fenómeno del hilo de retorno de la bobina de Rogowski.

Resumen de ecuaciones para el modelo de parámetros concentrados cuando el área de la sección transversal del núcleo es cuadrada:

$$R_d = \frac{\rho_d L_d}{\pi r_d^2} \quad (85)$$

$$L = \frac{\mu_0 N^2 h}{2 \pi} \ln \left(\frac{b}{a} \right) \quad (86)$$

$$C = \frac{2 \pi^2 \varepsilon_0 (b + a)}{\ln \left(\frac{b+a}{b-a} \right)} \quad (87)$$

$$M = \frac{\mu_0 N h}{2 \pi} \ln \left(\frac{b}{a} \right) \quad (88)$$

$$V_{bobina} = -M \frac{di}{dt} \quad (89)$$

$$\frac{V_{salida}}{V_{entrada}} = \frac{Z}{L_c Z C_c S^2 + (L_c + R_c Z C_c) S + R_c + Z} \quad (90)$$

$\rho_d \rightarrow$ Resistividad del alambre del devanado

$L_d \rightarrow$ Longitud del alambre del devanado

$r_d \rightarrow$ Radio de la sección transversal del alambre del devanado

$N \rightarrow$ Número de espiras de la bobina

$a \rightarrow$ Radio menor de la bobina

$b \rightarrow$ Radio mayor de la bobina

$h \rightarrow$ Altura de la bobina

$\mu_0 \rightarrow$ Permeabilidad del vacío

$\varepsilon_0 \rightarrow$ Permitividad del vacío

$Z \rightarrow$ Impedancia de salida

Resumen de ecuaciones para el modelo de parámetros concentrados cuando el área de la sección transversal del núcleo es circular:

$$R_d = \frac{\rho_d 4 h N}{\pi r_d^2}$$

$$L = \frac{\mu_0 N^2 (a + b - 2\sqrt{ab})}{2}$$

$$C = \frac{2 \pi^2 \varepsilon_0 (b + a)}{\ln\left(\frac{b + a}{b - a}\right)}$$

$$M = \frac{\mu_0 N (a + b - 2\sqrt{ab})}{2}$$

$$V_{bobina} = - \frac{\mu_0 N (a + b - 2\sqrt{ab})}{2} \frac{di}{dt}$$

$$\frac{V_{salida}}{V_{entrada}} = \frac{Z}{L_c Z C_c S^2 + (L_c + R_c Z C_c) S + R_c + Z}$$

$\rho_d \rightarrow$ Resistividad del alambre del devanado

$r_d \rightarrow$ Radio de la sección transversal del alambre del devanado

$N \rightarrow$ Número de espiras de la bobina

$a \rightarrow$ Radio menor de la bobina

$b \rightarrow$ Radio mayor de la bobina

$h \rightarrow$ Altura de la bobina

$\mu_0 \rightarrow$ Permeabilidad del vacío

$\varepsilon_0 \rightarrow$ Permitividad del vacío

$Z \rightarrow$ Impedancia de salida

8.3. Diseño de la Bobina de Rogowski

Se plantea hacer el diseño de la bobina con una sola capa, esto con el fin de tener una mejor respuesta dinámica, este aspecto de diseño permite que la bobina de Rogowski pueda tener una respuesta adecuada ante un impulso tipo rayo. Respecto a los valores de R, L, C y Z, se va a usar un valor pequeño de impedancia de salida Z (resistencia pequeña), este valor debe ser muy pequeño respecto a la impedancia característica propia de la bobina, con el fin de que la misma bobina tenga un rango de frecuencias en la cual sea integradora. Adelante se dará una aclaración de los valores de L, C y R y cuál es su comportamiento dependiendo el valor, sus consecuencias y sus ventajas.

8.3.1. Parámetros de diseño de la bobina de Rogowski

Para obtener una medida fiable de los parámetros del rayo, se deben tener conocimientos de parámetros como (Valor pico, tiempo de duración, forma de onda, polaridad y descargas subsecuentes) [1]. Se eligen las siguientes magnitudes de referencia para el dispositivo, que se obtienen de mediciones de campo eléctrico o de campo electromagnético y considerando algunas relaciones empíricas y de modelos matemáticos [21] :

Max. Amplitud de corriente máxima de rayo 400 kA

Max. Amplitud de corriente por la torre (12.5%) 50 kA

Max. Amplitud de corriente por una pata de la torre 12.5 kA

Min. Ancho de banda 22 MHz.

Max. Salida de voltaje 18 V

Las bobinas de Rogowski generalmente se han utilizado cuando otros métodos son inadecuados. En realidad, son los métodos ideales de las mediciones de corriente, tienen características más adecuadas que los transformadores y otros dispositivos con núcleo de hierro [21].

8.3.2. Adecuación de la bobina

De acuerdo a las ecuaciones de la Bobina auto-integradora de Rogowski se diseñaron diferentes bobinas de las cuales más adelante se verán los resultados, pero como resultado final se obtuvo una bobina con un alto ancho de banda de 23 MHz, una sensibilidad calculada de $0,76 V/kA$ y una sensibilidad práctica de $1,19 V/kA$. A continuación, se observa el diseño de cada una de las bobinas que se plantearon para este trabajo y en detalle la bobina que se usó finalmente para realizar las mediciones en la torre.

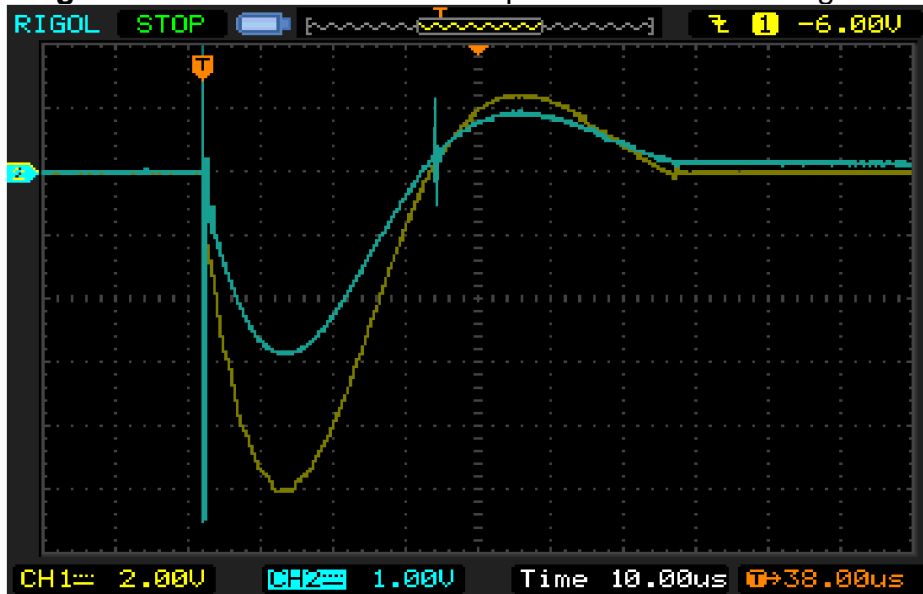
Como la idea del proyecto es usar materiales económicos y fáciles de encontrar, se usó para el primer modelo una manguera de agua de diámetro de 1,27 centímetros y una longitud de 62 centímetros para que pueda cerrar cuando se lleve a la pata de una torre, respecto a la resistencia de salida o impedancia de salida de la bobina

autointegradora de Rogowski se usó una resistencia de 0.1 Ohmios y alambre 16 AWG u un numero de vueltas de 500. Tendiendo como resultado lo siguiente:

Figura 202. Primera Bobina de Rogowski construida



Figura 203. Datos medidos de la primera Bobina de Rogowski



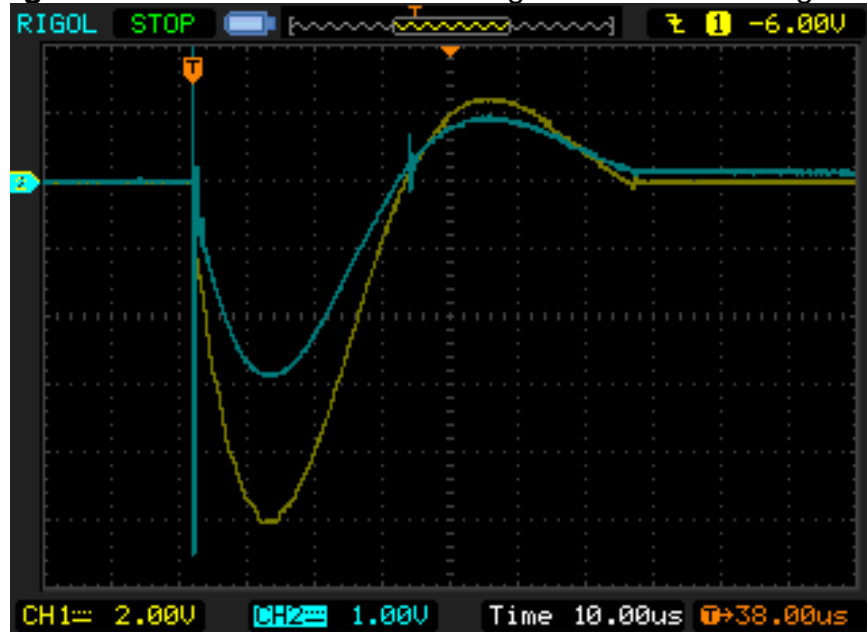
Con la primera bobina construida se tienen unos picos medidos que sobresalen a la onda real, la onda de color azul o la de menor amplitud es la onda medida por la Bobina y la onda amarilla o la onda con mayor amplitud es la medida por la resistencia Shunt.

La segunda bobina también se diseñó con manguera de agua de 1,27 centímetros de diámetro, alambre 16 AWG, longitud de 62 centímetros y se arrolló alambre en toda la longitud de la bobina, la resistencia de salida fue de 0,1 Ohmios.

