



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de La Laguna

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**"Análisis de la Pantalla Electroestática en la
Distribución Inicial de la Tensión en los Devanados
de un Transformador de Potencia"**

POR

M.C. Carlos Francisco Favela Acosta

T E S I S

**PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Marco Antonio Arjona López

CODIRECTOR DE TESIS

Dra. Concepción Hernández Flores

ISSN: 0188-9060



RIITEC: 02 - TDCIE - 2021

Torreón, Coahuila. México

Julio 2021



Bld. Revolución y Av. Instituto Tecnológico de La
Laguna, Col. Centro. C.P. 27000. Torreón, Coah. México.
Tel: (871) 7051313
E-mail: webmaster@correo.itlalaguna.edu.mx
tecnm.mx | lalaguna.tecnm.mx





Torreón Coah., 07/Julio/2021

DR. JOSÉ IRVING HERNÁNDEZ JACQUEZ
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

Por medio de la presente, hacemos de su conocimiento que después de haber sometido a revisión el trabajo de tesis titulado:

“Análisis de la Pantalla electrostática en la distribución inicial de la tensión en los devanados de un transformador de Potencia”

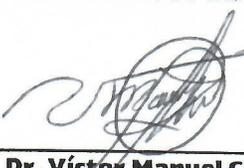
Desarrollado por el **C. Carlos Francisco Favela Acosta**, con número de control **D1613009** y habiendo cumplido con todas las correcciones que se le indicaron, estamos de acuerdo que se le conceda la autorización de la fecha de examen de grado para que proceda a la impresión de la misma.

ATENTAMENTE
EDUCACIÓN TECNOLÓGICA FUENTE DE INNOVACIÓN


Dr. Marco Antonio Arjona López
Asesor/Director de Tesis


Dra. Concepción Hernández Flores
Co-Asesora/Co-Directora de Tesis


Dr. Francisco Sergio Sellschopp Sánchez
Comité Tutorial


Dr. Víctor Manuel Cabrera Morelos
Comité Tutorial


Dr. Jorge Lara Cardoso
Comité Tutorial Externo





Instituto Tecnológico de La Laguna

Torreón, Coah., **06/Julio/2021**

Dependencia: DEPI/CPCIE

Oficio: DEPI/CDCIE/035/2021

Asunto: Autorización de impresión
de tesis.

M.C. Carlos Francisco Favela Acosta
C. CANDIDATO AL GRADO DE DOCTOR EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA.
PRESENTE

Después de haber sometido a revisión su trabajo de tesis titulado:

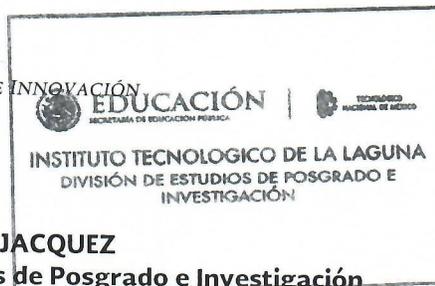
" Análisis de la Pantalla electrostática en la distribución inicial de la tensión en los devanados de un transformador de Potencia"

Habiendo cumplido con todas las indicaciones que el jurado revisor de tesis hizo, se le comunica que se le concede la autorización con número de registro **RIITEC: (02)-TDCIE-2021**, para que proceda a la impresión del mismo.

ATENTAMENTE

EDUCACIÓN TECNOLÓGICA FUENTE DE INNOVACIÓN

DR. JOSÉ IRVING HERNÁNDEZ JACQUEZ
Jefe de la División de Estudios de Posgrado e Investigación
del Instituto Tecnológico de la Laguna



Dedicatoria

Dedicado con todo mi amor y cariño a mi amado hijo, que es mi fuente de inspiración y felicidad, brindándome la motivación para seguir creciendo como persona.

Erik Saúl Favela Rodríguez

A mi madre, por enseñarme el valor de la perseverancia, por su incondicional amor y comprensión.

María Engracia Acosta Gallegos

A mi familia, en especial a mis tías, por su valioso apoyo en los momentos más difíciles.

Ma. Dolores y Luz María

Por su apoyo para iniciar este proyecto, por sus sabios consejos, paciencia y confianza.

Susana Rodríguez Rodríguez

Agradecimientos

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico otorgado durante la realización de mis estudios de doctorado. Al Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL), al Fondo de Sustentabilidad Energética SENER-CONACYT y al CEMIE-Eólico por la oportunidad de participar en el proyecto P10: Diseño, análisis y construcción de generadores eléctricos síncronos de imanes permanentes y de inducción doblemente alimentados para plantas eólicas.

Al Tecnológico Nacional de México y al Instituto Tecnológico de la Laguna por brindarme la posibilidad de seguir mi formación académica.

A mis asesores de tesis Dr. Marco Antonio Arjona López y Dra. Concepción Hernández Flores, por sus enseñanzas, sugerencias y su apoyo invaluable durante la realización de este trabajo.

A los revisores de este trabajo de tesis, Dr. Francisco Sergio Sellschopp Sánchez, Dr. Víctor Manuel Cabrera Morelos y al Dr. Jorge Lara Cardoso, por todos y cada uno de sus comentarios y sugerencias hechas para la conclusión de esta tesis.

Al Dr. José Irving Hernández Jacquez y a la MAAD. Graciela Salinas Lerma por su valioso apoyo administrativo.

Al Dr. José Luis Hernández Ávila y a él M.C. Esaú Caro Vega, por el trabajo desarrollado con el equipo generador de impulsos.

A todos mis amigos que tuve la oportunidad de conocer durante mi estadía en la realización de mis estudios, por brindarme momentos muy amenos, por su amistad y apoyo incondicional: Jesús, Luis, Daniel, Julio, Miguel, Manolo, Héctor, Fernando, Emiliano, Manuel, Antonio, Andrés, Jacob y Elliot.

Indice General

Indice de figuras	V
Indice de tablas	VIII
Resumen	X
Abstract.....	XI
Artículos	XII
Capítulo 1	13
Introducción.....	13
1.1 Introducción	13
1.2 Antecedentes	14
1.3 Objetivo de la tesis.....	18
1.4 Contribución	18
1.5 Descripción	18
Capítulo 2	20
Modelo Matemático del Circuito Eléctrico Equivalente del Transformador con Pantalla Electrostática.	20
2.1 Introducción	20
2.2 Distribución de la tensión de impulso.....	20
2.2.1 Distribución inicial de tensión	24
2.2.2 Modelo interno	25
2.3 Desarrollo del modelo.....	30
2.4 Formulación	30

2.4.1 Capacitancia en serie.....	31
2.4.2 Capacitancia a tierra.....	33
2.5 Influencia de la pantalla electrostática.....	33
Capítulo 3	35
Análisis del Modelo Equivalente del Transformador con Pantalla Electroestática	35
3.1 Introducción	35
3.2 Desarrollo de la red capacitiva.....	35
3.3 Características de los tipos de devanado.....	36
3.3.1 Devanado tipo disco.....	37
3.3.2 Devanado tipo capa.....	38
3.3.3 Devanado intercalado.....	39
3.4 Distribución de tensión en los devanados.....	40
3.5 Simulación de red capacitiva	42
3.5.1 Generador de tensión de impulso.....	47
3.5.2 Red capacitiva con pantalla calibre 16.....	51
3.5.3 Red capacitiva con pantalla calibre 18.....	58
3.5.4 Red capacitiva con pantalla calibre 22.....	63
3.5.5 Red capacitiva con pantalla calibre 26.....	68
3.6 Comparación entre las diferentes pantallas electrostáticas instaladas	74
Capítulo 4	80
Análisis Electrostático Usando Elementos Finitos en 2D	80
4.1 Introducción	80
4.2 Introducción al método de elemento finito	80

4.3 Procesamiento básico del método del elemento finito.....	83
4.4 Análisis del elemento finito en 2-D	84
4.5 Ecuaciones de Maxwell	84
4.6 Formulación del problema electrostático.....	85
4.7 Modelo del transformador en 2D.....	86
4.8. Resultados de simulación.....	89
4.8.1 Red capacitiva con pantalla calibre 16.....	91
4.8.2 Red capacitiva con pantalla calibre 18.....	98
4.8.3 Red capacitiva con pantalla calibre 22.....	102
4.8.4 Red capacitiva con pantalla calibre 26.....	107
4.9 Comparación de los resultados del modelo de 2D.....	112
Capítulo 5	117
Análisis de los Resultados de los Modelos.....	117
5.1 Introducción	117
5.2 Análisis de los resultados entre el modelo de circuito equivalente y MEF 2D	117
5.2.1 Análisis de la pantalla electrostática calibre 16	118
5.2.2 Análisis de la pantalla electrostática calibre 18	121
5.2.3 Análisis de la pantalla electrostática calibre 22	125
5.2.4 Análisis de la pantalla electrostática calibre 26	128
Capítulo 6	132
Conclusiones y Trabajo Futuro	132
Referencias	134

Índice de figuras

Figura 2.1 Circuito equivalente simplificado.	23
Figura 2.2. Distribución de tensión	25
Figura 2.3. Distribución de tensión inicial en el devanado del transformador.....	29
Figura 2.4. Sección transversal de un devanado.....	30
Figura 2.5. Circuito equivalente capacitivo simplificado.....	31
Figura 2.6 Vista superior de un devanado tipo capa para una fase.	32
Figura 3.1. Representación de los devanados de un transformador	36
Figura 3.2. Circuito equivalente de la red de capacitancias para un devanado tipo capa ..	36
Figura 3.3. Par de discos de un devanado continuo.	37
Figura 3.4. Devanado tipo capa.....	39
Figura 3.5. Devanados intercalados.....	40
Figura 3.6. Devanado tipo capa	41
Figura 3.7. Red equivalente RLC para un devanado tipo disco.	42
Figura 3.8. Circuitos eléctricos básicos que producen formas de onda tipo rayo	49
Figura 3.9. Característica de la forma de onda de voltaje de impulso completo [51].....	49
Figura 3.10. Impulso de tensión de onda cortado en la cola [51].....	50
Figura 3.11. Descarga disruptiva sobre la cola [51].....	50
Figura 3.12. Red capacitiva completa con pantalla electrostática calibre 16.....	52
Figura 3.13. Red capacitiva para el devanado B.T. con pantalla electrostática.	53
Figura 3.14. Tensiones a lo largo del devanado de B.T. con la pantalla electrostática.....	55
Figura 3.15. Tensiones a lo largo de la primera capa del devanado de A.T:	57
Figura 3.16. Distribución inicial de tensión	58

Figura 3.17. Red capacitiva para devanado B.T. con pantalla electrostática.	58
Figura 3.18. Tensiones a lo largo del devanado de B.T. con la pantalla electrostática.....	60
Figura 3.19. Tensiones a lo largo de la primera capa del devanado de A.T.....	62
Figura 3.20. Distribución inicial de tensión	63
Figura 3.21. Red capacitiva para devanado B.T. con pantalla electrostática.	64
Figura 3.22. Tensiones a lo largo del devanado de B.T. con la pantalla electrostática.....	66
Figura 3.24. Distribución inicial de tensión	68
Figura 3.25. Red capacitiva para devanado B.T. con pantalla electrostática.	69
Figura 3.26. Tensiones a lo largo del devanado de B.T. con la pantalla electrostática.....	71
Figura 3.27. Tensiones a lo largo de la primera capa del devanado de A.T:	73
Figura 3.28. Distribución inicial de tensión	74
Figura 3.29. Distribución inicial de tensión para B.T.	76
Figura 3.30. Distribución inicial en la pantalla electrostática.	77
Figura 3.31. Distribución inicial de tensión para A.T.	79
Figura 4.1. Elementos finitos.....	81
Figura 4.2. Geometría del transformador en 2D.....	87
Figura 4.3. Intensidad de campo eléctrico en conjunto de devanados y núcleo.....	87
Figura 4.5. Potencial en el conjunto devanados y núcleo.....	88
Figura 4.6. Potencial entre vueltas del devanado y PE.....	89
Figura 4.8. Red capacitiva para devanado B.T.....	93
Figura 4.9. Tensiones a lo largo del devanado de B.T. con PE calibre 16.....	95
Figura 4.10. Tensiones a lo largo de la primera capa del devanado de A.T.:	96
Figura 4.11. Distribución inicial de tensión:	97

Figura 4.12. Tensiones a lo largo del devanado de B.T. con la PE calibre 18	100
Figura 4.13. Tensiones a lo largo de la primera capa del devanado de A.T.....	101
Figura 4.14. Distribución inicial de tensión	102
Figura 4.15. Tensiones a lo largo del devanado de B.T. con la PE calibre 22	104
Figura 4.16. Tensiones a lo largo de la primera capa del devanado de A.T.....	106
Figura 4.17. Distribución inicial de tensión	107
Figura 4.18. Tensiones a lo largo del devanado de B.T. con la PE.....	109
Figura 4.19. Tensiones a lo largo de la primera capa del devanado de A.T.....	111
Figura 4.20. Distribución inicial de tensión	112
Figura 4.21. Distribución inicial de tensión para B.T.	113
Figura 4.22. Distribución inicial en la pantalla electrostática.	114
Figura 4.23. Distribución inicial de tensión para la primera capa de A.T.....	116

Indice de tablas

Tabla 1.1 Principales diferencias entre transformadores.....	14
Tabla 2.1. Duración de fenómenos transitorios en un sistema eléctrico.	22
Tabla 2.2. Rangos de frecuencia.....	23
Tabla 3.1. Geometría del devanado de A.T.....	44
Tabla 3.2. Geometría del devanado de B.T.	44
Tabla 3.3. Tabla de calibres para lámina de cobre.	45
Tabla 3.4. Capacitancias entre capas en el devanado de A.T.....	45
Tabla 3.5. Capacitancias devanado B.T.	46
Tabla 3.6. Parámetros de capacitancia entre B.T.-A.T.....	46
Tabla 3.7. Capacitancias a tierra.....	46
Tabla 3.8. Capacitancias para la pantalla electrostática para cada calibre.	47
Tabla 3.9. Capacitancia entre vueltas para cada caso.....	47
Tabla 3.10. Tensiones en el devanado de B.T.	75
Tabla 3.11. Tensiones en pantalla electrostática.	76
Tabla 3.12. Tensiones en el devanado de A.T.....	77
Tabla 4.1. Capacitancias entre capas en el devanado de A.T.....	89
Tabla 4.2. Capacitancias devanado B.T.	90
Tabla 4.3. Parámetros de capacitancia entre B.T. y A.T.	90
Tabla 4.4. Capacitancias a Tierra.	90
Tabla 4.5. Capacitancias para cada calibre de la pantalla electrostática.	91
Tabla 4.6. Capacitancia entre vueltas para diferentes espesores de la PE.....	91
Tabla 4.7. Tensiones en el devanado de B.T.	113

Tabla 4.8. Tensiones la pantalla electrostática del modelo 2D.	114
Tabla 4.9. Tensiones en el devanado de A.T.....	115
Tabla 5.1. Tensiones de la primera capa del devanado de B.T.	118
Tabla 5.2. Tensiones en pantalla electrostática.	119
Tabla 5.3. Tensiones en la primera capa del devanado de A.T.....	120
Tabla 5.4. Tensiones primera capa del devanado de B.T.....	121
Tabla 5.5. Tensiones en pantalla electrostática.	122
Tabla 5.7. Tensiones primera capa del devanado de B.T.....	125
Tabla 5.8. Tensiones en pantalla electrostática.	126
Tabla 5.9. Tensiones en la primera capa del devanado de A.T.....	127
Tabla 5.10. Tensiones primera capa del devanado de B.T.....	128
Tabla 5.11. Tensiones en pantalla electrostática	129
Tabla 5.12. Tensiones en la primera capa del devanado de A.T.....	130

Resumen

Los transformadores son uno de los principales componentes dentro de un sistema eléctrico de potencia, una falla puede interrumpir la operación del transformador y la continuidad del suministro de energía eléctrica. Una de las fallas más comunes es debido a las sobretensiones transitorias generadas por operaciones de conmutación de interruptores o fallas en la red eléctrica. Por esta razón es importante que el transformador de potencia cuente con un sistema de aislamiento que soporte estos fenómenos transitorios. Para analizar la respuesta del transformador cuando una sobretensión transitoria incide en sus devanados es necesario realizar un estudio. Este trabajo presenta el análisis de la implementación de la pantalla electrostática en los devanados de un transformador de potencia de 2.5 MVA 13.2/7.621 kV en A.T. y 690 V B.T. para determinar la distribución inicial de la tensión a lo largo de sus devanados. El análisis se realiza con diferentes espesores de la pantalla electrostática para analizar su respuesta, se calculan las capacitancias relacionadas con los devanados para determinar la distribución de la tensión para cada caso. Finalmente se realiza una comparación entre el modelo de circuitos equivalentes y el método de elementos finitos.

Abstract

Transformers are one of the main components in electrical power system, a failure can interrupt the operation of the transformer and the continuity of the electrical power supply. One of the most common transformer faults is the transient overvoltages generated by switching operations or failures in the electrical network. For this reason, it is important that the power transformer has an insulation system that can withstand these transient phenomena. In order to analyze the response of the transformer when a transient overvoltage occurs in its windings, it is necessary to carry out a study. This work presents the analysis of an electrostatic shield installed in the windings of a power transformer of 2.5 MVA 13.2/7.621 kV HV and 690 V LV to determine the initial distribution of the voltage along its windings. The analysis is performed with different thicknesses of the electrostatic shields to analyze its response. The capacitances related to the windings are calculated to determine the distribution of the voltage for each case. Finally, a comparison between the equivalent circuit model and the finite element method is shown.

Artículos

Carlos Favela, Jesus Gonzalez, Jose Hernandez-Avila, Marco Arjona, Concepcion Hernandez, Esau Caro, “Simulation and Experimental Analysis of an Impulse Voltage Generator”, *Journal of Electrical and Electronic Engineering*. Vol. 9, No. 4, 2021, pp. 93-99.

Favela, Carlos; Hernandez, Concepcion; Gonzalez Dominguez, Jesus; Arjona, Marco A; Escalera-Perez, Rafael; “Development of a Simplified Transformer Model for Transient Studies”, 21st International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields, Compumag 2017.

Capítulo 1

Introducción

1.1 Introducción

Este trabajo de tesis presenta el desarrollo de un diseño y análisis de la pantalla electrostática instalada en el transformador, este análisis se lleva a cabo con la finalidad de reducir las tensiones transitorias dentro de los devanados del transformador que son sometidos a grandes tensiones provocadas por interruptores, la electrónica de potencia, y fallas en las redes eléctricas. Los transformadores que se encuentran en granjas eólicas también están expuestos a este tipo de fallas de aislamiento debido a los transitorios. La energía eólica juega un papel fundamental en los tiempos modernos, debido a que es una de las principales en energías renovables. El transformador de un aerogenerador es uno de los componentes principales dentro de una granja eólica (GE).

Históricamente, investigaciones han reportado que los transformadores conectados a un aerogenerador presentan fallas continuamente [1] y necesitan ser diseñados de manera adecuada a las condiciones de operación, para que puedan soportar los efectos de la potencia de salida variable del aerogenerador, ya que existe una gran diferencia entre las plantas de generación convencionales (las que utilizan combustibles fósiles) y las de energías renovables, las diferencias entre estos transformadores se presentan en [2]. Los fenómenos que se deben considerar en el transformador instalado en una GE son: carga variable, armónicos, cargas no senoidales, variación de la tensión, sobretensiones por conmutación y sobretensiones transitorias. Para la generación de energía eólica se necesita principalmente el aerogenerador, la caja multiplicadora, el transformador, el convertidor, góndola, los alabes y la torre; cada aerogenerador está equipado con un transformador elevador, que tiene la función de actuar como enlace entre el aerogenerador y la red de distribución [3]. La potencia variable debido a la velocidad no constante del viento es una de las principales causas de falla en los transformadores [4].

1.2 Antecedentes

La manufactura de transformadores para sistemas de conversión de energía eólica debe de considerar en su diseños los fenómenos presentados en las GE, para garantizar la operación continua del equipo. La energía eólica no es utilizada para el control de la oferta y demanda de los consumidores; debido a la variación en la generación de energía, por la velocidad no constante del viento, en ocasiones solo se genera una fracción de la potencia del aerogenerador debido a una baja velocidad. Cuando la velocidad del viento excede los 25m/s, el del aerogenerador debe ser frenado para evitar a daño en sus componentes. Existen diferencias entre las plantas convencionales de generación de energía y una GE, por los diferentes componentes instalados y su diseño. Como se mencionó anteriormente, existen diferencias entre los transformadores instalados en las diferentes plantas. En la tabla 1.1 se presentan las principales diferencias entre los transformadores instalados en cada una de ellas [2].

Tabla 1.1 Principales diferencias entre transformadores.

	Transformadores convencionales de distribución	Transformadores de distribución en energías renovables
Operación	Reductor	Elevador
Energizaciones	Pocas durante su periodo de operación	Frecuentemente
Flujo de potencia	Unidireccional, del sistema de distribución hacia la carga	Bidireccional
Sobre excitación	10 % sobre su valor nominal	15 a 20 % sobre el valor nominal en granjas eólicas
Máximo valor de sobrecarga	Depende de la carga	Picos de carga controlados por sistemas electrónicos
Máxima duración de sobrecarga	Menor a 4 horas	Puede llegar a 12 horas por día
Carga promedio	Entre 40 y 50 %	Entre 40 y 50 %

Además se presentan otras diferencias en el equipo utilizado en una GE, tales como el uso de diferentes tipos de cables, los transformadores para aerogeneradores son de tipo seco o sumergido en liquido aislante, existen interruptores de vacío en la red interna de la GE, entran en operación más frecuentemente los interruptores de corto circuito, etc. Estos

elementos contribuyen a que en una GE se presenten fenómenos transitorios que comúnmente no suceden en una planta convencional [5]. De igual manera en una GE el transformador puede estar operando en ciclos de carga baja a carga alta frecuentemente durante el día, dependiendo de la velocidad variable del viento [6].

En un sistema eléctrico de potencia, el componente más expuesto a los transitorios electromagnéticos, exceptuando las líneas de transmisión, es el transformador [7]. En el momento en que un impulso de tensión incide en las terminales del devanado de un transformador, la distribución inicial de tensión (DIT) se hace presente la cual depende de la relación de las capacitancias dentro del devanado, tales como: las capacitancias entre vuelta, las capacitancias entre capas, la capacitancia entre baja tensión y alta tensión, las capacitancias a tierra (núcleo y tanque). Durante la DIT las inductancias no tienen efecto alguno, ya que el campo magnético necesita un tiempo finito para inducir una corriente a través de un inductor. Puesto que la corriente no se puede generar de forma instantánea, esta distribución de tensión es predominantemente definida por las capacitancias, formando una red capacitiva dentro de los devanados del transformador. Por lo tanto, el análisis puede ser considerado completamente electrostático, i.e., las capacitancias en serie dentro del devanado hacen que la respuesta del transformador a los impulsos de tensión sea de una red capacitiva [8].

Para obtener la DIT de los devanados sometidos a transitorios, es necesario conocer el valor de sus capacitancias en serie y a tierra. Para esto existen diferentes métodos, por ejemplo, el modelo de parámetros concentrados que se crea a partir de los segmentos del devanado para así calcular las diferentes capacitancias [9].

Al inicio del desarrollo de las tecnologías en alta tensión del transformador, la instalación de pantallas electrostáticas es una práctica demasiado común, pues es una estrategia muy efectiva de protección. El efecto de la capacitancia a tierra de esa sección del devanado se ve afectado por la capacitancia correspondiente a la pantalla electrostática (PE), aumentando así las capacitancias en serie a lo largo del devanado, por lo que de esta manera se puede lograr una DIT más uniforme [10, 11]. La PE debe tener aislamiento entre las capas del devando y/o del tanque a lo largo de su diámetro y altura. Los transformadores instalados en una GE se encuentran comúnmente expuestos a sobretensiones electromagnéticas ocasionadas por conmutaciones. Los transitorios representan un gran problema respecto a los fenómenos

resonantes en los devanados del transformador, que pueden dar como respuesta un transitorio desde los devanados hacia al núcleo [12]. Estos transitorios no necesariamente provocan fallas en el aislamiento del transformador, pero pueden dar lugar a descargas parciales. Este fenómeno repercute en la degradación del aislamiento hasta provocar finalmente su ruptura. Los transitorios por conmutación en las GE se inician por la operación de interruptores durante eventos de energización y desenergización, así como durante la liberación de fallas. Las sobretensiones generadas se pueden clasificar como sobretensiones transitorias y sobretensiones temporales. Las ocurridas dentro de una GE son diferentes en comparación con las plantas convencionales debido a su diseño y a los componentes instalados [13].

El objetivo del análisis de sobretensiones en el transformador del aerogenerador es contribuir al diseño y mejoramiento del sistema de aislamiento contra las sobretensiones transitorias, así como poder determinar el tipo de devanado menos vulnerable [14, 15]. Para cada tipo de devanado la respuesta transitoria será diferente. Otro fenómeno a tomar en cuenta son los transitorios por descargas atmosféricas. Su análisis varía en función de parámetros de la GE, la localización de la descarga y la impedancia de cada componente [16]. Como se mencionó anteriormente, los transitorios electromagnéticos provocan daño y fatiga al aislamiento del transformador. Este transitorio de tensión puede ser controlado por medio de una PE instalada dentro de los devanados del transformador, la cual incrementará las capacitancias en serie y dará como resultado una DTI más uniforme a lo largo de los devanados [10].

Los fenómenos que ocurren dentro de los devanados de un transformador conectado a un aerogenerador, motivan a los fabricantes e investigadores para examinar los retos de las fallas de aislamiento debidas a los transitorios. Una medida de protección que puede incidir en la disminución de una sobretensión es la selección adecuada del tipo de devanado, es decir, tipo disco, tipo capa o tipo rectangular [17]. También existen diferentes técnicas de mitigación para sobretensiones transitorias, las cuales son usadas particularmente en aplicaciones de la red del sistema eléctrico de potencia. Sin embargo, cada una de ellas tiene desventajas que limitan su uso en aplicaciones eólicas [18]. Una opción viable es utilizar fusibles de expulsión para el transformador tipo pedestal, pero existe la posibilidad que las sobretensiones transitorias contaminen el líquido aislante con los gases disueltos que se producen debido al arqueo eléctrico en el tubo del porta fusible [19].

La instalación de una PE entre los devanados del transformador es una práctica recomendada en los transformadores que se conectan a un convertidor de potencia en aplicaciones de energía renovable. La función principal de la PE es aumentar las capacitancias en serie para lograr una DIT más uniforme, así como desacoplar capacitivamente los devanados. La ventaja de este método es que suprime la transferencia del contenido de alta frecuencia de la tensión generada en cada devanado del transformador [20]. La capacitancia en la PE es debida a la energía almacenada en la distancia entre la capa del devanado y la pantalla [21]. Si un impulso de tensión incide en las terminales del transformador, la magnitud de las capacitancias en serie y a tierra en el devanado tienen un efecto importante en la DIT y en tensiones a lo largo del devanado. Si se aumentan las capacitancias en serie del devanado, la DIT será más lineal y la tensión en el devanado se reducirá. Un análisis comparativo de la distribución de tensión entre un devanado tipo disco con PE y uno sin PE se presenta en [22].

Los fabricantes de transformadores practican la instalación de PE para filtrar las tensiones transferidas. Aunque esta técnica ofrece mejoras, para lograr una mayor eficacia de las PE en una amplia gama de frecuencias se requiere de más estudios [10, 23]. Ya que una PE no puede atenuar todas las componentes de alta frecuencia de la tensión con la misma eficacia. Incluso puede llegar a aumentar la transferencia de tensión entre los devanados del transformador. Varias configuraciones de la conexión para PE pueden ser consideradas. La influencia de la localización de la PE y la polarización del devanado influyen en la magnitud y distribución de las sobretensiones transitorias [24, 25]. Para el diseño de la PE en una GE, deben considerar la mayoría de los contenidos de frecuencia de la tensión que existen en las terminales del transformador y que son generados por el funcionamiento del convertidor y de los interruptores [26].

Los parámetros de diseño del transformador también influyen en la distribución de tensión a lo largo del devanado. Las variaciones que puede presentar la DIT en el devanado dependen de los valores de las capacitancias en serie y a tierra. A algunos de los parámetros del transformador son: espesores de aislamiento, tensiones nominales, diámetros del devanado, altura de los devanados, permitividad de los aislamientos y distancias a tierra [10].

Los transformadores para aplicaciones de fuentes de energía renovable como la eólica, desempeñan una muy función importante en los sistemas de generación, ya que son los

encargados de aumentar la tensión de generación a niveles de distribución para el sistema colector, y después transmitirla al sistema eléctrico de potencia. Los transformadores conectados en los aerogeneradores presentan características, diferentes a las de los utilizados en centrales convencionales, ya que deben considerar aspectos particulares en su diseño para lograr garantizar la operación adecuada y continua del suministro de energía de la GE.

1.3 Objetivo de la tesis

El objetivo de la tesis es diseñar e implementar una pantalla electrostática en el transformador de potencia, en función de su capacidad y tensiones nominales, para lograr una distribución inicial de la tensión de impulso más lineal y reducir así tensión a lo largo de los devanados.

1.4 Contribución

La contribución de este trabajo de tesis es la implementación de una pantalla electrostática en los devanados de un transformador de potencia, desarrollando un modelo de 2D para su estudio, así como el cálculo de los valores de las capacitancias relacionadas dentro de los devanados del transformador para la obtención de la distribución inicial de la tensión de impulso.

1.5 Descripción

La tesis está integrada por seis capítulos, los cuales se describen brevemente:

Capítulo 1: Se presenta la introducción del trabajo de tesis doctoral.

Capítulo 2: En este capítulo se presenta el modelo matemático del circuito equivalente del transformador de potencia con pantalla electrostática, se describe la distribución inicial de la tensión de impulso, incluyendo el modelo interno de la red capacitiva de los devanados del transformador de potencia, se muestra el efecto de las capacitancias en serie y a tierra, y finalmente se da a conocer la influencia de la pantalla electrostática entre los devanados.

Capítulo 3: Se presenta el análisis del modelo equivalente del transformador con la pantalla electrostática, el desarrollo de la red capacitiva para el análisis del transformador, los

efectos de los diferentes tipos de devanados, así como la simulación de la red capacitiva aplicando la tensión por impulso, para cada caso de estudio de la pantalla electrostática.

Capítulo 4: Este capítulo muestra el análisis electrostático con el método de elementos finitos en 2D y se presenta una breve introducción al método, así como el análisis de la instalación de la pantalla electrostática para cada uno de los casos de estudio.

Capítulo 5: Se presenta el análisis de los resultados obtenidos con los métodos empleados para el cálculo de la capacitancia en serie y a tierra de los devanados del transformador, considerando diferentes espesores de la pantalla electrostática.

Capítulo 6: Se presentan las conclusiones obtenidas de cada una de las pruebas realizadas con la instalación de la pantalla electrostática y se proponen actividades para un trabajo futuro de investigación.

Capítulo 2

Modelo Matemático del Circuito Eléctrico Equivalente del Transformador con Pantalla Electroestática.

2.1 Introducción

El aislamiento dentro de los devanados del transformador debe ser diseñado con el objetivo de soportar sobretensiones transitorias, para esto las sobretensiones dentro de los devanados tienen que ser conocidas, por lo tanto la distribución de tensión dentro de los devanados para tensiones de prueba debe ser calculada [8]. La magnitud de estas tensiones depende principalmente de la tensión de impulso que incide en las terminales del transformador, ya sea en condiciones de operación normal o cuando es sometido a las pruebas dieléctricas por tensión de impulso. Las tensiones alcanzadas dentro de los devanados del transformador pueden calcularse, para esto se debe de conocer su distribución de tensión. La distribución de tensión de un frente de onda, depende de las capacitancias e inductancias de los devanados. Para el cálculo de la distribución de impulso de tensión, dichos elementos son requeridos para realizar el circuito eléctrico equivalente del transformador.

2.2 Distribución de la tensión de impulso

Para que el modelo del transformador represente la distribución de tensión de impulso se requiere que cada parte del devanado sea representada tomando en cuenta sus componentes mutuas, inductivas y capacitivas. El modelo para la distribución de tensión depende del propósito de su análisis. El estudio de la transferencia de tensión dentro de los devanados del transformador es uno de los más complejos. Sin embargo, este análisis es necesario para diseñar la protección adecuada contra la presencia de sobretensiones transitorias. Los modelos más detallados y complejos son los que se requieren para el estudio de la

distribución inicial de tensión y sus oscilaciones dentro de los devanados del transformador [7].

Las tensiones que inciden en las terminales del transformador pueden ser clasificadas de acuerdo a su duración. Estas tensiones presentes durante toda la vida de operación del transformador, las cuales son generalmente similares a la tensión nominal, o en algunos casos ligeramente superior. Por norma, la tensión del transformador no debe exceder el 5% de la tensión nominal durante su operación, siendo ésta ajustada por medio de las derivaciones del devanado del transformador. Las tensiones transitorias son de duración muy corta pero pueden alcanzar una magnitud muy elevada de tensión cuando la tensión incide en las terminales del transformador se denominan sobretensiones, las cuales pueden ser internas o externas, dependiendo de su origen. Las sobretensiones internas surgen por cambios repentinos en los elementos del sistema eléctrico, cuando la simetría de las tensiones es alterada, o como consecuencia de fenómenos resonantes.

Es probable que sobretensiones temporales aparezcan al desconectar una carga en el extremo remoto de una línea de transmisión. Este tipo de sobretensiones son altas en el punto de conmutación y su efecto no puede ser despreciado al final de la línea de transmisión, es decir, en las terminales del transformador. Sobretensiones de naturaleza similar surgen cuando una línea de transmisión es energizada al conectar el transformador en su lado de baja tensión. Una sobretensión temporal también puede ser causada por un fenómeno de resonancia o ferro-resonancia, recorriendo la red eléctrica. Esta resonancia ocurre como consecuencia de una operación de conmutación o un cambio repentino en la carga. Las capacitancias e inductancias del sistema forman un circuito resonante sintonizado con la frecuencia del sistema o con algunos de sus armónicos superiores. La ferro-resonancia se debe a los elementos inductivos que presentan características magnetizadoras no lineales.

Las sobretensiones temporales son las que están más asociadas con los transitorios de tensión y tienen una duración de microsegundos. Usualmente estas sobretensiones son llamadas sobretensiones por conmutación. Su frecuencia depende de la frecuencia natural del sistema y se producen por una operación de conexión o desconexión o por una falla de la red eléctrica. La mayoría de estas sobretensiones son fenómenos altamente amortiguados de duración relativamente corta. Para el sistema de aislamiento del transformador este tipo de sobretensión representa un peligro [27].

Como se mencionó anteriormente, los transitorios pueden clasificarse de acuerdo a su duración u origen, como lo es una descarga atmosférica, que es tipo rayo, o por conmutación, ya sea por conexión, variación de la carga o fallas. Existe otra manera de clasificar los transitorios electromagnéticos en base a su modo de generación: 1) son predominantemente debidos a la interacción de campos eléctricos en las capacitancias y los campos magnéticos de las inductancias en los sistemas de potencia, donde los fenómenos electromagnéticos aparecen en forma de ondas viajeras en las líneas de transmisión, cables, secciones de bus, y oscilaciones entre inductancia y capacitancia; 2) transitorios electromecánicos: debidos a la interacción entre la energía eléctrica almacenada en el sistema y la energía mecánica almacenada en la inercia de las maquinas rotatorias, es decir, generadores y motores [28].

En la tabla 2.1 se presenta la duración de los fenómenos transitorios en el sistema eléctrico de potencia. De acuerdo con el análisis de transitorios en el sistema eléctrico de potencia, éstos implican un rango de frecuencia de aproximadamente 50 MHz, y en algunos casos aún más amplio. La tabla 2.2 muestra el origen de los transitorios y rangos de frecuencia más comunes [29]. Generalmente, los transitorios superiores a la frecuencia nominal involucran fenómenos electromagnéticos.

Tabla 2.1. Duración de fenómenos transitorios en un sistema eléctrico.

Naturaleza del transitorio	Tiempo de duración
Descarga atmosférica	0.1 μ s – 1.0 ms
Conmutación	10 μ s a menos que 1 seg
Resonancia subsincrónica	0.1 ms – 5 seg
Estabilidad transitoria	1 ms – 10 seg
Estabilidad dinámica	0.5 – 1000 seg
Regulación de líneas de transmisión	10 – 1000 seg
Maniobras del operador	Mayor a 24 hrs

Cuando se presenta una sobretensión transitoria en las terminales de un transformador, se genera un gradiente de tensión dentro de los devanados, dando lugar a un importante efecto: una tensión a lo largo de los devanados y una distribución de tensión de impulso. Para

analizar este fenómeno, el devanado del transformador puede representarse como un circuito equivalente de inductancias y capacitancias distribuidas uniformemente. Cuando una sobretensión es aplicada a este circuito, la DIT es totalmente determinada por la red capacitiva. La DIT en cualquier punto del devanado se puede calcular mediante la solución de ecuaciones diferenciales y las condiciones frontera necesarias para la red. La distribución final de tensión está determinada por las resistencias en serie y por la inductancia; este circuito equivalente se muestra en la figura 2.1 [30].

Tabla 2.2. Rangos de frecuencia

Origen del transitorio	Rango de frecuencia
Conmutaciones o falla en GIS	100 kHz – 50 MHz
Sobretensiones por descarga atmosférica	10 kHz – 3 MHz
Transitorios por operación de interruptores	10 kHz – 1 MHz
Fallas en terminales	50/60 Hz – 20 kHz
Fallas en la línea	50/60 kHz – 100 kHz
Reconexión	50/60 Hz – 3 kHz
Inicio de falla	50/60 Hz – 20 kHz
Energización de falla	50/60 Hz – 3kHz
Rechazo de carga	0.1 Hz – 3 kHz
Energización de un transformador	(dc) 0.1 Hz – 1kHz
Ferroresonancia	(dc) 0.1 Hz – 1 kHz

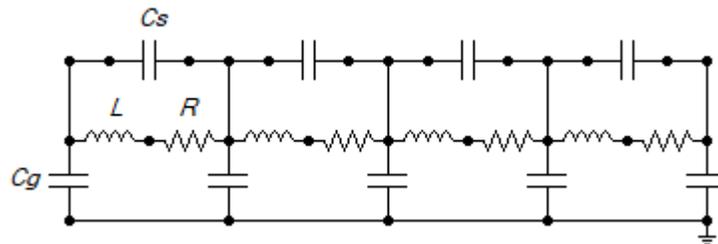


Figura 2.1 Circuito equivalente simplificado.

2.2.1 Distribución inicial de tensión

Cuando ocurre una sobretensión transitoria que incide en las terminales del transformador, se genera un alto estrés de tensión dentro y entre los devanados, que a su vez impacta en el sistema de aislamiento. Especialmente entre vueltas, capas y discos de los devanados puede ocurrir una tensión elevada, principalmente en el lado de alta tensión del devanado [31]. Para realizar el análisis de sobretensiones transitorias a lo largo del devanado, un circuito equivalente formado por una red de capacitancias puede representar la distribución de tensión. En el caso de sobretensiones no transitorias donde el frente de onda de tensión es alcanzado por el efecto inductivo, la distribución de tensión será menor que la obtenida de la red capacitiva [7,32].

La DIT en los devanados del transformador está compuesta por las capacitancias entre vueltas, entre capas, entre los devanados y tierra (núcleo y tanque). En este efecto las inductancias del devanado no presentan ningún efecto en la DIT debido a que el campo magnético que necesita una cantidad finita de tiempo para poder inducir una corriente a través de un inductor y que por lo tanto esta corriente no se puede establecer de forma instantánea. Por esta razón, las inductancias prácticamente no conducen ninguna corriente, y la distribución de la tensión es completamente definida por las capacitancias en la red; este efecto puede ser considerado completamente electrostático. La presencia de capacitancias en serie y en paralelo entre las secciones del devanado provoca que el transformador responda a los impulsos de tensión, como una red de capacitancias para todas las frecuencias por encima de sus frecuencias naturales más bajas de oscilación [17]. Cuando el impulso de tensión aplicado es mantenido un tiempo suficientemente largo ($50 \mu\text{s}$ a $100 \mu\text{s}$), es cuando las corrientes comienzan a fluir en las inductancias, llevando eventualmente a la distribución uniforme de tensión. Debido a la diferencia entre las distribuciones iniciales y finales de tensión, como se muestra en la figura 2.2, se genera un fenómeno transitorio.

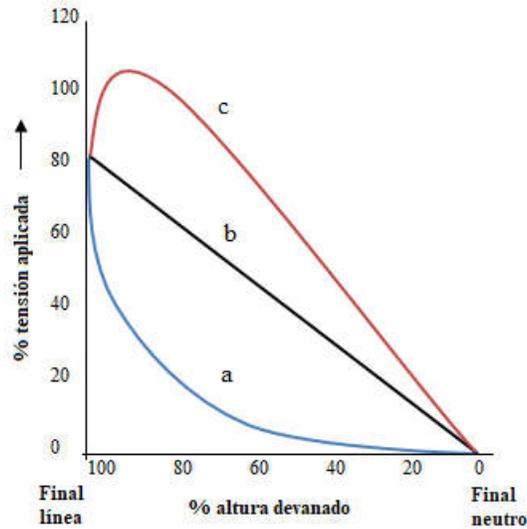


Figura 2.2. Distribución de tensión: a) distribución inicial, b) distribución final y c) máxima tensión a tierra.

Existe un intercambio continuo de energía en el periodo transitorio entre el campo eléctrico y el campo magnético a causa de un factor de amortiguación de bajo nivel de los devanados del transformador. La tensión en cualquier punto del devanado oscila sobre el valor final de tensión, alcanzando un máximo, como muestra la curva c) de la figura 2.2. El nivel de resistencia para soportar las tensiones debidas a los transitorios en los devanados del transformador se puede aumentar significativamente mínima, realizando que la diferencia entre las distribuciones iniciales y finales sea minimizada. Con esto no sólo se reducirían las tensiones excesivas al final de la línea, sino también se mitigarían las oscilaciones, manteniendo así la tensión a tierra en cualquier punto en el devanado ligeramente mayor que la distribución final de tensión.

2.2.2 Modelo interno

La ecuación de este circuito de la figura 2.1, suponiendo capacitancias distribuidas uniformemente, se puede expresar en términos de corriente y voltaje a tierra en cualquier punto x como:

$$\begin{aligned} \frac{di_x}{dx} &= -C_g \frac{dv_x}{dt} \\ i_x &= -C_s \frac{d}{dt} \left(\frac{dv_x}{dt} \right) \end{aligned} \quad (2.1)$$

donde C_s es la capacitancia serie del devanado C_g es la capacitancia a tierra del devanado, x es la distancia a lo largo del devanado, i es la corriente que fluye a través del devanado y v es la tensión aplicada al circuito de la figura 2.1.

Al sustituir la corriente, la ecuación resultante se puede escribir de la siguiente manera:

$$\frac{d^2 v_x}{dx^2} - \frac{C_g}{C_s} v_x = 0 \quad (2.2)$$

La solución de la ecuación anterior está dada por:

$$v_x = A_1 e^{kx} + A_2 e^{-kx} \quad (2.3)$$

donde

$$k = \sqrt{\frac{C_g}{C_s}} \quad (2.4)$$

Las constantes de integración A_1 y A_2 pueden obtenerse a partir de las condiciones de frontera en la línea y en los extremos neutros del devanado.