Figura 204. Segunda Bobina de Rogowski construida



Figura 205. Datos medidos de la segunda bobina de Rogowski



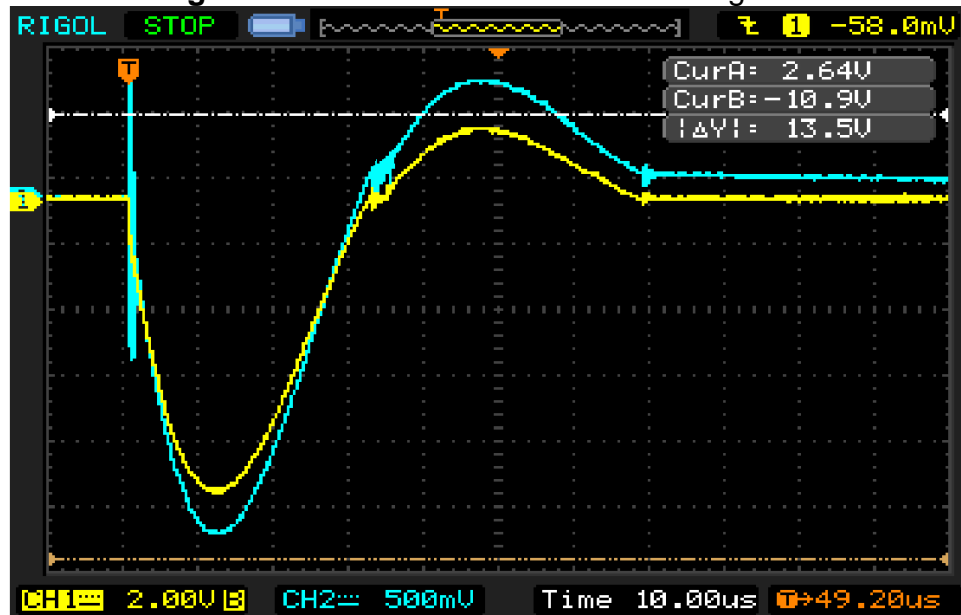
Esta segunda bobina de Rogowski mejoro el comportamiento de la señal, aunque todavía se nota ese sobrepico en algunas partes de la señal, donde la azul es la Bobina y la amarilla la bobina Shunt.

La tercera bobina construida se realizó con la misma manguera de agua usada en las dos anteriores bobinas, pero ahora se cambió el alambre, para este caso se usó alambre 23 y se bobino en toda la longitud de la bobina de 62 centímetros de longitud.

Figura 206. Tercera bobina de Rogowski construida



Figura 207. Datos tercera bobina de Rogowski



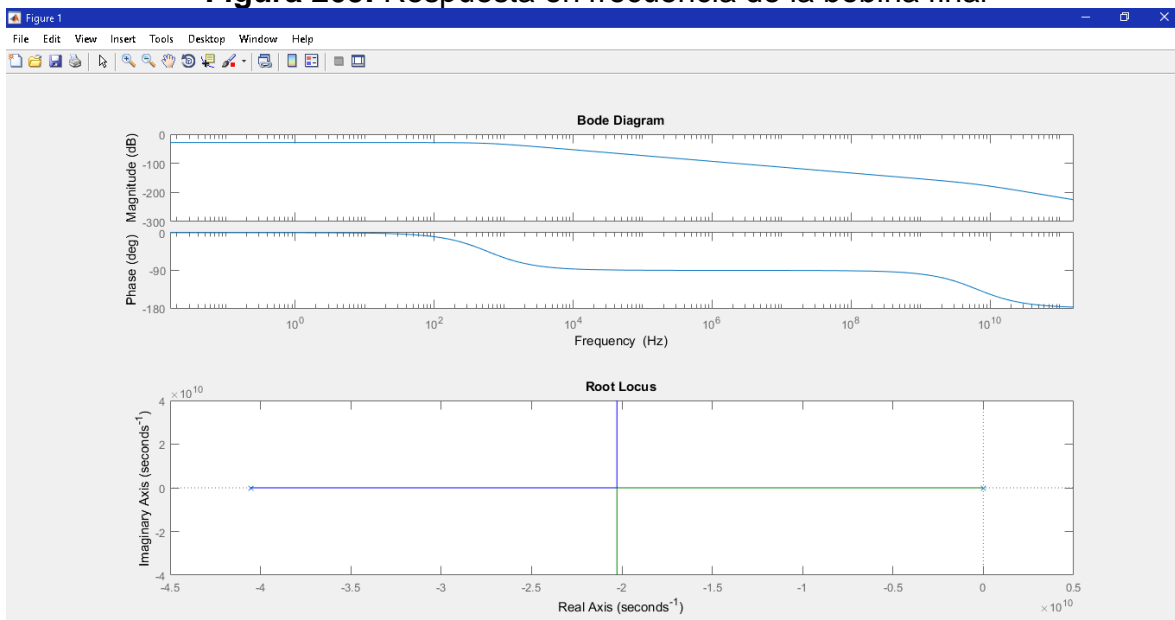
En esta se mejoró aún más el comportamiento de la bobina, pero continua con algunos picos especialmente en los cruces por cero.

Para el diseño final se cambió el núcleo, ahora se usó una miguera de espuma llamada “Ductolon”, la cual tiene un diámetro 3,8 centímetros una longitud de 62 centímetros y el alambre usado fue 24 AWG y una resistencia de salida de 1 ohmio, donde se tienen los siguientes resultados:

Figura 208. Diseño bobina final de Rogowski



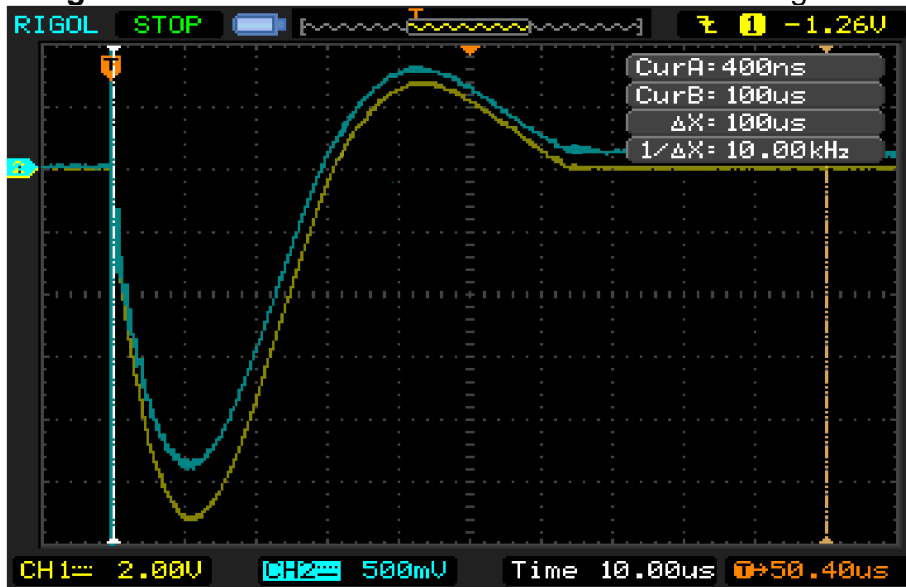
Figura 209. Respuesta en frecuencia de la bobina final



la inductancia mutua M calculada fue de $4.2349 \times 10^{-6} H$, inductancia calculada fue de $0.0073 H$, la capacitancia calculada fue de $2.466 \times 10^{-11} F$ y la resistencia calculada fue de $10,8195 \Omega$. La resistencia medida por el puente de impedancias

Fluke PM6306 fue de $8,9954 \Omega$, la capacitancia medida fue $14.66 \mu F$ y la inductancia medida fue de $12.342 mF$

Figura 210. Resultados diseño final de bobina de Rogowski



Para este diseño final la bobina tiene una buena respuesta y mide correctamente, la sensibilidad es de $1,19 V/kA$.

El laboratorio donde se realizaron las pruebas fue el de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas Facultad Tecnológica, a continuación, se muestra una imagen de este:

Figura 211. Laboratorio de alta tensión de la Universidad Distrital Facultad Tecnológica



En la siguiente figura se muestra la instalación de la bobina para realizar las pruebas tipo impulso de corriente tipo rayo.

Figura 212. Instalación de la bobina para las pruebas

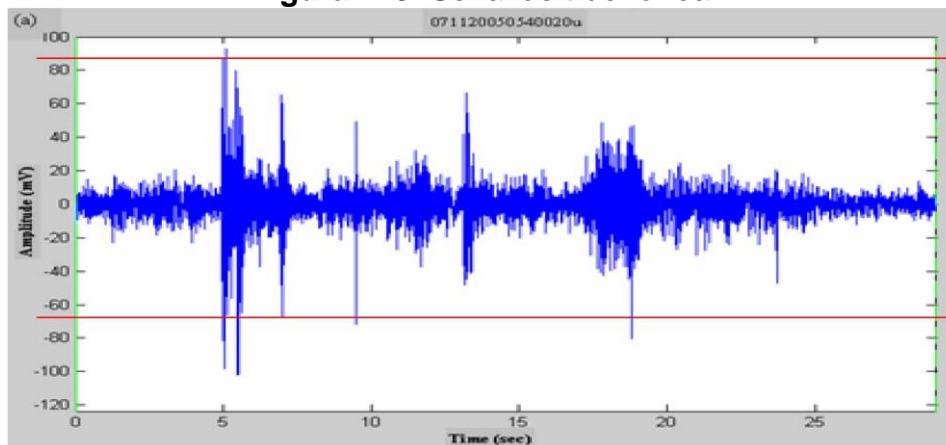


En la imagen anterior se puede ver la bobina de Rogowski y la bobina Shunt de medida.

9. Sistema de obtención de datos

Teniendo la bobina de Rogowski realizando mediciones adecuadas de impulso de corriente tipo rayo, ahora se debe diseñar un sistema de adquisición de datos provenientes de la bobina y del trueno; respecto a la señal de corriente tipo rayo se tienen mediciones reales, de laboratorio y adicionalmente se tienen ecuaciones que describen su comportamiento, ahora, respecto al trueno no se había mencionado nada en este trabajo, este sonido no tiene una curva característica, es una señal de ruido como se muestra a continuación:

Figura 213. Señal de trueno real



Fuente: A preliminary study on characteristics of thunder pulses of lightning [50]

Teniendo en cuenta que el trueno no tiene una señal característica y por cuestiones técnicas se va a tomar para este trabajo una señal digital, que indique cuando hubo un trueno después de medir una señal de corriente, es decir, cuando se detecte un rayo se va a comenzar a medir tiempo y una entrada digital cambiara de estado 1 a 0 cuando detecte ruido después de medir la señal de la corriente de rayo. Ahora como se plantea tener dos sensores de sonido uno direccionado hacia la derecha y uno hacia la izquierda ambos van a cambiar de estado 1 a 0 pero con diferentes tiempos respecto a la señal de corriente medida, por lo tanto, se puede determinar el rayo donde cayo y el tiempo desde que se midió la corriente y el sonido del trueno en el lugar. El sensor usado para este proyecto es el LM393, que se muestra a continuación:

Figura 214. LM393



El sensor usado para detectar cuando inicia el trueno en el lugar es el integrado LM393, el cual funciona con una tensión de operación entre 4-6 voltios, tiene un pin de Vcc un pin de tierra y dos salidas, una digital y una análoga, la temperatura de operación de este integrado es entre -40°C y 85°C . Este integrado tiene un rango de frecuencias entre 100-10000Hz y una sensibilidad mínima de 58dB, con las características dadas cumple con los requisitos para este proyecto.

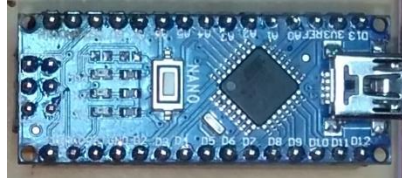
Otro integrado usado en el proyecto es el convertidor DC-DC MP2307, el cual se va a usar para mantener la tensión de alimentación en 5 voltios en todo el circuito de adquisición de datos, se debe usar este convertidor DC-DC reductor con tensión de salida de 5 voltios ya que se va a energizar con un panel solar que tiene tensiones mayores a 5 voltios, por lo general pueden llegar hasta los 24 voltios por ende hay que regular la tensión de alimentación para no causar daños en los elementos del circuito de adquisición de datos. Las características de este elemento son su tensión de entrada que va desde los 5 voltios hasta los 25 voltios y una tensión de salida de 5 voltios lo cual lo hace ideal para energizar los componentes del circuito de adquisición, su temperatura de funcionamiento es desde los -20°C hasta los 85°C , este elemento se muestra abajo:

Figura 215. Convertidor DC-DC MP2307



El siguiente elemento que se uso fue el Arduino nano con conversor USB FT232RL que se muestra en la Figura 216, este es un dispositivo con 10 bits en el conversor análogo/digital con lo cual puede tener valores entre 0 y 1024, tiene una tensión de operación entre 1.8 y 5.5 voltios, cuenta con 6 pines de entrada analógica y 14 pines GPIO de los cuales se pueden llegar a usar 6 de ellos como PWM, tiene una memoria flash de 32 KB, adicional a este se va a usar un módulo SD para ampliar la memoria y poder guardar más señales medidas por el circuito de adquisición de datos.

Figura 216. Arduino nano con conversor USB FT232RL



para realizar la simulación del impulso se tomaron varios ejemplos de pulso como se muestran en las figuras 217 y 218, la idea era tomar la mayor cantidad de variables y que el dispositivo estuviera en la capacidad de leerlas.

Figura 217. Primer circuito de pruebas

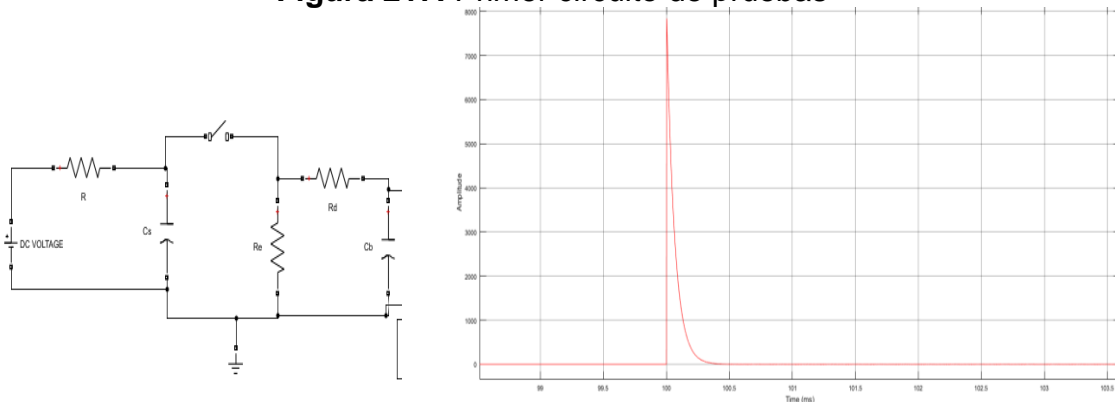
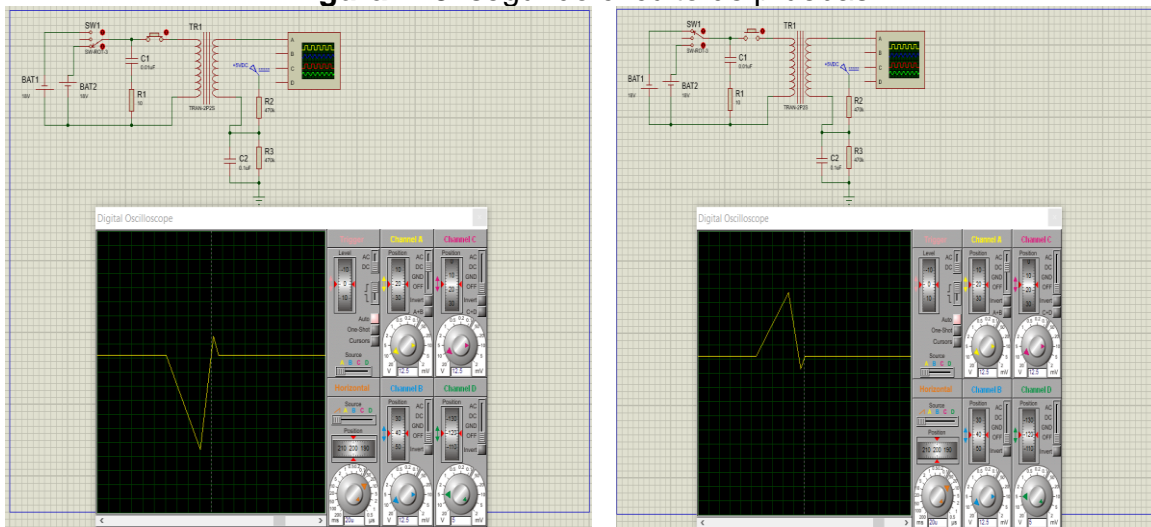


Figura 218. segundo circuito de pruebas

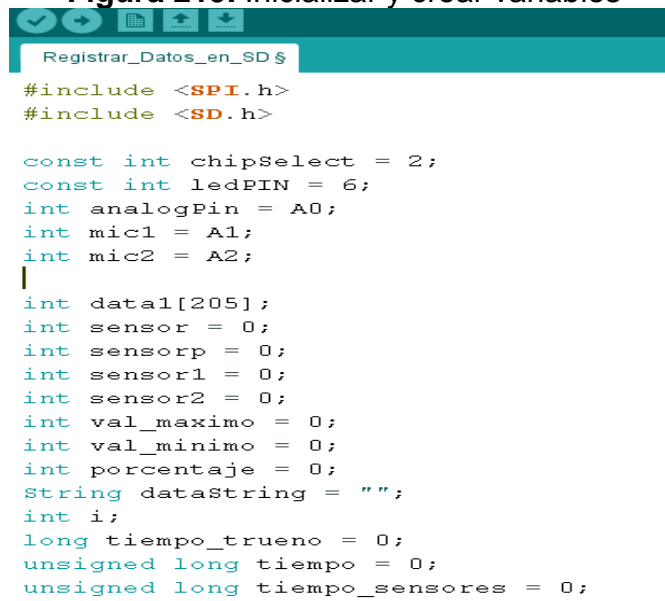


Teniendo en cuenta las señales a medir y las posibilidades de onda que pueden existir entonces se entra a programas en el software de ARDUINO versión 1.8.9 para Windows. Donde se van a usar las librerías <SPI.H> la cual se usa para utilizar el módulo SD el cual usa protocolo de comunicación SPI y la otra librería a usar es <SD.h> la cual también es necesaria para el reconocimiento de la memoria.

Antes de entrar a hacer la programación se aclara que también se usó un amplificador operacional LF353P en modo de seguidor de voltaje, ya que se pueden tener corrientes de retorno de rayo positivas y negativas, adicionalmente se tienen tensiones máximas y mínimas de 18 y -18 voltios respectivamente a la salida de la bobina con los parámetros de medición que se dieron en 8.3.1, por tal motivo se usó este amplificador para dejar a la salida 2.5 voltios por ende se planea para señales positivas de 2.5 voltios a 5 voltios y para señales negativas de 2,5 voltios a 0 voltios y como se tienen valores de 0 a 1024 entonces se va a tener que valores entre 512 a 1024 para señales positivas esta ese rango y para señales negativas entre 512 y 0 ese rango definido.

Ahora, como se tiene una tensión entre 10 y -18 voltios se va a usar un transformador de alta frecuencia el cual se van a ver los resultados más adelante, este transformador tendrá una relación de 0.8, este transformador tiene una salida conectada a un potenciómetro de 500 K Ω a su vez el potenciómetro tiene un terminal conectado a Vcc uno a tierra donde el potenciómetro está ubicado en la mitad es decir 250 K Ω en cada extremo, ahora, la otra salida del transformador de alta frecuencia a la entrada no inversora del amplificador operacional usado como seguidor de voltaje, esto con el fin de tener un punto de referencia de 2,5 voltios como el cero del sistema.

Figura 219. Inicializar y crear variables



```
Registrar_Datos_en_SD $
#include <SPI.h>
#include <SD.h>

const int chipSelect = 2;
const int ledPIN = 6;
int analogPin = A0;
int mic1 = A1;
int mic2 = A2;
|
int data1[205];
int sensor = 0;
int sensorp = 0;
int sensor1 = 0;
int sensor2 = 0;
int val_maximo = 0;
int val_minimo = 0;
int porcentaje = 0;
String dataString = "";
int i;
long tiempo_trueno = 0;
unsigned long tiempo = 0;
unsigned long tiempo_sensores = 0;
```

En la imagen anterior y comenzando con la programación en Arduino, se va a tener una variable análoga en el pin A0 el cual es encargado de leer la señal de tensión proveniente de la bobina de Rogowski, otras dos variables enteras a las entradas análogas A1 y A2, donde A1 es el valor que viene del micrófono 1 indica la derecha y A2 es el valor digital que viene del micrófono 2 y corresponde al valor de la izquierda, un del en el pin 6 el cual nos va a indicar que el circuito está haciendo una lectura. Para luego inicializar datos de los sensores en 0 y hacer crear un vector de datos, lo anterior dicho se muestra en la siguiente imagen.

Luego de esto se procede a realizar los comandos de ejecución única, los cuales se ejecutan en el Void Setup(), se ejecutan comandos como de abrir la comunicación serial, pines de salida como un led de indicación, inicializar la SD.