Para el neutro sólidamente conectado a tierra, las condiciones de frontera son $v_x = V$ con $x = 0$, y $v_x = 0$ para $x = l$, donde l es la longitud del devanado y V es la amplitud del voltaje de entrada. Al sustituir estos valores en la ecuación 2.5 se obtiene:

$$\left. \begin{aligned} A_1 + A_2 &= V \\ A_1 e^{kl} + A_2 e^{-kl} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

$$A_1 = -V \frac{e^{-kl}}{e^{kl} - e^{-kl}}; A_2 = V \frac{e^{kl}}{e^{kl} - e^{-kl}}$$

Después de sustituir las expresiones en la ecuación 2.5, la solución es:

$$v_x = V \frac{e^{k(l-x)} - e^{-k(l-x)}}{e^{kl} - e^{-kl}} = V \frac{\sinh k(l-x)}{\sinh kl} \quad (2.6)$$

El gradiente de voltaje inicial en el extremo de la línea del devanado está dado por:

$$\begin{aligned} \left. \frac{dv_x}{dx} \right|_{x=0} &= -V \frac{k \cosh k(l-x)}{\sinh kl} \Big|_{x=0} \\ &= -V \frac{k \cosh kl}{\sinh kl} = -kV \cosh kl \end{aligned} \quad (2.7)$$

Dado que para valores prácticos $kl > 3$, entonces $\coth kl \sim 1$. Para un aumento de amplitud unitario (es decir, para $V = 1$), el gradiente inicial en el extremo de la línea es:

$$\left. \frac{dv_x}{dx} \right| \approx -k \quad (2.8)$$

Es decir, para valores prácticos, el gradiente de voltaje es máximo en el extremo de la línea e igual en magnitud a k . Por otro lado, cuando $k \rightarrow 0$, el gradiente se acerca menos a la unidad (para $V=l$). Este resultado también se puede expresar como una función de las capacitancias totales. La ecuación (2.8) puede reescribirse como:

$$\begin{aligned} \left. \frac{dv_x}{dx} \right|_{max} &= -\frac{1}{l} kl = -\frac{1}{l} \sqrt{\frac{C_g l}{C_s/l}} = -\frac{\alpha}{l} \\ \alpha &= \left(\sqrt{\frac{C_g l}{C_s/l}} = kl \right) \end{aligned} \quad (2.9)$$

Donde $C_g l$ y C_s/l son la capacitancia a tierra total y la capacitancia en serie total del devanado respectivamente.

La solución de la red capacitiva generalmente se expresa como función del parámetro α . Después de algunas manipulaciones simples, la ecuación (2.6) se convierte en:

$$v_x = V \frac{\sinh \alpha \left(1 - \frac{x}{l}\right)}{\sinh \alpha} \quad (2.10)$$

Dado que el gradiente uniforme para el aumento de amplitud de la unidad es $1/l$, el gradiente inicial máximo en el extremo de la línea es α veces el gradiente uniforme. Así, cuanto mayor sea el valor de la capacitancia de tierra, mayores serán los valores de α y la tensión en el extremo de la línea. Para la condición neutral aislada, las condiciones de contorno son $v_x = V$ para $x = 0$ y $dv/dx = 0$ para $x = l$. Procediendo conforme a la condición neutral puesta a tierra, las ecuaciones resultantes son:

$$\begin{aligned} &\left. \begin{aligned} A_1 + A_2 &= V \\ kA_1 e^{kl} - kA_2 e^{-kl} &= 0 \end{aligned} \right\} \\ A_1 &= V \frac{e^{-kl}}{e^{kl} + e^{-kl}}; \quad A_2 = V \frac{e^{kl}}{e^{kl} + e^{-kl}} \end{aligned} \quad (2.11)$$

de donde se convierte la solución de la ecuación (2.3):

$$v_x = V \frac{\cosh k(l-x)}{\cosh kl} \quad (2.12)$$

la cual puede ser expresada como:

$$v_x = V \frac{\cosh \alpha \left(1 - \frac{x}{l}\right)}{\cosh \alpha} \quad (2.13)$$

Para la condición neutral aislada, el gradiente inicial máximo al final de la línea se puede escribir como:

$$\left. \frac{dv_x}{dx} \right|_{x=0} = -kV \tanh kl \quad (2.14)$$

Para un aumento de amplitud unitario y $kl > 3$, $\tanh kl \sim 1$. Por lo tanto, el gradiente inicial vuelve a ser:

$$\left. \frac{dv_x}{dx} \right|_{max} = -k \quad (2.15)$$

Es decir, que el valor del gradiente inicial máximo en el extremo de la línea es el mismo para la condición de neutro a tierra y aislado para las tensiones rápidas o muy rápidas del frente de onda.

La distribución inicial de tensión para varios valores de α se presenta en la figura 2.3 considerando las condiciones de neutro a tierra y neutro aislado. La constante de distribución α indica el grado de desviación de la distribución de voltaje inicial de la distribución de voltaje lineal final. Por lo que si el valor de α es elevado, mayor será la amplitud de las oscilaciones que ocurren durante el período transitorio. Una modificación en el diseño del transformador que disminuya α , resultará en una distribución de voltaje más uniforme, reduciendo así las tensiones a lo largo del devanado.

La constante de distribución α está definida por la relación $\sqrt{C_g/C_s}$, donde C_g y C_s son la capacitancia a tierra y la capacitancia en serie, respectivamente. El valor máximo del gradiente inicial en el final de la línea es el mismo para las condiciones de neutro a tierra y neutro aislado bajo impulsos bruscos.

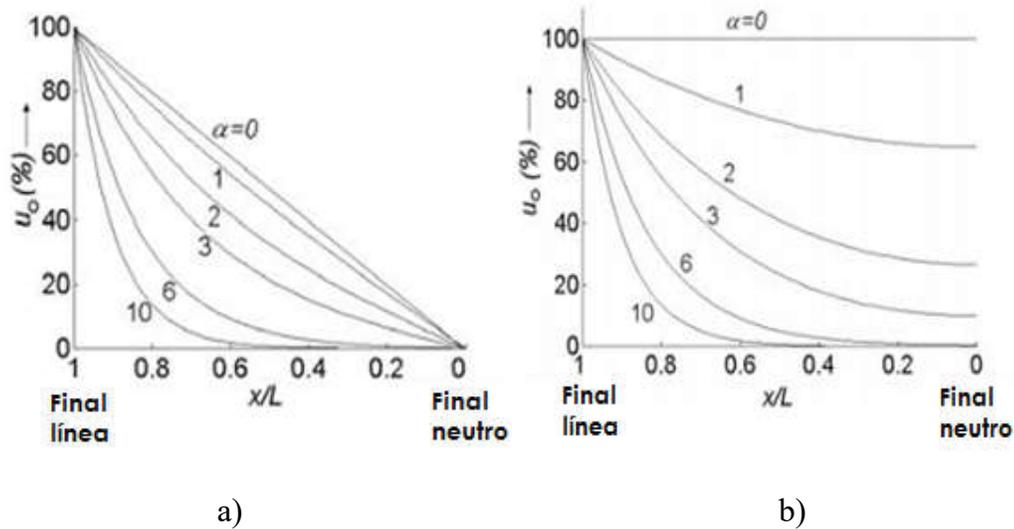


Figura 2.3. Distribución de tensión inicial en el devanado del transformador

a) neutro a tierra y b) neutro aislado.

La capacitancia serie total (C_S) y la capacitancia a tierra total (C_G) del devanado en el transformador definen su distribución inicial de tensión para sobretensiones. C_S consiste de capacitancias entre vuelta y capacitancias entre secciones del devanado, mientras que C_G incluye las capacitancias entre el devanado y tierra (núcleo, tanque, otros devanados), por lo que la distribución de tensión inicial se caracteriza por la constante de distribución alfa:

$$\alpha = \sqrt{\frac{C_G}{C_S}} \quad (2.16)$$

Cuanto mayor sea el valor de α , mayores serán las desviaciones y la amplitud de las oscilaciones que se producen entre las distribuciones iniciales y finales de tensión. Cualquier cambio en el diseño del transformador que disminuya esta constante de distribución del devanado, resultará en una distribución más uniforme de tensión y se reducirá el estrés de tensión entre las diferentes partes del devanado. La distribución inicial de tensión del devanado se puede hacer más cercana a la distribución lineal ideal ($\alpha = 0$) mediante el aumento de su capacitancia en serie y/o reduciendo su capacitancia a tierra. Si se reduce la capacitancia a tierra, más corriente fluye a través de las capacitancias en serie, la cual tiende a hacer que la tensión a través de las diversas secciones del devanado sea más uniforme. Una distribución inicial de tensión uniforme se conseguirá si no fluyen corrientes a través de las capacitancias a tierra.

2.3 Desarrollo del modelo

La figura 2.4 muestra la sección transversal de los devanados del transformador y el circuito equivalente de un segmento de devanado diferencial. Una representación precisa del devanado para determinar la distribución de voltaje entre vueltas es un modelo con parámetros distribuidos basados en el circuito equivalente representado en la Figura 1b. Los parámetros distribuidos uniformemente, en unidades de longitud, pueden enumerarse de la siguiente manera: L_i es la inductancia en serie, R es el componente de pérdida de L_i , C_{ik} es la capacitancia vuelta a vuelta, G_{ik} es el componente de pérdida de C_{ik} , C_{ig} es la capacitancia vuelta a tierra, G_{ig} es el componente de pérdida de C_{ig} , y M_{ik} es la inductancia mutua vuelta a vuelta.

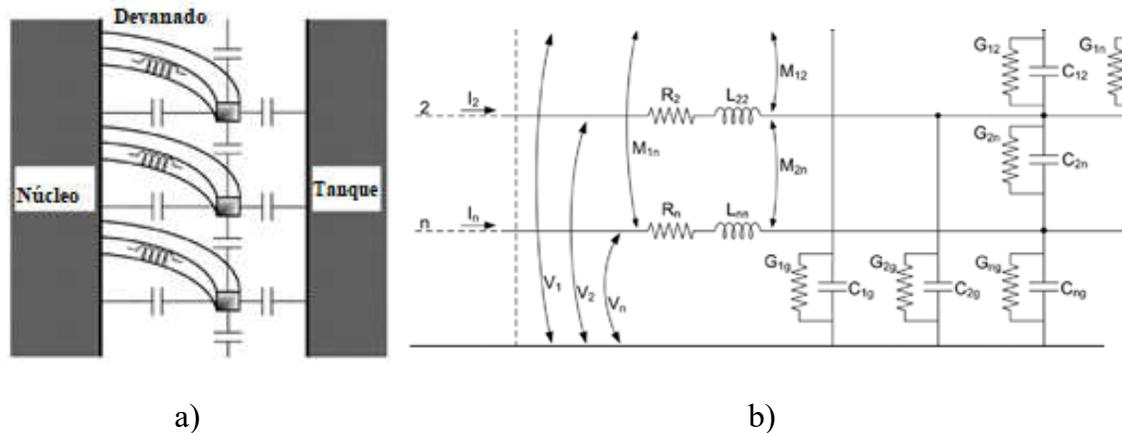


Figura 2.4. Sección transversal de un devanado: a) sección transversal del devanado de un transformador, b) circuito equivalente.

2.4 Formulación

Para construir un modelo de parámetros concentrados, el devanado del transformador se subdivide en segmentos o grupos de vueltas. Cada uno de estos segmentos contiene un nodo de inicio y un nodo final; entre estos dos nodos se asociará una capacitancia llamada “capacitancia en serie”. Además, cada segmento tendrá asociado a él capacitancias entre las secciones adyacentes de vueltas o para un escudo (pantalla electrostática) o a tierra; estas son las capacitancias entre secciones, denominadas generalmente “capacitancias shunt”. Para estimar la distribución de tensión dentro del transformador, en el devanado sometido a

transitorios, es esencial conocer sus capacitancias serie y de tierra. Los modelos de parámetros concentrados se crean mediante la subdivisión del devanado en segmentos con pequeñas dimensiones radiales y axiales, así como grandes radios, permitiendo el uso de una fórmula simple de placas paralelas para calcular tanto la capacitancia serie como la capacitancia a tierra de un segmento [28].

La DIT puede calcularse considerando únicamente la red de capacitancias equivalentes. Por lo que, solo dos elementos del circuito están presentes para calcular la respuesta inicial: la capacitancia en serie C_s y la capacitancia a tierra C_g . En la figura 2.5 se muestra un circuito de la red capacitiva simplificada. La capacitancia en serie total está compuesta por la capacitancia entre vueltas y la capacitancia entre capas del devanado, mientras que la capacitancia a tierra total está formada por las capacitancias entre el devanado y las distancias a tierra, así como por las capacitancias formadas entre la estructura del núcleo y las paredes del tanque.

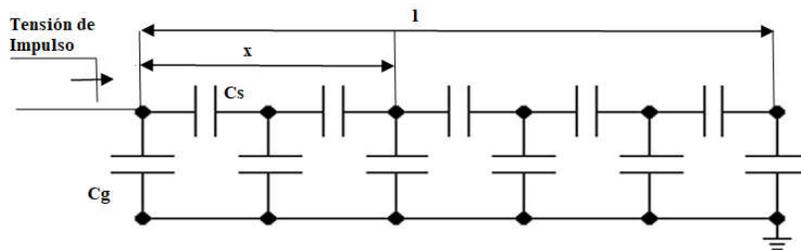


Figura 2.5. Circuito equivalente capacitivo simplificado.

2.4.1 Capacitancia en serie

La capacitancia entre dos vueltas adyacentes se describe por la ecuación 2.16 [33]:

$$C_{tt} = (\epsilon_{eq} \theta e^{(d_e/d_i)} + \cot(\theta/2) + \epsilon_0 \cot(\pi/12)) \quad (2.16)$$

$$\theta = \cos^{-1} \left(\left(1 - (1/\epsilon_{eq}) \ln(d_e/d_i) \right) \right)$$

donde ϵ_0 es la permitividad del aire, ϵ_{eq} es la permitividad del material aislante, d_e es el diámetro externo del devanado y d_i es el diámetro interno del devanado. Si el número de vueltas del devanado es n_t , entonces el número de capacitancias serie a lo largo de una capa del devanado es $n_t - 1$. La capacitancia C_{tt}' serie total de una capa del devanado completo de alta tensión (A.T.).

$$C_{tt}' = \frac{C_{tt}}{n_t - 1} \quad (2.17)$$

La capacitancia C_{ll} entre dos capas del devanado de A.T., se determina evaluando $r = \infty$ [34,35]:

$$C_{ll} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r 2\pi \omega}{\ln(1 + d/r)} = \varepsilon_0 \varepsilon_r 2\pi \frac{r\omega}{d} \quad (2.18)$$

donde ω es el ancho de la capa, d es la distancia entre dos capas (longitud de la línea de flujo eléctrico promedio entre dos conductores), y r es el radio de curvatura del devanado.

El devanado de A.T. se bobina alrededor de la barrera intermedia de aislamiento, la cual a su vez se bobinan en las capas del devanado de baja tensión (B.T.) como se muestra en la figura 2.6.

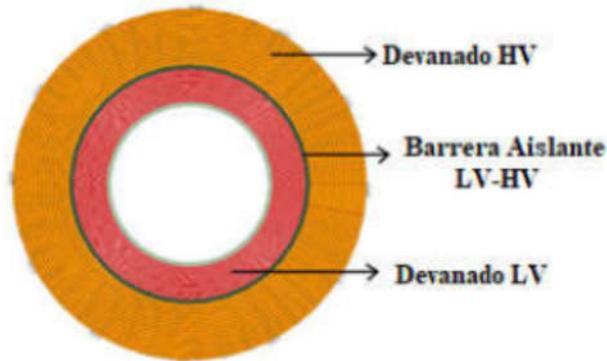


Figura 2.6 Vista superior de un devanado tipo capa para una fase.

La capacitancia C_{HV-LV} de la barrera entre A.T.-B.T., y la capacitancia $C_{LV,tt}$ entre dos vueltas del devanado B.T., se determinó como [36]:

$$C_{HV-LV} = C_{LV,tt} = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r h}{\ln(d_i/d_0)} \quad (2.19)$$

donde h es la altura del devanado del B.T., d_0 es el diámetro externo del devanado interno y d_i es el diámetro interno del devanado.

2.4.2 Capacitancia a tierra

La capacitancia entre la fase final del devanado y el tanque del transformador, C_{gt} se obtuvo en base a:

$$C_{gt} = \frac{0.75 \times 2\pi\epsilon_0\epsilon_r h'}{\ln(t/d_0)} \quad (2.20)$$

donde $h' = h + d$ para compensar los bordes del campo en los extremos, h es la altura del devanado, d_0 es el diámetro externo del devanado interno y t es el ancho interno del tanque. Dado que los devanados están dispuestos concéntricamente alrededor del núcleo, se pueden tratar como una capacitancia cilíndrica y, por lo tanto, se puede calcular el C_{gt} correspondiente como:

$$C_{gt} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r h'}{\ln(d_i/d_0)} \quad (2.21)$$

donde d_i es el diámetro interno del devanado externo, d es la distancia entre d_i y d_0 . La capacitancia distribuida desde el final de la línea hasta el tanque del transformador se determina en base a:

$$C_{gt}' = \frac{C_{gt}}{3} \quad (2.22)$$

2.5 Influencia de la pantalla electrostática

La instalación de la pantalla electrostática entre los devanados del transformador tiene por efecto el aumento de las capacitancias en serie, lo que influye en una DIT más uniforme. Cuando las terminales del transformador son impactadas por un impulso de tensión, las magnitudes de las capacitancias relacionadas (en serie y paralelo) en los devanados, tienen un efecto importante en la distribución de tensión de impulso y las tensiones a lo largo de los devanados. Si se aumentan las capacitancias en serie de los devanados, la distribución de tensión se vuelve más lineal y la tensión en el devanado se reduce. Un análisis comparativo de la distribución de tensión entre el devanado tipo disco con pantalla electrostática y sin pantalla se lleva a cabo en [22].

Los transformadores instalados en las GE requieren consideraciones específicas de diseño para protegerse de los efectos de la distorsión de tensión. Los fabricantes practican la implementación de la pantalla electrostática en los devanados del transformador para filtrar las tensiones transferidas. Como se menciono antes, aunque ésta técnica ofrece mejoras, la eficacia de las pantalla electrostática en una gama más amplia de frecuencias se requiere de más estudios [9, 23]. Ya que una pantalla no puede atenuar todas las componentes de alta frecuencia de la tensión con la misma eficacia. Incluso puede llegar a aumentar la transferencia de algunos componentes de frecuencia en el lado secundario del transformador. Varias configuraciones para la conexión para la pantalla pueden ser consideradas, incluyendo flotantes y polarizadas. La influencia de la localización de la pantalla en el devanado y su polarización influyen en la magnitud y distribución de las sobretensiones transitorias [24, 25]. En el diseño de la pantalla electrostática de los transformadores para GE, se deben considerar la mayoría de los contenidos de frecuencia de la tensión que existen en las terminales del transformador, los cuales son generados por el y que son generados por el funcionamiento del convertidor y de los interruptores [37-40].

Capítulo 3

Análisis del Modelo Equivalente del Transformador con Pantalla Electroestática

3.1 Introducción

El uso de la pantalla electrostática instalada entre las capas del devanado del transformador es una técnica implementada por los fabricantes para mejorar su respuesta cuando es sometido a transitorios electromagnéticos durante su operación. Este método provoca un efecto de desacoplamiento capacitivo entre los devanados al aumentar las capacitancias en serie relacionadas con la respuesta del transformador ante eventos de sobretensiones transitorias, causando que la DIT se vuelva más uniforme. Para el cálculo de la capacitancia se asume que solo las capas interiores de una sección del devanado contribuyen al aumento de las capacitancias en serie, ya que el campo eléctrico entre la pantalla electrostática y las capas delante de la pantalla representan la principal contribución a la energía electrostática almacenada [41].

3.2 Desarrollo de la red capacitiva

La capacitancia en la pantalla electrostática es debida a la energía electrostática almacenada entre la distancia del devanado secundario y la pantalla; para este cálculo se asume que solo las capas interiores contribuyen a la capacitancia. La energía almacenada entre cada sección y la pantalla se calcula inicialmente de una manera similar a como se realiza en [42], Y posteriormente todas las contribuciones se resumen para proporcionar la energía total almacenada entre la pantalla y la capa conductora opuesta a la pantalla.

El devanado se puede representar como se muestra en la figura 3.1, el cual consiste de una red de capacitancias en serie y capacitancias a tierra e inductancias, teniendo así un número finito de mallas; en este circuito se asume que las capacitancias e inductancias son distribuidas uniformemente a lo largo del devanado [43].

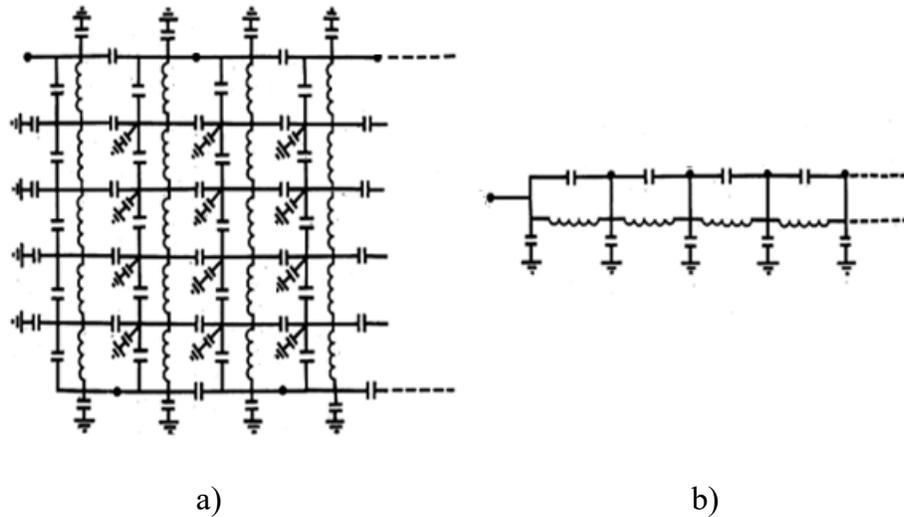


Figura 3.1. Representación de los devanados de un transformador: a) red equivalente detallada, b) red equivalente simplificada.

Como se mencionó anteriormente, el transformador se comporta como una red de capacitancias en su respuesta a los impulsos tensión, mientras que la inductancia no responde ante cambios rápido. Para analizar la DIT en los devanados del transformador [32] la red de capacitancias se define como se muestra en la figura 3.2.

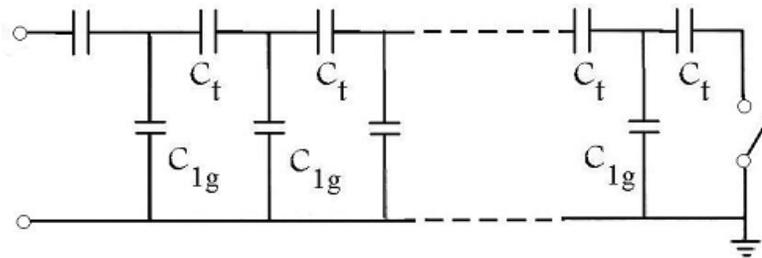


Figura 3.2. Circuito equivalente de la red de capacitancias para un devanado tipo capa.

3.3 Características de los tipos de devanado

En los primeros años del desarrollo de la tecnología del transformador en altas tensiones, el uso de pantallas electrostáticas era bastante común, pues se trata de un método de protección muy útil en que el efecto de la capacitancia a tierra de una sección individual del devanado se neutraliza por medio de la capacitancia correspondiente a la pantalla [10, 11]. Así, las corrientes en la capacitancia a tierra se reducen y también corriente que fluye a través de las capacitancias en serie del devanado. Si las capacitancias en serie a lo largo de

los devanados se hacen iguales, se puede lograr que la distribución inicial de tensión sea uniforme. Esta pantalla electrostática está en la terminal y en la línea de potencial, por lo tanto debe aislarse del devanado y del tanque a lo largo de su altura. La capacitancia en la pantalla electrostática se puede calcular sobre la base que actúa como una capa más del devanado del transformador [33].

3.3.1 Devanado tipo disco

La capacitancia del devanado tipo disco mostrada en la figura 3.3 se determina considerando la distribución de tensión lineal. El término C_T denota la capacitancia entre vueltas, mientras que C_D representa la capacitancia entre una vuelta de un disco y la correspondiente vuelta de otro disco. Si N_D es el número de vueltas por disco, entonces el número de capacitancias entre vueltas (C_T) en cada disco es $(N_D - 1)$. Además, el número de capacitancias de intersección (C_D) entre dos discos es $(N_D - 1)$. La capacitancia en serie del disco del devanado es la resultante de las capacitancias entre vueltas y entre discos.

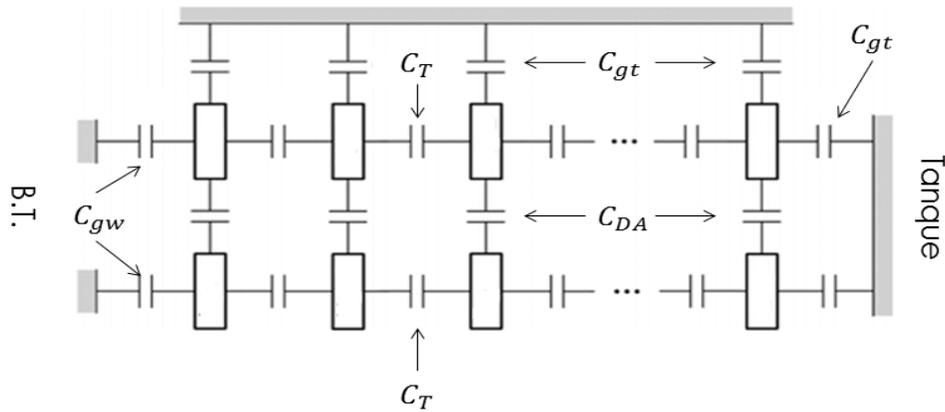


Figura 3.3. Par de discos de un devanado continuo.

La tensión por vuelta para el par de discos es $(V/2N_D)$. Considerando el principio de que la suma de las energías en las capacitancias individuales dentro del par de discos proporciona toda su energía, se puede escribir la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{2} C_T \left(\frac{V}{2N_D} \right)^2 2(N_D - 1) = \frac{1}{2} C_{TR} V^2 \quad (3.1)$$

donde C_{TR} es la capacitancia resultante entre vueltas definida como:

$$C_{TR} = \frac{C_T}{2N_D^2} (N_D - 1) \quad (3.2)$$

Para determinar la capacitancia vuelta a vuelta en el devanado tipo disco, la capacitancia vuelta a vuelta está dada por:

$$C_T = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_p \pi D_m (w + t_p)}{t_p} \quad (3.3)$$

dónde D_m es el promedio del diámetro del devanado, w es el ancho del conductor desnudo en la dirección axial, t_p es el espesor total del aislamiento de papel, ε_0 y ε_p son la permitividad del vacío y del aislamiento de papel respectivamente.

3.3.2 Devanado tipo capa

Para un devanado tipo capa, como el mostrado en la figura 3.4, una vuelta individual puede tener un número de conductores paralelos dependiendo del valor de la corriente. Su capacitancia en serie se puede determinar considerando C_T la capacitancia entre vuelta y N_W el número total de vueltas en el devanado y asumiendo que la distribución de tensión es uniforme en el devanado [44]. Así la energía almacenada en el devanado es igual a la suma de las energías almacenadas en las capacitancias individuales:

$$En = \frac{1}{2} C_T \left(\frac{V}{N_W} \right)^2 (N_W - 1) = \frac{1}{2} C_S V^2 \quad (3.4)$$

Y por lo tanto:

$$C_S = \frac{C_T (N_W - 1)}{N_W^2} \cong \frac{C_T}{N_W} \quad (3.5)$$

Para determinar la capacitancia en serie de diferentes tipos de devanados, el cálculo de las capacitancias vuelta a vuelta y disco a disco son esenciales. La capacitancia vuelta a vuelta está dada por la ecuación 3.3.

Para un devanado helicoidal (devanado de capa con espacios radiales entre vueltas), la ecuación anterior se aplica con C_T calculada con la ecuación 3.5, la proporción del área ocupada por los espaciadores (aislamiento sólido).



Figura 3.4. Devanado tipo capa.

El valor de la capacitancia capa a capa C_{ll} entre dos capas de vueltas está dada por [45]:

$$C_{ll} = \frac{n_t(n_t + 1)(2n_t + 1)}{6n_t^2} l C_T \quad (3.6)$$

donde l es el promedio de longitud de una vuelta y n_t es el número de vueltas.

3.3.3 Devanado intercalado

Un devanado intercalado resulta en un considerable incremento de capacitancias en serie. En este tipo de devanados, geoméricamente las vueltas adyacentes se mantienen lejos eléctricamente una de la otra, por lo que la tensión entre vueltas adyacentes aumenta. Las capacitancias entre los discos tienen muy poco efecto en las capacitancias en serie. Así es suficiente considerar sólo las capacitancias entre vueltas para el cálculo de la capacitancia en serie de los devanados intercalados. De aquí se desprende que el segundo enfoque del cálculo para la capacitancia, basado en la distribución de tensión lineal, será preciso para los devanados intercalados en comparación con los devanados continuos.

Para los devanados intercalados (figura 3.5), el número de capacitancias entre vueltas por disco es $(N_D - 1)$. El número total de las capacitancias entre vueltas en un par de discos es $2(N_D - 1)$. En la ecuación 3.8 V es la tensión aplica y se considera con una distribución uniforme en el devanado. El número de vueltas eléctricas entre la primera y segunda vuelta es 10, mientras que entre la segunda y tercera vuelta es 9; este arreglo se repite alternativamente dentro de los discos. Por lo tanto, para el par de discos, la tensión a través de N_D capacitancias es $(V/2)$ y a través de la capacitancia restante $(N_D - 2)$ es $\left(\frac{N_D - 1}{N_D} \frac{V}{2}\right)$. La energía almacenada en el par de discos está dada por:

$$E_n = \frac{1}{2} C_T \left(\frac{V}{2}\right)^2 N_D + \frac{1}{2} C_T \left[\frac{(N_D - 1)}{2 N_D} V\right]^2 (N_D - 2) = \frac{1}{2} C_{se} V^2 \quad (3.7)$$

$$C_{se} = \frac{C_T}{4} \left[N_D + \left(\frac{N_D - 1}{N_D} \right)^2 (N_D - 2) \right] \quad (3.8)$$

Las vueltas intercaladas pueden dar un incremento substancial en la capacitancia serie y por lo tanto los devanados intercalados son usados ampliamente en transformadores de alta tensión.

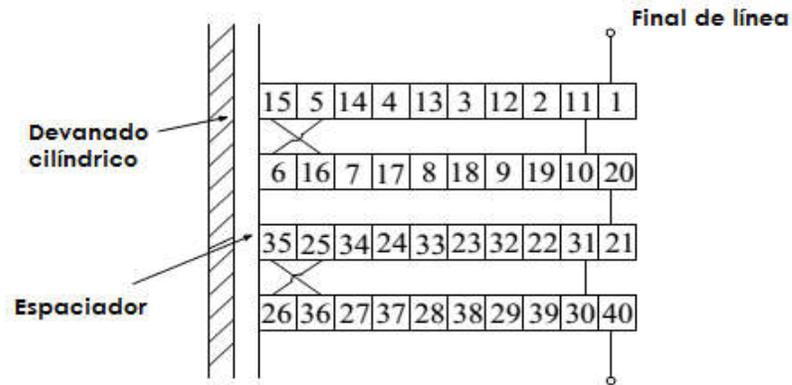


Figura 3.5. Devanados intercalados.

3.4 Distribución de tensión en los devanados.

La figura 3.6 a) muestra un modelo de devanado tipo capa, mientras que la figura 3.6 b) muestra su circuito equivalente de red capacitiva. De acuerdo con la figura 3.6 a) hay una capacitancia entre cada conductor y los conductores siguientes o anteriores. Si n es el número de vueltas, entonces el número de capacitancias en serie es $n-1$ [46].

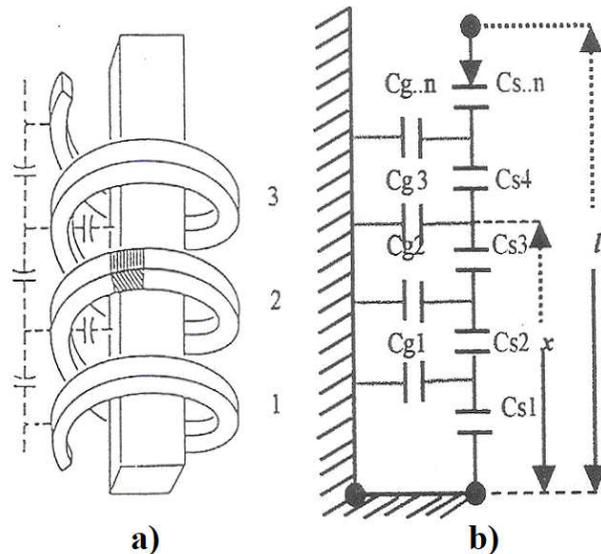


Figura 3.6. Devanado tipo capa, a) modelo esquemático, b) circuito equivalente de red capacitiva.

Como se mencionó anteriormente, la instalación de una pantalla electrostática entre los devanados primario y secundario es una práctica recomendada para los transformadores que manejan altas tensiones o que son alimentados con un convertidor de potencia en aplicaciones de energía renovable. La función principal de la pantalla electrostática es aumentar las capacitancias en serie para hacer una distribución de tensión más uniforme, además de desacoplar capacitivamente los devanados primario y secundario. La ventaja de este método es que suprime la transferencia de contenidos de alta frecuencia de la tensión generada en cada lado del transformador [47].

La influencia de la instalación de la pantalla electrostática entre los devanados incide en el aumento de la capacitancia en serie del transformador. Si en las terminales del transformador incide un impulso de tensión, la magnitud de la capacitancia en serie de los devanados tiene un efecto importante en la distribución de tensión de impulso y las tensiones a lo largo de los devanados. Si se aumenta las capacitancias en serie de los devanados, la distribución de tensión se vuelve más lineal y la tensión en el devanado se reduce. Un análisis comparativo de la distribución de tensión entre el devanado tipo disco con pantalla electrostática y sin pantalla se lleva a cabo en [23], donde se concluye que la distribución de tensión en el devanado con pantalla electrostática es más uniforme.

La figura 3.7 muestra la configuración de un devanado tipo disco que incorpora pantallas electrostáticas. Estas pantallas pueden estar hechas de cobre o aluminio. Las pantallas se insertan en lugares predeterminados entre las capas del devanado y se mantienen aisladas de los conductores [30].

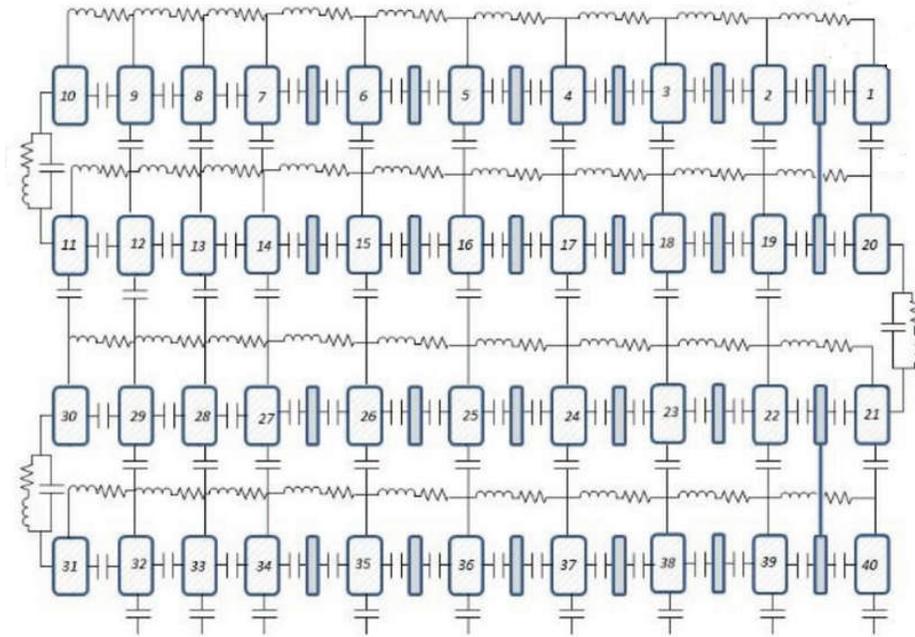


Figura 3.7. Red equivalente RLC para un devanado tipo disco.(circuito simplificado que solo incluye las capacitancias relacionadas)

3.5 Simulación de red capacitiva

Generalmente los transformadores se prueban bajo diferentes impulsos estándar en las fábricas para examinar la influencia de las tensiones transitorias en el sistema de aislamiento y sus devanados. Para analizar esta situación, un devanado del transformador puede estar representado por un circuito uniformemente distribuido de inductancias en serie y capacitancias a tierra y en serie [48]. Cuando se aplica un impulso de tensión a este circuito, la distribución de tensión inicial está determinada completamente por la red capacitiva [49].

Para hacer más eficiente el sistema de aislamiento dentro del transformador, es necesario diseñar devanados que eliminen, o al menos reduzcan considerablemente la concentración de tensión inicial en el final de la línea, así como las altas tensiones oscilatorias a lo largo del devanado. Cualquier mejora, es decir, una mayor linealidad de la distribución inicial de

tensión, disminuirá la diferencia entre las respuestas inicial y final del devanado, y también reducirá la magnitud de las tensiones oscilatorias. Por lo tanto, puede ser suficiente concentrarse únicamente en mejorar la distribución de tensión inicial en los devanados. Dado que esta distribución está controlada completamente por la relación de las capacitancias a tierra y en serie, reducir la capacitancia a tierra o aumentar la capacitancia en serie puede ayudar a lograr una mejor distribución inicial de tensión [7]. Para evitar la ruptura del aislamiento, es necesario mejorar la distribución inicial de tensión a través del devanado, es decir, reducir el gradiente máximo de voltaje de capa a capa. Por este motivo, en el diseño de transformadores para operaciones de alto voltaje, se intenta que la capacitancia en serie total del devanado tenga el mayor valor posible. En este caso, la distribución de tensión inicial a lo largo del devanado será uniforme, por lo que también se protegerá el aislamiento de los conductores al inicio del devanado.

Como se mencionó anteriormente, para minimizar el daño al devanado en el momento del impacto de la tensión de impulso, el coeficiente de α debe tener el valor más pequeño posible. Los métodos de intercalar las vueltas del devanado y el uso de la pantalla electrostática en los devanados se utilizan para aumentar la capacitancia en serie total del devanado y la linealización de la distribución de tensión inicial en el devanado o la disminución de la constante de distribución de tensión α [50].

Para el análisis de la red capacitiva y el desarrollo de su modelo, a continuación se presentan los datos del transformador. Sus capacitancias se han calculado a partir de las dimensiones y especificaciones del diseño, cada capacitancia relacionada (vuelta a vuelta, capa a capa, a tierra y entre B.T.-A.T.) está dada como se muestra en [8, 33]. Las características del transformador son: 2500 kVA, 13200/7621 V en A.T. conexión estrella, 690 V en B.T. conexión delta, y sumergido en líquido aislante. Las tablas 3.1 y 3.2 muestran los datos de vueltas, capas y espesores para los devanados de A.T y B.T, respectivamente.

Tabla 3.1. Geometría del devanado de A.T.

Parámetros	Valores
Numero de vueltas	34 por capa
Numero de capas	6
Espesor conductor/vuelta	0.762 cm
Espesor de aislamiento entre capas	8 mm
Altura devanado A.T.	71.2 cm
Aislamiento entre devanados A.T.-B.T.	ducto (6mm)+ papel kraft (2mm) + ducto (6 mm)
Distancia desde el centro del núcleo hasta el devanado de A.T.	19.95 cm
Distancia desde el centro del núcleo hasta el final del devanado de A.T.	24 cm

Tabla 3.2. Geometría del devanado de B.T.

Parámetros	Valores
Altura devanado B.T.	75.2 cm
Numero de capas	2
Diámetro del núcleo	27.3 cm
Aislamiento entre núcleo y devanado B.T.	1.1 cm
Distancia desde centro del núcleo hasta el devanado B.T.	14.75 cm
Espesor conductor de cada capa	1.2954 cm
Distancia desde el centro del núcleo hasta el final del devanado de B.T.	18.05 cm
Ancho interno del tanque	199.6 cm
Permitividad aceite	2.25
Permitividad papel aislante	4.2

Para el análisis de la distribución inicial de tensión, se realizó el estudio con la instalación de una pantalla electrostática entre las capas de B.T. para los diferentes espesores mostrados en la tabla 3.3.

Tabla 3.3. Tabla de calibres para lámina de cobre.

No.	Espesor	
	Pulgadas	mm
16	0.065	1.615
18	0.048	1.245
22	0.028	0.711
26	0.018	0.457

Para el análisis de la DTI se desarrolló una red capacitiva incluyendo la pantalla electrostática. Fueron cuatro los casos de análisis, en los cuales el espesor de la pantalla electrostática se varió en cada uno de ellos conforme a los calibres presentados en la tabla 3.3.

La tabla 3.4 muestra las capacitancias obtenidas en cada caso para el devanado de A.T. del transformador.

Tabla 3.4. Capacitancias entre capas en el devanado de A.T.

Casos	Capacitancia (F) capa 1	Capacitancia (F) capa 2	Capacitancia (F) capa 3	Capacitancia (F) capa 4	Capacitancia (F) capa 5	Capacitancia (F) capa 6
PE 16	4.4382E-09	4.6162E-09	4.7943E-09	4.9723E-09	5.1504E-09	5.3284E-09
PE 18	4.4301E-09	4.6081E-09	4.7862E-09	4.9642E-09	5.1422E-09	5.3203E-09
PE 22	4.4183E-09	4.5964E-09	4.7744E-09	4.9525E-09	5.1305E-09	5.3085E-09
PE 26	4.4128E-09	4.5908E-09	4.7688E-09	4.9469E-09	5.1249E-09	5.3030E-09

Las capacitancias correspondientes al devanado B.T. para cada caso se presentan en la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Capacitancias devanado B.T.

Casos	Capacitancia (F) capa 1	Capacitancia (F) capa 2
PE 16	3.4132E-09	4.3967E-09
PE 18	3.4132E-09	4.3878E-09
PE 22	3.4132E-09	4.375E-09
PE 26	3.4132E-09	4.3689E-09

La capacitancia entre los devanados de B.T. y A.T., se muestra en la tabla 3.6, mientras que capacitancias a tierra se presentan en la tabla 3.7. Las capacitancias relacionadas con la instalación de la pantalla electrostática para diferentes calibres se muestran en la tabla 3.8.

Tabla 3.6. Parámetros de capacitancia entre B.T.-A.T.

Casos	Capacitancia (F) capa 1
PE 16	1.6728E-07
PE 18	1.6712E-07
PE 22	1.6688E-07
PE 26	1.6677E-07

Tabla 3.7. Capacitancias a tierra

Casos	Capacitancia (F) a Tierra
PE 16	5.6394E-08
PE 18	5.6339E-08
PE 22	5.6261E-08
PE 26	5.6223E-08

Tabla 3.8. Capacitancias para la pantalla electrostática para cada calibre.