Figura 220. Void setup()

```
void setup()
{
  // Open serial communications and wait for port to open:
  pinMode(ledPIN , OUTPUT);
  Serial.begin(9600);
  Serial.print("Initializing SD card...");

  // see if the card is present and can be initialized:
  if (!SD.begin(chipSelect))
  {
    Serial.println("Card failed, or not present");
    // don't do anything more:
    return;
  }
  Serial.println("card initialized.");
}
```

Luego de esto se comienza con la otra función obligatoria en ARDUINO, el Void loop(), se va a ingresar todo aquel proceso que se tenga que realizar una y otra vez un bucle. En este caso se va a ingresar los datos correspondientes a la lectura del pin análogo de la señal de tensión A0, encender el led cuando se inicie una medida de tensión y luego proceder a tomar un dato de la entrada análoga por cada instrucción, luego de que el programa entienda que inicio la medición de tensión se activan los pines de sensor 1 y sensor 2 respectivamente corresponden al micrófono 1 y micrófono 2 respectivamente, estos cuando superen un valor de 512 se toma como el valor de lectura y que hubo trueno, a parte de los datos de tensión se van a tener otros tres datos los cuales son:

- primer dato indica el tiempo entre el rayo y el trueno en milisegundos
- segundo dato indica quien leyó primero la señal de trueno "1" si fue el micrófono 1 o "2" si fue el micrófono 2
- tercer dato indica la diferencia de tiempo entre los dos micrófonos dada en microsegundos.

Por último, se imprimen los datos donde se debe tener un archivo *.txt creado preliminarmente en la memoria microSD llamado DATALOG, la memoria debe estar en formato FAT32 para que el Arduino la reconozca, ahora, cuando se crea el archivo se va a tener una columna de datos con valores entre 0-1024, donde los valores entre 512 y 1024 son tensiones entre 0 y 18 voltios y valores entre 512 y 0 son tensiones entre 0 y -18 voltios. La columna anteriormente dicha estará separando los datos de la señal de tensión con los tiempos por la letra Ampersan "&" y la coma "," separa las distintas mediciones.

Figura 221. lectura de sensores

```

Registrar_Datos_en_SD Arduino 1.8.9 (Windows Store 1.8.21.0)
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
Registrar_Datos_en_SD $

sensor1 = analogRead(mic1);
sensor2 = analogRead(mic2);
Serial.println("Esperando Trueno");

tiempo = 0;
while (sensor1 > 512 && sensor2 > 512)
{
  delay(1);
  sensor1 = analogRead(mic1);
  sensor2 = analogRead(mic2);
  tiempo++;

  if (tiempo > 5000) //Espera 5 segundos el trueno
  {
    data1[201] = 0; //tiempo en que se presento el trueno
    data1[202] = 0; //si Mic1 fue primero = 1, sino = 2
    data1[203] = 0; //diferencia en tiempo entre mic1 y mic2
    data1[204] = 6000;
    Serial.println("No hubo Trueno");
    delay(2000);
    goto continua;
  }
}
data1[201] = (tiempo);
tiempo_sensores = 0;

```

Figura 222. Impresión de datos

```

Registrar_Datos_en_SD Arduino 1.8.9 (Windows Store 1.8.21.0)
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
Registrar_Datos_en_SD $

data1[203] = (tiempo_sensores * 5); //diferencia en tiempo entre mic1 y mic2
data1[204] = 6000;

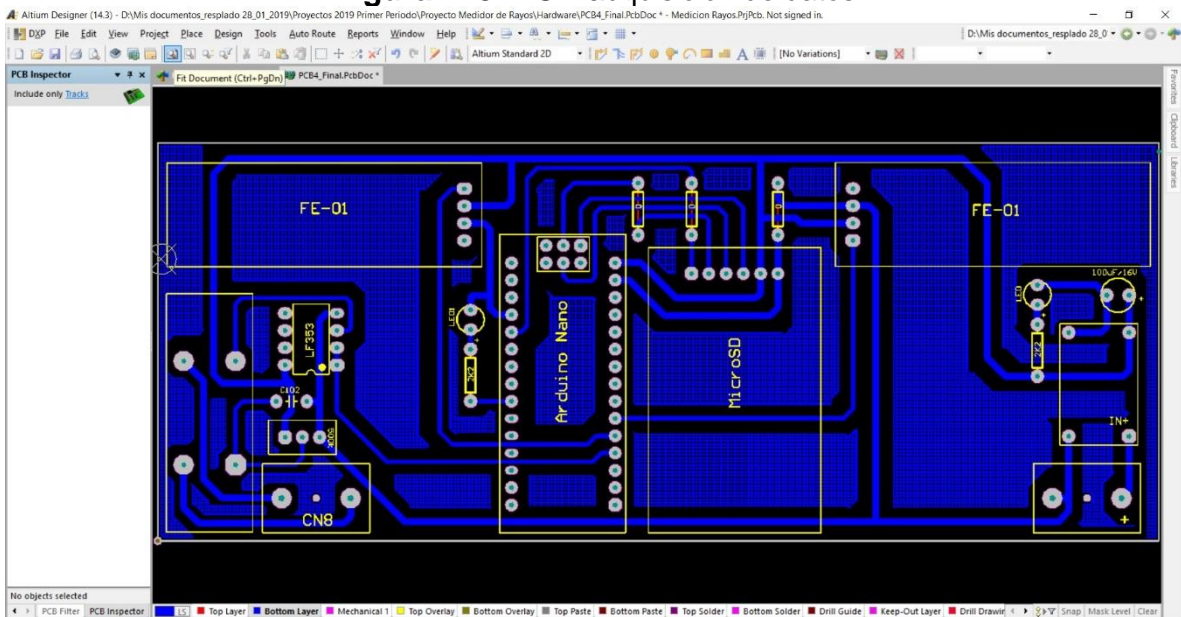
continua:
Serial.println("Imprimiendo Datos");
delay(2000);

for (i = 0; i<205; i++)
{
  File dataFile = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE);
  if (dataFile)
  {
    if (data1[i] == 5000 || data1[i] == 6000)
    {
      dataString = "&";
    }
    else
    {
      dataString = String(data1[i]);
    }
    dataFile.println(dataString);
    dataFile.close();
    Serial.println(dataString);
  }
  else
  {

```

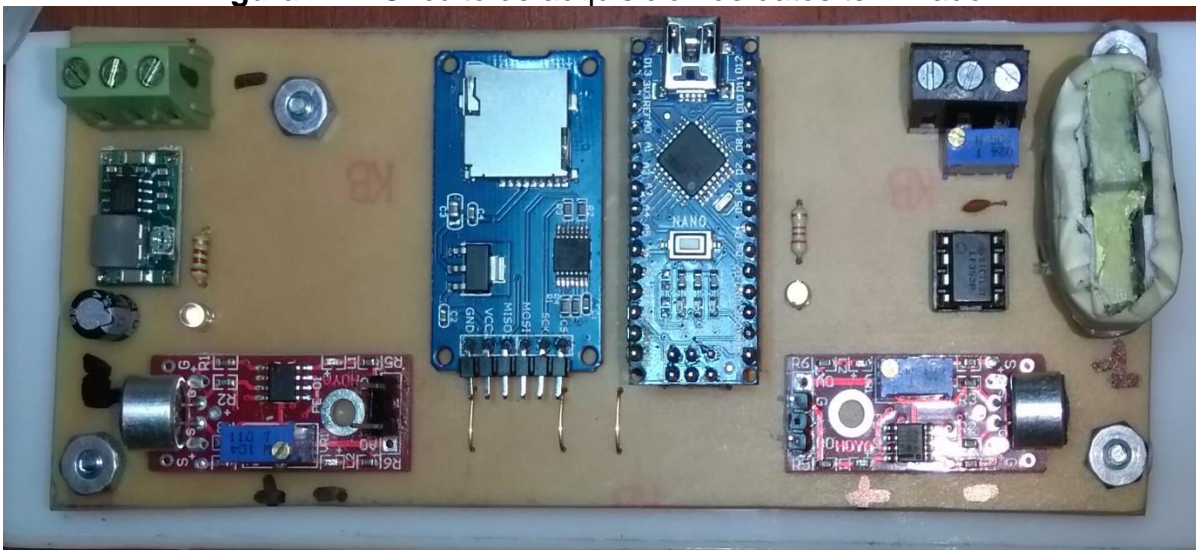
Teniendo la programación del Arduino y calibrados los sensores de sonido se fabricó la PCB en Altium, esta placa se muestra a continuación:

Figura 223. PCB adquisición de datos



luego de tener la PCB se instalan todos los componentes para tener como resultado lo siguiente:

Figura 224. Circuito de adquisición de datos terminado



Las pruebas realizadas en la protoboard y luego en la PCB se registraron por el serial de Arduino y por un osciloscopio, las pruebas se presentan en las siguientes figuras 225 y 226:

Figura 225. Ploteo en serial Arduino

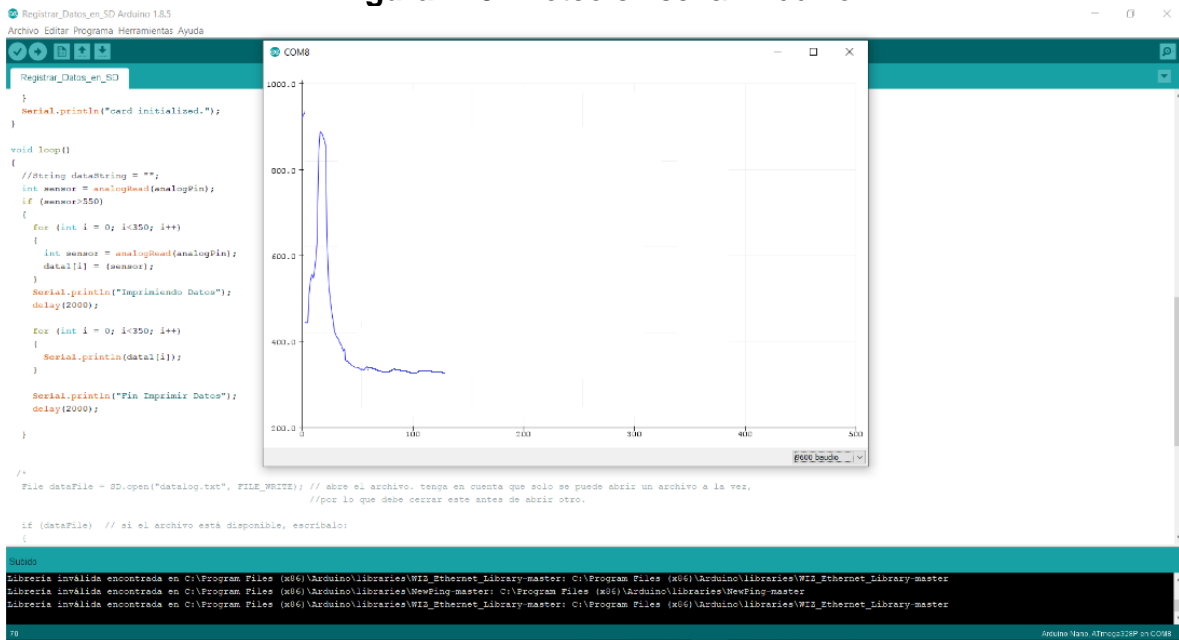
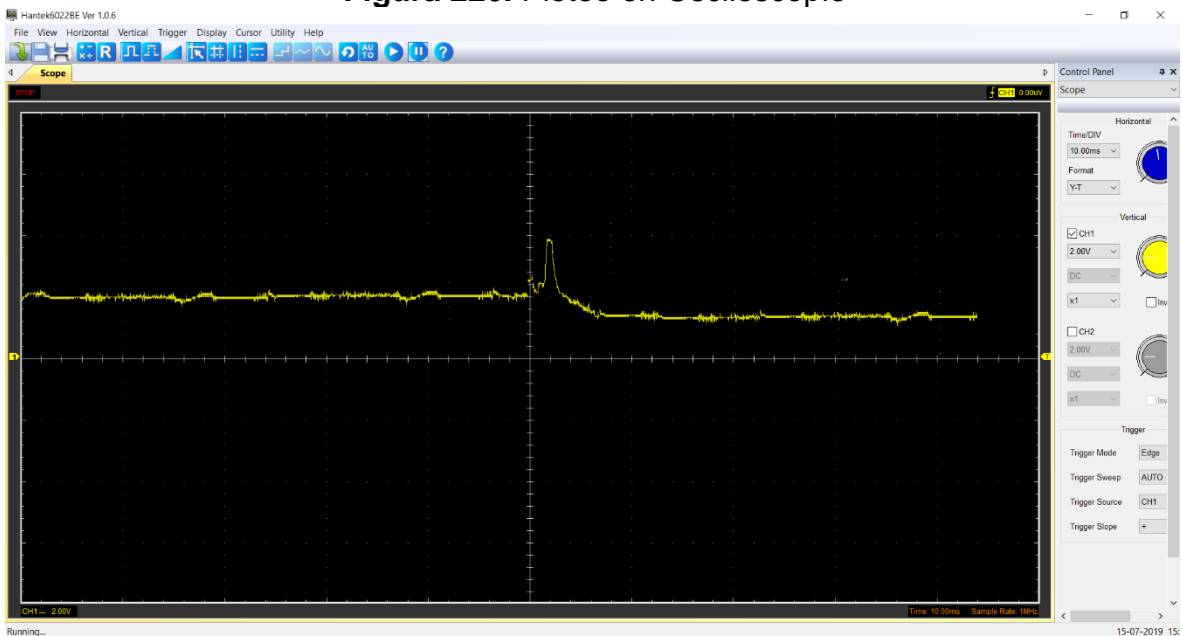


Figura 226. Ploteo en Osciloscopio



Las graficas anteriores demuestran que las lecturas de presentadas en el plot del serial de Arduino y en el osciloscopio son iguales, por tal razón se compró que el sistema de adquisición de datos funciona correctamente, ahora, como el archivo DATALOG creado en la memoria microSD solo almacena los datos de tensión, se debe crear un archivo excel y crear en ese archivo una columna de tiempo donde el delta tiempo es de 1us.

Ahora respecto a la alimentación se debe usar este controlador de carga solar como el que se muestra en la siguiente imagen, este se usa con el fin de no dañar los dispositivos electrónicos conectados a él.

Figura 227. Controlador de carga solar

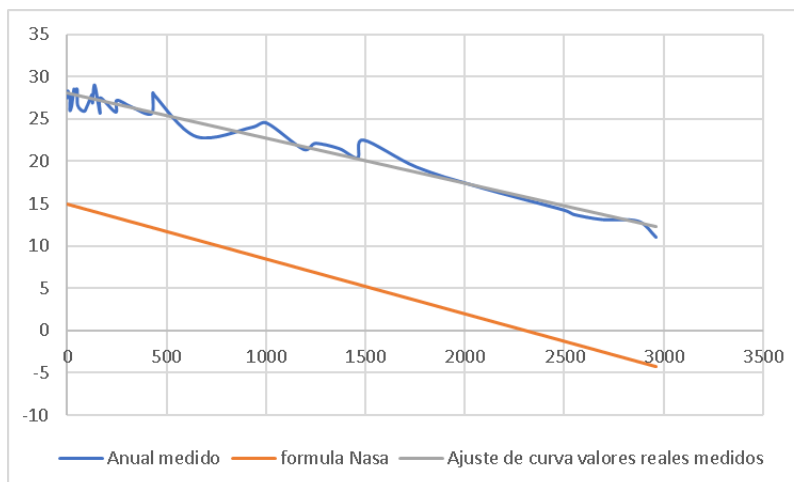


10. Resultados

- El primer resultado de este trabajo fue la implementación de una nueva ecuación para el cálculo de las impedancias de sobretensión de la torre, las cuales se calcularon con la Ecuacion27 que se muestra a continuación, la cual presento un comportamiento adecuado para el modelo de Ishii.

$$Z_{t_section} = 60 \left[\ln \left(\frac{h^2 \sqrt{3}}{2R} \right) - 2 \right]$$

- Como segundo resultado se encontró una ecuación de la temperatura en función de la altitud con los valores tomados de las estaciones meteorológicas de Colombia, la cual fue diferente a la presentada por la NASA; adicionalmente se creó el perfil de la velocidad del sonido para Colombia.

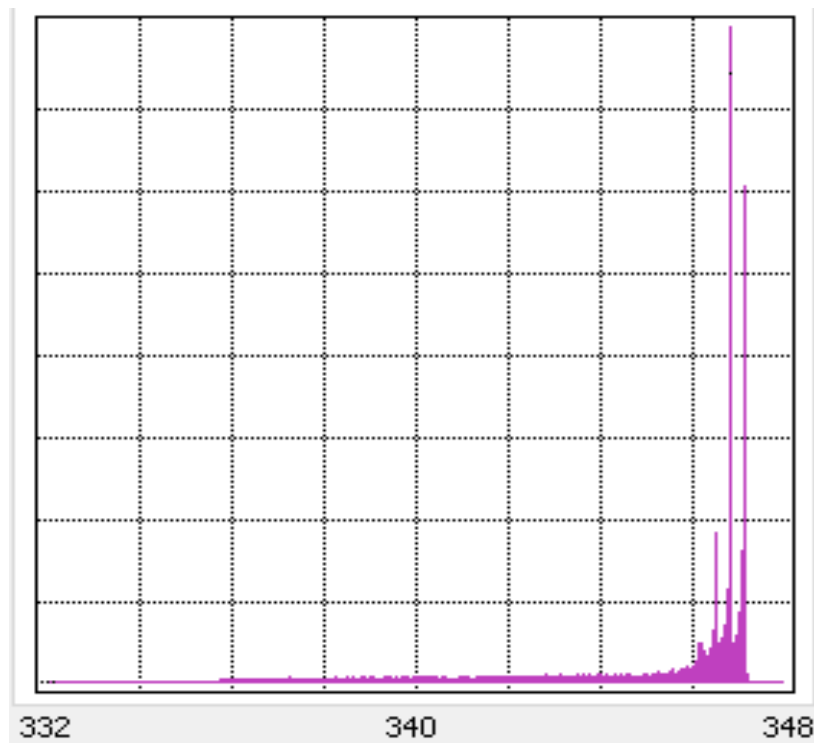


Donde la ecuación de temperatura en función de la altitud con datos de las estaciones meteorológicas de Colombia es:

$$T(h) = 28,045 - 0,0053 * h$$

La ecuación de la NASA se uso con valores en pies para la altitud y se realizo el cambio de la temperatura de grados Fahrenheit a centígrados para contrastarla con la ecuación hallada en este trabajo.

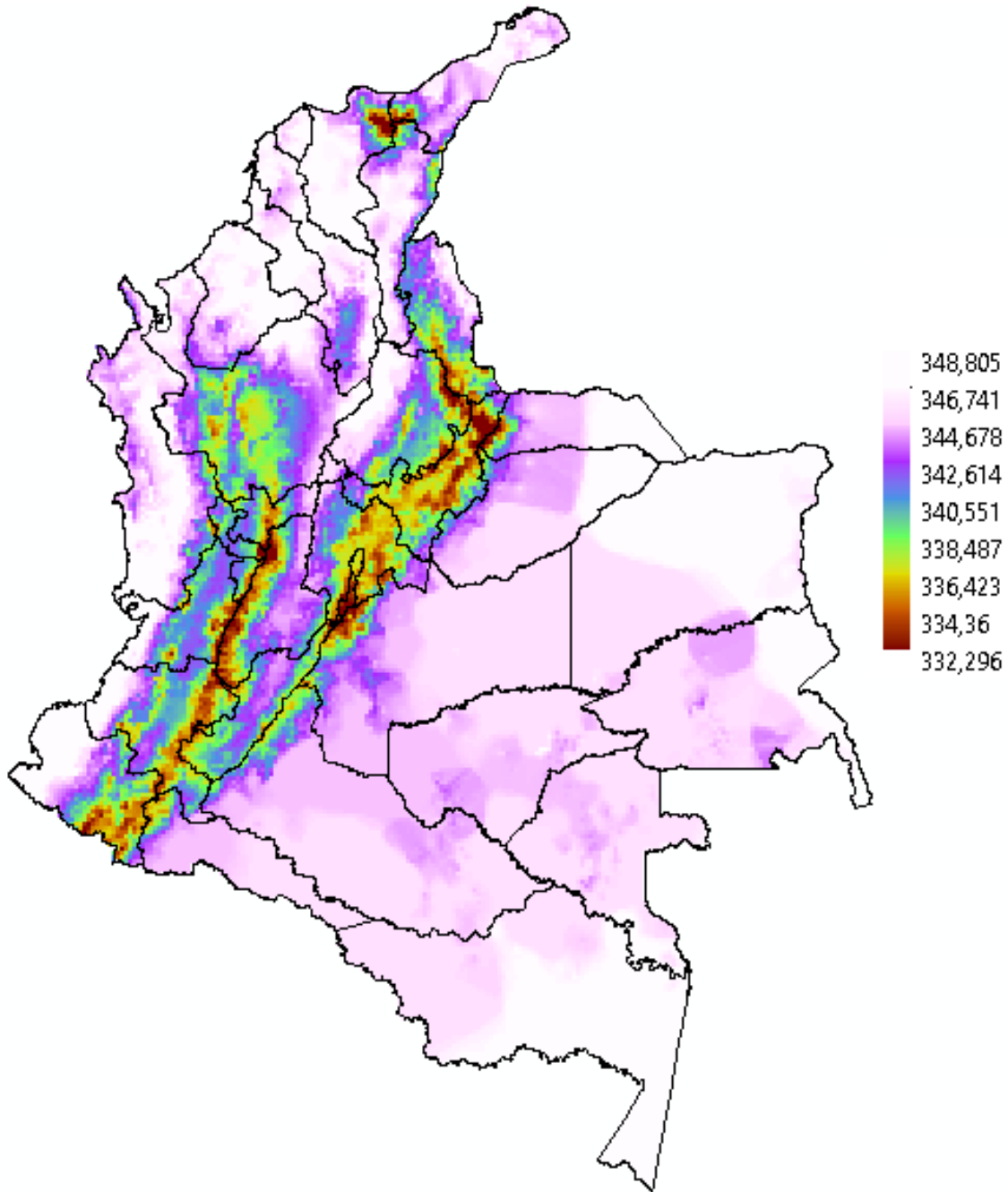
Usando la ecuación de velocidad del sonido en función de la temperatura hallada en este trabajo y la humedad relativa se obtuvo el siguiente histograma para Colombia:



Statistics	
min:	332,30
max:	348,80
mean:	346,16
std. deviation:	2,83

Se puede determinar que en Colombia la velocidad máxima del sonido es 348 *m/s*, la mínima velocidad del sonido es 332,3 *m/s*, con lo cual se tiene un promedio de 346,16 *m/s*

Ahora, el perfil de velocidad del sonido para Colombia se muestra a continuación:



- Como tercer resultado se obtuvo una ecuación de corrección de amplitud de armónicos:

$$Factor_{amplitude\ of\ harmonics} = a * tower_{installed}^2 + b * tower_{installed} + c$$

Donde $tower_{installed}$ es la torre en la cual esta instalado el equipo, teniendo como referencia la torre más cercana a la torre de remate y $tower_{impact}$ es la torre que fue impactada respecto a la misma torre de remate, los valores de a, b y c se describen a continuación:

$$a = 0.0729 * tower_{impact} + 0.2669$$

$$b = -1.3112 * tower_{impact} + 0.8497$$

$$c = 3.2228 * e^{0.3025 * tower_{impact}}$$

- Como cuarto resultado se tiene una ecuación muy practica para varias aplicaciones, la cual es un factor de corrección de amplitud en el tiempo la cual se aplica dependiendo si el impacto fue hacia la izquierda del lugar de instalación del equipo o hacia la derecha como se muestra a continuación:

Ecuación de la amplitud en el tiempo cuando el impacto es hacia la izquierda de la torre de medición

$$Amplitude_{correction\ time} = [(-0.0039 * tower_{impact} + 0.0184) * \ln(nt) + (-0.9138 * tower_{impact} + 8.9316)] * e^{tower * [(-0.0004 * tower_{impact} + 0.0009) * \ln(nt) + (0.001 * tower_{impact} + 0.1403)]}$$

Ecuación de la amplitud en el tiempo cuando el impacto es hacia la izquierda de la torre de medición

$$Amplitude_{correction\ time} = [(-0.064 * tower_{impact} + 0.0897) * \ln(nt) + (0.9603 * tower_{impact} + 21.507)] * e^{tower * [(-2 * 10^{-8} * tower_{impact} + 1 * 10^{-6}) * \ln(nt) + (0.0394 * tower_{impact} - 0.5027)]}$$

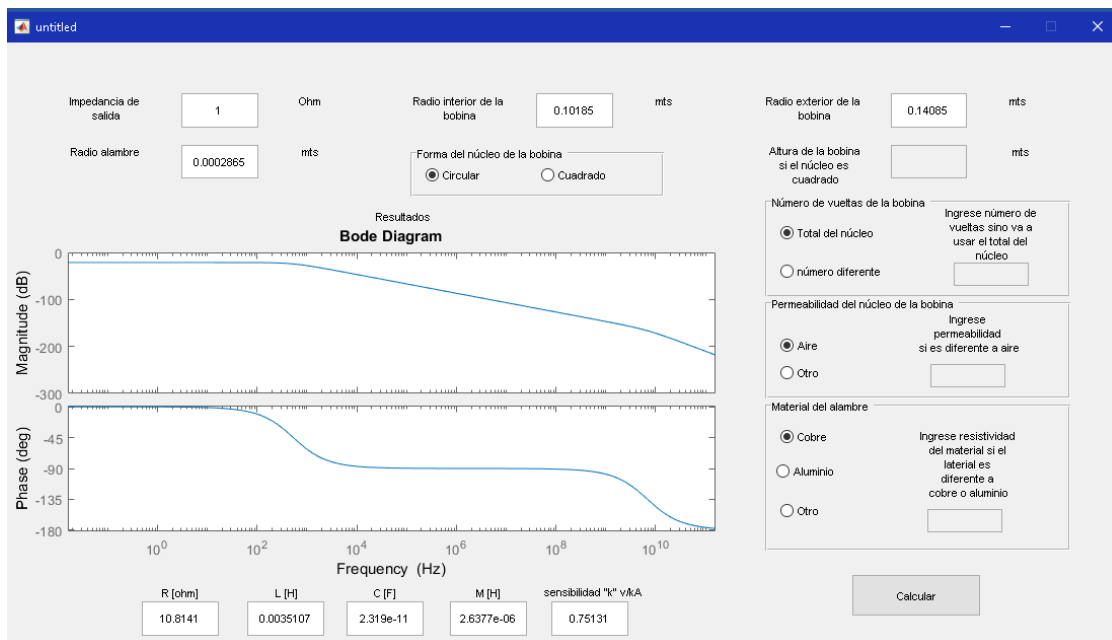
Donde:

$$\begin{aligned} tower_{impact} &\rightarrow \text{torre de impacto} \\ tower &\rightarrow \text{torre donde esta instalado el equipo de medición} \\ nt &\rightarrow \text{número total de torres} \end{aligned}$$

Para la implementación de este hay que tener como referencia la torre de remate más cercana la cual va a ser la torre 1 o torre inicial.

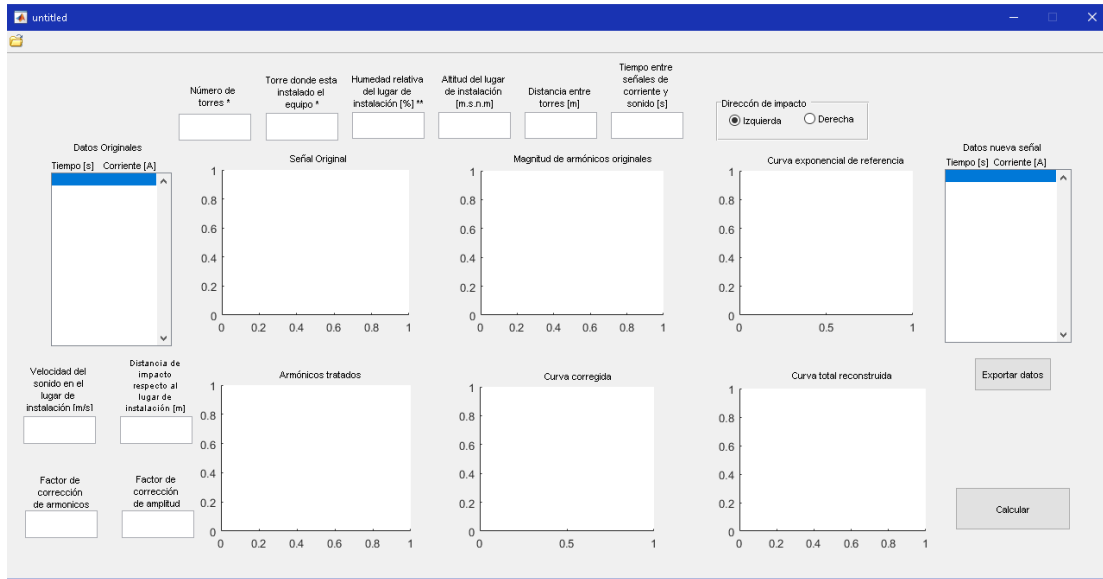
- Como quinto resultado se tiene la creación de un programa ejecutable realizado en Matlab con el cual se puede calcular bobinas de Rogowski

Para usar el programa se debe ingresar la resistencia de salida, radio interno de la bobina, radio externo de la bobina, radio del conductor, material del conductor, tipo de núcleo si es redondo o cuadrado, si se quiere que el alambre cubra toda la superficie del núcleo o ingresar un numero de vueltas determinado por el usuario. Con lo cual se puede tener un resultado como el siguiente:

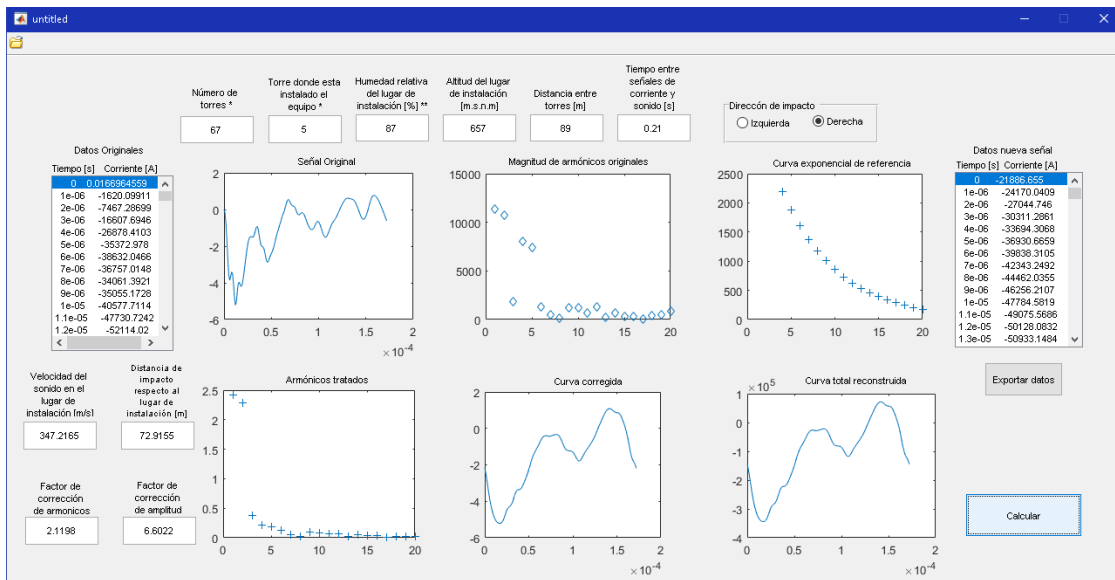


Donde se tiene como resultado la respuesta en frecuencia de la bobina, valor de resistencia, valor de inductancia, inductancia mutua, capacitancia y sensibilidad.