Casos	Capacitancia (F) PE
PE 16	1.3589E-09
PE 18	1.1507E-09
PE 22	8.5024E-10
PE 26	7.0731E-10

Las capacitancias entre vueltas para los devanados de B.T. y A.T. para cada caso de análisis se muestran en la tabla 3.9. Los valores de capacitancias relacionadas restantes se calcularon previamente.

Tabla 3.9. Capacitancia entre vueltas para cada caso.

	Sin PE (F)	Capacitancia PE 16 (F)	Capacitancia PE 18 (F)	Capacitancia PE 22 (F)	Capacitancia PE 26 (F)
B.T.	7.53526E-08	7.59169E-08	7.583044E-08	7.570567E-08	7.564633E-08
A.T.	1.02689E-07	1.03254E-07	1.031677E-07	1.030429E-07	1.029836E-07

3.5.1 Generador de tensión de impulso

Para llevar a cabo el análisis del circuito capacitivo equivalente de los devanados del transformador y obtener su respuesta al aplicar un impulso de tensión en sus terminales, se aplicó el nivel de tensión de impulso de 30 kV, conforme al estándar [51]. Para este tipo de pruebas a transformadores, se utiliza el equipo generador de impulso (GI) de descargas atmosféricas, el cual es un equipo eléctrico compuesto principalmente por capacitores y resistores. Estos elementos desempeñan diversas funciones para producir o generar intencionalmente formas de onda de voltajes transitorios de alta tensión. Los impulsos de alta tensión se generan para simular descargas atmosféricas y/o sobretensiones por maniobra, con la capacidad de poder modificar las características de la forma de onda producida tales como: tiempo de ascenso al máximo de amplitud de tensión, tiempo de descenso al 50% de amplitud, perfil de onda, etc.

Los experimentos que se realizan con un GI en laboratorios de investigación varían considerablemente y van desde ensayos de rutina para determinar la eficiencia y

confiabilidad de los materiales hasta estudios de los materiales dieléctricos empleados en equipos eléctricos que operan a diferentes condiciones. Básicamente, estos equipos están diseñados para efectuar pruebas dieléctricas principalmente en materiales aislantes y equipos eléctricos, simulando sobretensiones temporales como las que aparecen en los sistemas eléctricos de potencia. Las pruebas realizadas con el GI a niveles de cientos y miles de volts se aplican a equipos tales como: aisladores, transformadores, pararrayos, conductores, cuchillas y generadores [52, 53].

Al originarse un transitorio, se generan tensiones y corrientes que están compuestas por señales de diversas frecuencias, las cuales se atenúan o surgen conforme se desarrolla el transitorio, por lo que la composición de armónicos de las tensiones y corrientes varía con el tiempo. Esto se debe a que la corriente en una inductancia no puede cambiar repentinamente y a que la tensión a través de un capacitor no varía instantáneamente, puesto que la carga almacenada toma un tiempo para redistribuirse en el circuito eléctrico.

La forma de onda de las sobretensiones tipo impulso puede ser representada por una doble exponencial, la cual está definida por:

$$V = V_0[\exp(-\alpha t) - \exp(-\beta t)] \quad (3.10)$$

donde V es el impulso de voltaje, V_0 es el voltaje inicial y α - β son los parámetros de la forma de onda exponencial la cual puede ser generada en el laboratorio ya sea combinando circuitos RLC bajo condiciones de sobre amortiguamiento o circuitos RC [54]. Diferentes tipos de circuitos como los que se muestran en la figura 3.8. Estos circuitos son los más usados y corresponden cuatro modelos básicos, obteniendo así diferentes características con cada uno de ellos. Estos circuitos pueden lograr tensiones de impulso de tipo descargas atmosféricas y por maniobra. Aunque existen otros circuitos que pueden generar una onda exponencial de tensión, la cual puede usarse como un impulso de voltaje tipo atmosférico, el esquema de circuito más utilizado está formado por dos capacitores, dos resistencias y un interruptor.

Los perfiles normalizados para las ondas de impulso son los conceptos más importantes que se aplican a su generación y uso de los impulsos de tensión y corriente para pruebas de equipos eléctricos en alta tensión. Un impulso de tensión es una onda de tensión transitoria de corto tiempo con polaridad única la cual es obtenida a partir de una disrupción en el aire y

curva característica, sin tener en cuenta las oscilaciones del rizado, crece rápidamente hasta un valor máximo y luego decrece a cero. Esta curva se muestra en la figura 3.9 y está definida por su valor pico, su polaridad y los parámetros característicos de tiempo. El impulso de tensión plena o de rayo (onda completa), es un impulso de tensión que después de alcanzar el valor pico en $1.2 \mu\text{s}$ decrece lentamente y exponencialmente a cero, con un tiempo al valor de la mitad de cola de $50 \mu\text{s}$, i.e., $1.2/50 \mu\text{s}$.

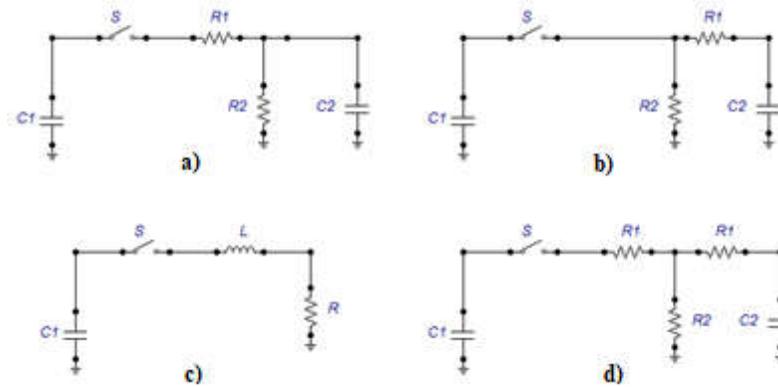


Figura 3.8. Circuitos eléctricos básicos que producen formas de onda tipo rayo. a), b) y d) son circuitos utilizados comercialmente para pruebas, c) circuito limitado sólo al modelado del generador.

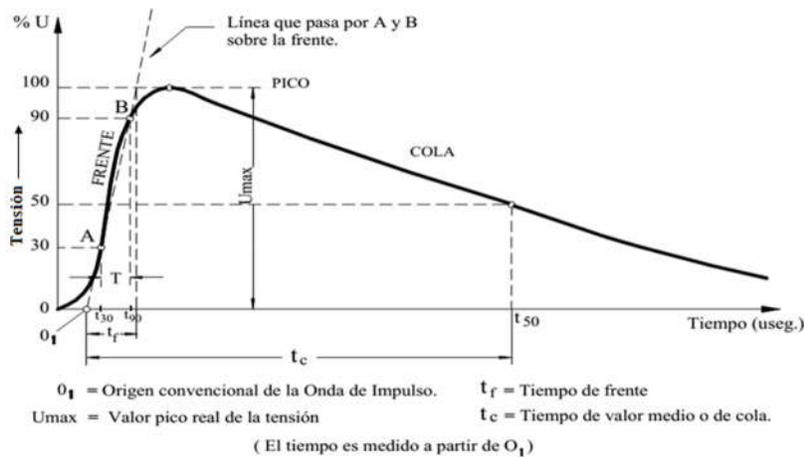
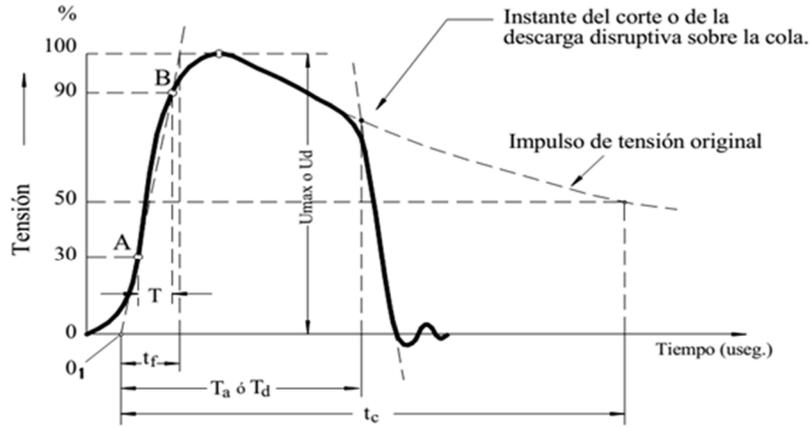


Figura 3.9. Característica de la forma de onda de voltaje de impulso completo [51].

Un impulso de tensión cortado o de onda cortada en la cola, es un impulso que es cortado súbitamente, luego de 2 ó $3 \mu\text{s}$ por una carga disruptiva, produciéndose una caída de tensión brusca hasta cero. El corte de impulso puede generarse por medio de un interruptor especial o bien puede ocurrir debido a una descarga en el aislamiento del objeto de prueba, tal como se

muestra en la figura 3.10. En impulso de voltaje de onda cortado en el frente el voltaje característico crece con una pendiente aproximadamente constante hasta que se corta en el frente por una descarga disruptiva, como se muestra en la figura 3.11.



T_a = Tiempo del corte en que se produce la discontinuidad inicial o la ocurrencia de la descarga disruptiva
 T_d = Instante en que ocurre la descarga disruptiva en el objeto de prueba.
 U_d = Tensión disruptiva. sobre el Impulso de Tensión.

Figura 3.10. Impulso de tensión de onda cortado en la cola [51].

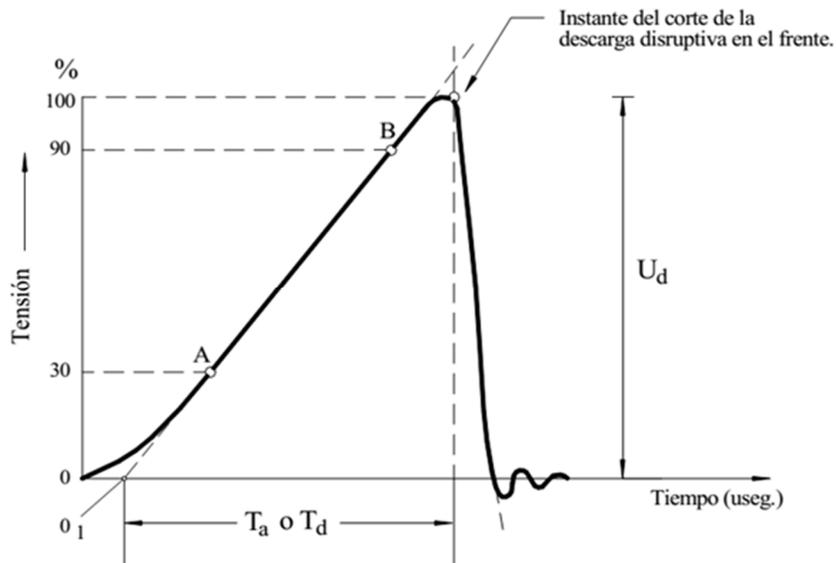


Figura 3.11. Descarga disruptiva sobre la cola [51].

3.5.2 Red capacitiva con pantalla calibre 16

La figura 3.12 muestra la red capacitiva completa para el análisis de la distribución inicial de tensión, instalando una pantalla electrostática de calibre 16 entre las capas de B.T. para así aumentar las capacitancias en serie y hacer más lineal la distribución de tensión a lo largo de los devanados del transformador. Desarrollando el circuito equivalente con el software ATP DRAW [55], la red capacitiva está formada por las capacitancias vuelta a vuelta, capa a capa, capacitancia entre B.T.-A.T., capacitancias a tierra (al núcleo y tanque). Cada vuelta y capa de los devanados de B.T. y A.T. está representada con sus capacitancias relacionadas, así como con sus capacitancias en serie que agrega la pantalla electrostática en el devanado de B.T.

La figura 3.13 muestra la red capacitiva del devanado de B.T., con el aumento de las capacitancias en serie de la pantalla electrostática.

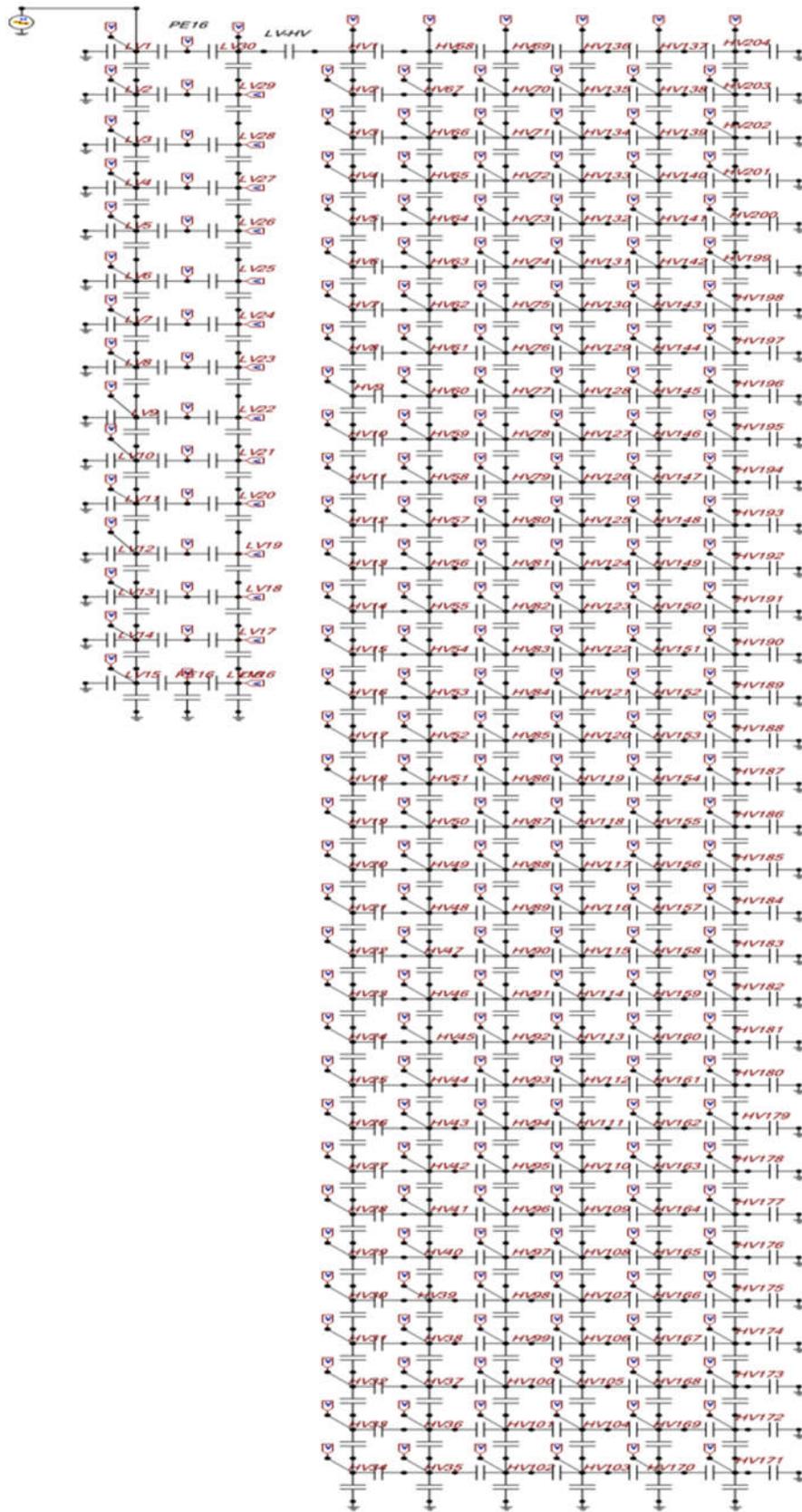


Figura 3.12. Red capacitiva completa con pantalla electrostatica calibre 16.

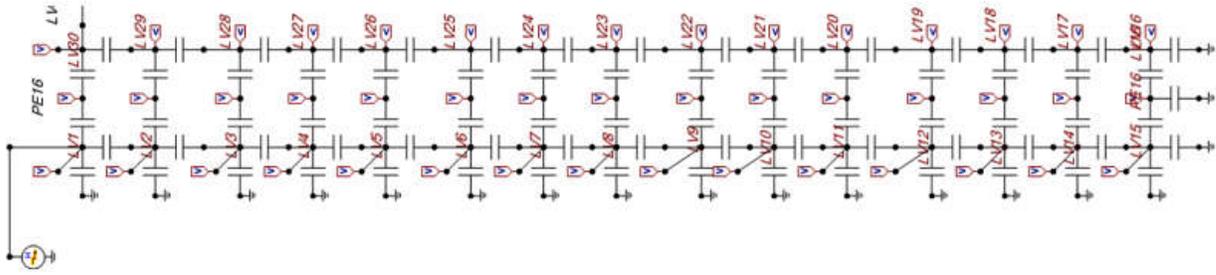
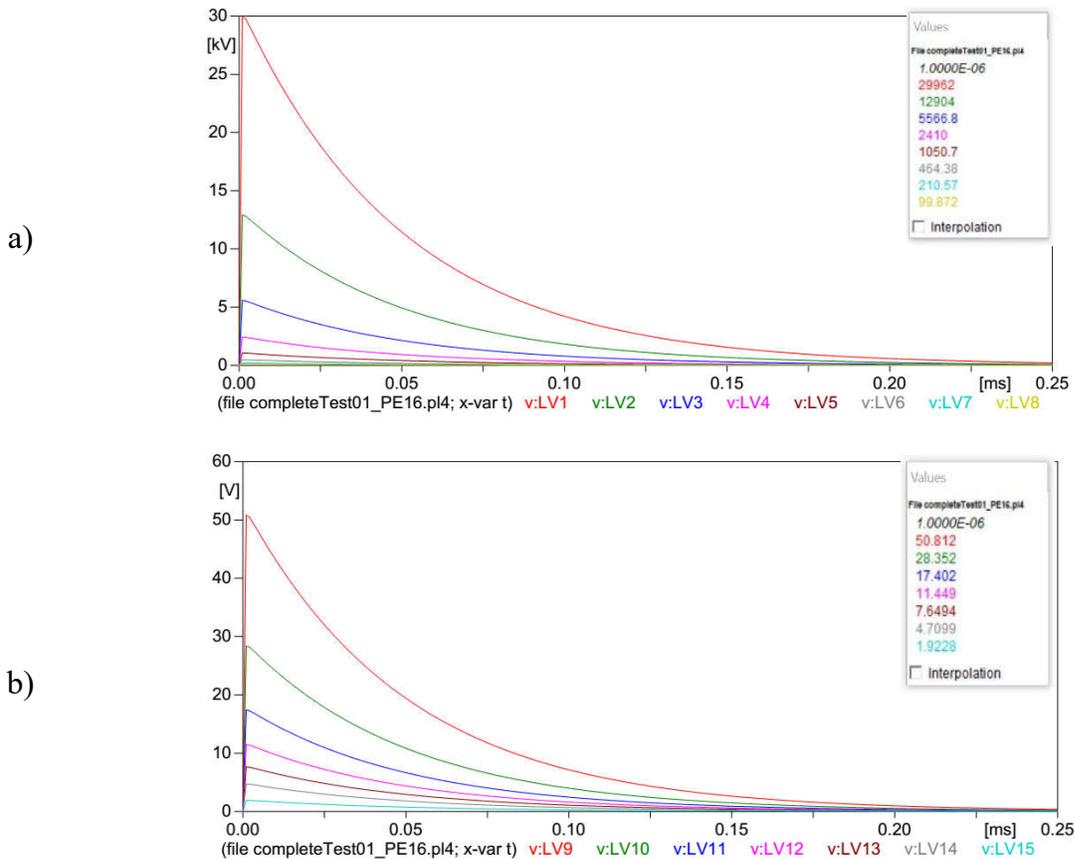
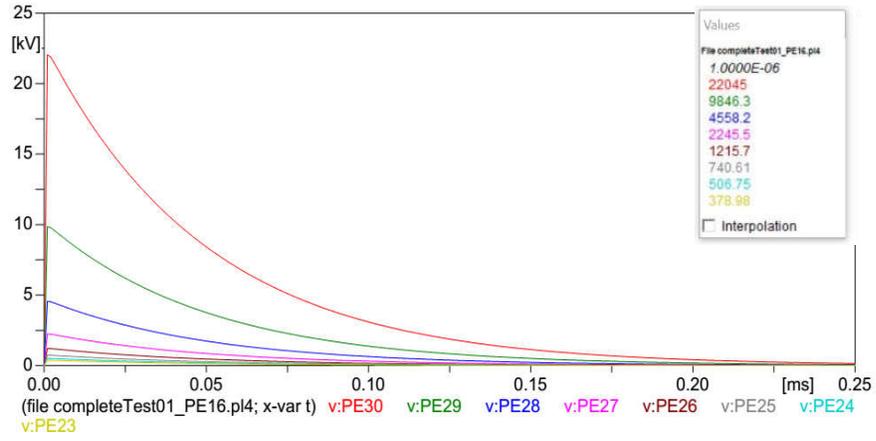


Figura 3.13. Red capacitiva para el devanado B.T. con pantalla electrostática.

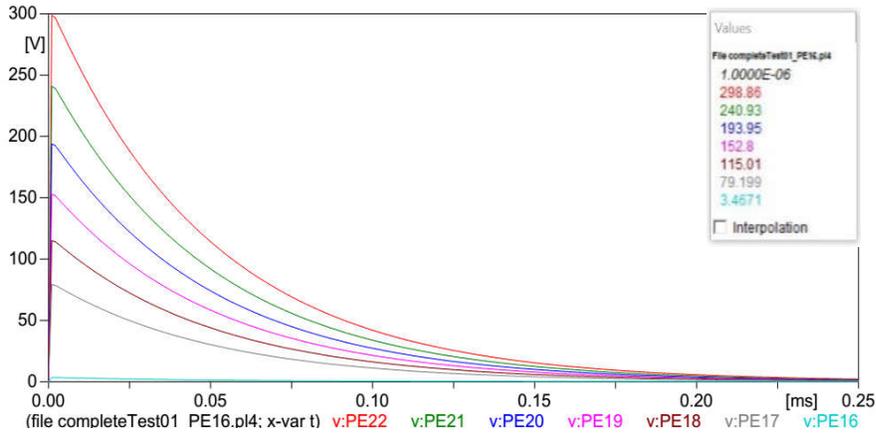
Las tensiones entre las vueltas y capas para el devanado B.T. incluyendo la pantalla electrostática son mostradas en la figura 3.14. En esta figura se observa la tensión en diferentes puntos del devanado de B.T. mostrando las tensiones en las dos capas del devanado y las tensiones en la pantalla electrostática.



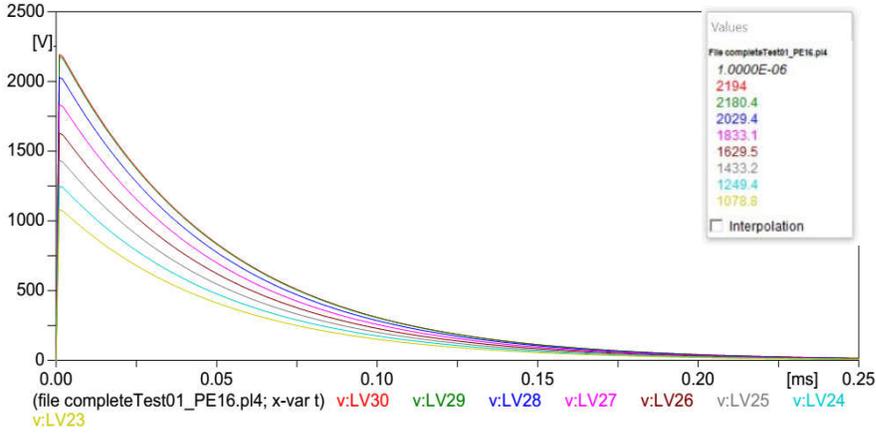
c)



d)



e)



f)

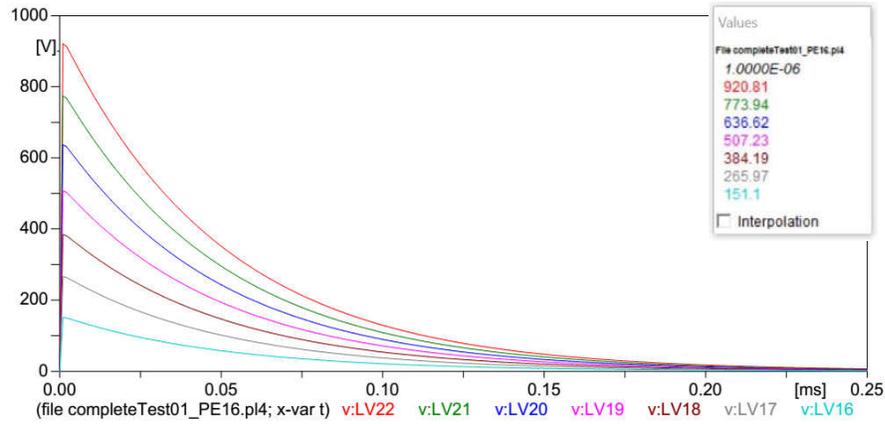
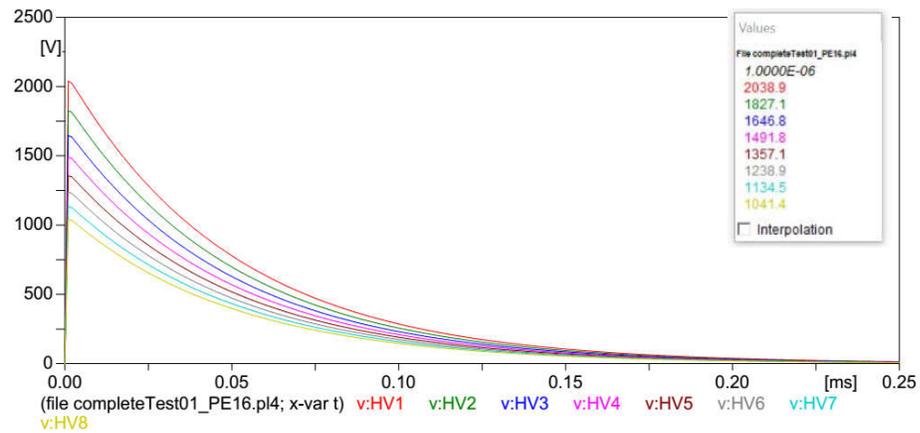


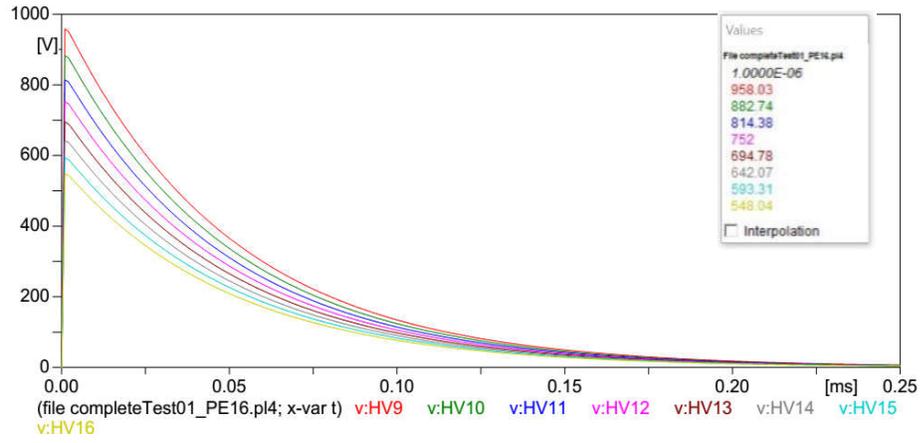
Figura 3.14. Tensiones a lo largo del devanado de B.T. con la pantalla electrostática entre sus capas: a) tensión para la capa 1 de la vuelta 1 a 8, b) tensión para la capa 1 de la vuelta 9 a 15, c) tensiones entre la pantalla y cada vuelta de la capa para la vuelta 1 a 15, d) tensiones entre la pantalla y cada vuelta de la capa para la vuelta 16 a 30, e) tensión para la capa 2 de la vuelta 23 a 30, f) tensión para la capa 2 de la vuelta 16 a 22.

Las tensiones entre las vueltas y capas para la primera capa del devanado de A.T. son mostradas en la figura 3.15. En esta figura se observa la tensión en las primeras 34 vueltas para la primera capa del devanado de A.T.

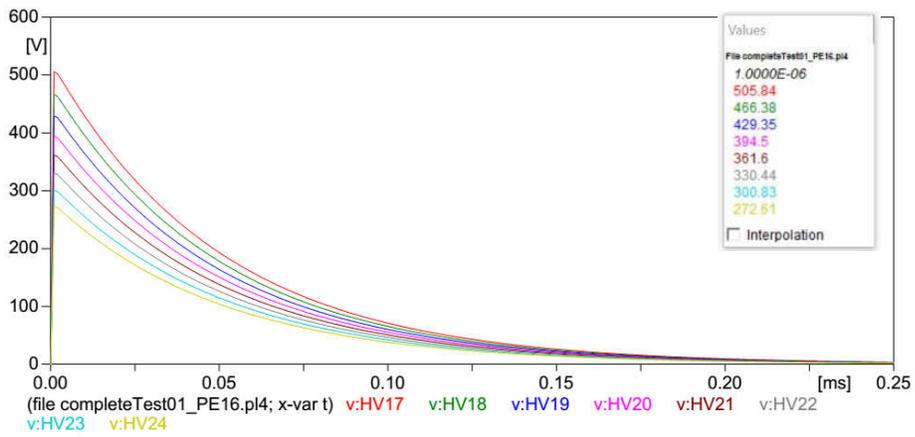
a)



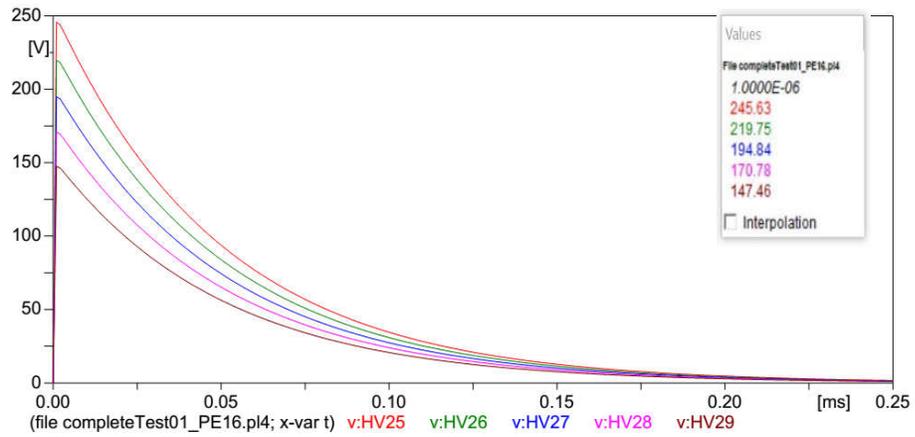
b)



c)



d)



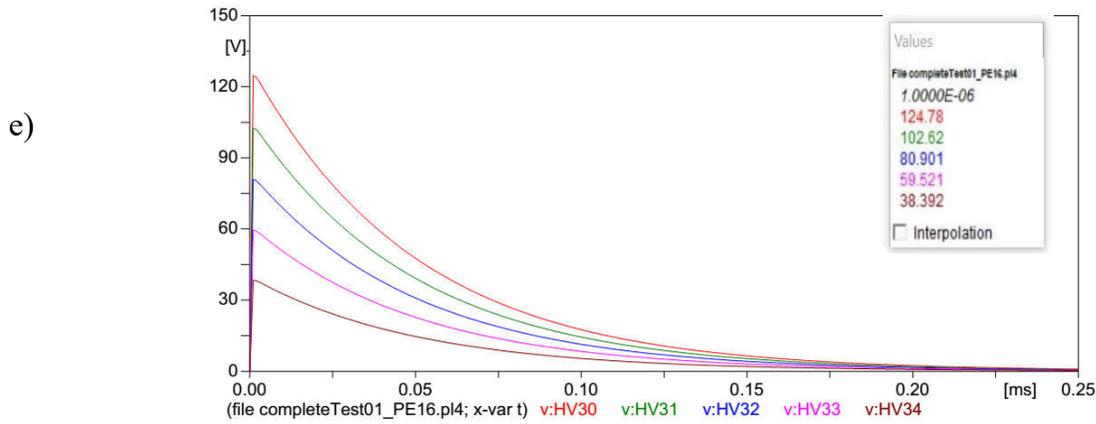
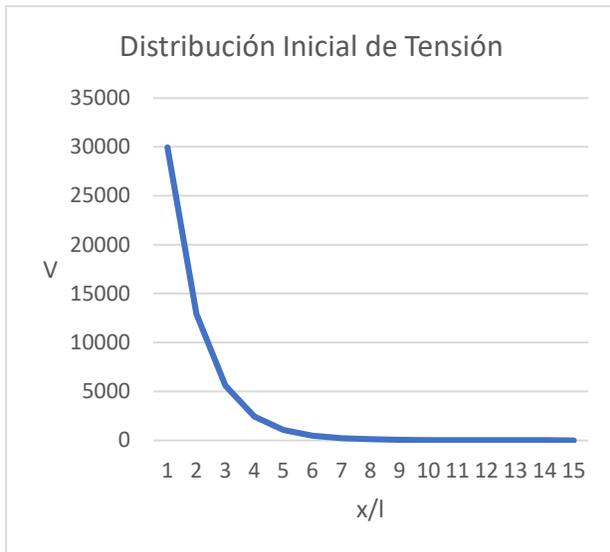
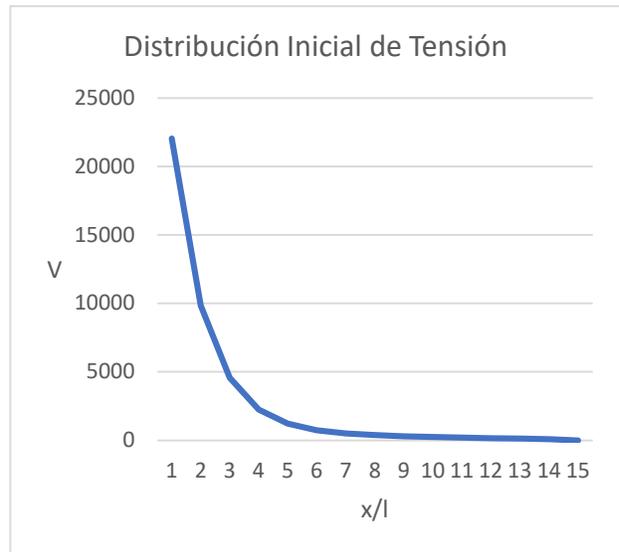


Figura 3.15. Tensiones a lo largo de la primera capa del devanado de A.T: a) tensión para la capa 1 de la vuelta 1 a 8, b) tensión para la capa 1 de la vuelta 9 a 16, c) tensión para la capa 1 de la vuelta 17 a 24, d) tensión para la capa 1 de la vuelta 25 a 29, e) tensión para la capa 1 de la vuelta 30 a 34.

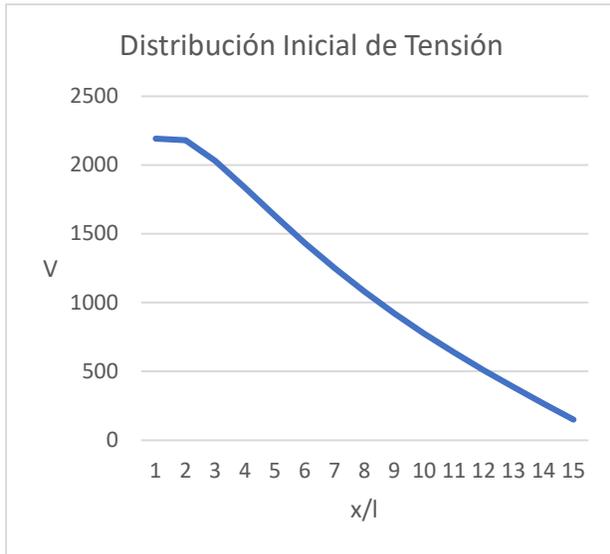
La figura 3.16 presenta la distribución inicial de tensión para las capas del devanado de B.T. y para la primera capa de A.T. con una pantalla electrostática entre sus capas de calibre 16. Con la instalación de la pantalla electrostática se obtiene un aumento de las capacitancias en serie del devanado, las cuales tienen un efecto en la distribución inicial de tensión, provocando que sea más lineal debido al efecto de la constante de distribución α .



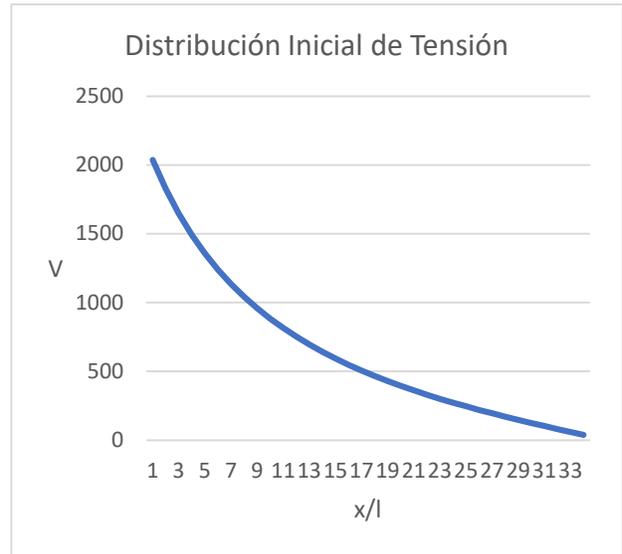
a)



b)



c)



d)

Figura 3.16. Distribución inicial de tensión: a) capa 1 devanado de B.T., b) capacitancias en pantalla electrostática, c) capa 2 devanado B.T., d) primera capa devanado A.T.

3.5.3 Red capacitiva con pantalla calibre 18

La figura 3.17 muestra la red capacitiva del devanado de B.T. con el aumento de las capacitancias en serie de la pantalla electrostática de calibre 18.

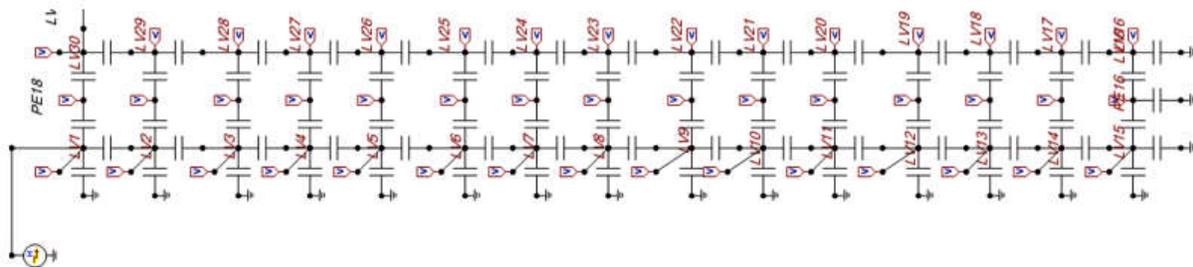
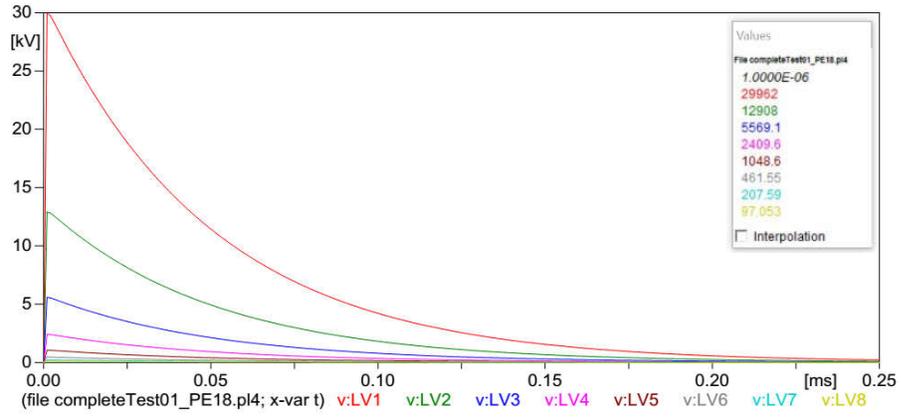


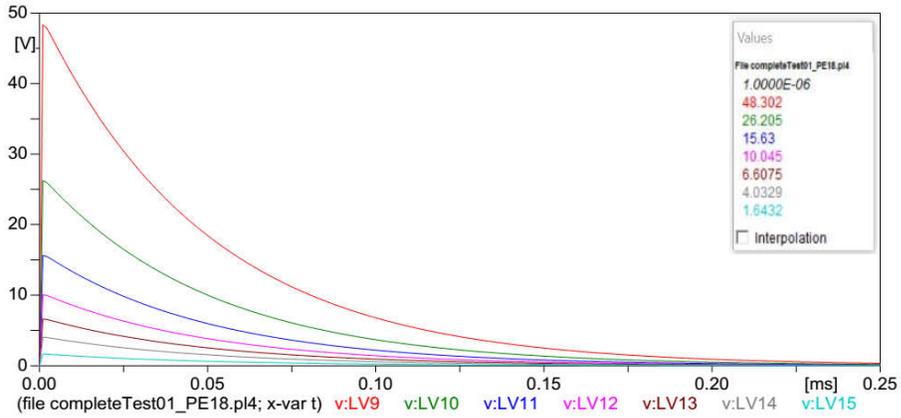
Figura 3.17. Red capacitiva para devanado B.T. con pantalla electrostática.

Las tensiones entre las vueltas y capas para el devanado de B.T. son mostradas en la figura 3.18. En esta figura se observa la tensión en diferentes puntos del devanado de B.T., mostrando las tensiones en las dos capas del devanado.

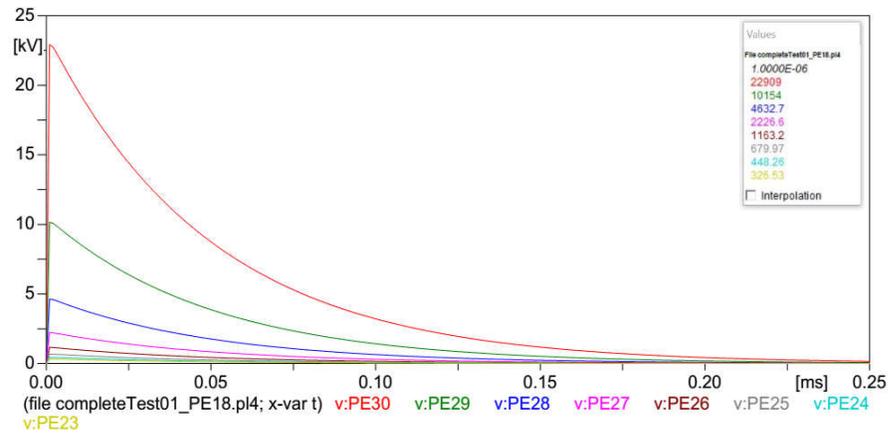
a)



b)



c)



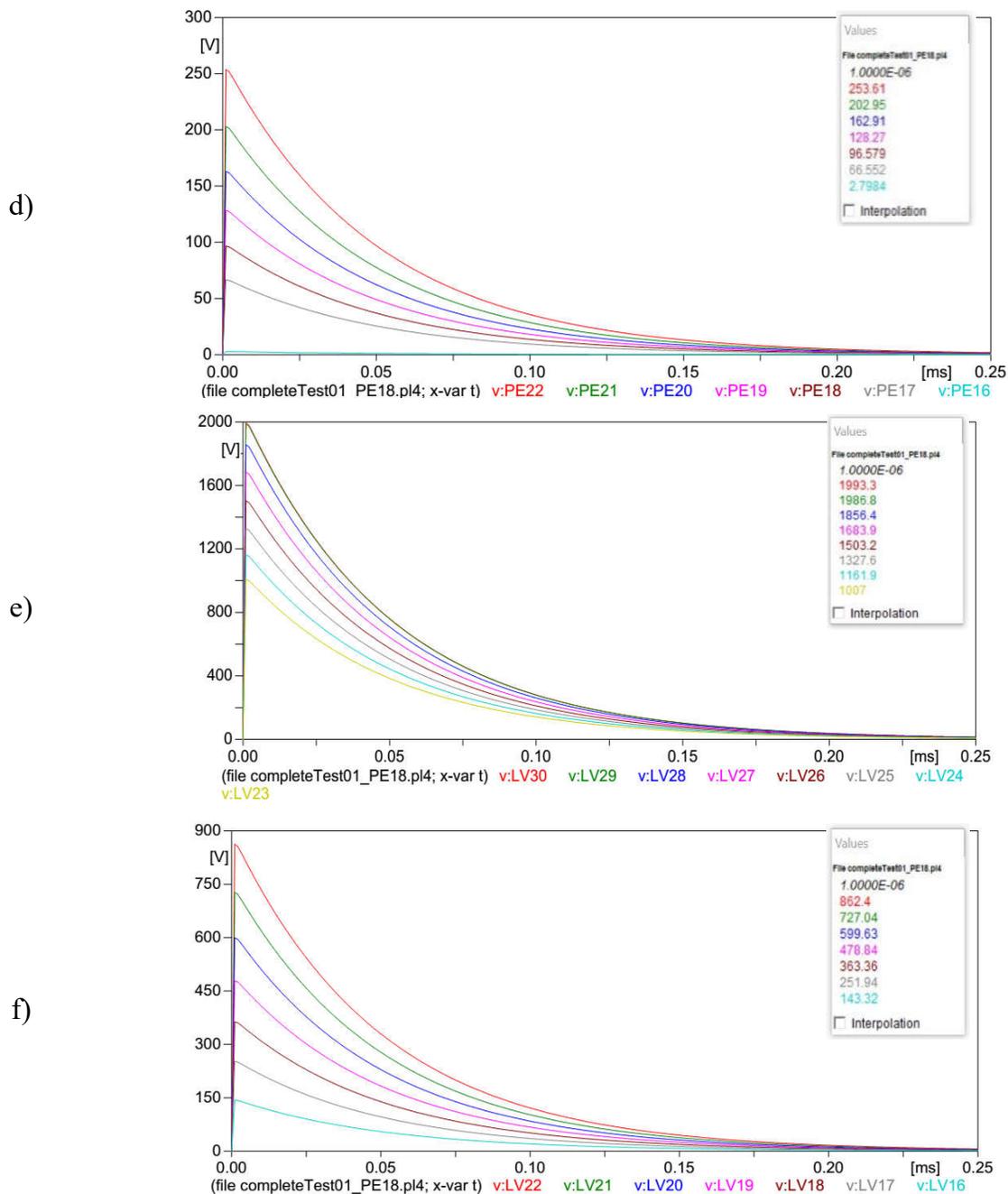
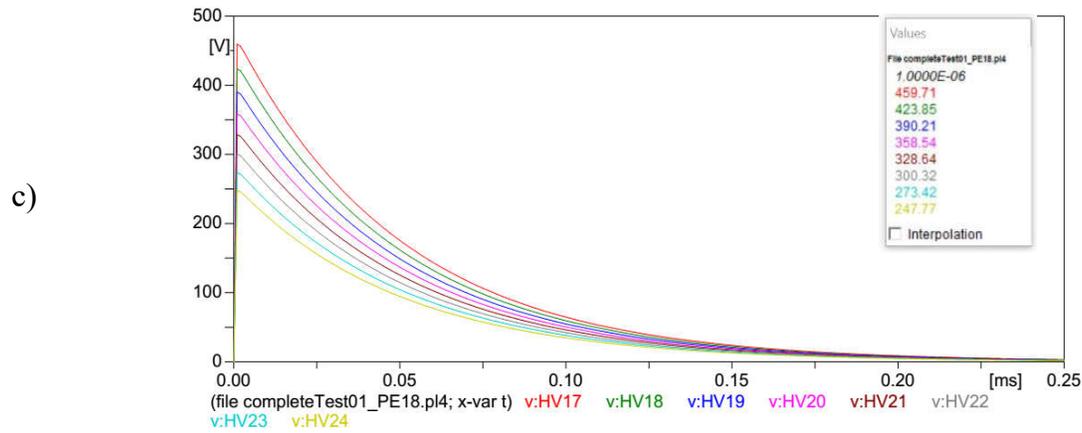
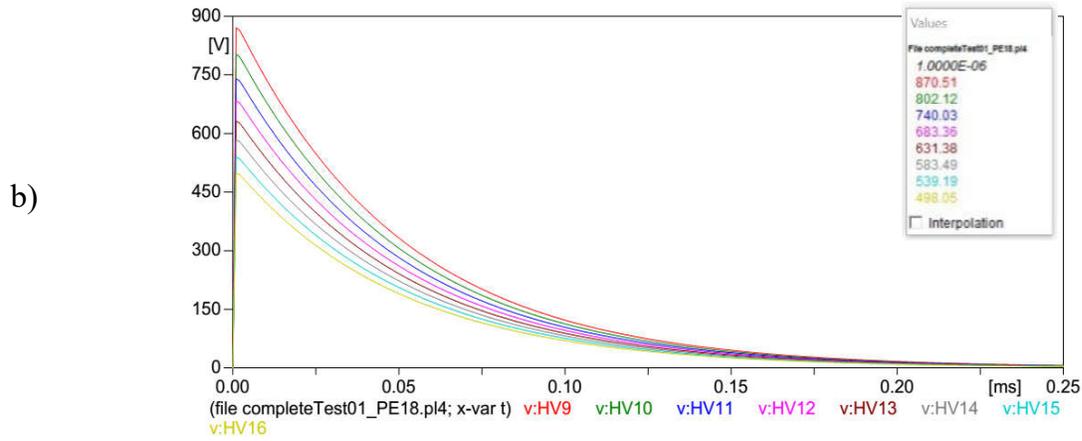
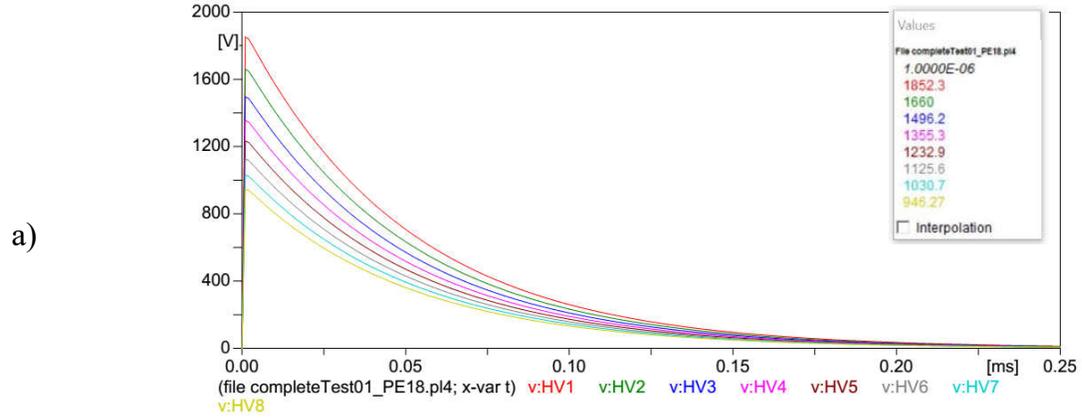
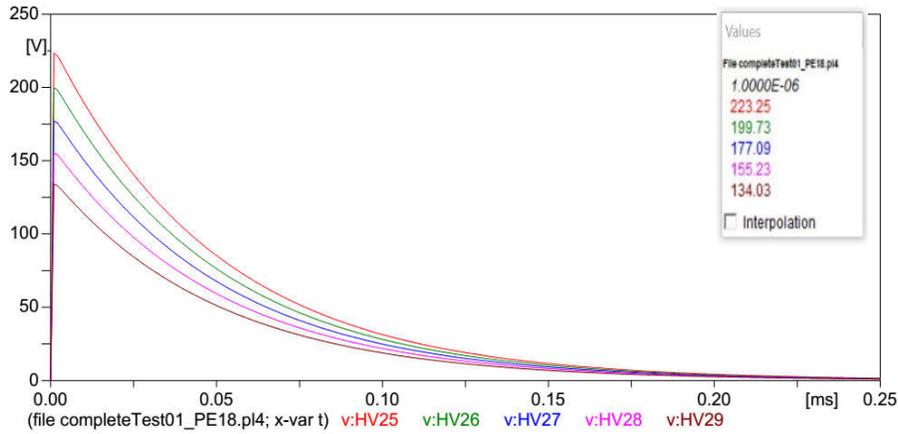


Figura 3.18. Tensiones a lo largo del devanado de B.T. con la pantalla electrostática entre sus capas: a) tensión para la capa 1 de la vuelta 1 a 8, b) tensión para la capa 1 de la vuelta 9 a 15, c) tensiones entre la pantalla y cada vuelta de la capa para la vuelta 1 a 15, d) tensiones entre la pantalla y cada vuelta de la capa para la vuelta 16 a 30, e) tensión para la capa 2 de la vuelta 23 a 30, f) tensión para la capa 2 de la vuelta 16 a 22.

Las tensiones entre las vueltas y capas para para la primera capa del devanado de A.T. son mostradas en la figura 3.19. En esta figura se observa la tensión en las primeras 34 vueltas para la primera capa del devanado de A.T.



d)



e)

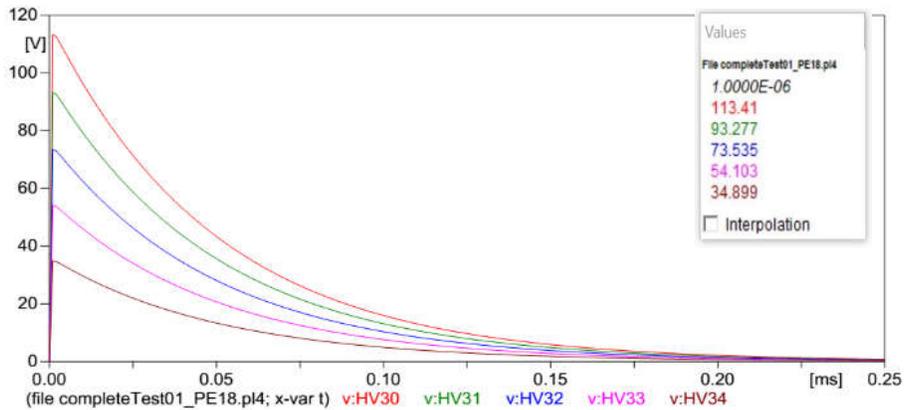
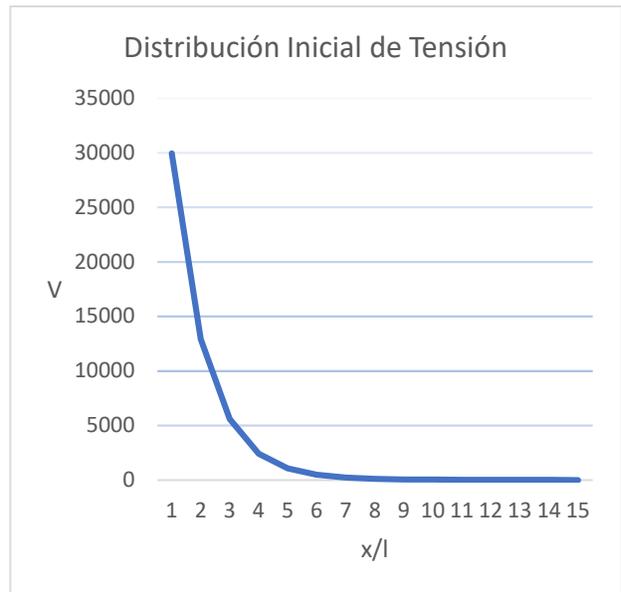


Figura 3.19. Tensiones a lo largo de la primera capa del devanado de A.T., a) tensión para la capa 1 de la vuelta 1 a 8, b) tensión para la capa 1 de la vuelta 9 a 16, c) tensión para la capa 1 de la vuelta 17 a 24, d) tensión para la capa 1 de la vuelta 25 a 29, e) tensión para la capa 1 de la vuelta 30 a 34.

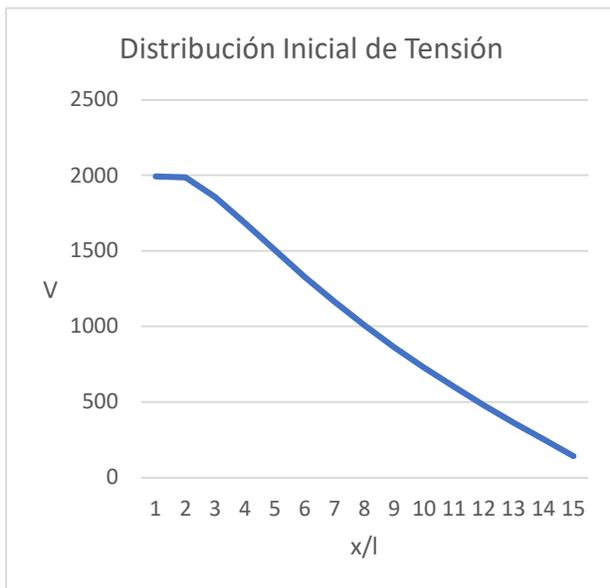
La figura 3.20 presenta la distribución inicial de tensión para las capas del devanado de B.T. y para la primera capa de A.T. con una pantalla electrostática entre sus capas de calibre 18. Con la instalación de la pantalla electrostática se obtiene un aumento de las capacitancias en serie del devanado, las cuales tienen un efecto en la distribución inicial de tensión, provocando que sea más lineal debido al efecto de la constante de distribución α .



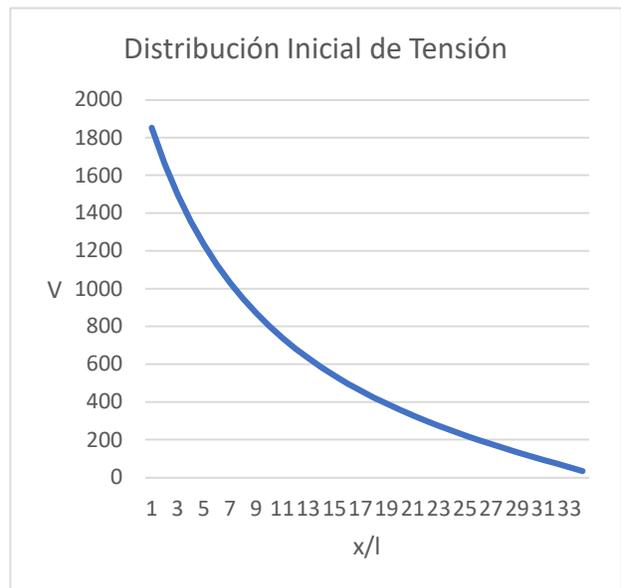
a)



b)



c)



d)

Figura 3.20. Distribución inicial de tensión: a) capa 1 devanado de B.T., b) capacitancias en pantalla electrostática c) capa 2 devanado B.T., d) primera capa devanado A.T.

3.5.4 Red capacitiva con pantalla calibre 22

La figura 3.21 muestra la red capacitiva del devanado de B.T. con el aumento de las capacitancias en serie de la pantalla electrostática.

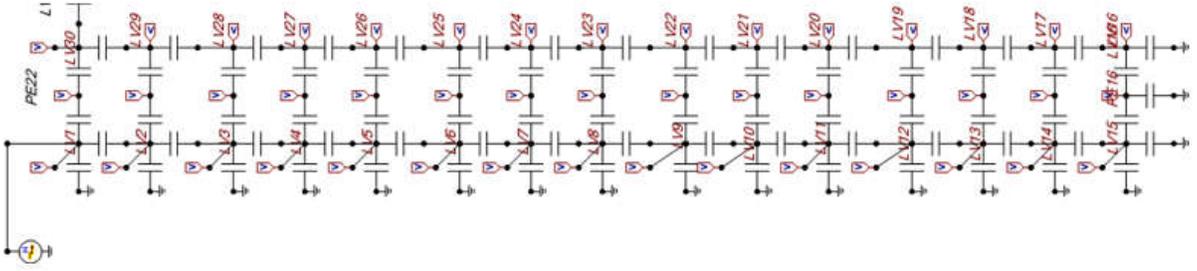
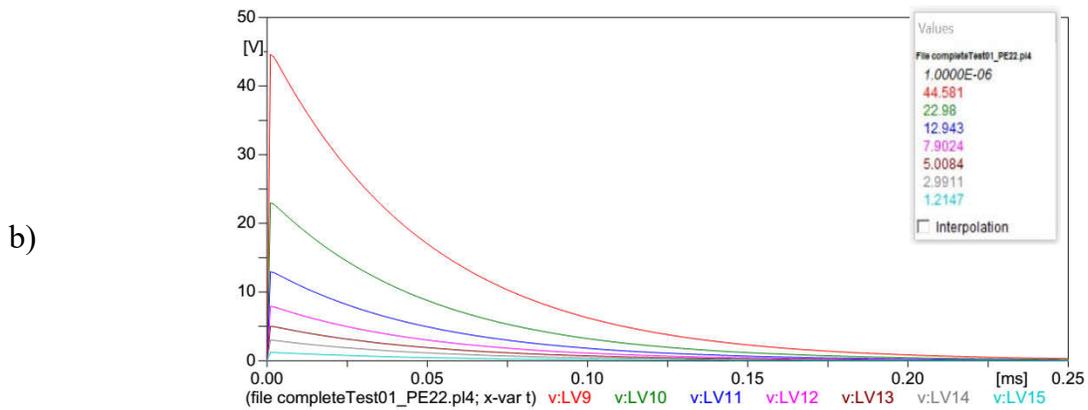
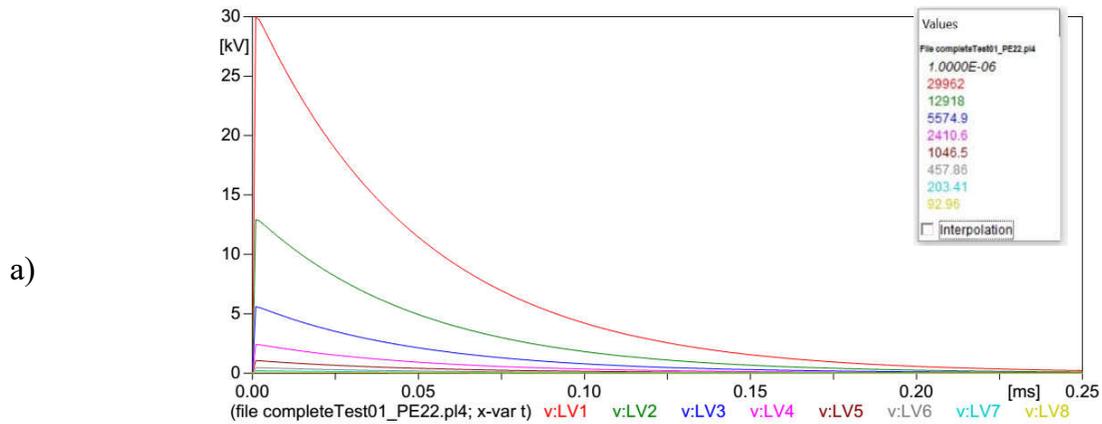
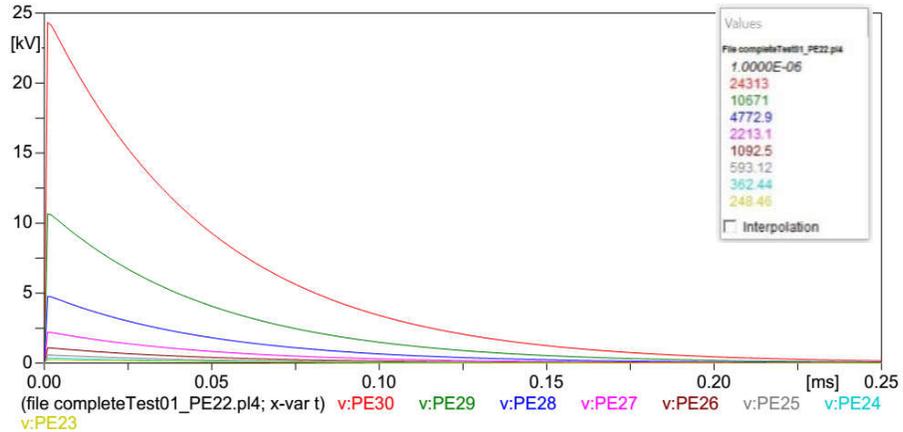


Figura 3.21. Red capacitiva para devanado B.T. con pantalla electrostática.

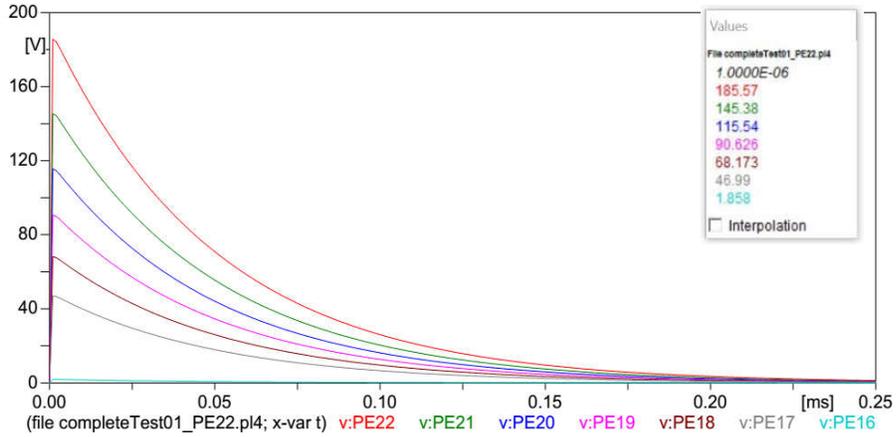
Las tensiones entre las vueltas y capas para el devanado de B.T. son mostradas en la figura 3.22. En esta figura se observa la tensión en diferentes puntos del devanado de B.T. mostrando las tensiones en las dos capas del devanado.



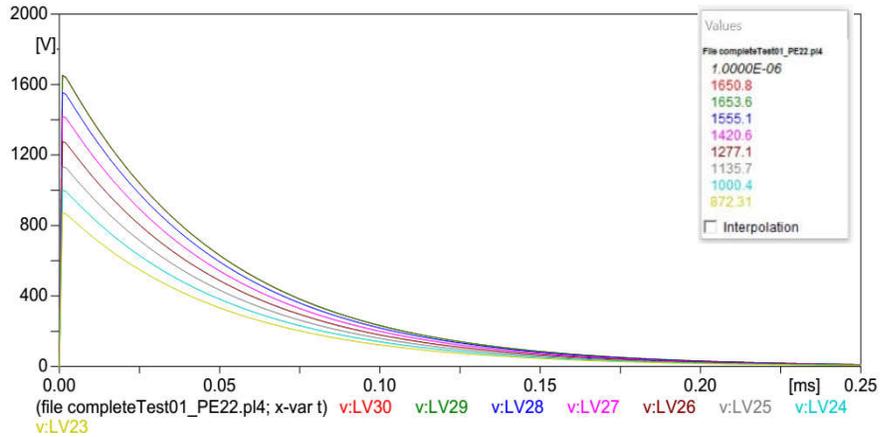
c)



d)



e)



f)

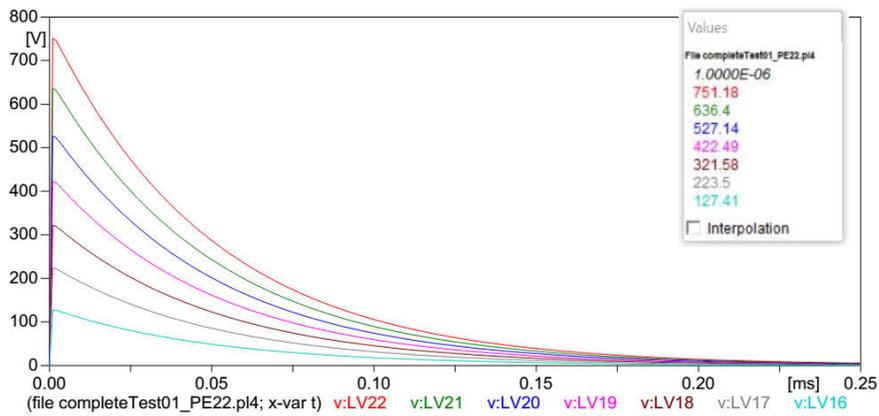
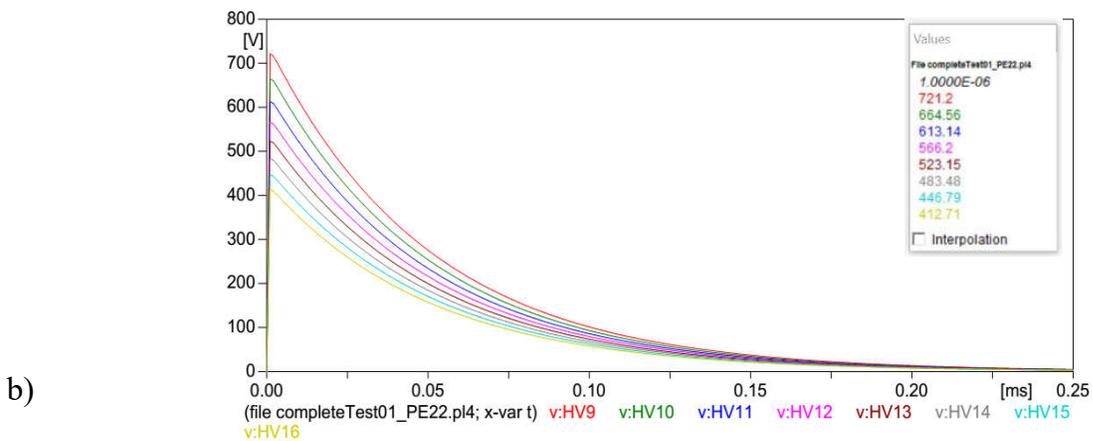
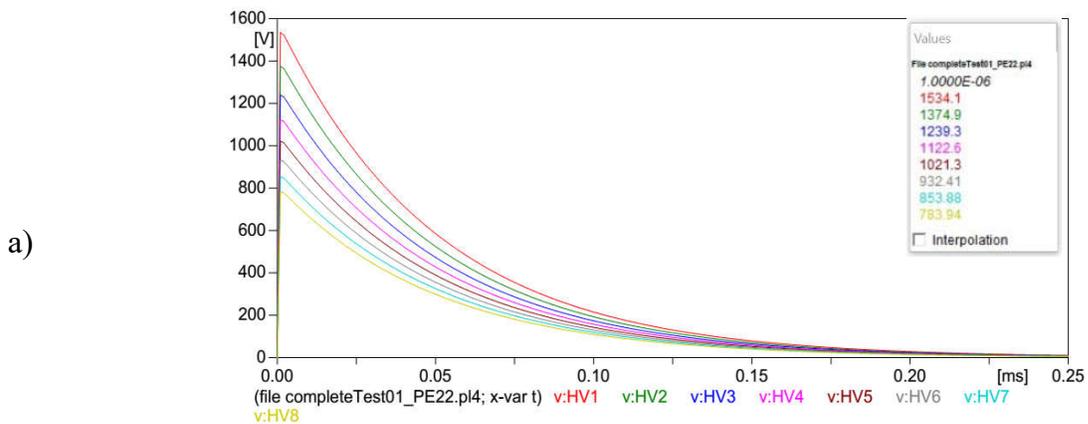
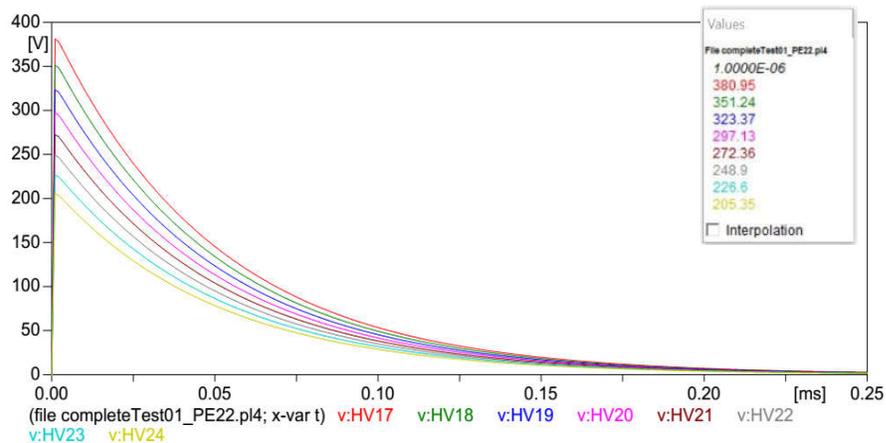


Figura 3.22. Tensiones a lo largo del devanado de B.T. con la pantalla electrostática entre sus capas: a) tensión para la capa 1 de la vuelta 1 a 8, b) tensión para la capa 1 de la vuelta 9 a 15, c) tensiones entre la pantalla y cada vuelta de la capa para la vuelta 1 a 15, d) tensiones entre la pantalla y cada vuelta de la capa para la vuelta 16 a 30, e) tensión para la capa 2 de la vuelta 23 a 30, f) tensión para la capa 2 de la vuelta 16 a 22.

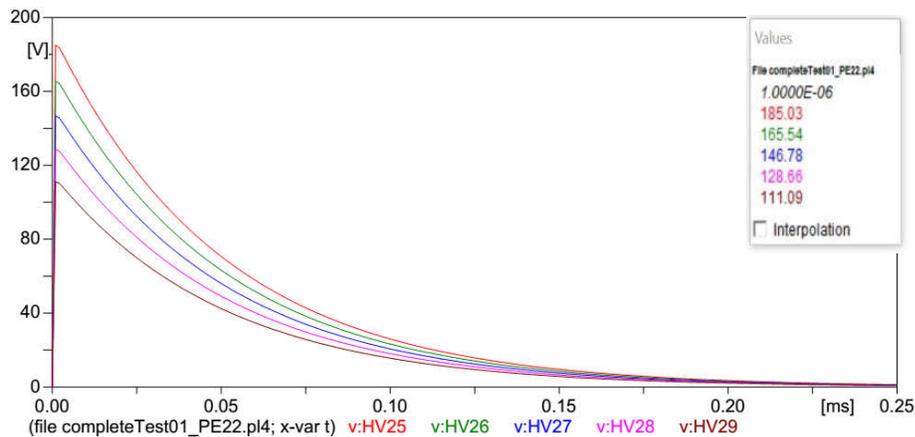
Las tensiones entre las vueltas y capas para para la primera capa del devanado de A.T. son mostradas en la figura 3.23. En esta figura se observa la tensión en las primeras 34 vueltas para la primera capa del devanado de A.T.



c)



d)



e)

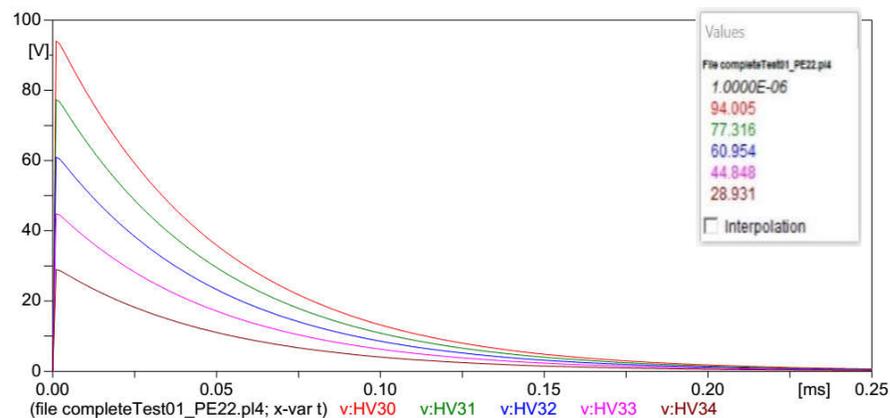
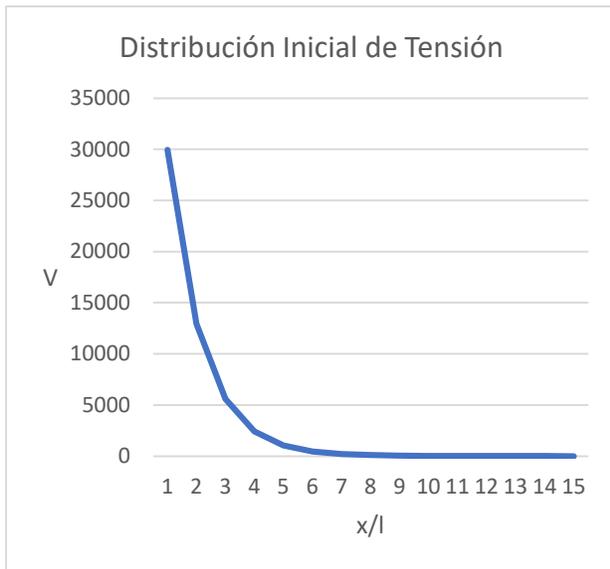
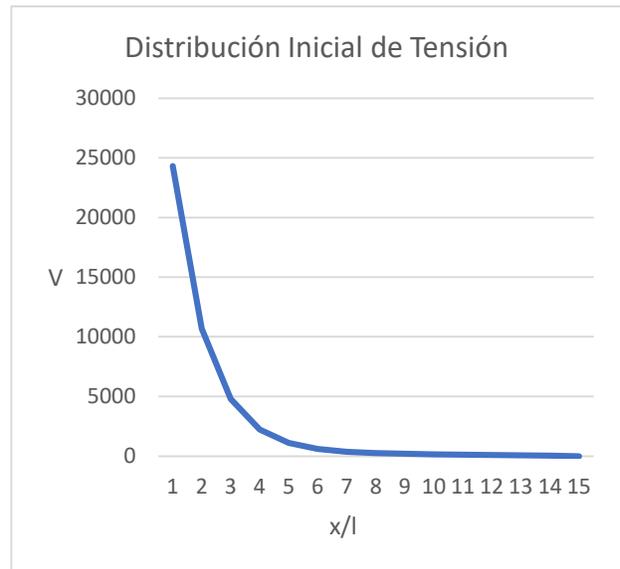


Figura 3.23. Tensiones a lo largo de la primera capa del devanado de A.T: a) tensión para la capa 1 de la vuelta 1 a 8, b) tensión para la capa 1 de la vuelta 9 a 16, c) tensión para la capa 1 de la vuelta 17 a 24, d) tensión para la capa 1 de la vuelta 25 a 29, e) tensión para la capa 1 de la vuelta 30 a 34.

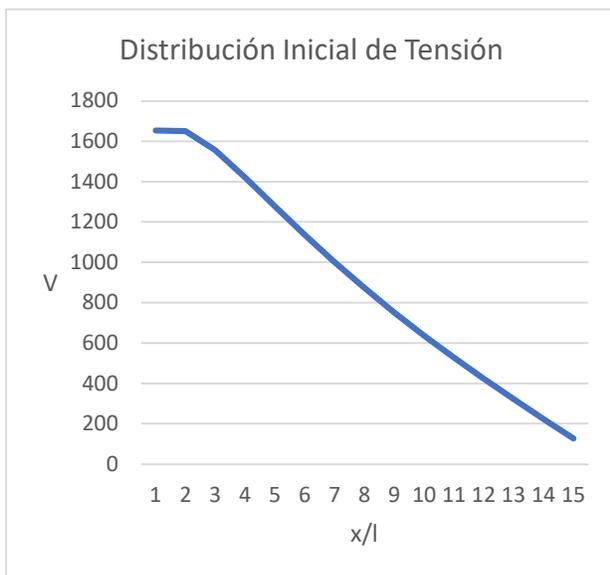
La figura 3.24 presenta la distribución inicial de tensión para las capas del devanado de B.T. y para la primera capa de A.T. con una pantalla electrostática entre sus capas de calibre 22.



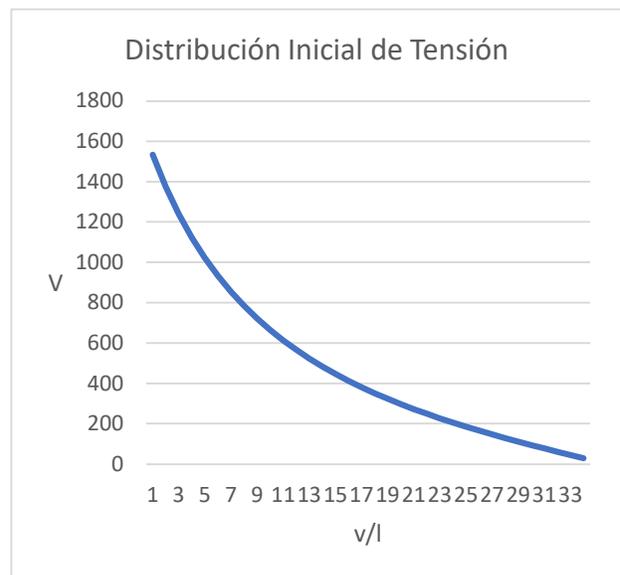
a)



b)



c)



d)

Figura 3.24. Distribución inicial de tensión: a) capa 1 devanado de B.T., b) capacitancias en pantalla electrostática, c) capa 2 devanado B.T., d) primera capa devanado A.T.

3.5.5 Red capacitiva con pantalla calibre 26

La figura 3.25 muestra la red capacitiva del devanado de B.T., con el aumento de las capacitancias en serie de la pantalla electrostática.

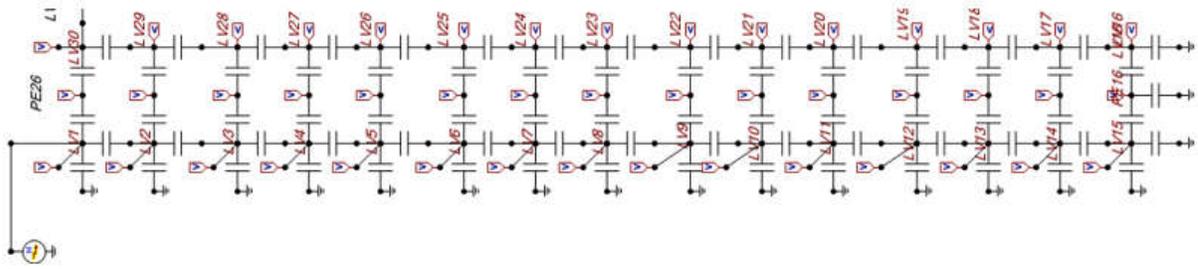
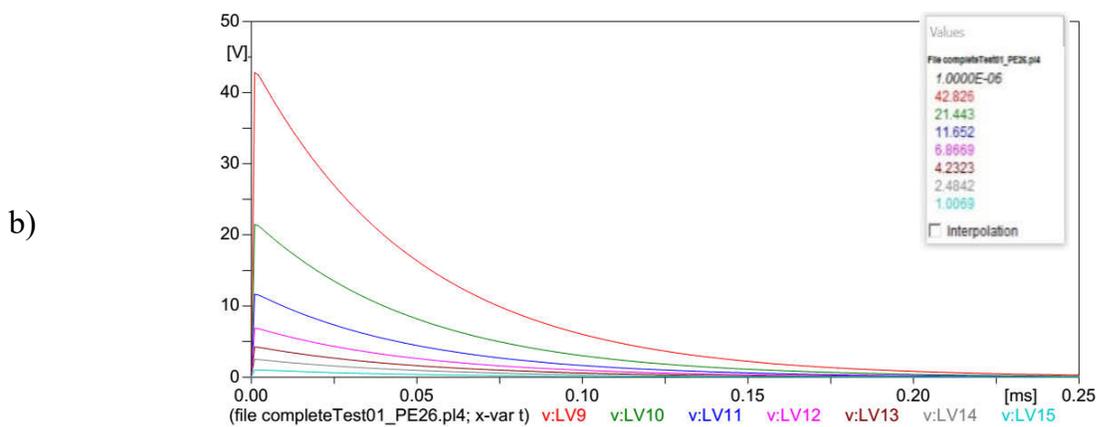
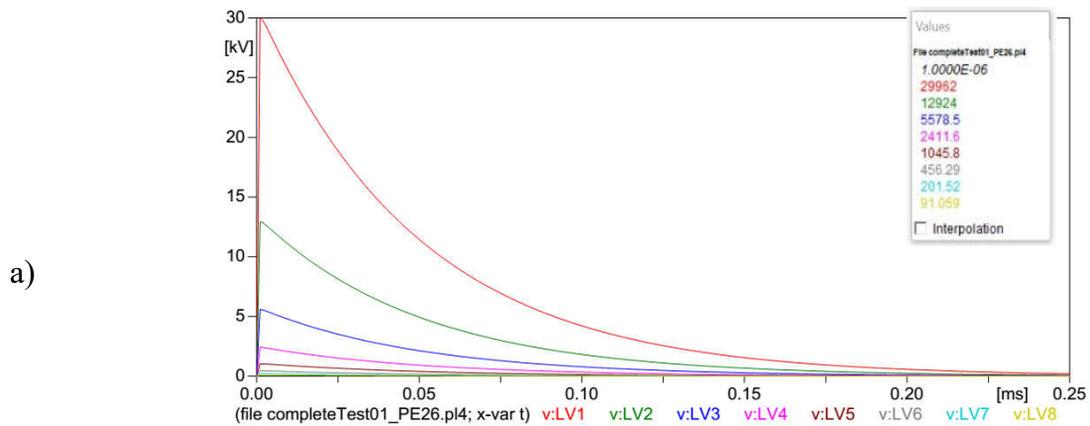
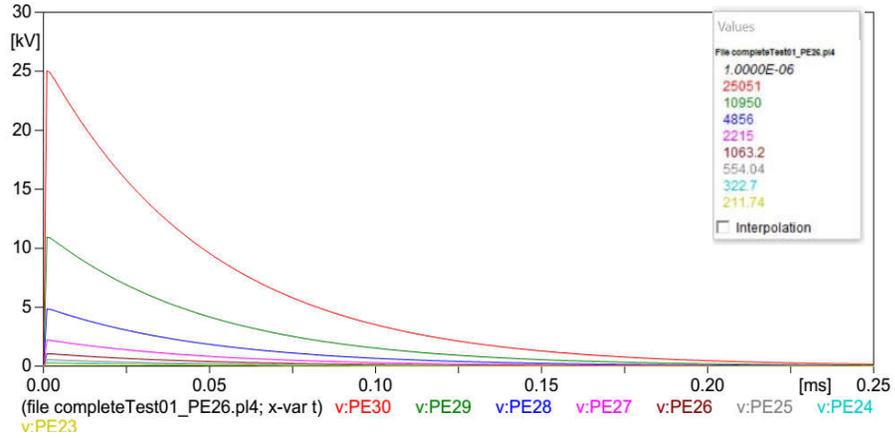


Figura 3.25. Red capacitiva para devanado B.T. con pantalla electrostática.