- Como sexto resultado se tiene un programa ejecutable realizado en Matlab para determinar la corriente de retorno de rayo a partir de un impacto de rayo en un grupo de torres de transmisión



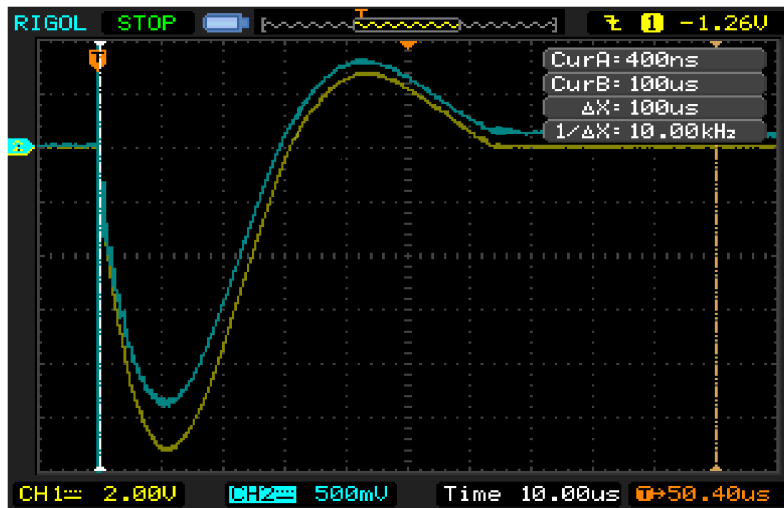
Para aplicar el programa se debe dar clic en el botón en forma de carpeta donde se ingresa la corriente por la torre, es decir el valor obtenido por el equipo de adquisición de datos multiplicada por 4 y así conseguir la corriente por la torre, en un archivo Excel se debe tener en la primera columna el tiempo y en la segunda columna es la corriente, la corriente se halla usando la sensibilidad de la bobina y la tensión medida por el dispositivo



Luego de ingresar los datos de la corriente por la torre en el programa, se debe ingresar el numero de torres, torre donde esta instalado el equipo teniendo como

referencia la torre de remate mas cercana, humedad relativa del lugar donde esta instalado el equipo, altitud del lugar donde esta instalado el equipo, distancia que existe entre torres, tiempo que paso entre el inicio de la señal de corriente y el trueno, por ultimo selecciona si el impacto fue hacia la derecha o hacia la izquierda y se oprime calcular. Si se decía tener los datos finales, se puede exportar el resultado a un archivo Excel con el botón exportar datos.

- Otro resultado del trabajo fue la bobina de Rogowski con la cual se va a medir la corriente de retorno de rato en la pata de la torre de transmisión, la cual fue calculada con las ecuaciones presentadas en el trabajo y con la consideración de tener un costo bajo.

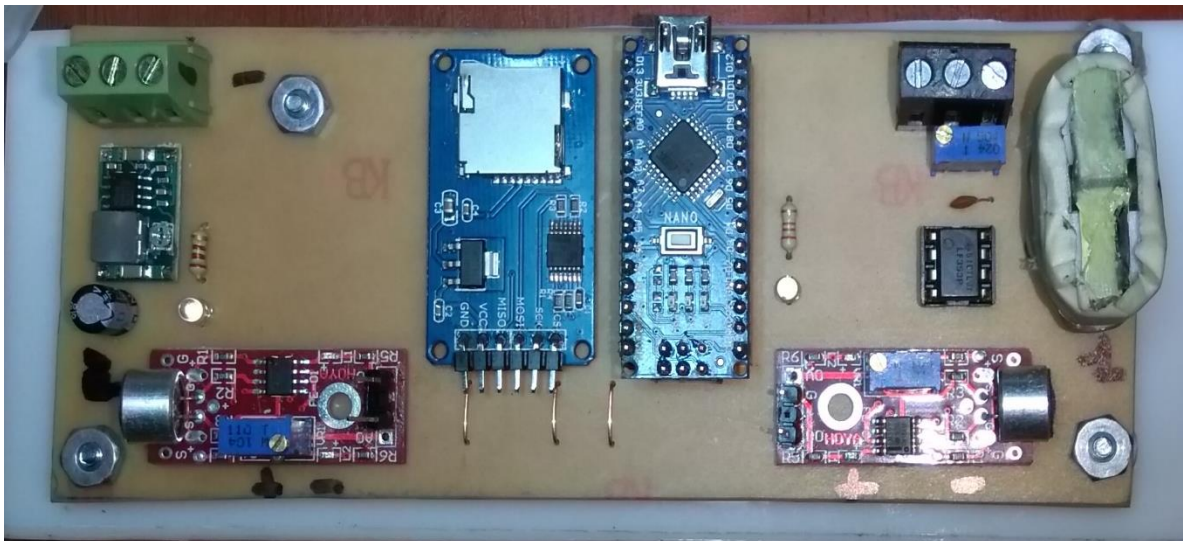


Para corroborar las mediciones de la bobina se plantea la siguiente tabla de repetitividad de la medida y se busca un error y decir que tan buena es la medida de la bobina respecto a la resistencia Shunt del laboratorio.

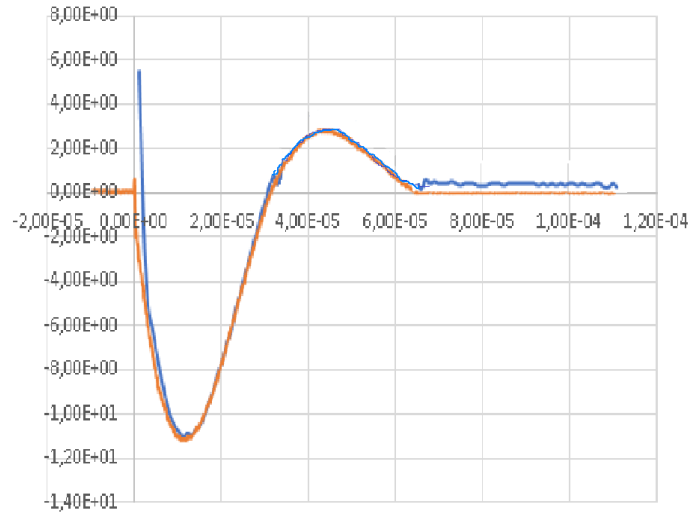
Repetibilidad datos medidos Bobina de Rogowski			
Prueba	Valor Medido	Valor Real	Error
1	2905,1	2937,2	1,09287757
2	2912,5	2945,9	1,133779151
3	2912,5	2945,7	1,127066572
4	2911,7	2945	1,130730051
5	2913,1	2944,6	1,069754805
6	2913,2	2944,8	1,073077968
7	2912,4	2946,2	1,147240513
8	2914,5	2945,1	1,039013955
9	2913,8	2944,9	1,056063024
10	2911,6	2946,2	1,174394135
Error promedio			1,104399774

Con los datos tomados en la anterior tabla se muestra que la bobina tiene un error promedio de 1,1043%.

- El ultimo resultado del proyecto fue el dispositivo de adquisición de datos el cual se muestra ahora



Con el dispositivo se tiene la siguiente señal de salida comparada con una resistencia Shunt como referencia:



La señal naranja es la medida por la resistencia Shunt y la azul es medida por el equipo de adquisición de datos.

11. Conclusiones y trabajos futuros.

- El modelo aplicado para hacer la reconstrucción de la señal, teóricamente funciona adecuadamente.
- Se determino que hay una relación directa entre los armónicos de la señal medida y la señal original
- La torre de transmisión funciona como elemento para la medición de la corriente de retorno de rayo
- Se pudo aislar el error producido por la torre al momento del tránsito de la corriente de retorno de rayo por la estructura “torre de transmisión”
- Se espera tener impactos de rayo en el cable de guarda asociado a la torre de transmisión instalado para ver si desempeño ante un evento real.
- El equipo para la medición de la corriente de retorno de rayo se logró conseguir con bajo costo
- La implementación de la medición del trueno mediante el uso de la velocidad del sonido en el lugar de instalación ayuda de buena forma a tener un mejor dato del lugar de impacto
- Para realizar una medición adecuada no se debe tener más de 6 torres de transmisión de diferencia
- La variación de la velocidad del sonido en Colombia está entre 332 m/s y $348,80\text{ m/s}$
- La serie de Fourier es una herramienta que ayuda de buena manera a la reconstrucción original de la corriente de retorno de rayo, aunque esta serie se aplica para señales periódicas, la adecuación dada para este trabajo funciona muy bien.
- Cuando se llegue a tener una medición de corriente de rayo en el dispositivo se entra a observar como fue y la reconstrucción de la misma para ver el desempeño
- El error dado por la ecuación de factor de amplitud en el tiempo esta entre $1,12\%$ y 15.23%
- Dado que la onda viaja a una velocidad muy cercana a la velocidad de la luz, se puede aplicar el modelo de “ver el rayo y contar el tiempo que se demora

en escuchar el trueno”, solo que en esta ocasión se lee la señal de corriente y después se mide el tiempo en que se demora en llegar el sonido a la torre.