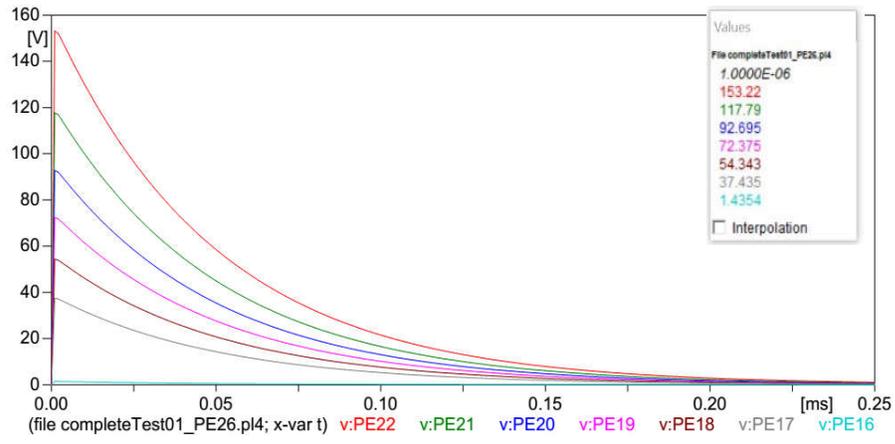
Las tensiones entre las vueltas y capas para el devanado de B.T. son mostradas en la figura 3.26. En esta figura se observa la tensión en diferentes puntos del devanado de B.T., mostrando las tensiones en las dos capas del devanado.



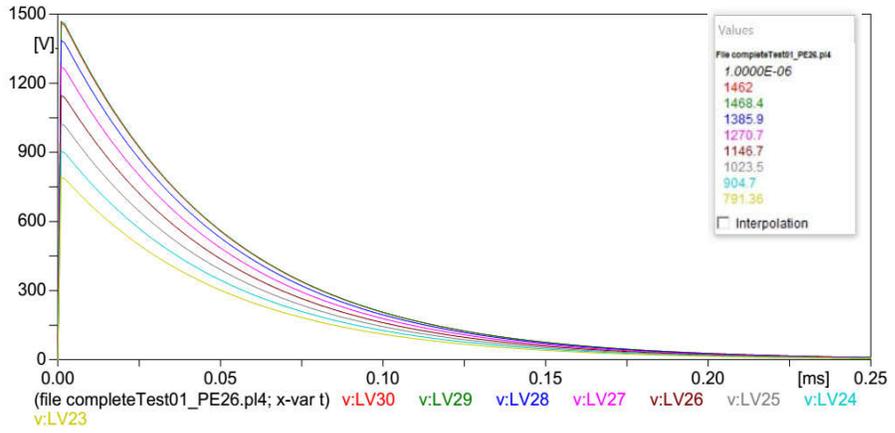
c)



d)



e)



f)

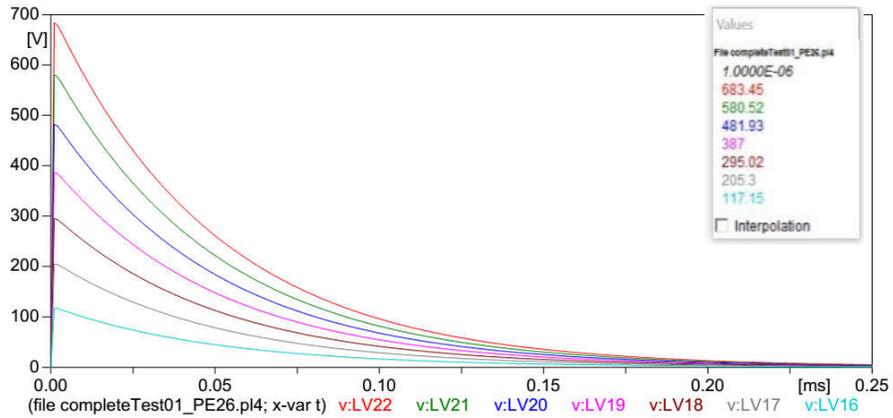
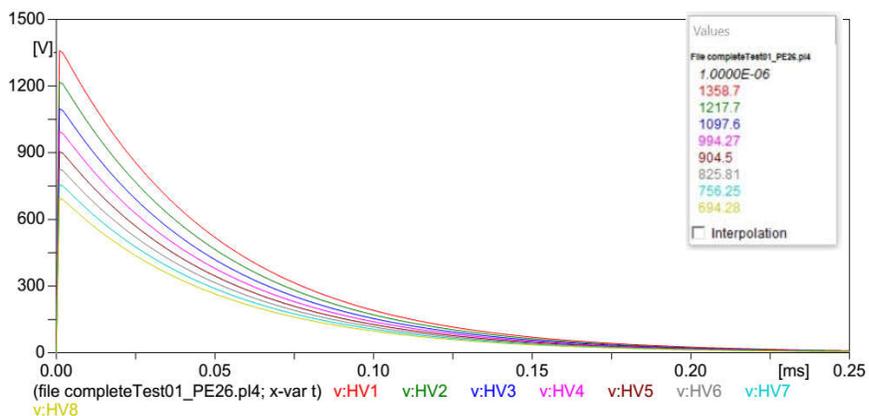


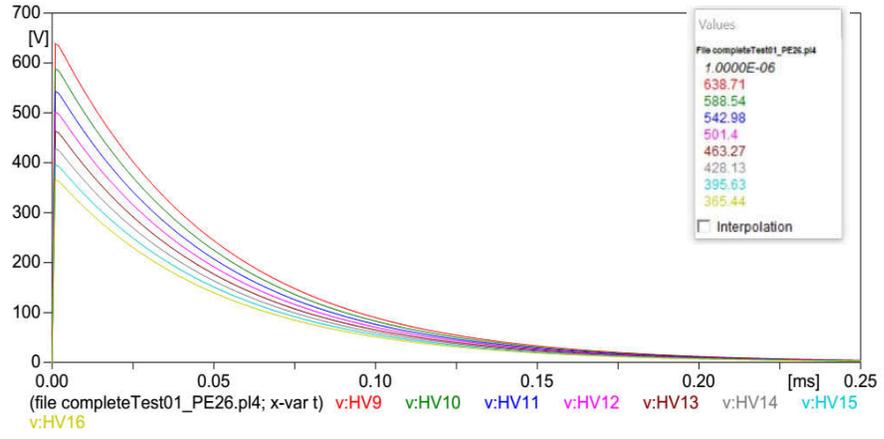
Figura 3.26. Tensiones a lo largo del devanado de B.T. con la pantalla electrostática entre sus capas: a) tensión para la capa 1 de la vuelta 1 a 8, b) tensión para la capa 1 de la vuelta 9 a 15, c) tensiones entre la pantalla y cada vuelta de la capa para la vuelta 1 a 15, d) tensiones entre la pantalla y cada vuelta de la capa para la vuelta 16 a 30, e) tensión para la capa 2 de la vuelta 23 a 30, f) tensión para la capa 2 de la vuelta 16 a 22.

Las tensiones entre las vueltas y capas para para la primera capa del devanado de A.T. son mostradas en la figura 3.27 En esta figura se observa la tensión en las primeras 34 vueltas para la primera capa del devanado de A.T.

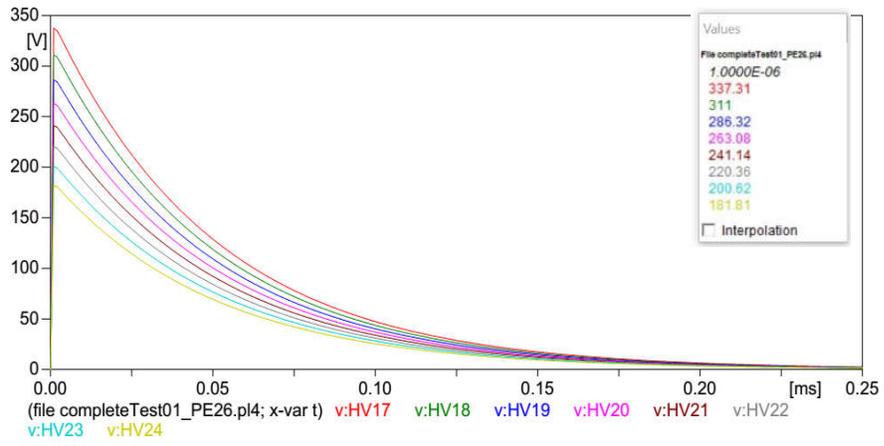
a)



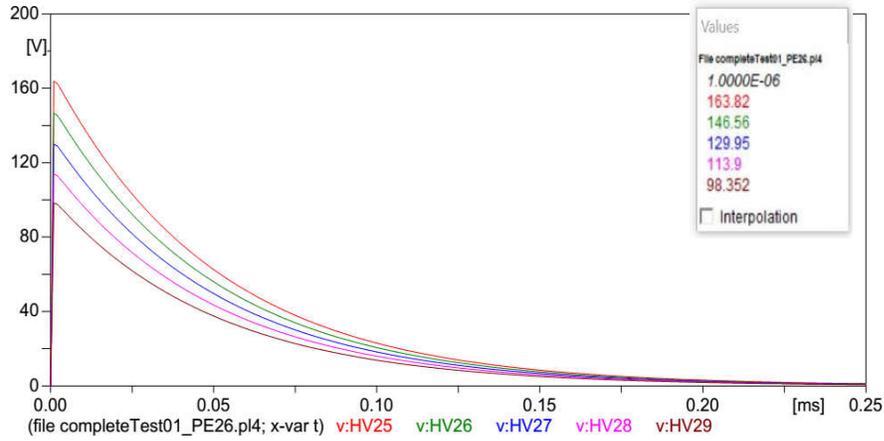
b)



c)



d)



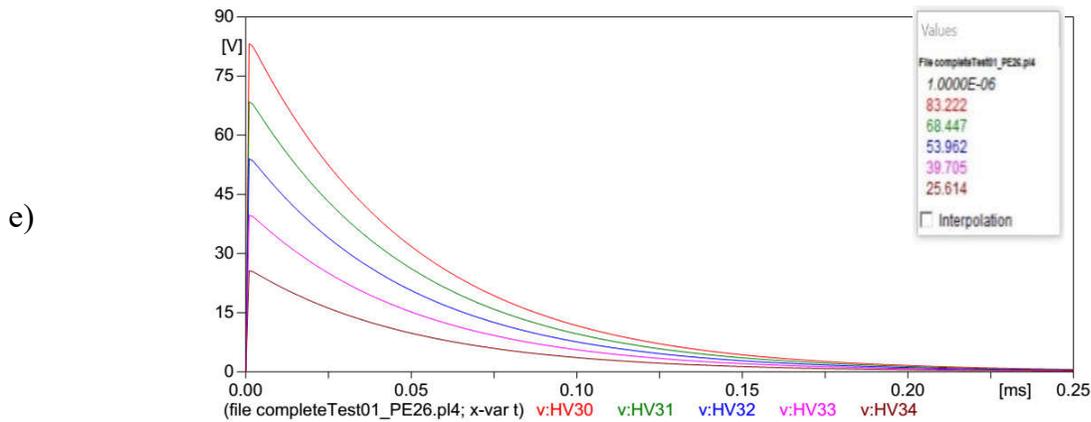
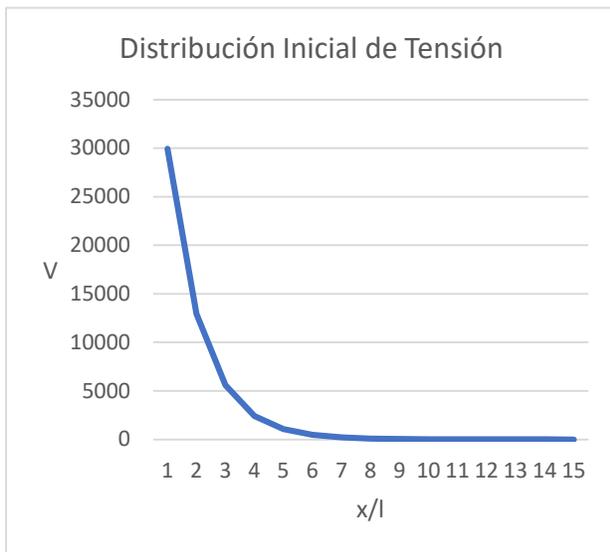
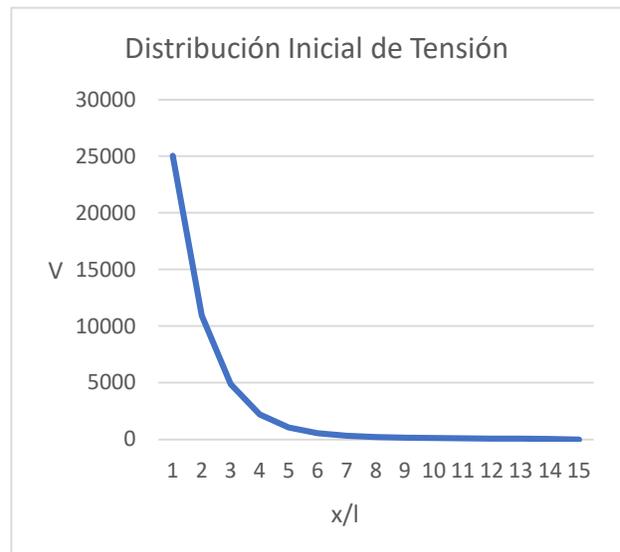


Figura 3.27. Tensiones a lo largo de la primera capa del devanado de A.T: a) tensión para la capa 1 de la vuelta 1 a 8, b) tensión para la capa 1 de la vuelta 9 a 16, c) tensión para la capa 1 de la vuelta 17 a 24, d) tensión para la capa 1 de la vuelta 25 a 29, e) tensión para la capa 1 de la vuelta 30 a 34.

La figura 3.28 presenta la distribución inicial de tensión para las capas del devanado de B.T. y para la primera capa de A.T. con una pantalla electrostática entre sus capas de calibre 26.



a)



b)

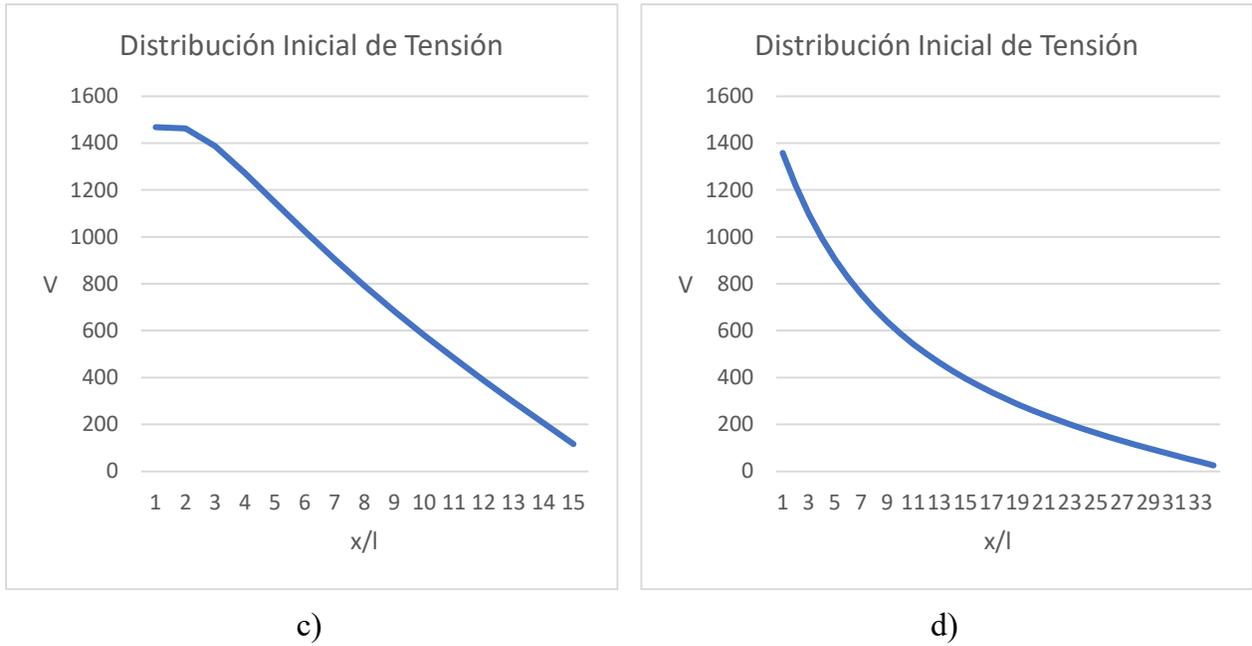


Figura 3.28. Distribución inicial de tensión: a) capa 1 devanado de B.T., b) capacitancias en pantalla electrostática, c) capa 2 devanado B.T., d) primera capa devanado A.T.

3.6 Comparación entre las diferentes pantallas electrostáticas instaladas

A continuación, se realiza el análisis de las tensiones obtenidas para los diferentes casos de espesores de pantallas electrostáticas implementadas en los devanados del transformador, donde se instalaron entre la capa uno y la capa dos del devanado B.T. La tabla 3.10 muestra las tensiones para cada uno de los casos.

Tabla 3.10. Tensiones en el devanado de B.T.

Distribución de Tensión en B.T. capa 1					
# de Vuelta	Volts en B.T. sin PE (V)	Volts en B.T. PE 16 (V)	Volts en B.T. PE 18 (V)	Volts en B.T. PE 22 (V)	Volts en B.T. PE 26 (V)
1	29962	29962	29962	29962	29962
2	3249	12904	12904	12918	12924
3	434	5567	5567	5575	5579
4	98	2410	2410	2411	2412
5	38	1051	1051	1047	1046
6	19	464	464	458	456
7	10	211	211	203	202
8	5	100	100	93	91
9	3	51	51	45	43
10	1	28	28	23	21
11	75	17	17	13	12
12	0.4	11	11	8	6
13	0.2	8	7.6	5	4
14	0.1	5	4.7	3	2
15	0.0	2	2	1.2	1

La figura 3.29 muestra la DIT para el devanado de B.T.

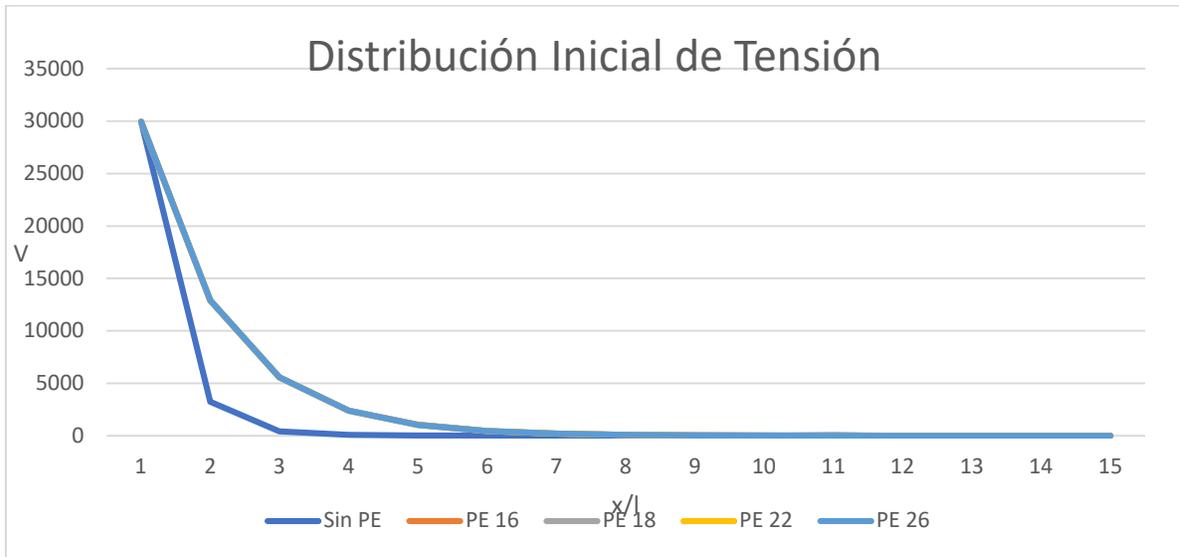


Figura 3.29. Distribución inicial de tensión para B.T.

La tabla 3.11 muestra las tensiones relacionadas en la pantalla electrostática.

Tabla 3.11. Tensiones en pantalla electrostática.

Distribución de Tensión en B.T. capa 1				
# de Vuelta	Volts en B.T. PE 16	Volts en B.T. PE 18	Volts en B.T. PE 22	Volts en B.T. PE 26
1	22045	22909	24313	25051
2	9846	10154	10671	10950
3	4558	4633	4773	4856
4	2246	2227	2213	2215
5	1216	1163	1093	1063
6	741	680	593	554
7	507	448	362	323
8	379	327	248	212
9	299	254	186	153
10	241	203	145	118
11	194	163	116	93

12	153	128	91	72
13	115	97	68	54
14	79	67	47	37
15	3	3	2	1

La figura 3.30 muestra la DIT en la pantalla electrostática.

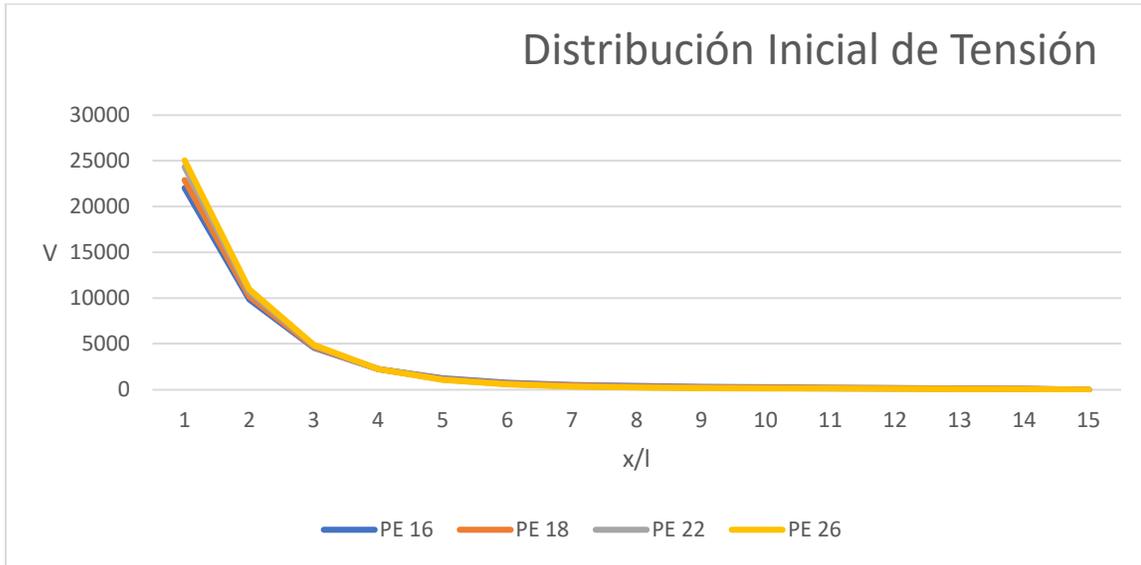


Figura 3.30. Distribución inicial en la pantalla electrostática.

La tabla 3.12 muestra las tensiones en devanado de A.T.

Tabla 3.12. Tensiones en el devanado de A.T.

Distribución de Tensión en A.T. capa 1					
# de Vuelta	Volts A.T. sin PE (V)	Volts A.T. PE 16 (V)	Volts A.T. PE 18 (V)	Volts A.T. PE 22 (V)	Volts A.T. PE 26 (V)
1	5358	2039	1852	1534	1359
2	4803	1827	1660	1375	1218
3	4330	1647	1496	1239	1098
4	3923	1492	1355	1123	994
5	3569	1357	1233	1021	905
6	3259	1239	1126	932	826
7	2985	1135	1031	854	756
8	2741	1041	946	784	694

9	2521	958	871	721	639
10	2324	883	802	665	589
11	2144	814	740	613	543
12	1980	752	683	566	501
13	1830	695	631	523	463
14	1691	642	583	483	428
15	1563	593	539	447	396
16	1444	548	498	413	365
17	1333	506	460	381	337
18	1229	466	424	351	18
19	1131	429	390	323	19
20	1040	395	359	297	20
21	953	362	329	272	21
22	871	330	300	249	22
23	793	301	273	227	23
24	719	273	248	205	24
25	647	246	223	185	25
26	579	220	200	166	26
27	514	195	177	147	27
28	450	171	155	129	28
29	389	147	134	111	29
30	329	125	113	94	30
31	271	103	93	77	31
32	213	81	74	61	32
33	157	60	54	45	33
34	101	38	35	29	34

La figura 3.31 muestra la DIT en el devanado de A.T.

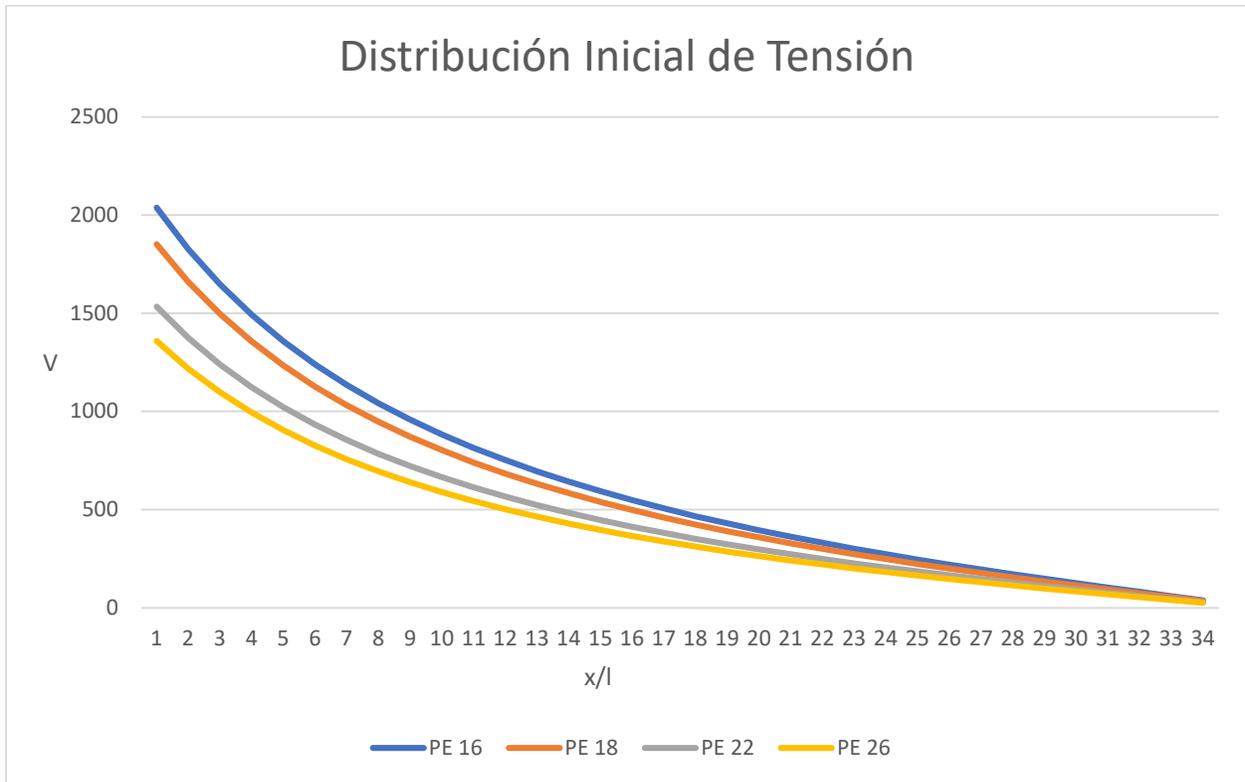


Figura 3.31. Distribución inicial de tensión para A.T.

Capítulo 4

Análisis Electrostático Usando Elementos Finitos en 2D

4.1 Introducción

El análisis electrostático a través de la técnica de elementos finitos (EF) es ampliamente utilizado para resolver fenómenos que involucran problemas de campos magnéticos y eléctricos. En el desarrollo del modelo de 2D del transformador de potencia, se utiliza un software especializado para analizar los devanados de B.T. y A.T., y así obtener el cálculo de la distribución de tensión a lo largo de los devanados. En este capítulo se describe el modelo de EF 2D para el transformador de potencia anteriormente descrito, con la finalidad de obtener el valor de las capacitancias relacionadas con la red capacitiva a la respuesta a sobretensiones por impulso.

4.2 Introducción al método de elemento finito

El método del elemento finito (MEF), en ocasiones referido como análisis de elementos finitos, es una técnica computacional utilizada para obtener soluciones aproximadas de problemas de fenómenos eléctricos y magnéticos, donde una o más variables deben de satisfacer una ecuación diferencial dentro de un dominio conocido de variables independientes, así como satisfacer condiciones específicas en el límite del dominio. Este tipo de problemas también se conocen como problemas de campo. El campo es el dominio de interés, y la mayoría de las veces representa una estructura física. Las variables de campo son las variables dependientes de interés regidas por la ecuación diferencial. Las condiciones fronteras son los valores especificados de las variables de campo en los límites de sus dominios. Dependiendo del tipo de problema físico que se esté analizando, las variables pueden incluir desplazamiento físico, temperatura, flujo de calor o velocidad de un fluido, por mencionar algunas [56].

En la figura 4.1 se muestran con círculos diferentes materiales que tienen propiedades físicas conocidas. La superficie de estos materiales representa el dominio de un problema de valor límite a resolver. Para esto, se asume un caso bidimensional (2D) con una sola variable de campo a resolver en cada punto $P(x,y)$, de tal manera que la ecuación que gobierna el fenómeno sea resuelta para cada punto (figura 4.1 a)). En problemas prácticos, el dominio puede ser geoméricamente complejo, por lo que la probabilidad de obtener una solución de forma exacta de la ecuación a resolver es baja. Por lo tanto, las soluciones aproximadas basadas en técnicas numéricas y computacionales son las que se obtienen comúnmente en el análisis de problemas complejos de ingeniería. El análisis de elementos finitos es considerada una técnica poderosa para obtener tales soluciones aproximadas con una buena precisión.

Un elemento triangular que encierra un subdominio de tamaño finito del área de interés se muestra en la figura 4.1 b). El que este elemento no sea un elemento diferencial (dy/dx), lo hace un elemento finito. Al tratar con el caso 2D, se asume que el espesor en la dirección z es constante y que la dependencia de z no se indica en la ecuación diferencial.

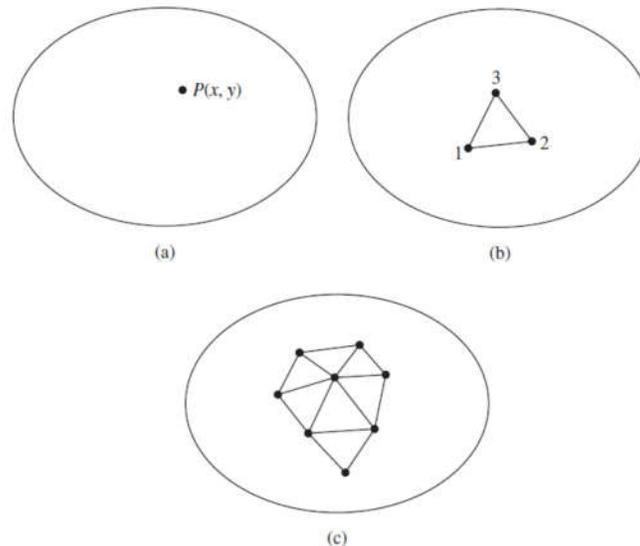


Figura 4.1. Elementos finitos.

Los vértices del elemento triangular están numerados para indicar que estos puntos son nodos. Un nodo es un punto específico donde se calcula explícitamente el valor de la variable de campo. Los nodos exteriores se encuentran en los límites del elemento finito y pueden utilizarse para conectar un elemento a más elementos finitos adyacentes. Los nodos que no se

encuentran en los límites de los elementos se denominan nodos interiores y no se pueden conectar a ningún otro elemento. El elemento triangular de la figura 4.1.1b) sólo tiene nodos exteriores.

Si los valores de la variable de campo se calculan solo en los nodos, entonces los valores de la variable de campo calculada en estos nodos se utilizan para aproximar los valores en puntos no nodales (es decir, en el interior del elemento) por interpolación de los valores nodales. Para el ejemplo del triángulo de tres nodos, los nodos son todos exteriores y, en cualquier otro punto dentro del elemento, la variable de campo se describe por la ecuación 4.1:

$$\Phi(x,y) = N_1(x,y)\phi_1 + N_2(x,y)\phi_2 + N_3(x,y)\phi_3 \quad (4.1)$$

donde ϕ_1 , ϕ_2 y ϕ_3 , son los valores de la variable de campo en los nodos, y N_1 , N_2 y N_3 , son las funciones de interpolación. En el enfoque de elementos finitos, los valores nodales de la variable de campo se tratan como constantes desconocidas que deben determinarse. Las funciones de interpolación son a menudo formas polinomiales de las variables independientes, derivadas para satisfacer ciertas condiciones requeridas en los nodos. Estas funciones de interpolación son funciones predeterminadas y conocidas de las variables independientes, las cuales describen la variación de la variable de campo dentro del elemento finito. La figura 4.1c muestra que cada elemento está conectado en sus nodos exteriores a otros elementos. Las ecuaciones de elementos finitos están formuladas de tal manera que, en las conexiones nodales, el valor de la variable de campo en cualquier conexión es el mismo para cada elemento conectado al nodo. Así, se garantiza la continuidad de la variable de campo en los nodos.

Las formulaciones de elementos finitos son tales que la continuidad de la variable de campo a través de los límites entre elementos también está garantizada. Esta característica evita la posibilidad físicamente inaceptable de tener huecos o vacíos presentes en el dominio. En los problemas estructurales, tales casos representarían la separación física del material.

4.3 Procesamiento básico del método del elemento finito.

Existen ciertos pasos en la formulación de un análisis de elementos finitos de un problema físico ya sea estructural, de transferencia de calor, de flujo de fluidos, o algún otro problema. Estos pasos incorporados en paquetes de software comerciales de elementos finitos, se describen a continuación.

El paso del preprocesamiento se describe, generalmente como la definición del modelo e incluye:

- Definir el modelo geométrico del problema.
- Definir el tipo de elemento a utilizar.
- Definir las propiedades en los materiales de los elementos.
- Definir las propiedades geométricas de los elementos.
- Definir el mallado del modelo.
- Definir las restricciones físicas (condiciones fronteras).
- Definir las cargas.

Este preprocesamiento o definición del modelo es un paso crítico. Ya que una solución perfectamente calculada de elementos finitos no tiene ningún valor si corresponde al problema incorrecto.

Durante el paso de solución, el software de elementos finitos ensambla las ecuaciones algebraicas gobernantes en forma de matriz y calcula los valores desconocidos de la o las variables de campo. A continuación, los valores calculados se utilizan por sustitución inversa para calcular variables derivadas adicionales, como son las fuerzas de reacción, las tensiones de los elementos y el flujo de calor. Como no es raro que un modelo de elementos finitos esté representado por decenas de miles de ecuaciones, se utilizan técnicas de solución especiales para reducir los requisitos de almacenamiento de datos y el tiempo de cálculo [57].

El análisis y la evaluación de los resultados de la solución se conoce como postprocesamiento. El software del postprocesador contiene rutinas sofisticadas usadas para ordenar, imprimir y trazar los resultados seleccionados de una solución de elementos finitos. Ejemplos de estas operaciones que se pueden realizar son:

- Ordenar las tensiones de los elementos en orden de magnitud.

- Comprobar el equilibrio.
- Calcular los factores de seguridad.
- Trazar la forma estructural deformada.
- Analizar el comportamiento dinámico del modelo animado.
- Producir gráficos de temperatura codificados por color.

Si bien los datos de la solución se pueden manipular de muchas maneras en el procesamiento posterior, el objetivo más importante es aplicar un buen juicio de ingeniería para determinar si los resultados de la solución son físicamente razonables.

4.4 Análisis del elemento finito en 2-D

El análisis en 2-D del MEF, comúnmente involucra ecuaciones diferenciales de segundo orden de una sola variable dependiente que está sujeta a una serie de condiciones de frontera. El dominio del problema es una geometría 2-D con una forma arbitraria, por lo tanto, una representación exacta del dominio en el contexto del MEF presume discretización del dominio utilizando la forma más apropiada de elementos básicos, llamados elementos finitos. Los elementos finitos más utilizados en 2-D son los elementos triangulares y cuadriláteros.

El dominio comúnmente tiene una forma irregular. Para implementar el MEF, el primer paso es representar exactamente el dominio físico del problema por un conjunto de formas básicas llamado elementos finitos. El uso de un rectángulo, por ejemplo, como un elemento finito base para discretizar un dominio irregular es ciertamente el más simple, pero no la opción más adecuada debido a que un conjunto de rectángulos no puede representar con precisión la forma geométrica arbitraria del dominio. Por otro lado, la mejor opción es utilizar un triángulo en lugar de un rectángulo como el elemento básico para el mallado del dominio 2D. De estos dos elementos básicos más utilizados para el análisis en 2D, los elementos triangulares son los que se usan más comúnmente debido a que contienen un menor número de nodos, lo que da origen a un menor número de incógnitas.

4.5 Ecuaciones de Maxwell

Los problemas de campos electromagnéticos tienen una posición favorable en aplicaciones de la ingeniería y la física, en cuanto que las leyes relacionadas pueden ser

escritas de manera concisa por las ecuaciones de Maxwell, las cuales son un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales del espacio y tiempo que se aplican a fenómenos electromagnéticos [58]. Las variables siguientes forman un conjunto básico de cinco vectores y un escalar:

- Intensidad del campo eléctrico \mathbf{E} (*Volt/metro*).
- Intensidad del campo magnético \mathbf{H} (*Ampere/metro*).
- Densidad de flujo eléctrico \mathbf{D} (*Coulomb/metro*).
- Densidad de flujo magnético \mathbf{B} (*Tesla*).
- Densidad de corriente \mathbf{J} (*Ampere/metro²*).
- Densidad volumétrica de carga ρ (*Coulomb/metro³*).

Las ecuaciones de Maxwell en su forma diferencial se escriben como:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{d\mathbf{B}}{dt} \quad (4.2)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{d\mathbf{D}}{dt} \quad (4.3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (4.4)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (4.5)$$

A estas ecuaciones diferenciales se le agregan las siguientes relaciones constitutivas de los materiales del dominio:

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (4.6)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (4.7)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (4.8)$$

donde ϵ es la permitividad, μ la permeabilidad y σ la conductividad. Estas relaciones describen las propiedades macroscópicas del medio, las cuales se definen como las relaciones entre magnitudes de campo en base a las propiedades eléctricas y magnéticas de los materiales.

4.6 Formulación del problema electrostático

El campo electrostático describe los campos eléctricos estáticos que se originan de las diferencias de potencial y de las distribuciones de carga eléctrica. La ecuación que rige el

comportamiento de los fenómenos electrostáticos y que resuelve el potencial eléctrico $\phi(x, y)$ es[59]:

$$\nabla \cdot (\epsilon_r \epsilon_0 \nabla \phi(x, y)) = -\rho \quad (4.9)$$

donde $\phi(x, y)$ es el potencial eléctrico escalar, ϵ_r es la permitividad relativa (varía dependiendo del tipo de material), ϵ_0 es la permitividad del vacío ($8.854 \times 10^{-12} F/m$) y $\rho(x, y)$ es la densidad de carga.

La ecuación 4.8 se obtiene de la Ley de Gauss y de la Ley de inducción de Faraday. La Ley de Gauss se indica que el flujo eléctrico neto que pasa a través de cualquier superficie cerrada es igual a la carga positiva neta encerrada por esa superficie. La Ley de Gauss en su forma diferencial se escribe como:

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (4.10)$$

donde $D(x, y)$ es la densidad de flujo eléctrico. Sustituyendo $D = \epsilon_r \epsilon_0 E$ en la ecuación 4.9 se obtiene:

$$\nabla \cdot (\epsilon_r \epsilon_0 E(x, y)) = \rho \quad (4.11)$$

Considerando la ley de Faraday, $E = -\nabla \phi$, en un campo estático se obtiene la ecuación 4.9:

$$\nabla \cdot (\epsilon_r \epsilon_0 \nabla \phi(x, y)) = -\rho$$

que es la ecuación que resuelve los problemas de campos electrostáticos, utilizada en el análisis de elementos finitos para campos electrostáticos.

4.7 Modelo del transformador en 2D

El modelo en elementos finitos en 2D del transformador se desarrolló en el software de ANSYS Maxwell [60], considerando los datos de diseño del transformador presentados en las tablas 3.1 y 3.2. Para realizar los casos de estudio se utilizaron las dimensiones de lámina de cobre mostradas en la tabla 3.3. En la figura 4.2 se muestra la geometría del modelo en 2D, en donde se observan los devanados de B.T. y A.T. (cada vuelta es considerada), el núcleo, el liquido aislante. Además, se presenta el mallado en la región de prueba, considerando un mayor número de elementos en las regiones con mayor interés de estudio, la cual se encuentra entre los devanados del transformador y en la pantalla electrostática. Para

efectos de comparación con los resultados obtenidos en el análisis de circuitos equivalentes, la pantalla electrostática se posicionó entre las capas de los devanados de B.T. La tensión aplicada para cada devanado es los Volts por vuelta para cada uno.

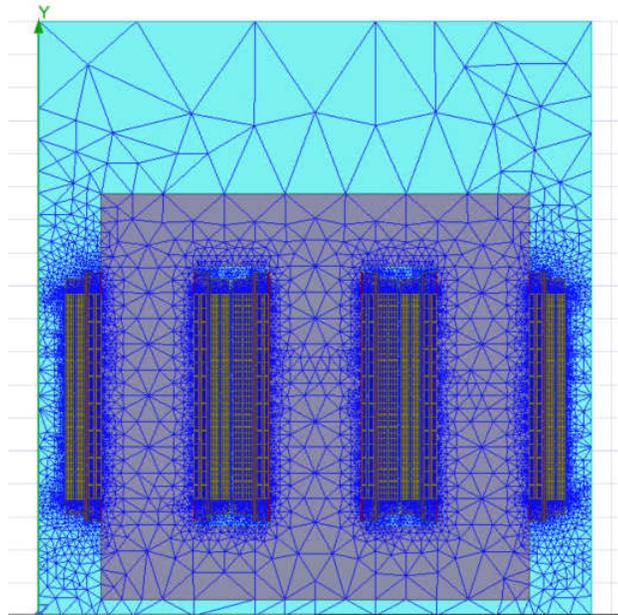


Figura 4.2. Geometría del transformador en 2D.

La figura 4.3 muestra la intensidad de campo eléctrico, en los devanados y en el núcleo del transformador. En la figura 4.4 se observa un acercamiento para observar mejor entre las capas del devanado de B.T. y la posición de la pantalla electrostática, donde se aprecia un incremento de la intensidad de campo eléctrico.

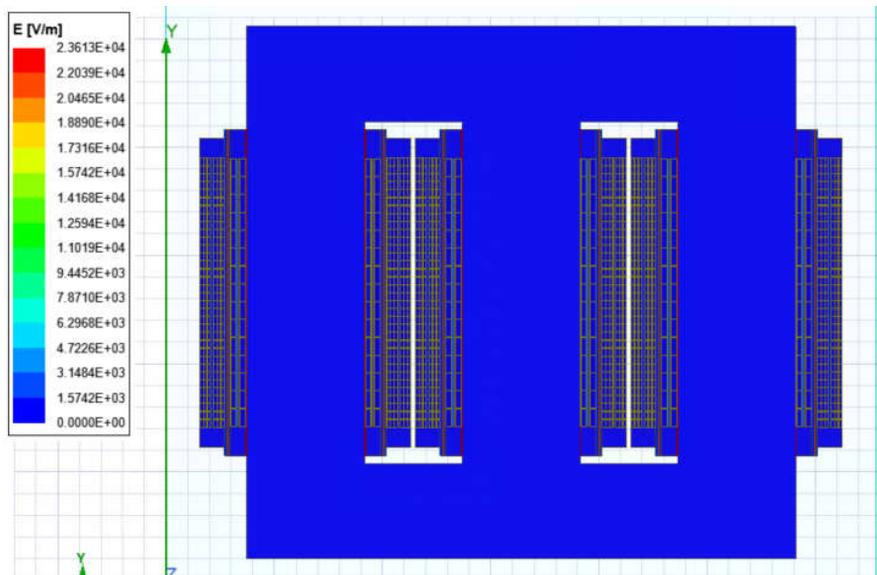


Figura 4.3. Intensidad de campo eléctrico en conjunto de devanados y núcleo.

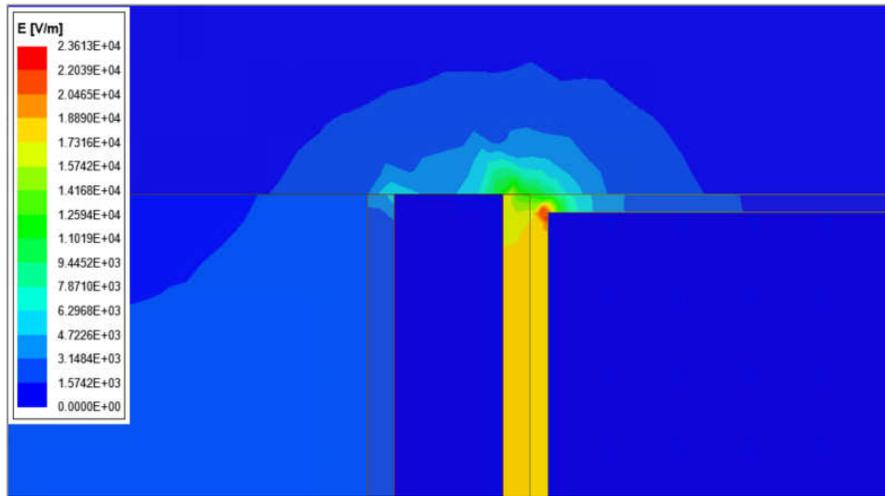


Figura 4.4. Acercamiento para observar mejor la intensidad de campo eléctrico en la pantalla electrostática.

En la figura 4.5 se muestra la magnitud del potencial distribuido en los conductores y los aislamientos del transformador, donde se observa un mayor estrés de potencial en el devanado de A.T. En esta figura también se aprecia la intensidad del potencial entre las vueltas de los devanados y los aislamientos entre capas. Observe que la pantalla electrostática a terrizada tiene un potencial de 0 V.

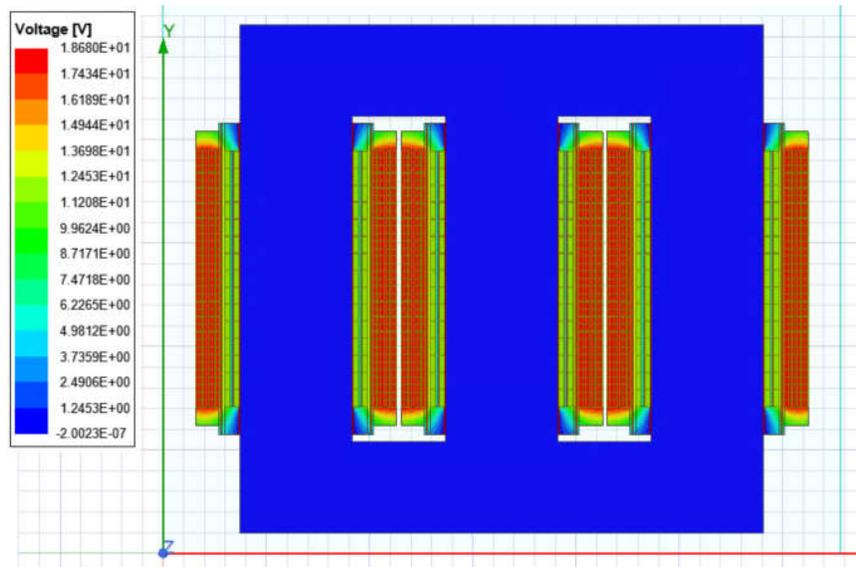


Figura 4.5. Potencial en el conjunto devanados y núcleo.

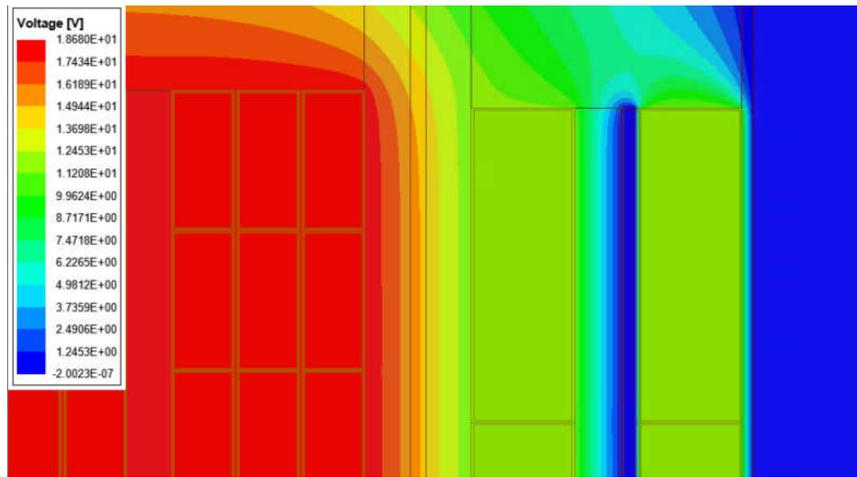


Figura 4.6. Potencial entre vueltas del devanado y PE.

4.8. Resultados de simulación

Con el análisis en 2D se obtuvieron los valores de las capacitancias relacionadas con la instalación de la pantalla electrostática entre las capas de B.T. Para esto se consideran diferentes espesores de la lámina que forma la pantalla. En la tabla 4.1 se presentan las capacitancias entre capas para el devanado de A.T. Las capacitancias que se muestran en la tabla 4.2 son las relacionadas con el devanado de B.T. entre sus capas.

Tabla 4.1. Capacitancias entre capas en el devanado de A.T.

Casos	Capacitancia capa 1 (μF)	Capacitancia capa 2 (μF)	Capacitancia capa 3 (μF)	Capacitancia capa 4 (μF)	Capacitancia capa 5 (μF)	Capacitancia capa 6 (μF)
PE 16	0.0011549	0.0012317	0.0012091	0.0012132	0.0011618	0.0011589
PE 18	0.0011619	0.0012136	0.0012066	0.0012069	0.0011479	0.0011522
PE 22	0.0011595	0.0012078	0.0012091	0.0012132	0.0011618	0.0011406
PE 26	0.0011583	0.0012112	0.0012091	0.0012132	0.0011618	0.0011410

Tabla 4.2. Capacitancias devanado B.T.

Casos	Capacitancia capa 1 (μF)	Capacitancia capa 2 (μF)
PE 16	0.0017791	0.0018502
PE 18	0.0017861	0.0018550
PE 22	0.0017804	0.0018525
PE 26	0.0017807	0.0018533

La capacitancia en la barrera de los devanados de A.T. y B.T. se presenta en la tabla 4.3, mientras que en la tabla 4.4 se observan las capacitancias a tierra. La tabla 4.5 muestra las capacitancias en la pantalla electrostática para los diferentes calibres de la lámina de cobre que la forman.

Tabla 4.3. Parámetros de capacitancia entre B.T. y A.T.

Casos	Capacitancia (μF)
PE 16	0.00109369
PE 18	0.00109369
PE 22	0.0010963
PE 26	0.00109670

Tabla 4.4. Capacitancias a Tierra.

Casos	Capacitancia a Tierra (μF)
PE 16	0.069192
PE 18	0.069195
PE 22	0.069193
PE 26	0.069193

Tabla 4.5. Capacitancias para cada calibre de la pantalla electrostática.

Casos	Capacitancia PE (μF)
PE 16	0.030113
PE 18	0.030114
PE 22	0.030106
PE 26	0.030102

Las capacitancias entre vuelta de los devanados de B.T. y A.T. para cada uno de los diferentes espesores de la pantalla electrostática se presentan en la tabla 4.6.

Tabla 4.6. Capacitancia entre vueltas para diferentes espesores de la PE.

	Capacitancia PE 16 (μF)	Capacitancia PE 18 (μF)	Capacitancia PE 22 (μF)	Capacitancia PE 26 (μF)
B.T.	0.0024869	0.0024935	0.0024938	0.0024913
A.T.	0.001595	0.0016019	0.0015968	0.0015988

4.8.1 Red capacitiva con pantalla calibre 16

La figura 4.7 muestra la red capacitiva para el análisis de la distribución inicial de tensión, con el valor de las capacitancias obtenidas aplicando el análisis de elementos finitos en el modelo desarrollado de 2D, y considerando la instalación de la pantalla electrostática de calibre 16 entre la capa 1 y la capa 2 del devanado de B.T. El circuito equivalente de la red capacitiva se desarrollo con el software ATP DRAW [55]. Esta red capacitiva está formada por las capacitancias vuelta a vuelta, capa a capa, capacitancia entre B.T.-A.T., capacitancias a tierra (al núcleo y tanque), donde cada vuelta y capa de los devanados de B.T. y A.T. está representada con sus capacitancias relacionadas. La figura 4.8 muestra la red capacitiva del devanado de B.T., incluyendo el aumento de las capacitancias en serie de la pantalla electrostática.

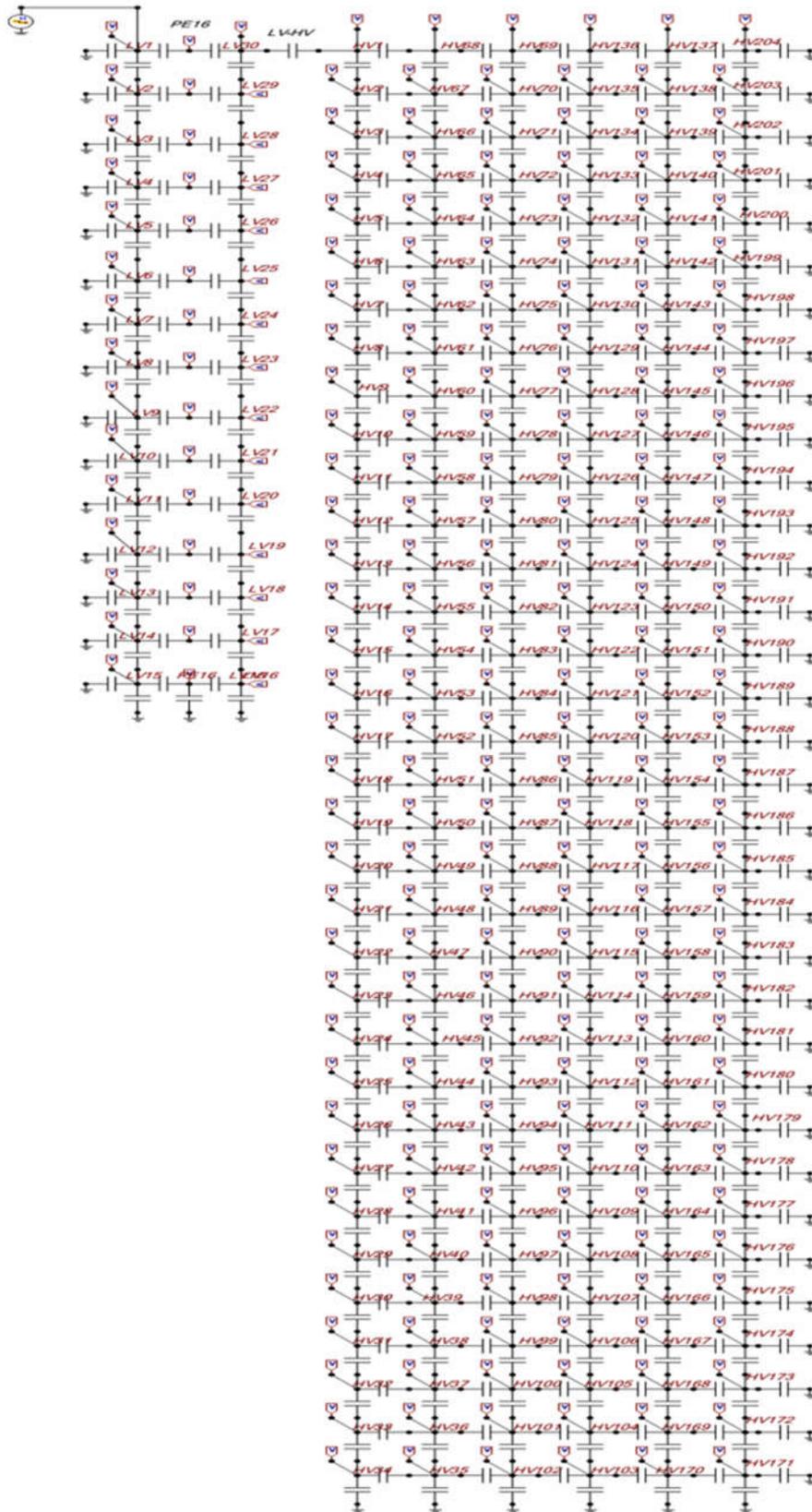


Figura 4.7. Red capacitiva completa.

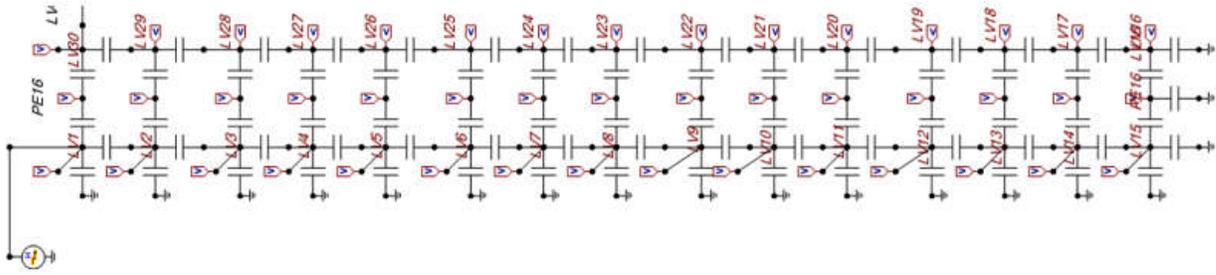
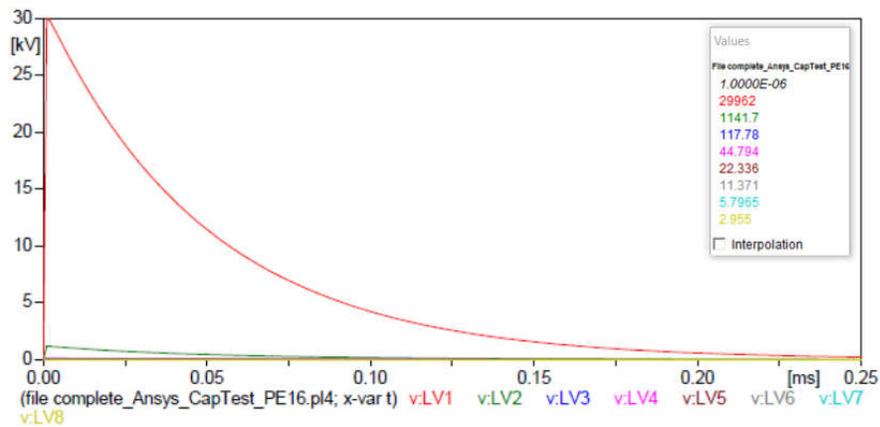


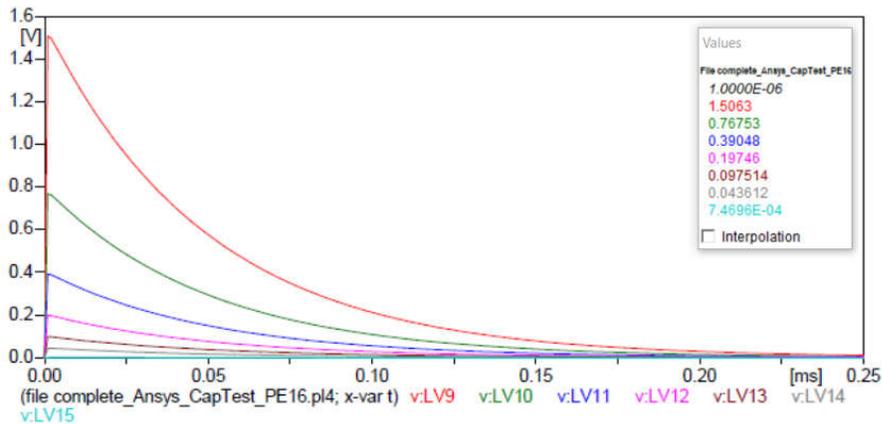
Figura 4.8. Red capacitiva para devanado B.T.

Las tensiones entre las vueltas y capas para el devanado B.T. considerando las capacitancias en la pantalla electrostática son mostradas en la figura 4.9, donde se observa la tensión a lo largo del devanado, mostrando las tensiones en las dos capas del devanado y las tensiones en la pantalla electrostática.

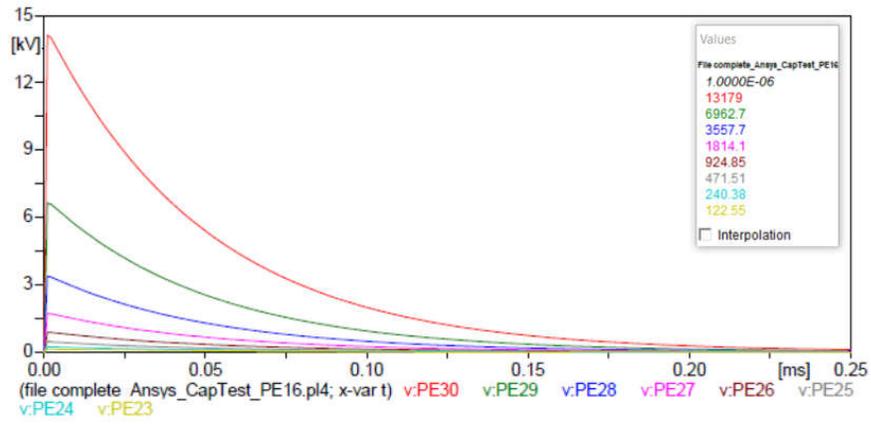
a)



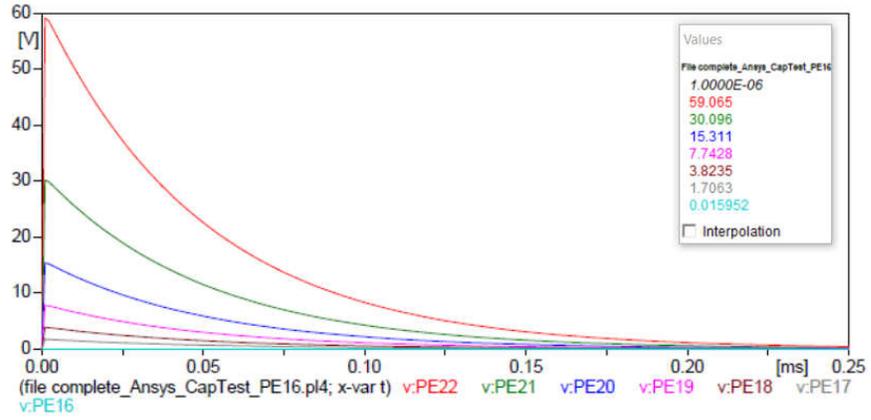
b)



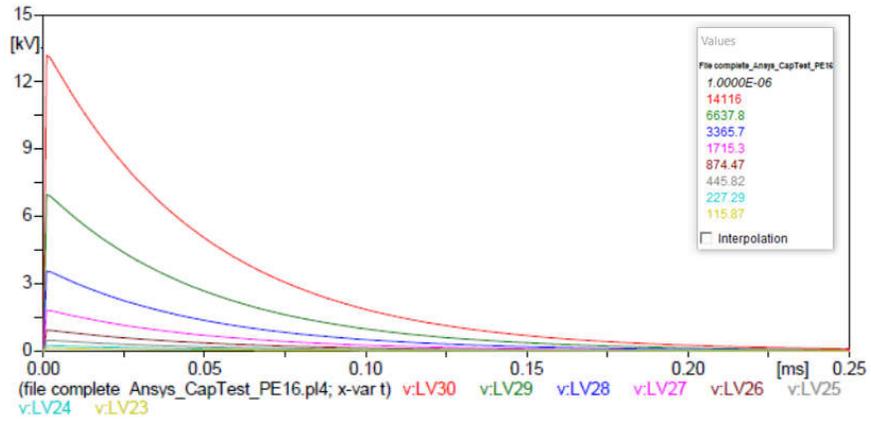
c)



d)



e)



f)

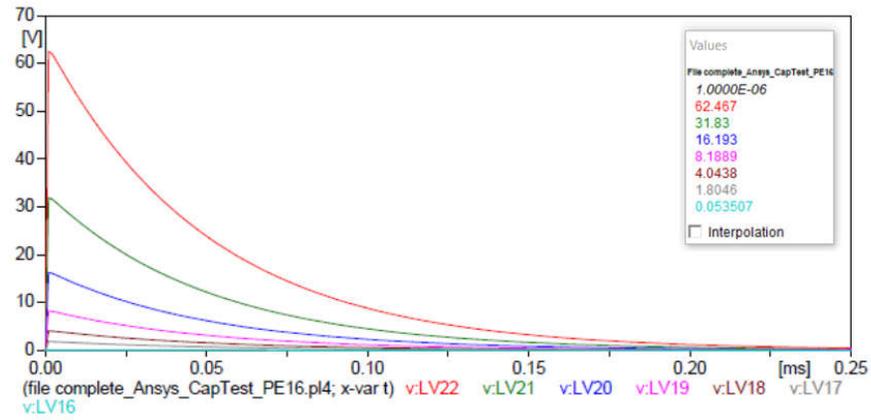
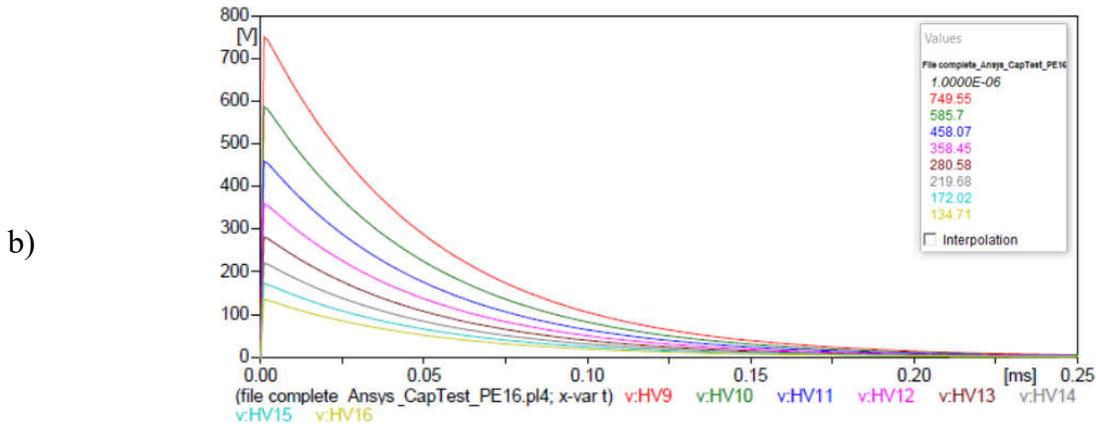
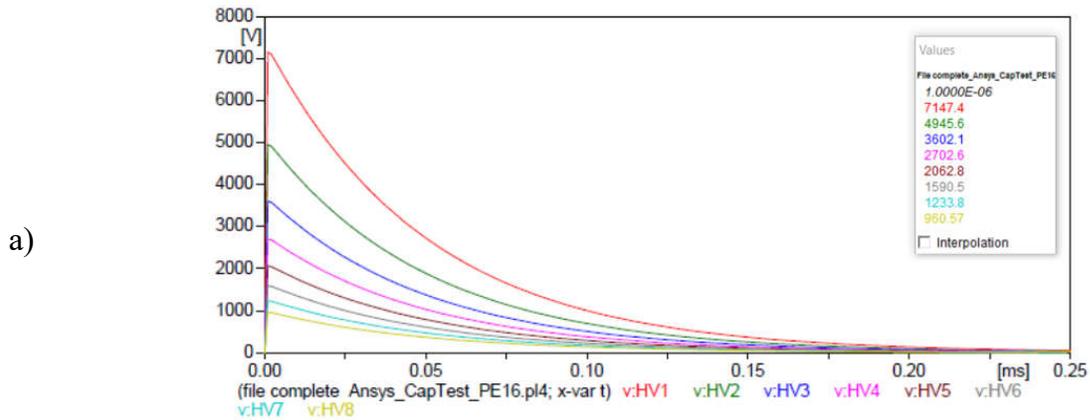
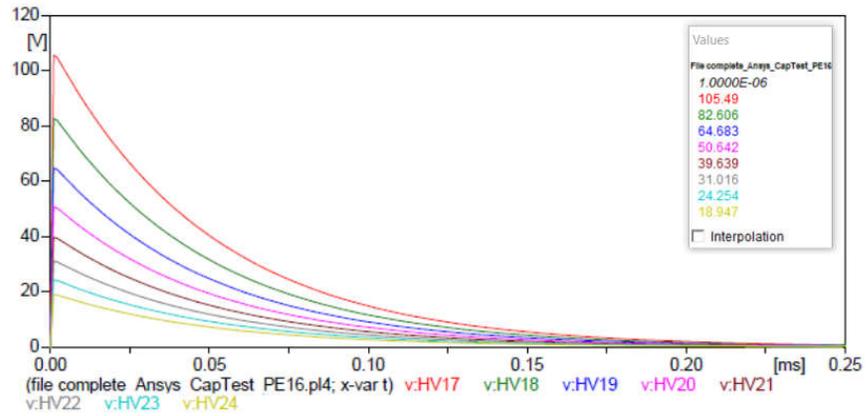


Figura 4.9. Tensiones a lo largo del devanado de B.T. con PE calibre 16.entre sus capas: a) tensión para la capa 1 de la vuelta 1 a 8, b) tensión para la capa 1 de la vuelta 9 a 15, c) tensiones entre la pantalla y cada vuelta de la capa para la vuelta 1 a 15, d) tensiones entre la pantalla y cada vuelta de la capa para la vuelta 16 a 30, e) tensión para la capa 2 de la vuelta 23 a 30, f) tensión para la capa 2 de la vuelta 16 a 22.

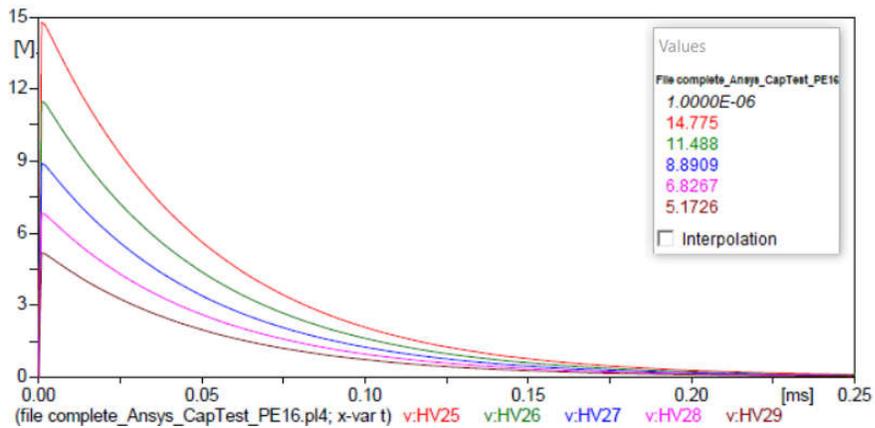
Las tensiones entre las vueltas y capas para el devanado de A.T. son mostradas en la figura 4.10, donde se puede observar la tensión entre las 34 vueltas de la primera capa de este devanado.



c)



d)



e)

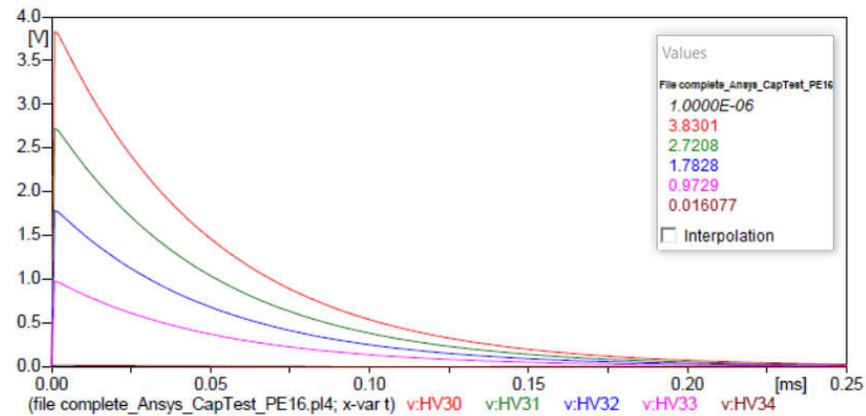


Figura 4.10. Tensiones a lo largo de la primera capa del devanado de A.T.: a) tensión para la capa 1 de la vuelta 1 a 8, b) tensión para la capa 1 de la vuelta 9 a 16, c) tensión para la capa 1 de la vuelta 17 a 24, d) tensión para la capa 1 de la vuelta 25 a 29, e) tensión para la capa 1 de la vuelta 30 a 34.

La figura 4.11 presenta la distribución inicial de tensión del devanado de B.T. en su primera capa, utilizando una pantalla electrostática entre sus capas de calibre 16 y para la primera capa de A.T. Con la instalación de la pantalla electrostática se obtiene un aumento de las capacitancias en serie del devanado, el cual a su vez tiene un efecto en la distribución inicial de tensión, provocando que sea más lineal, debido a la constante de distribución α .

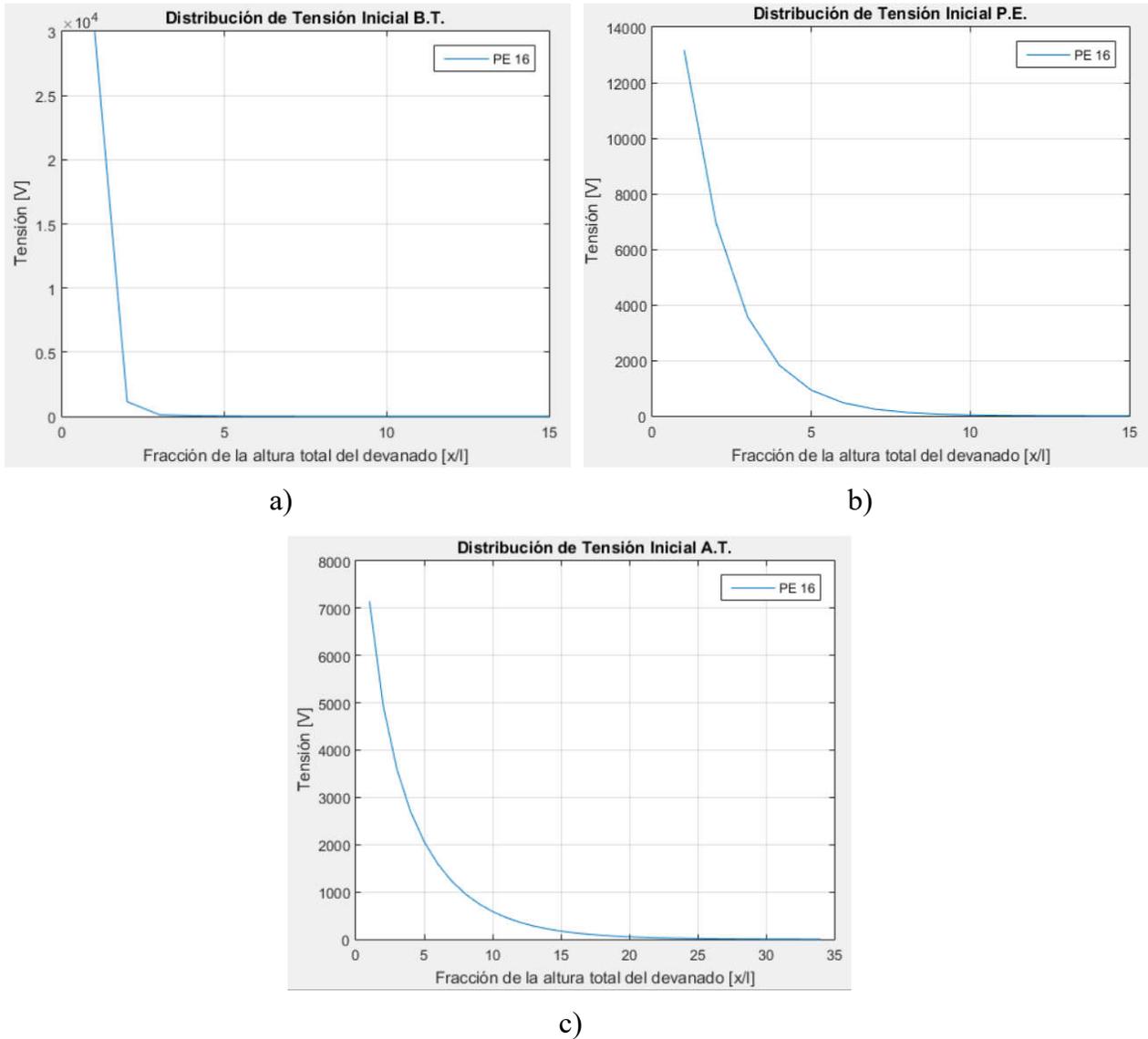
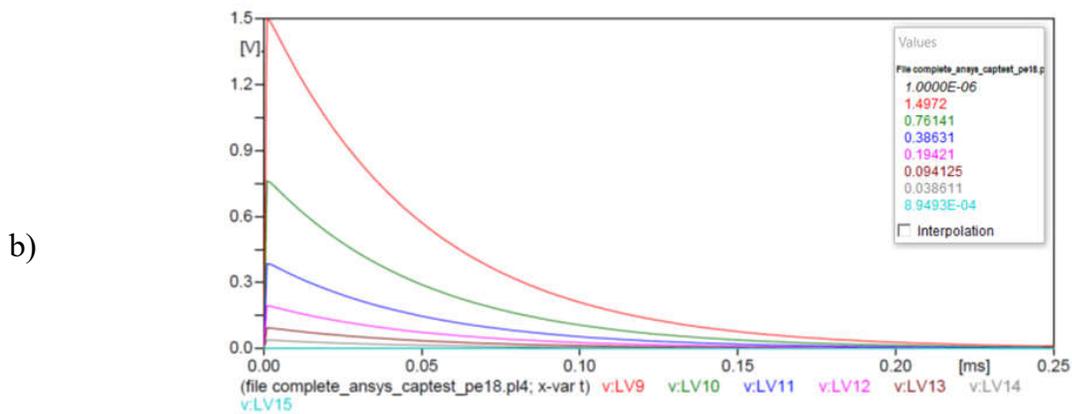
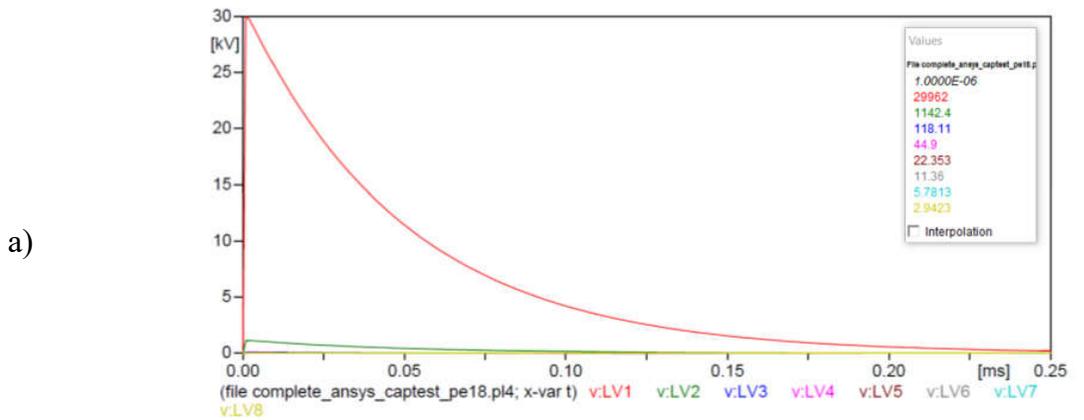


Figura 4.11. Distribución inicial de tensión: a) capa 1 devanado de B.T., b) capacitancias en pantalla electrostática, c) primera capa devanado de A.T.

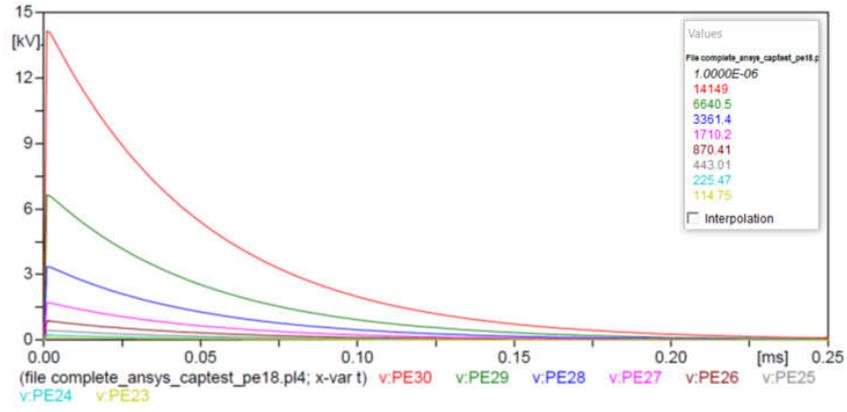
4.8.2 Red capacitiva con pantalla calibre 18

La red capacitiva utilizada para el análisis de la distribución inicial de tensión es igual a la presentada en la figura 4.7, utilizando los valores de las capacitancias obtenidas en el análisis de elementos finitos de 2D y la instalación de la pantalla electrostática de calibre 18 entre la capa 1 y la capa 2 del devanado de B.T. El circuito equivalente es analizado con el software ATP DRAW [55]. La red capacitiva del devanado de B.T. con el aumento de las capacitancias en serie de la pantalla electrostática es igual a la mostrada en la figura 4.8.

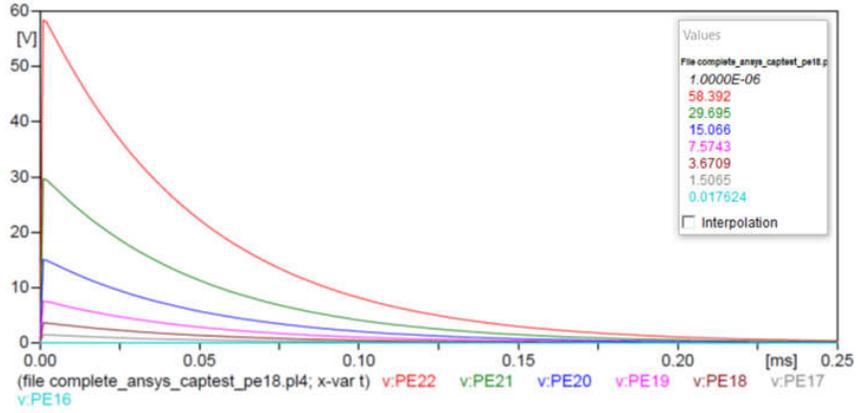
Las tensiones entre las vueltas y capas para el devanado B.T. considerando las capacitancias en la pantalla electrostática son mostradas en la figura 4.12, donde se observa la tensión a lo largo del devanado, mostrando las tensiones en las dos capas del devanado y las tensiones en la pantalla electrostática.