- La diferencia de sonido entre los dos micrófonos implementada en este trabajo, es indispensable para determinar la dirección de impacto donde fue el rayo en el grupo de torres o cable de guarda
- A futuro se puede buscar la implementación de más dispositivos en otras torres

12. Bibliografía

- [1] H. Torres Sánchez, *El Rayo Mitos, Leyendas, Ciencia y Tecnología*, Bogotá D.C: Universidad Nacional de Colombia, 2002.
- [2] H. Torres-Sánchez, «La interdisciplinariedad en la ciencia del rayo,» *Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, p. 175, 2017.
- [3] J. J. Rubiano Cruz, «ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DOS PARÁMETROS DE RAYO EN ZONA TROPICAL,» Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D.C, 2016.
- [4] H. Torres-Sanchez, *Aislamientos Eléctricos*, Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2011.
- [5] F. S. Mark Zemansky, *University Physics*, Pearson education, 1949.
- [6] M. d. I. S. Flores, «REFLECTIVIDAD EN ESTRUCTURAS COMPUESTO-METAL,» UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID, Madrid, 2013.
- [7] R. C. R. V. Adolfo González, «Materiales Magnéticos,» Mendoza, 2009.
- [8] H. Munguía, «Introducción al análisis de sistemas dinámicos lineales,» Universidad de Sonora, Sonora.
- [9] Y. a. F. R. Hugh D., *Física Universitaria con Física Moderna*, Decimosegunda edición ed., vol. 2, México: Pearson Education, 2009.
- [10] NTC 4552, «protección contra rayos principios generales,» INCONTEC, Bogotá D.C, 2004.
]
- [11] Younes Velosa & Horacio Torres, «Caracterización de los Parámetros del rayo en Colombia.,» Universidad Nacional de Colombia, Mannizalez, Colombia, 2010.
- [12] YOUNES Velosa, «Caracterización de los Parámetros del rayo en Colombia.,» Universidad Nacional de Colombia, Mannizalez, Colombia, 2010.
- [13] Keraunos S.A.S., «Keraunos Science of Lightning,» 21 June 2018. [En línea]. Available:
] <https://keraunos.co/ESP/index.php>.
- [14] V. Rakov, «Fundamentals of lightning,» de *Fundamentals of lightning*, Kathmandu, 2011.
]
- [15] Á. A. Villa, «Localización de Tormentas Eléctricas Usando Redes de Sensores Puntuales de Campo Electroestático,» de *Localización de Tormentas Eléctricas Usando Redes de Sensores Puntuales de Campo Electroestático*, Medellín, Universidad Nacional de Colombia, 2015.

- [16 International Electrotechnical Commission (IEC), «IEC 60060-1,» IEC, Ginebra, 2010.
]
- [17 M. D. V. R. o. De Alessandro, «Design of a current measurement system in a plasma thruster with Rowoski coil,» *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS*, vol. 11, nº 1, p. 7, 2013.
- [18 C. R. Rojo, «Diseño y construcción de una bobina de Rowoski y un shunt resistivo para la detección y medición de impulsos de corriente 8/20 us,» *pring, IIS - International Institute of Informatics and Systemics*, p. 1, 2009.
- [19 Keraunos S.A.S., «Servicios K.,» 13 Mach 2018. [En línea]. Available:
] <https://keraunos.co/ESP/index.php/servicios-k>.
- [20 Keraunos S.A.S, «Identificación y análisis de los niveles de calidad del servicio alcanzables en las redes de distribución de energía eléctrica del SIN,» CREG, Bogotá, 2013.
- [21 H. Torres , O. Trujillo, F. Amórtegui, G. Pinzón, C. Quintana, D. González , D. Rondón, M. Salgado y D. Avila, «Design, construction and calibration of three devices to measure directly lightning parameters,» Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 1999.
- [22 C. R. M. A. D. C. F. H. S. Silvério Visacro, «Updated statistics of lightning currents measured at Morro do Cachimbo Station,» *Atmospheric Research*, p. 9, 2012.
- [23 V. Rakov, «Lightning parameters of engineering interest: Application of lightning detection technologies,» Bangkok, 2012.
- [24 Sector electricidad , «Tipos de estructuras para Alta, Media y Baja Tensión,» 1 September 2013. [En línea]. Available: <http://www.sectorelectricidad.com/5612/tipos-de-estructuras-para-alta-media-y-baja-tension/>.
- [25 M. Argüeso montero, «ESTUDIO DE UNA BOBINA DE ROGOWSKI,» UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID, Madrid, 2005.
- [26 M. C. L. J. LI WEIBO, «SOME CONSIDERATIONS OF DESIGNING A HIGH PERFORMANCE ROGOWSKI COIL FOR PULSED CURRENT MEASUREMENT,» *ISTANBUL UNIVERSITY –JOURNAL OF ELECTRICAL & ELECTRONICS ENGINEERING*, vol. 6, p. 6, 2006.
- [27 W. F. R. a. C. R. Hewson, «High Performance Rogowski Current Transducers,» *Power Electronic Measurements Ltd.*, p. 8, 2000.
- [28 T. Stark, This is the theory of operation of the Rogowski Coil which is used for the measurement of fast pulses of current., 2006.
- [29 F. Heidler, «Parameters of lightning current given in IEC 62305 - background, experience and outlook,» *29th International Conference on lightning protection*, 2008.

- [30 e. a. Masuru Ishi, «MULTISTORY TRANSMISSION TOWER MODEL FOR LIGHTNING SURGE ANALYSIS,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1991.
- [31 Almeida M. et al., «Tower Modeling For Lightning Surge Analisis Using EMTP,» *IEEE Proc. Gen. Trans. Distrib.*, vol. 141, nº 6, 1994.
- [32 T. Yamada, «Experimental Evaluation of a UHV Tower Model For Lightning Surge Analysis,» *IEEE. Trans. On Pow. Del.*, vol. 10, nº 1, 1995.
- [33 e. a. Hara, «Modeling of a transmission tower for lightning surge analysis,» *IEEE. Pro. Gen. Trans. Dist.*, vol. 143, nº 3, 1996.
- [34 J. Li, *Measurement and analysis of overvoltages in power systems*, Wiley, 2018.
- [35 w. n. space, «whitworth near space,» 8 August 2012. [En línea]. Available: http://www.whitworthnearspace.org/wiki/Ozone_and_UV_Light.
- [36 NASA, «Earth Atmosphere Model,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/atmos.html>.
- [37 M. G. T. W. a. C. v. d. G. Wilhelm van-Schaik, «High Accuracy Acoustic Relative Humidity Measurement in Duct Flow with Air,» *Sensors*, p. 7434, 2010.
- [38 P. J. Hass, «Indiana University,» 2017. [En línea]. Available: http://www.indiana.edu/~emusic/etext/acoustics/chapter1_speed.shtml.
- [39 I. Eliakim, «SONAR BASED SLAMC (Simultaneous Localization, Mapping and Classification),» Tel Aviv University, Tel Aviv , 2014.
- [40 Fighter Planes and Military Aircraft, «SPEED OF SOUND AT DIFFERENT ALTITUDES,» 2011. [En línea]. Available: <https://www.fighter-planes.com/jetmach1.htm>.
- [41 IDEAM, «Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales,» 2010. [En línea]. Available: http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/Humedad-relativa_tabla.pdf.
- [42 M. F. Stringfellow, *Lightning in Britain and the solar cycle*, Darmstadt: Electrical processes in atmospheres, 1977.
- [43 M. F. V. C. Bodhika J., «A preliminary study on characteristics of thunder pulses of lightning,» *Internarional conference on lightning protection*, pp. 2-4, 2014.
- [44 J. P. Pérez, «Modelamiento y estandarización del sistema de puesta a tierra para líneas de transmisión a 110kV,» Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, 2016.

- [45 H. Torres, O. Trujillo, F. Amórtegui, F. Herrera, G. Pinzón , C. Quintana, D. González, D. Rondón, M. Salgado y D. Avila, «EXPERIMENTAL STATION TO MEASURE DIRECTLY LIGHTNING,» Universidad Nacional de Colombia PAAS, London, 1999.
- [46 UPME, «Unidad de planeación minero energética,» 2018. [En línea]. Available:
] http://sig.simec.gov.co/GeoPortal/images/pdf/UPME_EN_TRANSMISION_PLAN_2016_ACTUAL.pdf.
- [47 UPME, «Unidad de planeación minero energética,» 2018. [En línea]. Available:
] http://sig.simec.gov.co/GeoPortal/images/pdf/UPME_EN_TRANSMISION_COLOMBIA_STN-STR_ACTUAL_2016.pdf.
- [48 D. A. Ward y J. Exon, «Using rogowski coils for transient current measurements,» *Journal on Engineering Science and Education*, pp. 51-58, 1993.
- [49 J. Cooper, «On the high frequency response of a Rogowski coil,» *Journal of a nuclear energy*, pp. 285-289, 1963.
- [50 J. Bodhika, F. Mahendra y C. Vernon , «A preliminary study on characteristics of thunder pulses of lightning,» *International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, pp. 260-264, 2014.
- [51 I. d. E. A. O. d. S. e. y. s. e. Colombia, «IDEA,» 2015. [En línea]. Available:
] http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/IDEA/2010615/lecciones/eco_col/eco_col2.html.
[Último acceso: 11 2016].
- [52 H. Torres Sánchez, «¿QUÉ RAYOS SABEMOS?,» Universidad Nacional de Colombia, 2010.
]
- [53 V. V. Struve, *Historia de la antigua Grecia*, Madrid: Ankal Editor, 1981.
]
- [54 E. R. C. Héctor barco Ríos, *Electromagnetismo y Física moderna*, Manizales: Universidad Nacional de Colombia , 2001.
- [55 L. Eyges, *The classical electromagnetic field*, Dover , 1980.
]
- [56 Ecured, «Ecured, Conocimiento con todos y para todos,» Abril 2018. [En línea]. Available:
] <https://www.ecured.cu/Magnetita>.
- [57 C. Z. M. D. John Taylor, *Modern Physics for Scientists and Engineers*, 2 ed., Addison-Wesley, 2003.
- [58 M. R. Alcalá, *Comportamiento magnético de la aleación Fe-Ni sinterizada por resistencia eléctrica*, Sevilla: Universidad de Sevilla, 2014, p. 20.

[59 C. Sánchez-Norato, Circuitos electricos, Caracas: Universidad Simón Bolívar.
]

[60 Universidad Distrital , «Curso virtual de redes eléctricas,» 12 Agosto 2018. [En línea].

] Available:

<http://gemini.udistrital.edu.co/comunidad/grupos/gispud/redeselectricas/site/cap2/c2testructuras22.php>.

[61 Z. F. F. Heidler, «Parameters of lightning current given in IEC 62305 - background, experience
] and outlook,» *29th International Conference on lightning protection*, p. 22, 2008.

[62 International Electrotechnical Commission, *IEC 62305-2(Ed.3), Protection against lightning -
] Part 2 – Risk management*, Geneva, 2005.