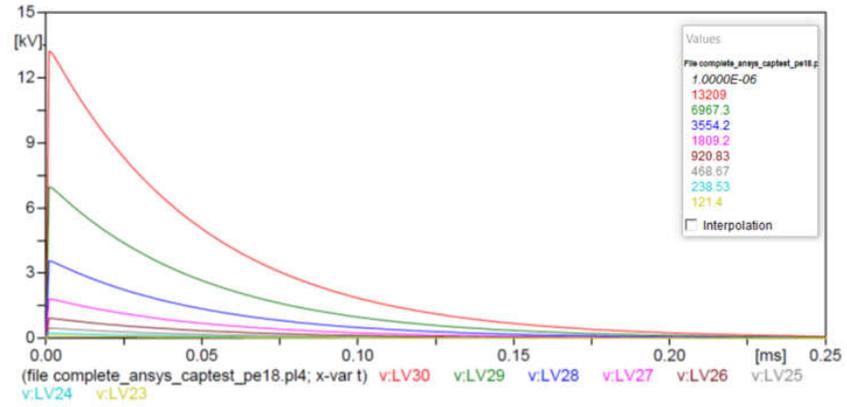
c)



d)



e)



f)

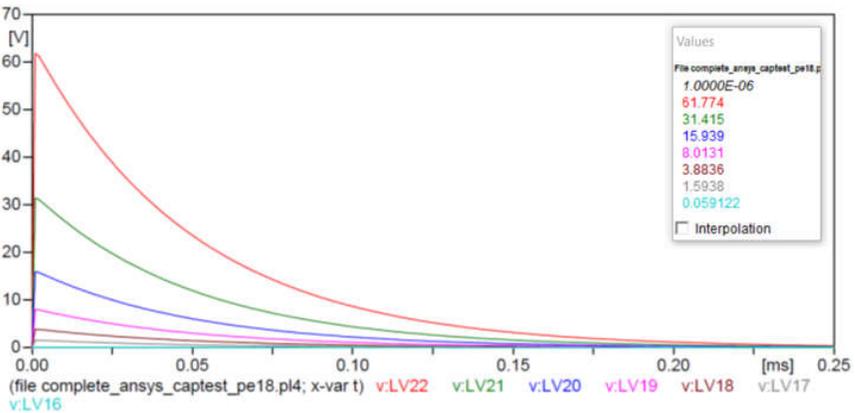
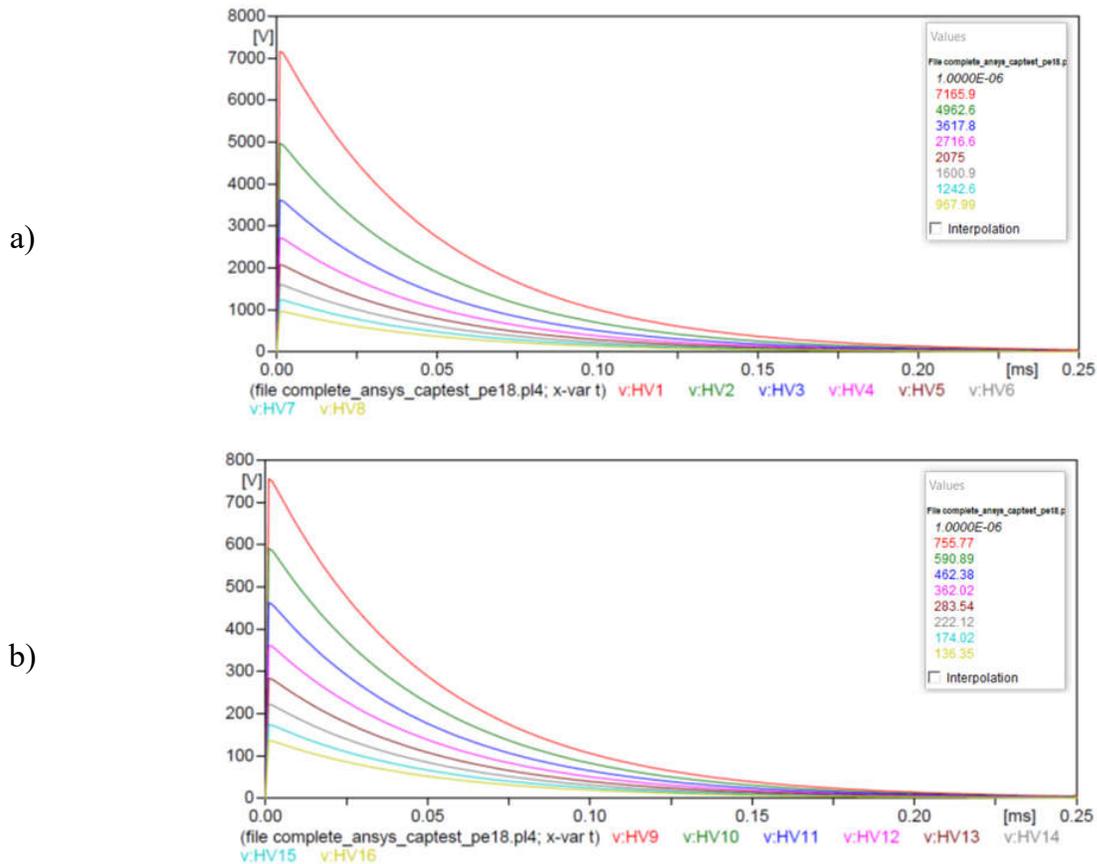
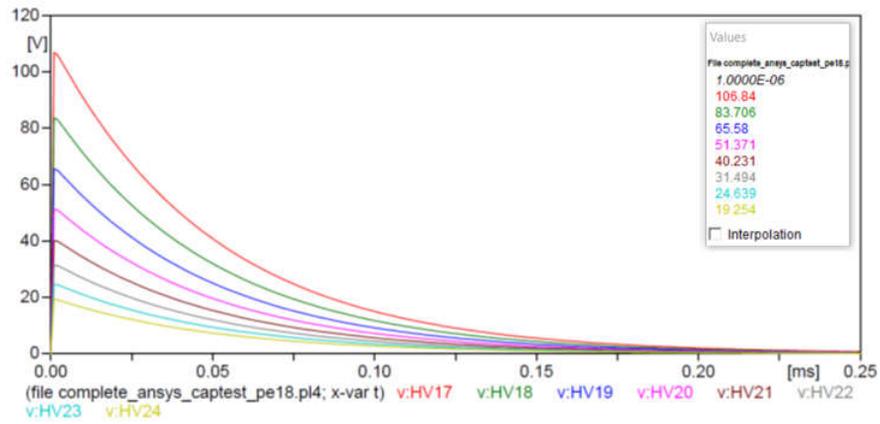


Figura 4.12. Tensiones a lo largo del devanado de B.T. con la PE calibre 18 entre sus capas:
a) tensión para la capa 1 de la vuelta 1 a 8, b) tensión para la capa 1 de la vuelta 9 a 15, c) tensiones entre la pantalla y cada vuelta de la capa para la vuelta 1 a 15, d) tensiones entre la pantalla y cada vuelta de la capa para la vuelta 16 a 30, e) tensión para la capa 2 de la vuelta 26 a 30, f) tensión para la capa 2 de la vuelta 16 a 22.

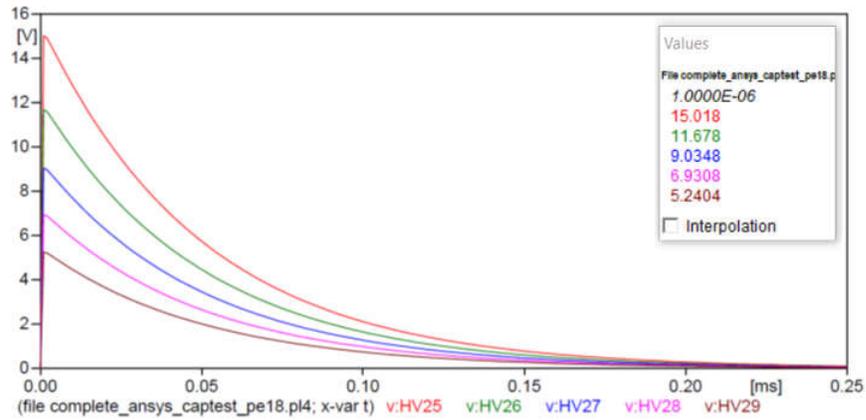
Las tensiones entre las vueltas y capas para el devanado de A.T. son mostradas en la figura 4.13, donde se puede observar la tensión entre las 34 vueltas de la primera capa de este devanado.



c)



d)



e)

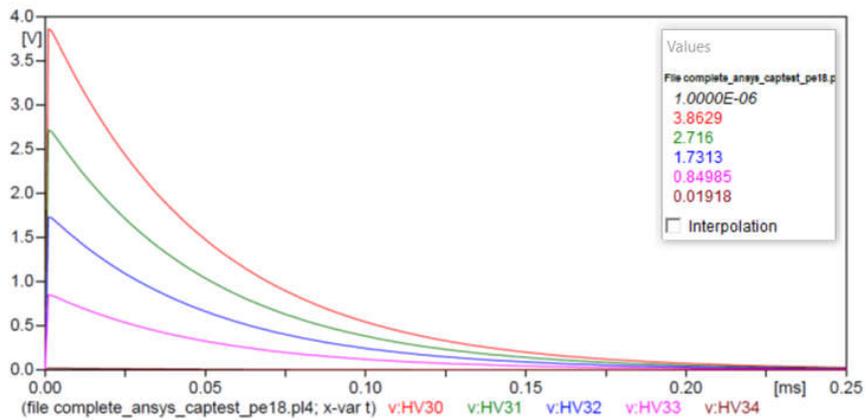
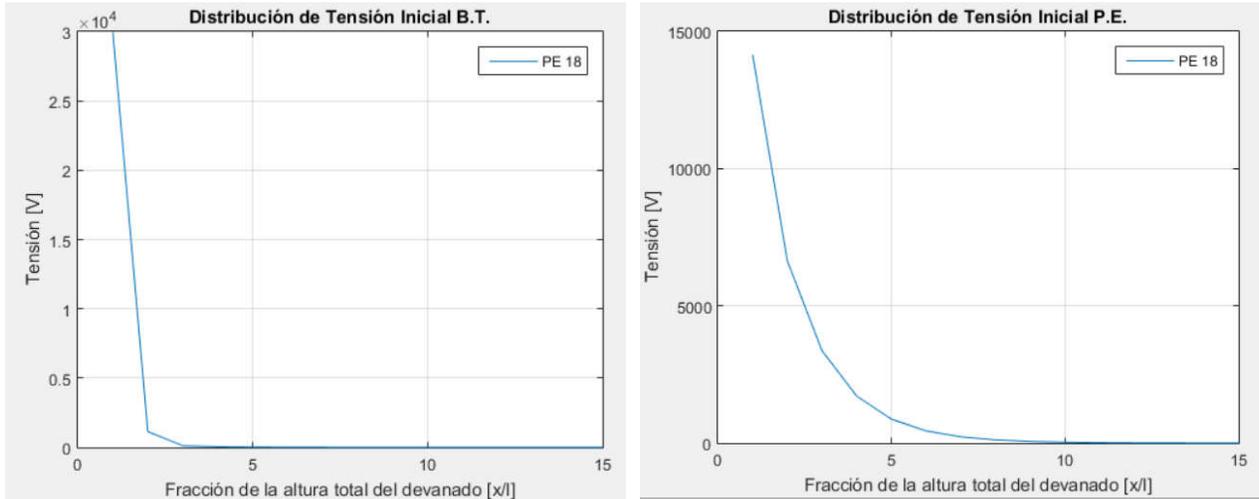


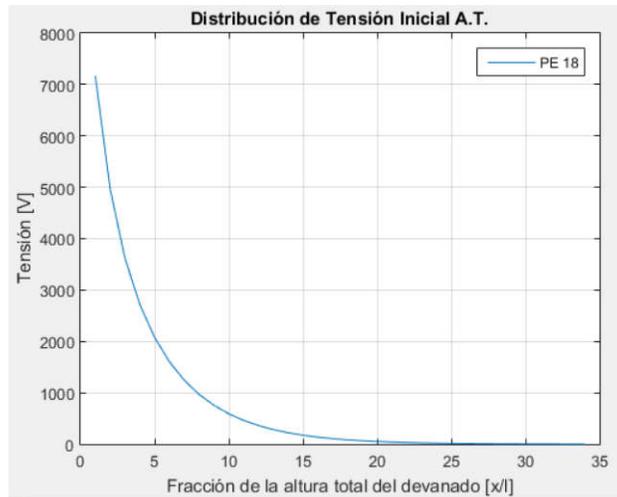
Figura 4.13. Tensiones a lo largo de la primera capa del devanado de A.T.: a) tensión para la capa 1 de la vuelta 1 a 8, b) tensión para la capa 1 de la vuelta 9 a 16, c) tensión para la capa 1 de la vuelta 17 a 24, d) tensión para la capa 1 de la vuelta 25 a 29, e) tensión para la capa 1 de la vuelta 30 a 34.

La figura 4.14 presenta la distribución inicial de tensión del devanado de B.T. en su primera capa, con una pantalla electrostática entre sus capas de calibre 18 y para la primera capa de A.T.



a)

b)



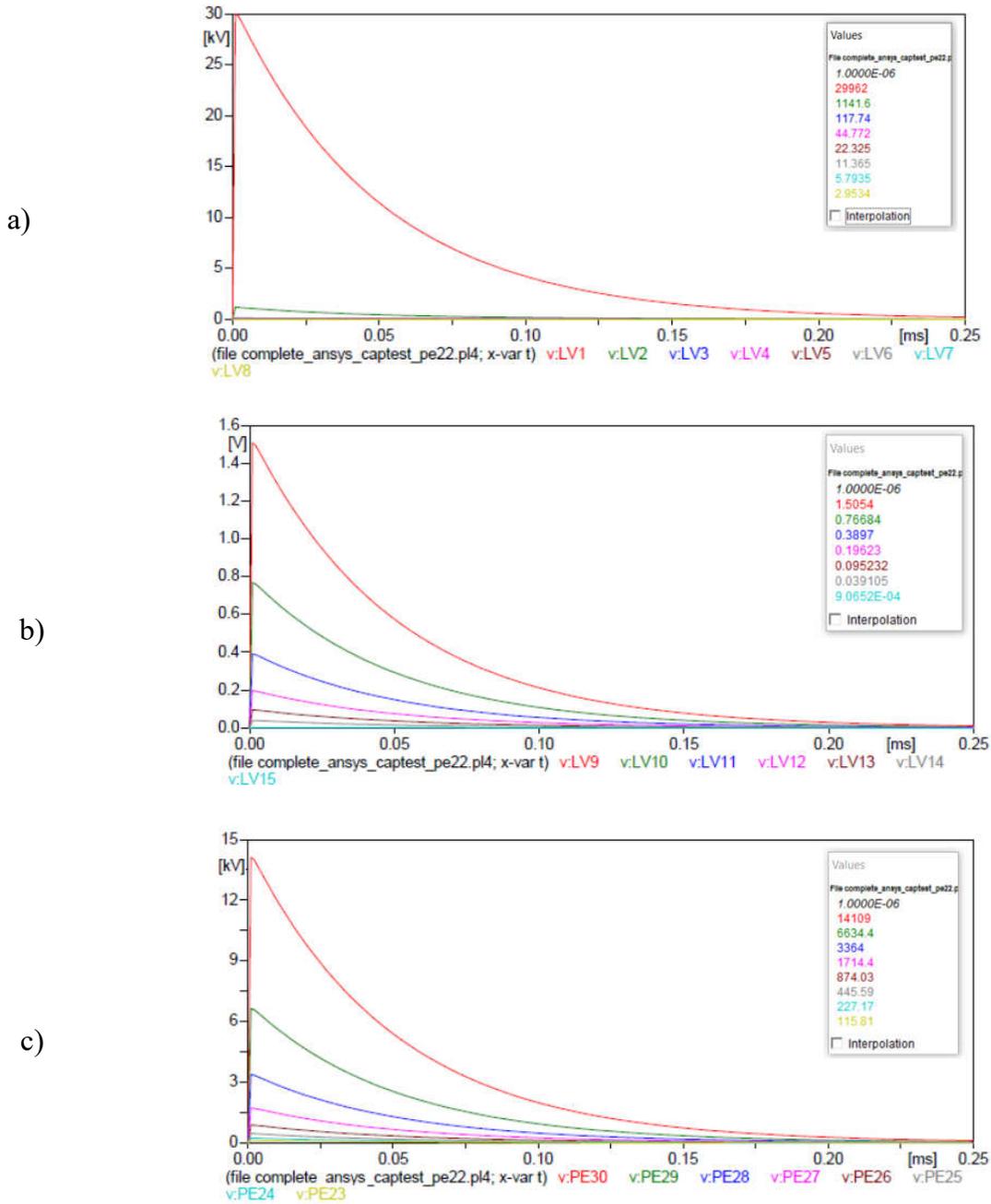
c)

Figura 4.14. Distribución inicial de tensión: a) capa 1 devanado de B.T., b) capacitancias en pantalla electrostática, c) primera capa devanado de A.T.

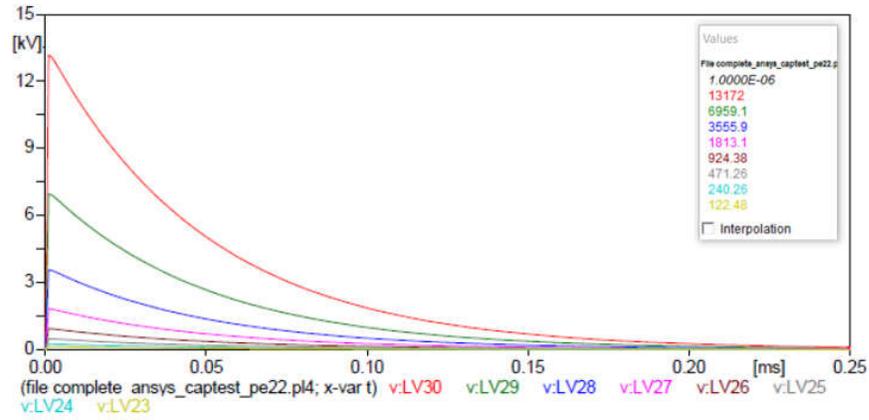
4.8.3 Red capacitiva con pantalla calibre 22

La red capacitiva utilizada considera la instalación de la pantalla electrostática de calibre 22 entre la capa 1 y la capa 2 del devanado de B.T.

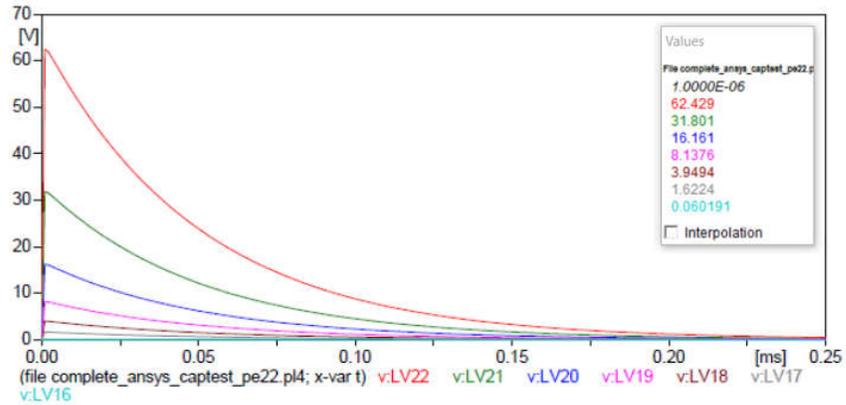
Las tensiones entre las vueltas y capas para el devanado de B.T., considerando además de las capacitancias en la pantalla electrostática son mostradas en la figura 4.15, donde se observa la tensión a lo largo del devanado, mostrando las tensiones en las dos capas del devanado y las tensiones en la pantalla electrostática.



d)



e)



f)

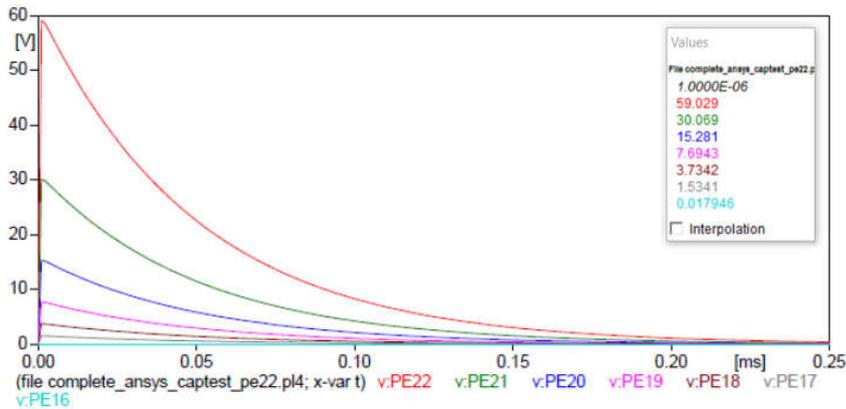
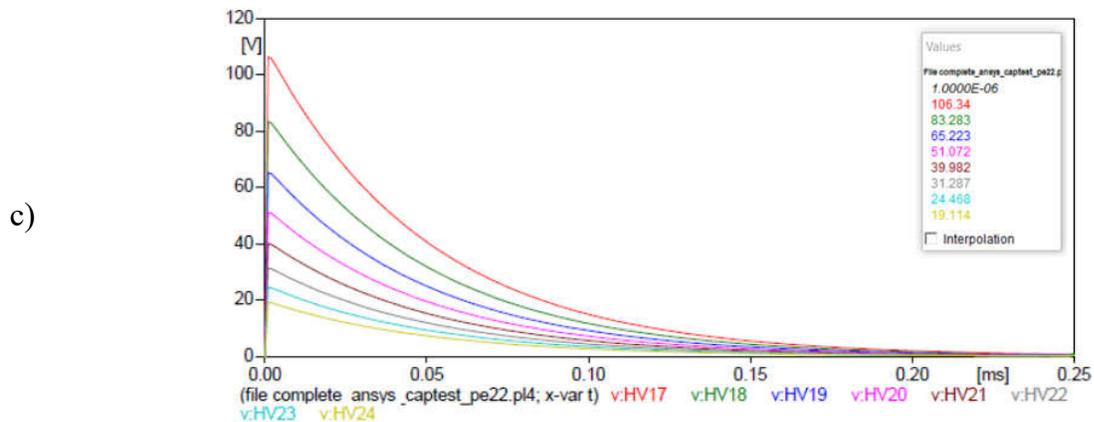
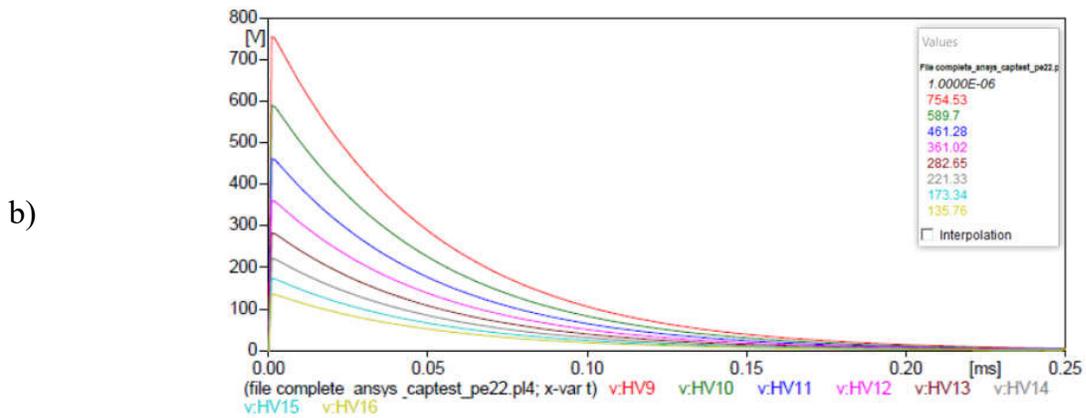
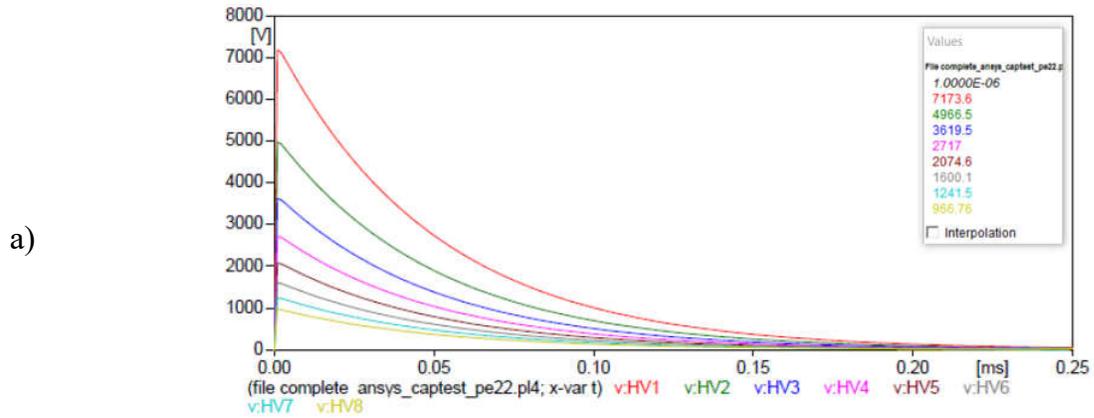
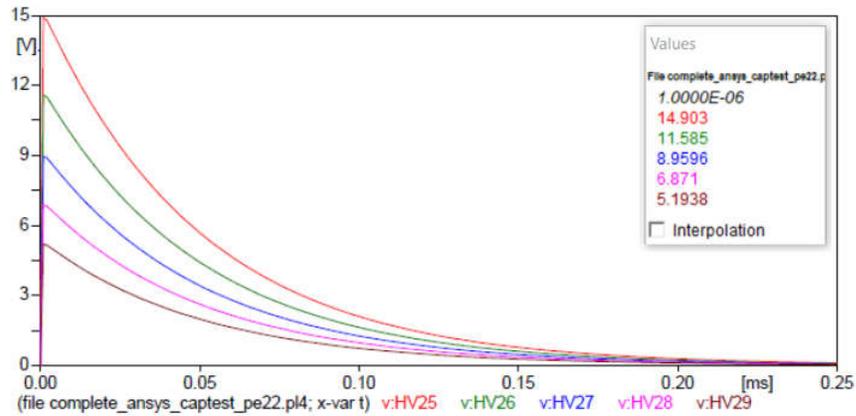


Figura 4.15. Tensiones a lo largo del devanado de B.T. con la PE calibre 22 entre sus capas: a) tensión para la capa 1 de la vuelta 1 a 8, b) tensión para la capa 1 de la vuelta 9 a 15, c) tensiones entre la pantalla y cada vuelta de la capa para la vuelta 1 a 15, d) tensiones entre la pantalla y cada vuelta de la capa para la vuelta 16 a 30, e) tensión para la capa 2 de la vuelta 23 a 30, f) tensión para la capa 2 de la vuelta 16 a 22.

Las tensiones entre las vueltas y capas para el devanado de A.T. son mostradas en la figura 4.16, se puede observar la tensión entre las 34 vueltas de la primera capa de este devanado.



d)



e)

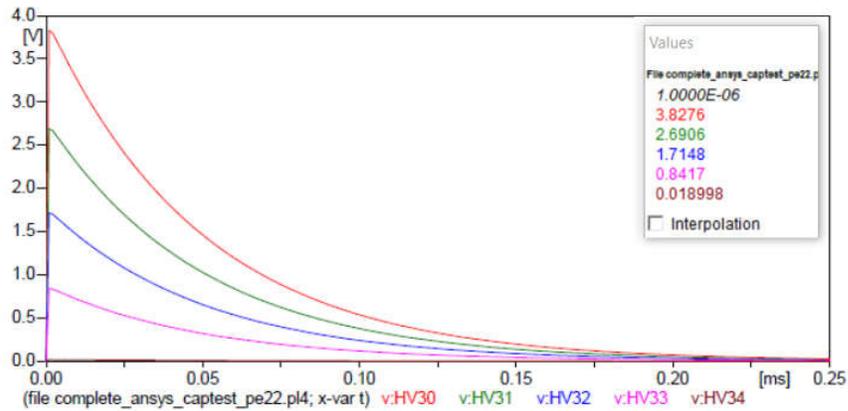


Figura 4.16. Tensiones a lo largo de la primera capa del devanado de A.T.: a) tensión para la capa 1 de la vuelta 1 a 8, b) tensión para la capa 1 de la vuelta 9 a 16, c) tensión para la capa 1 de la vuelta 17 a 24, d) tensión para la capa 1 de la vuelta 25 a 29, e) tensión para la capa 1 de la vuelta 30 a 34.

La figura 4.17 presenta la distribución inicial de tensión del devanado de B.T. en su primera capa, con una pantalla electrostática entre sus capas de calibre 22 y para la primera capa de A.T.

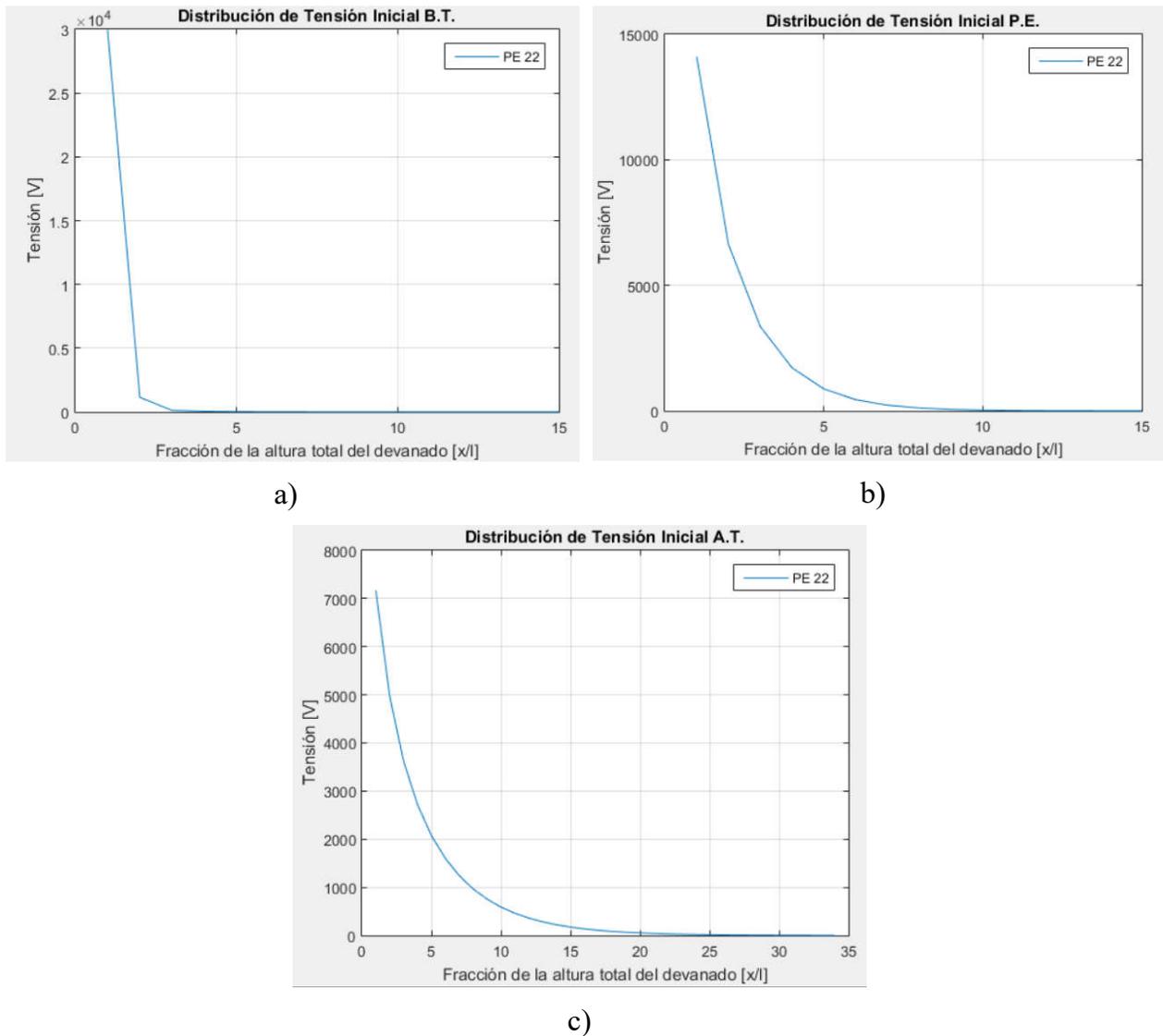


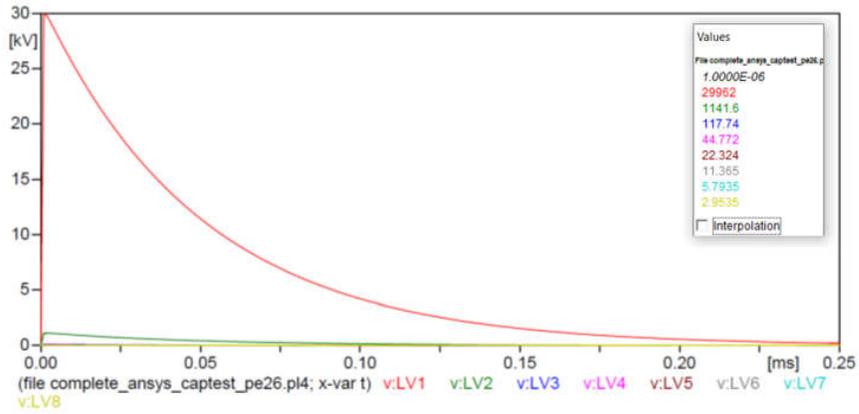
Figura 4.17. Distribución inicial de tensión: a) capa 1 devanado de B.T., b) capacitancias en pantalla electrostática, c) primera capa devanado de A.T.

4.8.4 Red capacitiva con pantalla calibre 26

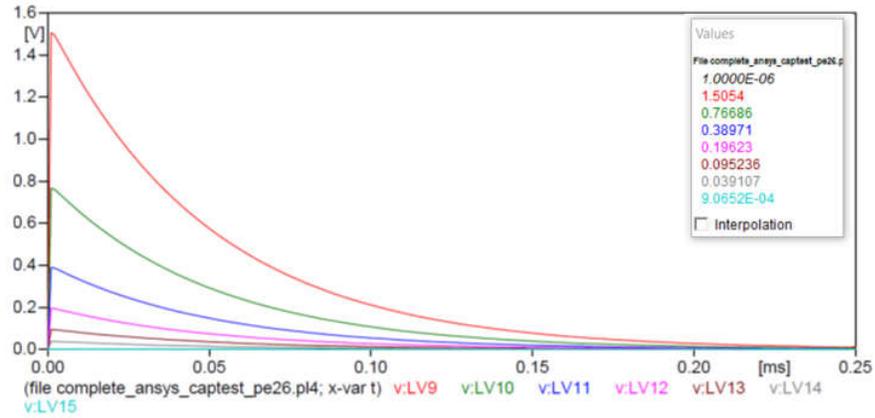
La red capacitiva utilizada considera la instalación de la pantalla electrostática de calibre 26 entre la capa 1 y la capa 2 del devanado de B.T.

Las tensiones entre las vueltas y capas para el devanado de B.T., considerando las capacitancias en la pantalla electrostática son mostradas en la figura 4.18, donde se observa la tensión a lo largo del devanado, mostrando las tensiones en las dos capas del devanado y las tensiones en la pantalla electrostática.

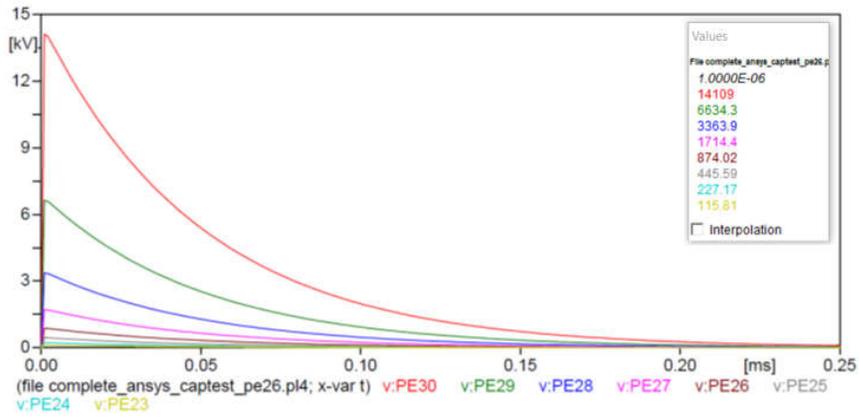
a)



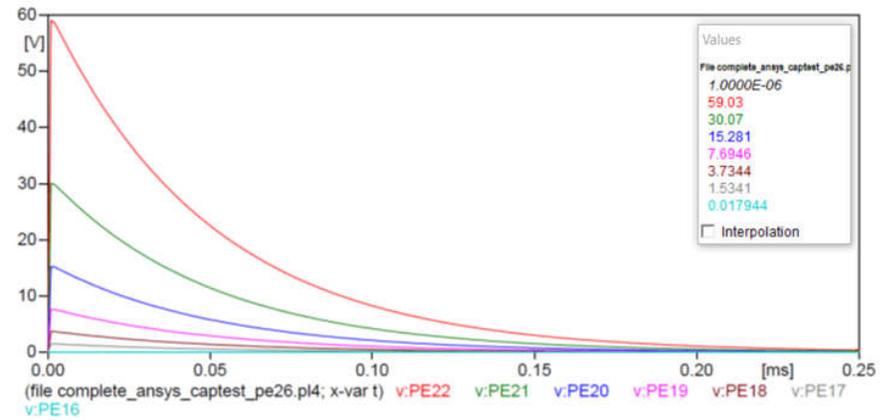
b)



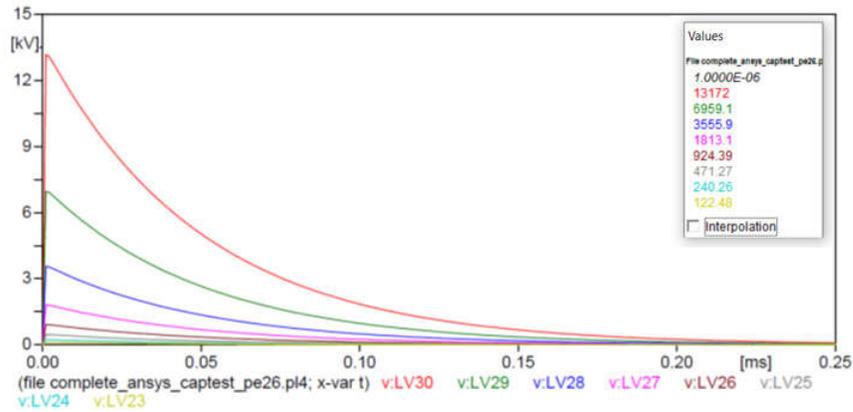
c)



d)



e)



f)

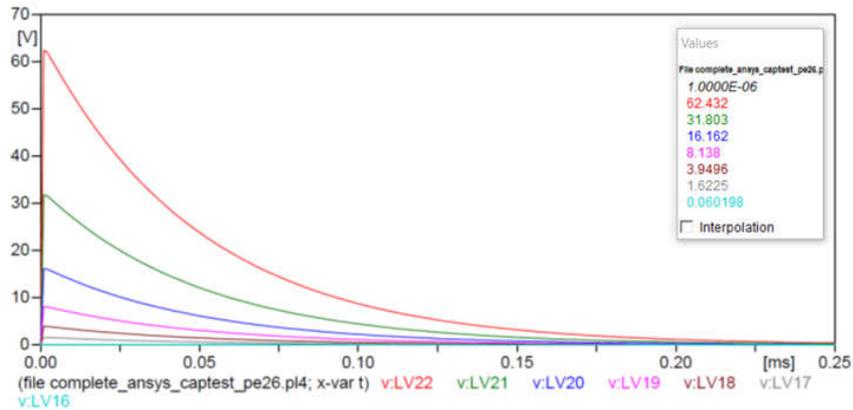
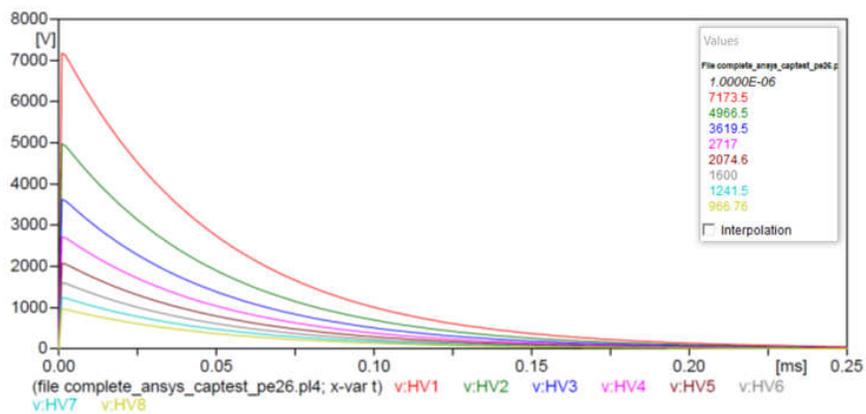


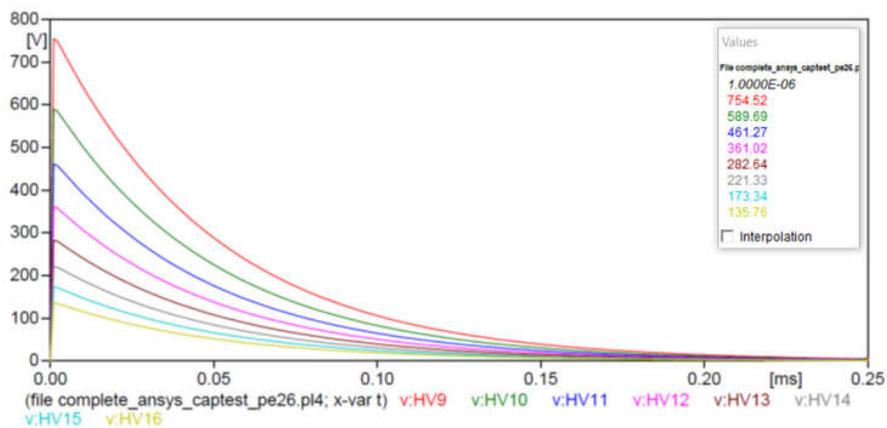
Figura 4.18. Tensiones a lo largo del devanado de B.T. con la PE de calibre 26 entre sus capas: a) tensión para la capa 1 de la vuelta 1 a 8, b) tensión para la capa 1 de la vuelta 9 a 15, c) tensiones entre la pantalla y cada vuelta de la capa para la vuelta 1 a 15, d) tensiones entre la pantalla y cada vuelta de la capa para la vuelta 16 a 30, e) tensión para la capa 2 de la vuelta 23 a 30, f) tensión para la capa 2 de la vuelta 16 a 22.

Las tensiones entre las vueltas y capas para el devanado de A.T. son mostradas en la figura 4.19, donde se puede observar la tensión entre las 34 vueltas de la primera capa de este devanado.

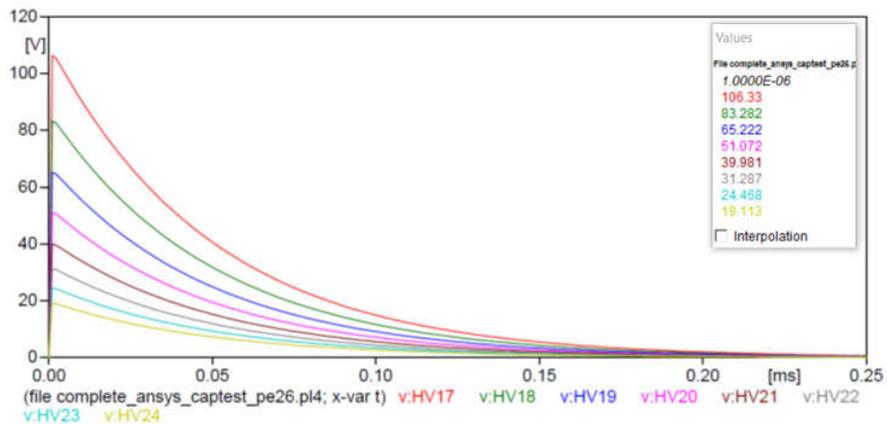
a)



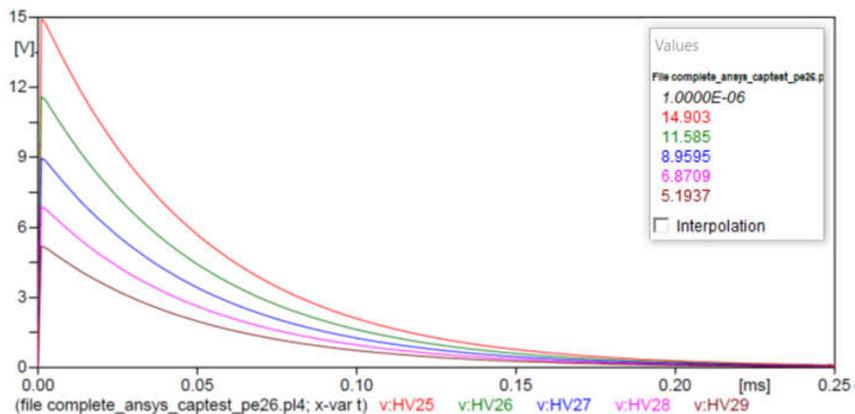
b)



c)



d)



e)

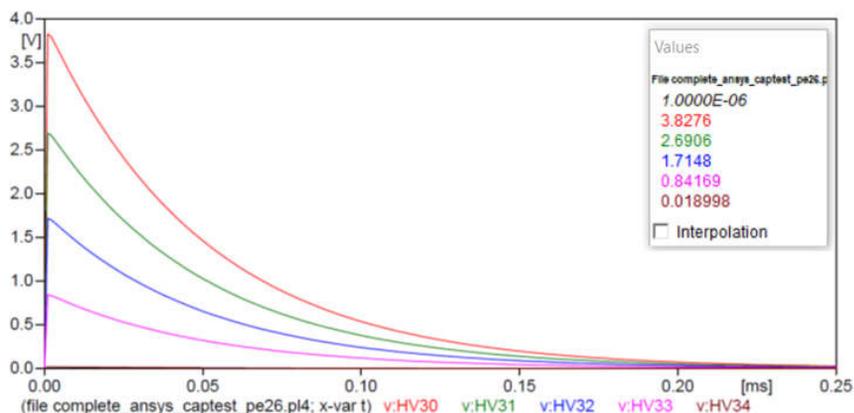


Figura 4.19. Tensiones a lo largo de la primera capa del devanado de A.T.: a) tensión para la capa 1 de la vuelta 1 a 8, b) tensión para la capa 1 de la vuelta 9 a 16, c) tensión para la capa 1 de la vuelta 17 a 24, d) tensión para la capa 1 de la vuelta 25 a 29, e) tensión para la capa 1 de la vuelta 30 a 34.

La figura 4.20 presenta la distribución inicial de tensión del devanado de B.T. en su primera capa, con una pantalla electrostática entre sus capas de calibre 26 y para la primera capa de A.T

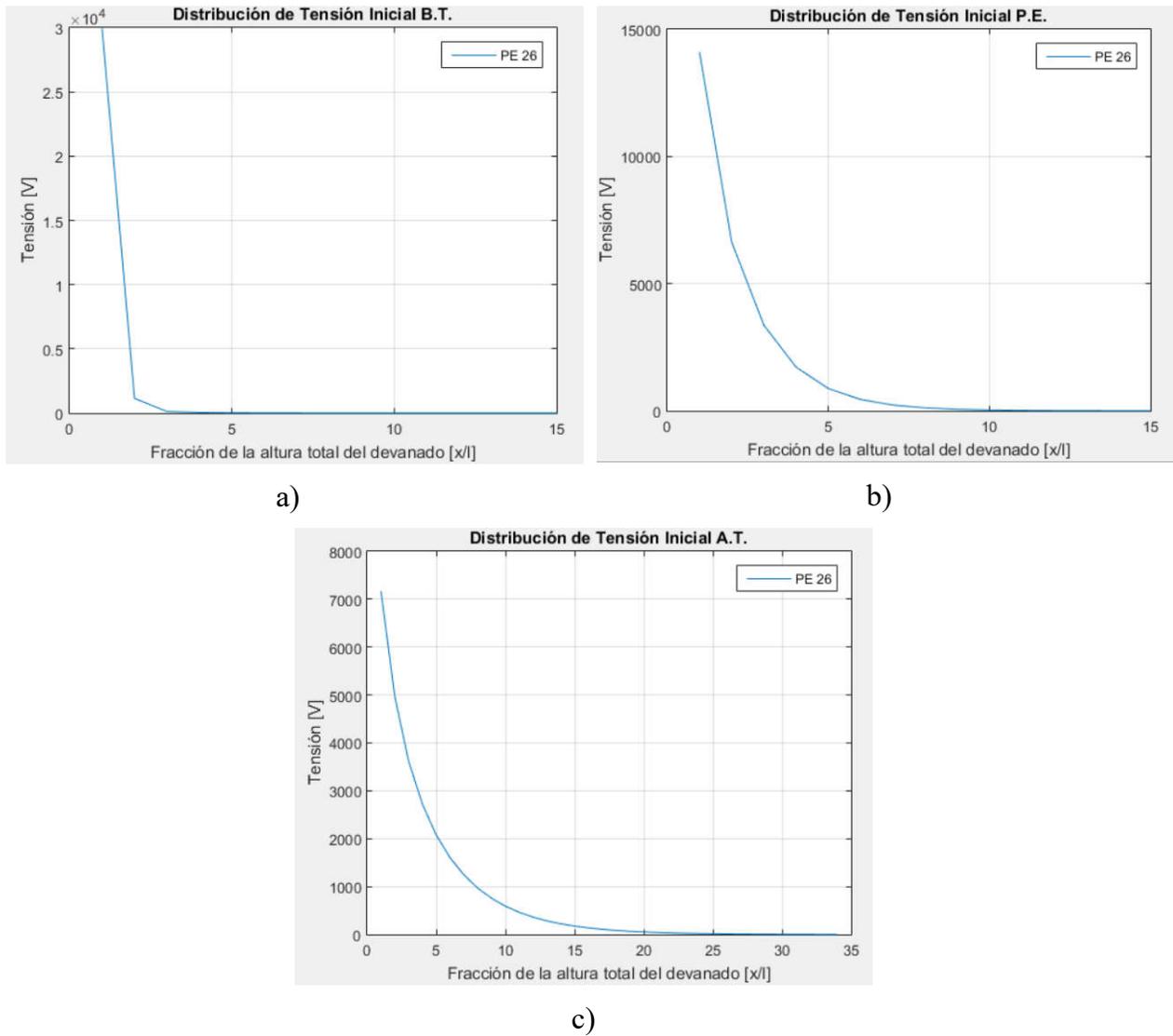


Figura 4.20. Distribución inicial de tensión: a) capa 1 devanado de B.T., b) capacitancias en pantalla electrostática, c) primera capa devanado de A.T.

4.9 Comparación de los resultados del modelo de 2D

A parti de los resultados obtenidos con el análisis de elementos finitos en el modelo de 2D, se ha llevado a cabo un análisis de las tensiones obtenidas para los diferentes casos de espesor de la pantalla electrostática instalada entre las capas de B.T. La tabla 4.7 muestra las tensiones en la primera capa de B.T. para cada uno de estos casos.

Tabla 4.7. Tensiones en el devanado de B.T.

Distribución de Tensión en B.T. capa 1				
# de Vuelta	Volts en B.T. PE 16 (V)	Volts en B.T. PE 18 (V)	Volts en B.T. PE 22 (V)	Volts en B.T. PE 26 (V)
1	29962	29962	29962	29962
2	1141.7	1142.4	1141.6	1141.6
3	117.78	118.11	117.74	117.74
4	44.794	44.9	44.772	44.772
5	22.336	22.353	22.325	22.324
6	11.371	11.36	11.365	11.365
7	5.7965	5.7813	5.7935	5.7935
8	2.955	2.9423	2.9534	2.9535
9	1.5063	1.4972	1.5054	1.5054
10	0.76753	0.76141	0.76684	0.76686
11	0.39048	0.38631	0.3897	0.38971
12	0.19746	0.19421	0.19623	0.19623
13	0.097514	0.094125	0.095232	0.095236
14	0.043612	0.038611	0.39105	0.039107
15	0.000747	0.000895	0.000907	0.000907

La figura 4.21 muestra la DIT para el devanado de B.T. del modelo en 2D.

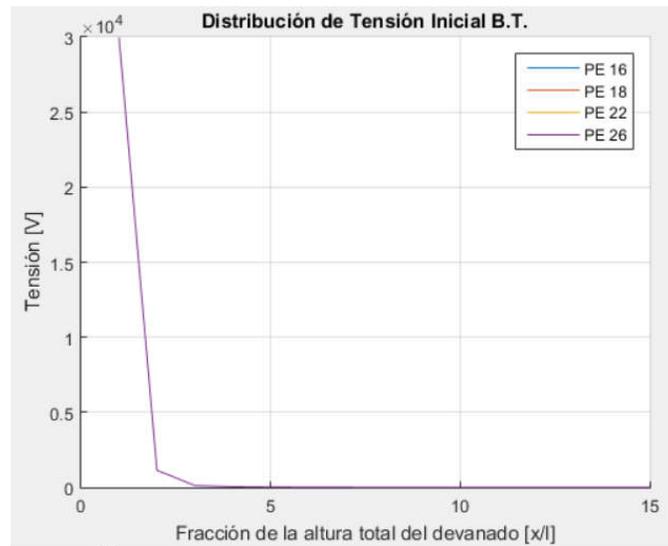


Figura 4.21. Distribución inicial de tensión para B.T.

La tabla 4.8 muestra las tensiones relacionadas en la pantalla electrostática.

Tabla 4.8. Tensiones la pantalla electrostática del modelo 2D.

Distribución de Tensión en B.T. capa 1				
# de Vuelta	Volts en B.T. PE 16 (V)	Volts en B.T. PE 18 (V)	Volts en B.T. PE 22 (V)	Volts en B.T. PE 26 (V)
1	13179	14149	14109	14109
2	6962.7	6640.5	6634.4	6634.3
3	3557.7	3361.4	3364	3363.9
4	1814.1	1710.2	1714.4	1714.4
5	924.85	870.41	874.03	874.02
6	471.51	443.01	445.59	445.59
7	240.38	225.47	227.17	227.17
8	122.55	114.75	115.81	115.81
9	59.065	58.392	59.029	59.03
10	30.096	29.695	30.069	30.07
11	15.311	15.066	15.281	15.281
12	7.7428	7.5743	7.6943	7.6946
13	3.8235	3.6709	3.7342	3.7344
14	1.7063	1.5065	1.5341	1.5341
15	0.015952	0.017624	0.017946	0.017944

La figura 4.22 muestra la DIT en la pantalla electrostática.

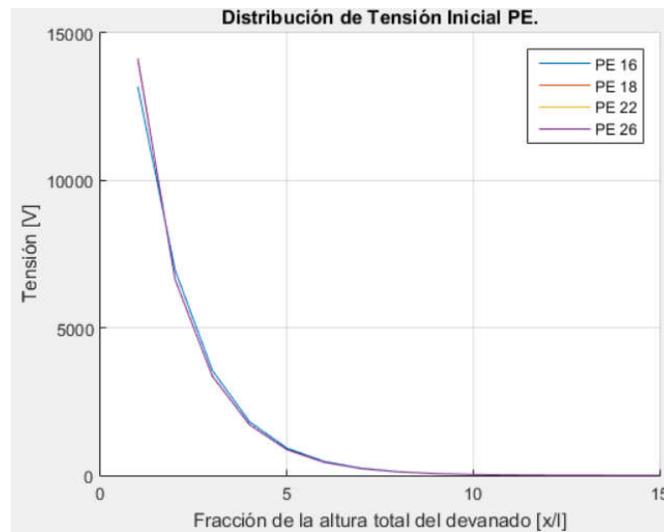


Figura 4.22. Distribución inicial en la pantalla electrostática.

Las tensiones de la primera capa del devanado de A.T. se muestran en la tabla 4.9.

Tabla 4.9. Tensiones en el devanado de A.T.

Distribución de Tensión en A.T. capa 1				
# de Vuelta	PE 16 (V)	PE 18 (V)	PE 22 (V)	PE 26 (V)
1	7147.4	7165.9	7173.6	7173.5
2	4945.6	4962.6	4966.5	4966.5
3	3602.1	3617.8	3619.5	3619.5
4	2702.6	2716.6	2717	2717
5	2062.8	2075	2074.6	2074.6
6	1590.5	1600.9	1600.1	1600
7	1233.8	1242.6	1241.5	1241.5
8	960.57	967.99	966.76	966.76
9	749.55	755.77	754.53	754.52
10	585.7	590.89	589.7	589.69
11	458.07	462.38	461.28	461.27
12	358.45	362.02	361.02	361.02
13	280.58	283.54	282.65	282.64
14	219.68	222.12	221.33	221.33
15	172.02	174.02	173.34	173.34
16	134.71	136.35	135.76	135.76
17	105.49	106.84	106.34	106.33
18	82.606	83.706	83.283	83.282
19	64.683	65.58	65.223	65.222
20	50.642	51.371	51.072	51.072
21	39.639	40.231	39.982	39.981
22	31.016	31.494	31.287	31.287
23	24.254	24.639	24.458	24.468
24	18.947	19.254	19.114	19.113
25	14.775	15.018	14.903	14.903
26	11.488	11.678	11.585	11.585
27	8.8909	9.0348	8.9596	8.9595
28	6.8267	6.9308	6.871	6.8709
29	5.1726	5.2404	5.1938	5.1937
30	3.8301	3.8629	3.8276	3.8276
31	2.7208	2.716	2.6906	2.6906
32	1.7828	1.7313	1.7148	1.7148
33	0.9729	0.84985	0.8417	0.84169
34	0.016077	0.01918	0.018998	0.018998

La figura 4.23 muestra la DIT en el devanado de A.T.

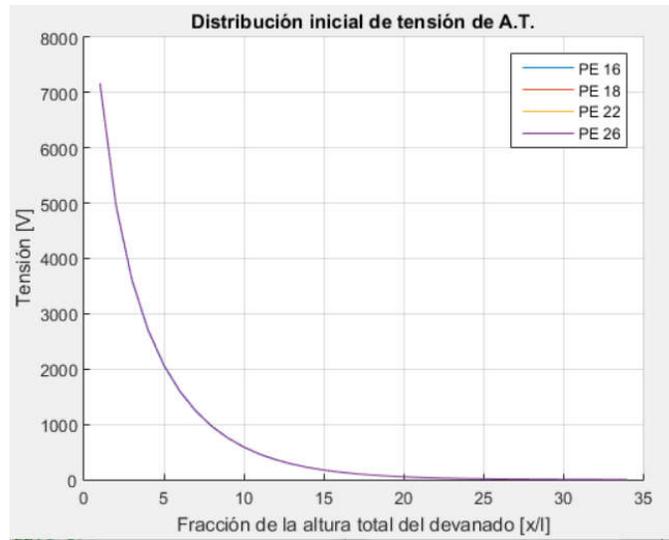


Figura 4.23. Distribución inicial de tensión para la primera capa de A.T.

Capítulo 5

Análisis de los Resultados de los Modelos

5.1 Introducción

La implementación de la pantalla electrostática en los devanados del transformador tiene el efecto de aumentar las capacitancias serie entre las vueltas de los devanados y con esto hacer más lineal la respuesta del transformador a las sobretensiones. Los resultados obtenidos de los métodos presentados anteriormente serán analizados en este capítulo. La respuesta del transformador a las sobretensiones generadas ya sea por descargas atmosféricas, conmutación, resonancia, regulación de tensión o por maniobras del operador, impactan de manera considerable en el sistema de aislamiento del transformador. Por esta razón es importante disminuir los niveles de la sobretensión por impulso a lo largo de los devanados del transformador de potencia, pues si éste llega a tener una falla se quedará fuera de operación afectando la continuidad del suministro de energía eléctrica.

5.2 Análisis de los resultados entre el modelo de circuito equivalente y MEF 2D

Una vez que se realizó el análisis del efecto de la pantalla electrostática en los devanados del transformador de potencia, la comparación de los métodos utilizados para determinar la DIT para cada caso es analizada en esta subsección. Cuando un impulso de tensión impacta en las terminales del transformador, las capacitancias entre vueltas, entre capas y las capacitancias a tierra, determinan la constante de distribución α de la tensión a lo largo de los devanados. Esta constante definida en la ecuación 2.16, modela la DIT en los devanados del transformador como un aumento de las capacitancias en serie debido a la pantalla electrostática. Haciendo que la DIT sea más lineal en cuanto a su distribución. Si el valor de α es alto, mayor será la amplitud de las oscilaciones que se produzcan entre las distribuciones iniciales y finales de tensión. Como se presento en la figura 2.2, un cambio que disminuya la constante de distribución del devanado, se verá reflejado en una distribución más uniforme de tensión, reduciendo así el estrés de tensión en el devanado. Para lograr este efecto y conseguir una distribución más lineal se puede hacer que la constante α sea lo más cercana a

ceros, mediante el aumento de sus capacitancias en serie y/o el decremento de su capacitancia a tierra.

5.2.1 Análisis de la pantalla electrostática calibre 16

Las capacitancias calculadas con el método de los circuitos equivalentes para obtener la respuesta ante sobretensiones transitorias fueron mostradas en el capítulo 3. Ahí se presentaron los cálculos para formar la red capacitiva y así poder analizar la distribución de la tensión a lo largo de los devanados del transformador de potencia. Gracias al análisis con la implementación de la pantalla electrostática entre sus capas de B.T. se pudieron obtener los niveles de tensión dentro de los devanados.

En el capítulo 4 se mostro el modelo 2D para calcular las capacitancias relacionadas a la red capacitiva para y poder así obtener la respuesta a sobretensiones de impulso con el análisis de elementos finitos. A continuación, se muestran las tensiones obtenidas con la implementación de la pantalla electrostática calibre 16.

En la tabla 5.1 se presentan las tensiones de la primera capa de B.T. obtenidas entre estos métodos. Se puede una variación en el nivel de la tensión obtenida por los diferentes métodos, siendo las tensiones derivadas del modelo 2D inferiores a las calculadas con el circuito equivalente.

Tabla 5.1. Tensiones de la primera capa del devanado de B.T.

# de Vuelta	Circuito Equivalente	Modelo 2D
	Volts en B.T. (V)	Volts en B.T. (V)
1	29962	29962
2	12904	1141.7
3	5567	117.78
4	2410	44.794
5	1051	22.336
6	464	11.371
7	211	5.7965
8	100	2.955
9	51	1.5063

10	28	0.76753
11	17	0.39048
12	11	0.19746
13	8	0.097514
14	5	0.043612
15	2	0.000747

La tabla 5.2 muestra la comparación entre las tensiones obtenidas con la pantalla electrostática implementada entre las capas de B.T.

Tabla 5.2. Tensiones en pantalla electrostática.

# de Vuelta	Circuito Equivalente	Modelo 2D
	Volts en B.T. PE 16 (V)	Volts en B.T. PE 16 (V)
1	22045	13179
2	9846	6962.7
3	4558	3557.7
4	2246	1814.1
5	1216	924.85
6	741	471.51
7	507	240.38
8	379	122.55
9	299	59.065
10	241	30.096
11	194	15.311
12	153	7.7428
13	115	3.8235
14	79	1.7063
15	3	0.015952

Las tensiones obtenidas de A.T. para la primera capa son mostradas en la tabla 5.3, donde se comparan los resultados de las tensiones con ambos métodos.

Tabla 5.3. Tensiones en la primera capa del devanado de A.T.

# de Vuelta	Circuito Equivalente	Modelo 2D
	Volts A.T. (V)	Volts A.T. (V)
1	2039	7147.4
2	1827	4945.6
3	1647	3602.1
4	1492	2702.6
5	1357	2062.8
6	1239	1590.5
7	1135	1233.8
8	1041	960.57
9	958	749.55
10	883	585.7
11	814	458.07
12	752	358.45
13	695	280.58
14	642	219.68
15	593	172.02
16	548	134.71
17	506	105.49
18	466	82.606
19	429	64.683
20	395	50.642
21	362	39.639
22	330	31.016
23	301	24.254
24	273	18.947
25	246	14.775
26	220	11.488
27	195	8.8909
28	171	6.8267
29	147	5.1726
30	125	3.8301

31	103	2.7208
32	81	1.7828
33	60	0.9729
34	38	0.016077

5.2.2 Análisis de la pantalla electrostática calibre 18

Las tensiones obtenidas con la instalación de la pantalla electrostática calibre 18 se muestran en la tabla 5.4. Comparando las tensiones con ambos métodos, se observa que las tensiones derivadas del modelo 2D son inferiores a las obtenidas con el circuito equivalente.

Tabla 5.4. Tensiones primera capa del devanado de B.T.

# de Vuelta	Circuito Equivalente	Modelo 2D
	Volts en B.T. (V)	Volts en B.T. (V)
1	29962	29962
2	12904	1142.4
3	5567	118.11
4	2410	44.9
5	1051	22.353
6	464	11.36
7	211	5.7813
8	100	2.9423
9	51	1.4972
10	28	0.76141
11	17	0.38631
12	11	0.19421
13	7.6	0.094125
14	4.7	0.038611
15	2	0.000895

La tabla 5.5 muestra la comparación entre las tensiones obtenidas con los dos métodos para el caso de la pantalla electrostática implementada entre las capas de B.T.

Tabla 5.5. Tensiones en pantalla electrostática.

# de Vuelta	Circuito Equivalente	Modelo 2D
	Volts en B.T. PE 18 (V)	Volts en B.T. PE 18 (V)
1	22909	14149
2	10154	6640.5
3	4633	3361.4
4	2227	1710.2
5	1163	870.41
6	680	443.01
7	448	225.47
8	327	114.75
9	254	58.392
10	203	29.695
11	163	15.066
12	128	7.5743
13	97	3.6709
14	67	1.5065
15	3	0.017624

Las tensiones obtenidas de A.T. para la primera capa son mostradas en la tabla 5.6, donde se pueden comparar los resultados de las tensiones con ambos métodos.

Tabla 5.6. Tensiones en la primera capa del devanado de A.T.

# de Vuelta	Circuito Equivalente	Modelo 2D
	Volts A.T. (V)	Volts A.T. (V)
1	1852	7165.9
2	1660	4962.6
3	1496	3617.8
4	1355	2716.6
5	1233	2075
6	1126	1600.9
7	1031	1242.6
8	946	967.99
9	871	755.77
10	802	590.89
11	740	462.38
12	683	362.02
13	631	283.54
14	583	222.12
15	539	174.02
16	498	136.35
17	460	106.84
18	424	83.706
19	390	65.58
20	359	51.371
21	329	40.231
22	300	31.494
23	273	24.639
24	248	19.254
25	223	15.018
26	200	11.678
27	177	9.0348
28	155	6.9308
29	134	5.2404
30	113	3.8629

31	93	2.716
32	74	1.7313
33	54	0.84985
34	35	0.01918

5.2.3 Análisis de la pantalla electrostática calibre 22

Para el análisis de la pantalla electrostática, las tensiones obtenidas se muestran en la tabla 5.7 Comparando las tensiones con ambos métodos, se observa que las tensiones derivadas del modelo 2D son inferiores a las obtenidas con el circuito equivalente.

Tabla 5.7. Tensiones primera capa del devanado de B.T.

# de Vuelta	Circuito Equivalente	Modelo 2D
	Volts en B.T. (V)	Volts en B.T. (V)
1	29962	29962
2	12918	1141.6
3	5575	117.74
4	2411	44.772
5	1047	22.325
6	458	11.365
7	203	5.7935
8	93	2.9534
9	45	1.5054
10	23	0.76684
11	13	0.3897
12	8	0.19623
13	5	0.095232
14	3	0.39105
15	1.2	0.000907

La tensión obtenida con los diferentes métodos para la pantalla electrostática entre las capas de B.T. se muestra en la tabla 5.8.

Tabla 5.8. Tensiones en pantalla electrostática.

# de Vuelta	Circuito Equivalente	Modelo 2D
	Volts en B.T. PE 22 (V)	Volts en B.T. PE 22 (V)
1	24313	14109
2	10671	6634.4
3	4773	3364
4	2213	1714.4
5	1093	874.03
6	593	445.59
7	362	227.17
8	248	115.81
9	186	59.029
10	145	30.069
11	116	15.281
12	91	7.6943
13	68	3.7342
14	47	1.5341
15	2	0.017946

En la tabla 5.9 se muestran los resultados de las tensiones para la primera capa de A.T. donde se pueden comparar las tensiones obtenidas del devanado de A.T con ambos métodos.

Tabla 5.9. Tensiones en la primera capa del devanado de A.T.

# de Vuelta	Circuito Equivalente	Modelo 2D
	Volts A.T. (V)	Volts A.T. (V)
1	1534	7173.6
2	1375	4966.5
3	1239	3619.5
4	1123	2717
5	1021	2074.6
6	932	1600.1
7	854	1241.5
8	784	966.76
9	721	754.53
10	665	589.7
11	613	461.28
12	566	361.02
13	523	282.65
14	483	221.33
15	447	173.34
16	413	135.76
17	381	106.34
18	351	83.283
19	323	65.223
20	297	51.072
21	272	39.982
22	249	31.287
23	227	24.458
24	205	19.114
25	185	14.903
26	166	11.585
27	147	8.9596
28	129	6.871
29	111	5.1938
30	94	3.8276
31	77	2.6906
32	61	1.7148

33	45	0.8417
34	29	0.018998

5.2.4 Análisis de la pantalla electrostática calibre 26

En la tabla 5.10 se muestran las tensiones para la primera capa de B.T. considerando la implementación de la pantalla electrostática calibre 26. Se puede observar una variación en el nivel de la tensión obtenida por los dos métodos utilizados al igual que sucedió en los demás casos para diferentes espesores. Una vez más siendo las tensiones obtenidas del modelo 2D son inferiores a las obtenidas con el circuito equivalente.

Tabla 5.10. Tensiones primera capa del devanado de B.T.

# de Vuelta	Circuito Equivalente	Modelo 2D
	Volts en B.T. (V)	Volts en B.T. (V)
1	29962	29962
2	12924	1141.6
3	5579	117.74
4	2412	44.772
5	1046	22.324
6	456	11.365
7	202	5.7935
8	91	2.9535
9	43	1.5054
10	21	0.76686
11	12	0.38971
12	6	0.19623
13	4	0.095236
14	2	0.039107
15	1	0.000907

La tensión obtenida con los diferentes métodos para la pantalla electrostática entre las capas de B.T. se muestra en la tabla 5.11.

Tabla 5.11. Tensiones en pantalla electrostática

# de Vuelta	Circuito Equivalente	Modelo 2D
	Volts en B.T. PE 26 (V)	Volts en B.T. PE 26 (V)
1	25051	14109
2	10950	6634.3
3	4856	3363.9
4	2215	1714.4
5	1063	874.02
6	554	445.59
7	323	227.17
8	212	115.81
9	153	59.03
10	118	30.07
11	93	15.281
12	72	7.6946
13	54	3.7344
14	37	1.5341
15	1	0.017944

Los resultados de las tensiones para la primera capa de A.T. son mostrados en la tabla 5.12 para ambos métodos.

Tabla 5.12. Tensiones en la primera capa del devanado de A.T.

# de Vuelta	Circuito Equivalente	Modelo 2D
	Volts HV (V)	Volts HV (V)
1	1359	7173.5
2	1218	4966.5
3	1098	3619.5
4	994	2717
5	905	2074.6
6	826	1600
7	756	1241.5
8	694	966.76
9	639	754.52
10	589	589.69
11	543	461.27
12	501	361.02
13	463	282.64
14	428	221.33
15	396	173.34
16	365	135.76
17	337	106.33
18	18	83.282
19	19	65.222
20	20	51.072
21	21	39.981
22	22	31.287
23	23	24.468
24	24	19.113
25	25	14.903
26	26	11.585
27	27	8.9595
28	28	6.8709
29	29	5.1937
30	30	3.8276

31	31	2.6906
32	32	1.7148
33	33	0.84169
34	34	0.018998

Comparando las tensiones obtenidas y que han sido presentadas en las tablas anteriores, se puede notar que para las capacitancias calculadas en base al modelo 2D la tensión entre las primeras vueltas del devanado tanto de B.T. como de A.T. son superiores que las obtenidas con el modelo de circuitos equivalentes. Para la pantalla electrostática, las tensiones obtenidas con el modelo 2D son inferiores que las obtenidas del circuito equivalente en todas las tensiones de entrevueltas del devanado de baja tensión. Para el devanado de alta tensión en sus capas restantes de la 2 a la 6, las tensiones son inferiores ya que aunque para la primera capa en las vueltas de inicio del devanado son en sus últimas capas, la tensión entre las vueltas del devanado disminuye su valor hasta un 50 %.

Capítulo 6

Conclusiones y Trabajo Futuro

La continuidad de energía eléctrica y su calidad son de suma importancia hoy en día, ya que el crecimiento de la demanda energética es cada vez más grande y más exigente. Todos los equipos y dispositivos relacionados con este proceso deben de ser fiables en todos sus componentes para asegurar su funcionamiento continuo. Uno de estos componentes son los transformadores de potencia utilizados para la transmisión y distribución de la energía, los cuales considerados de los principales equipos a proteger, ya que funcionan como el enlace entre la energía generada y la red eléctrica del sistema de potencia. Por esta razón, se debe asegurar su operación continua. Para lograrlo los diseñadores deben de considerar los fenómenos transitorios en su sistema de aislamiento, e.g., transitorios por conmutación, por la operación de interruptores durante eventos de energización y desenergización o por maniobras, así como por descargas atmosféricas o sobretensiones transitorias generadas durante la liberación de fallas.

El análisis de las sobretensiones en el transformador de potencia tiene como principal objetivo contribuir al mejoramiento de su sistema de aislamiento. En este trabajo, el análisis y la reducción de las sobretensiones transitorias dentro de los devanados del transformador ha sido el principal objetivo, ya que los transitorios electromagnéticos en la red de potencia inciden en las terminales del transformador y provocan un daño y fatiga de su aislamiento.

La implementación de una pantalla electrostática contribuye a atenuar las tensiones transferidas a lo largo de los devanados del transformador, pues tiene un efecto en la constante de distribución de tensión α que hace más cercana a cero. La DIT depende de la relación de las capacitancias en serie y a tierra, si se aumentan las capacitancias en serie entre las vueltas del devanado, se obtiene como resultando una distribución inicial de la tensión más uniforme y lineal, provocando que las oscilaciones de la sobretensión transitoria sea menor. El transformador analizado tiene los siguientes parámetros un devanado tipo capa, una potencia de 2500 kVA, un voltaje en B.T. 690 V con conexión delta y un voltaje en A.T. de 13200/7620 V con conexión estrella.

La instalación de la pantalla electrostática se realizó en el devanado de B.T. entre sus capas, también se realizó el estudio con diferentes espesores de lámina de cobre para la pantalla electrostática, i.e., 16, 18, 22 y 26. El cálculo de las capacitancias se llevó a cabo con dos métodos diferentes, circuitos equivalentes y por medio del análisis de elementos finitos con un modelo 2D. A partir de los resultados obtenidos se puede concluir que la DIT tiende a ser más uniforme y lineal cuando se implementa la pantalla electrostática, ya que en este caso la sobretensión transitoria es reducida y las tensiones transferidas dentro del devanado son disminuidas. El modelo de elementos finitos en 2D es el más cercano a la realidad, pues las consideraciones para su análisis incluyen cada aspecto de la geometría del diseño del transformador a diferencia de los circuitos equivalentes.

El trabajo futuro de investigación en el área de las sobretensiones transitorias en los transformadores de potencia es muy amplia. Sin embargo para complementar este trabajo se propone incluir la construcción y el desarrollo de un modelo en 3D con el análisis de elementos finitos. Para esto se deberán considerar los aspectos geométricos del transformador, así como los elementos que lo forman: aislamiento entre capas, vueltas, conductores, liquido aislante, barrera entre B.T. y A.T., núcleo y tanque. Con este modelo 3D sería posible estudiar la factibilidad de fabricarlo físicamente para realizar pruebas con el generador de impulsos y así poder medir las sobretensiones transitorias a lo largo de los devanados y compararlas con los resultados de simulación.

Referencias

- [1] G. Jose and R. Chacko, "A review on wind turbine transformers," Emerging Research Areas: Magnetics, Machines and Drives (AICERA/iCMMD), 2014 Annual International Conference on, Kottayam, 2014, pp. 1-7.
- [2] F. S. Cerón and C. Gaytan, "Distribution transformers for renewable energy," 2015 IEEE Thirty Fifth Central American and Panama Convention (CONCAPAN XXXV), Tegucigalpa, 2015, pp. 1-6.
- [3] Ayers D. E.; Dickinson M., "Wind Farm Transformer Design Considerations", in Power Engineering, pp.1-6, Nov. 2011.
- [4] Soloot, A.H.; Hoidalén H.K.; Gustavsen B., "Modeling of wind turbine transformers for the analysis of resonant overvoltages", in Electric Power Systems Research, Volume 115, Pages 26-34, Oct. 2014.
- [5] F. S. Cerón and C. Gaytan, "Distribution transformers for renewable energy," 2015 IEEE Thirty Fifth Central American and Panama Convention (CONCAPAN XXXV), Tegucigalpa, 2015, pp. 1-6.
- [6] James H. Harlow, "Electric Power Transformer Engineering", Third Edition, CRC Press, 2012.
- [7] A. Greenwood, "Electrical Transients in Power Systems", Second Edition, John Wiley & Sons, INC, 1970.
- [8] S.V. Kulkarni, S.A. Khaparde, "Transformer Engineering Design, Technology, and Diagnostics", Second Edition, CRC Press, 2013.
- [9] Charles Q. Su, "Electromagnetic Transients in Transformers and Rotating Machine Windings", IGI Global, 2013.
- [10] H. L. Thomas, "Insulation stresses in transformers, with special reference to surges and electrostatic shielding," in Electrical Engineers, Journal of the Institution of, vol. 87, no. 526, pp. 427-443, October 1940.
- [11] E. T. Inves, "The lightning strength of power transformers," in Electrical Engineers - Part II: Power Engineering, Journal of the Institution of, vol. 95, pp. 389-401, August 1948.

- [12] C. A. Banda and J. M. Van Coller, "Resonant overvoltages in wind turbine transformers," PowerTech, 2015 IEEE Eindhoven, Eindhoven, 2015, pp. 1-6.
- [13] A. Chennamadhavuni, K. Kumar Munji and R. Bhimasingu, "Investigation of transient and temporary overvoltages in a wind farm," Power System Technology (POWERCON), 2012 IEEE International Conference on, Auckland, 2012, pp. 1-6.
- [14] Amir Hayati Soloot, Hans Kristian Høidalen, Bjørn Gustavsen, "Influence of the winding design of wind turbine transformers for resonant overvoltage vulnerability", Dielectrics and Electrical Insulation IEEE Transactions, vol. 22, no. 2, pp. 1250-1257, 2015.
- [15] T. Zhang, L. X. Sun, Y. Zhang and P. Sun, "Simulation of switching overvoltage of step-up transformers in wind farms," Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD), 2013 IEEE International Conference on, Beijing, 2013, pp. 430-431.
- [16] O. Asuda and T. Funabashi, "Transient analysis on wind farm suffered from lightning," Universities Power Engineering Conference, 2004. UPEC 2004. 39th International, Bristol, UK, 2004, pp. 202-206 Vol. 1.
- [17] M. Florkowski, M. Kuniewski, J. Furgał and P. Pająk, "Investigation of overvoltages in distribution transformers," 2017 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), 2017, pp. 1-4 .
- [18] D. Smugala, W. Piasecki, M. Ostrogorska, M. Florkowski, M. Fulczyk and O. Granhaug, "Wind Turbine Transformers Protection Method Against High-Frequency Transients," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 30, pp. 853-860, April 2015.
- [19] E. M. Hope, T. A. Bellei and M. Reyes, "Wind turbine generator step-up transformer failure investigation," Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), 2012 IEEE PES, Orlando, FL, 2012, pp. 1-7.
- [20] M. Khanali and S. H. Jayaram, "Effectiveness of electrostatic shielding in suppressing the impact of fast transients on transformer insulation," Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 2015 IEEE Conference on, Ann Arbor, MI, 2015, pp. 652-65.

- [21] F. D. Freijedo, "Harmonic resonances in Wind Power Plants: Modeling, analysis and active mitigation methods," PowerTech, 2015 IEEE Eindhoven, Eindhoven, 2015, pp. 1-6.
- [22] M. Bagheri, M. Vakilian, A. Hekmati and R. Heidarzadeh, "Influence of Electrostatic Shielding of Disc Winding on Increasing the Series Capacitance in Transformer," Power Tech, 2007 IEEE Lausanne, Lausanne, 2007, pp. 1780-1784.
- [23] A. Portolan and I. W. Hofsjager, "The Analysis and Design of an Inter-Winding Shielding Structure of a High Frequency Transformer," Power Engineering Society Conference and Exposition in Africa, PowerAfrica '07. IEEE, Johannesburg, 2007, pp. 1-6.
- [24] B. Adamczyk, M. Florkowski and M. Swiatkowski, "Effect of shielding on surge overvoltages in multilayer type windings of power transformer," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 23, no. 3, pp. 1627-1635, June 2016.
- [25] R. M. Del Vecchio, B. Poulin and R. Ahuja, "Calculation and measurement of winding disk capacitances with wound-in-shields," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 13, no. 2, pp. 503-509, Apr 1998.
- [26] Babaei, Ebrahim & Ebadpour, Mohsen & Feyzi, M. Reza & Farhadi-Kangarlu, Mohammad. "Detailed Analysis and Comparison of Different Models of Distribution Transformers for Electromagnetic Transient Studies," International Review on Modelling and Simulations (IREMOS), 2012.
- [27] Karsai, K., Kerenyi, D. and Kiss, L, "Large Power Transformers," Elsevier, New York, 1987.
- [28] C. Das, "Transients in Electrical Systems: Analysis, Recognition, and Mitigation," McGraw-Hill Education, first edition, 2010.
- [29] Insulation co-ordination - Part 1: Definitions, principles and rules, IEC 60071-1:2019, International Electrotechnical Commission, 2019.
- [30] M. Bagheri, B. T. Phung and M. S. Naderi, "Impulse voltage distribution and frequency response of intershield windings," in IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 32, no. 5, pp. 32-40, September-October 2016.

- [31] M. Ghaffarian Niasar and W. Zhao, "Impulse voltage distribution on disk winding: calculation of disk series capacitance using analytical method," 2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICA.T.E), 2020, pp. 1-4.
- [32] M. Bagheri, A. Hekmati, R. Heidarzadeh and M. Salay Naderi, "Impulse voltage distribution in intershield disk winding VS interleaved and continuous disk winding in power transformer," 2008 IEEE 2nd International Power and Energy Conference, Johor Bahru, Malaysia, 2008, pp. 387-392.
- [33] A. S. Murthy, N. Azis, M.F. Mohd Yousof, J. Jasni, M.L. Othman, M.A. Talib and B.P. Das, "Investigation on the Resonant Oscillations in an 11 kV Distribution Transformer under Standard and Chopped Lightning Impulse Overvoltages with Different Shield Placement Configurations", in MDPI Energies Electrical Power an Energy System, vol. 12, pp 1466, March 2019.
- [34] P. Azimi and H. Golnabi, "Precise Formulation of Electrical Capacitance for a Cylindrical Capacitive Sensor", in Journal of Applied Sciences, vol. 9, pp 1556-1561. 2009.
- [35] Cylindrical capacitor, The university of Rhode Island, phys.uri.edu., [Online]. Available: <http://www.phys.uri.edu/gerhard/PHY204/tsl105.pdf>
- [36] L.S. Hasthanayake, "Distribution transformer model for transient studies" M.Sc. thesis, Electrical engineering, University of Moratuwa, Moratuwa, Sri Lanka, 2014.
- [37] Tomislav Župan, Bojan Trkulja, Željko Štih, "Power transformer winding model for lightning impulse testing," Procedia Engineering, Volume 202, 2017.
- [38] Qing Yang, Yong Chen, Wenxia Sima, Hongbin Zhao, "Measurement and analysis of transient overvoltage distribution in transformer windings based on reduced-scale model, Electric Power Systems Research," Volume 140, 2016.
- [39] C. A. Banda and J. M. Van Coller, "Resonant overvoltages in wind turbine transformers," 2015 IEEE Eindhoven PowerTech, 2015, pp. 1-6.
- [40] C. D. Tsirekis, G. J. Tsekouras, N. D. Hatziargyriou and B. C. Papadias, "Investigation of switching transient effects on power systems including wind farms," 2001 IEEE Porto Power Tech Proceedings (Cat. No.01EX502), 2001, pp. 6 pp. vol.4.

- [41] G. Bachir, H. Abdechafik and K. Mecheri, "Comparison electromagnetic shielding effectiveness between single layer and multilayer shields," 2016 51st International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2016, pp. 1-5.
- [42] T. Duerbaum, "Capacitance model for magnetic devices," Power Electronics Specialists Conference, 2000. PESC 00. 2000 IEEE 31st Annual, Galway, 2000, pp. 1651-1656, vol.3.
- [43] W. J. McNutt, T. J. Blalock and R. A. Hinton, "Response of Transformer Windings to System Transient Voltages," in IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-93, no. 2, pp. 457-467, March 1974.
- [44] Heidarzadeh, M. & Besmi, Mohammad. "Influence of the Parameters of Disk Winding on the Impulse Voltage Distribution in Power Transformers". Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering, vol 10, pp 143-151, 2014.
- [45] L. Dalessandro, F. da Silveira Cavalcante and J. W. Kolar, "Self-Capacitance of High-Voltage Transformers," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 22, no. 5, pp. 2081-2092, Sept. 2007.
- [46] H. Masdi, N. Mariun, A. Mohamed and N. I. A. Wahab, "Study of impulse voltage distribution in transformer windings," 2010 IEEE International Conference on Power and Energy, Kuala Lumpur, 2010, pp. 379-383.
- [47] Wijayapala, WDAS & Karunananda, H, "Mitigation of Lightning Surge Stresses in the High Voltage Windings of Distribution Transformers by Introducing an Electrostatic Shield," Engineer: Journal of the Institution of Engineers, Sri Lanka. XLVIII, 2015.
- [48] Wijayapala, WDAS & Lucas, Rohan & Hasthanayake, L, "A Methodology to Develop a Distribution Transformer Model for Transient Studies," Engineer: Journal of the Institution of Engineers, Sri Lanka. Vol. 49, 2016.
- [49] J. Smajic, et al., "Lightning Impulse Modeling and Simulation of Dry-type and Oil-immersed Power- and Distribution Transformers", Journal of Energy, vol.63, pp. 1-4.
- [50] M. Heidarzadeh and M.R. Besmi, "Influence of transformer layer winding parameters on the capacitive characteristic coefficient", in International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering (IJTPE), vol. 5, no. 2, pp. 22-28, June 2013.

- [51] Transformadores y Autotransformadores de Distribución y Potencia, Métodos de Prueba, NMX-J-169-2015-ANCE, Asociación Nacional de Normalización y Certificación, ANCE, México D.F. Nov. 2015.
- [52] C. Pereira Braz and A. Piantini, "Analysis of the dielectric behavior of distribution insulators under non-standard lightning impulse voltages," IEEE Latin America Trans., vol. 9, no. 5, pp. 732-739, Sept. 2011.
- [53] M. Aguado, B. Hermoso, J. Perez, "Evaluación del tipo de descargas en los aerogeneradores para su protección contra el rayo," IEEE Latin America Trans., vol. 3, pp 268-273, 2005.
- [54] F.C. Creed, M.M.C. Collins, "Shaping circuits for high impulses," National Research Council of Canada Radio and Electrical Engineering Division Ottawa, Canada, 1971.
- [55] Users' Manual ATPDRAW 7.0 for Windows, 5th ed., For Norwegian University of Technology Trondheim, Norway, Nov. 17th, 2019.
- [56] David V. Hutton, "Fundamentals of Finite Element Analysis," McGraw-Hill, 2004.
- [57] K.J. Bathe, "Finite Element Procedures," Prentice-Hall Englewood Cliffs, NJ, 1996.
- [58] P.P. Silvester R.L. Ferrari, "Finite Elements for electrical engineers," third edition, Cambridge University Press, 1996.
- [59] David k cheng , "Fundamentals of engineering electromagnetics," Pearson Education, 2014.
- [60] Maxwell User Manual ANSYS® 19, 2021.