



PONTIFICIA **UNIVERSIDAD CATÓLICA** DEL PERÚ

Esta obra ha sido publicada bajo la licencia Creative Commons
Reconocimiento-No comercial-Compartir bajo la misma licencia 2.5 Perú.

Para ver una copia de dicha licencia, visite
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/pe/>



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



Diseño de un Generador de Impulso de Alta Tensión basado en las normas ASTM-D3426 e IEC-60243-3 para ensayos de rigidez dieléctrica de materiales poliméricos sólidos.

TESIS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO ELECTRÓNICO

Presentado por:
Augusto Jesús Lora Rubiños

Lima – PERÚ
2008

RESUMEN

En el presente trabajo de tesis se desarrolla una propuesta de diseño de un equipo denominado Generador de Impulso de Alta Tensión para ensayos de Rigidez Dieléctrica en Materiales Poliméricos Sólidos que son de característica aislante, aplicando una forma de onda de voltaje establecida por normas o estándares internacionales, proporcionadas por instituciones como la American Society for Testing of Materials (ASTM) y la International Electrotechnical Commission (IEC). Las normas específicas a las que se hará referencia a lo largo de este documento serán: ASTM D-3426 e IEC 60243-3.

La propuesta de diseño que se mostrará, va acorde con la Teoría de E. Marx sobre las descargas eléctricas en alta tensión. Estos tipos de ensayos generalmente están caracterizados como destructivos, pues la muestra de prueba del material es sometido a ruptura dieléctrica mediante la aplicación de un alto nivel de voltaje de tipo transitorio.

Debido a que el mundo de los polímeros es muy amplio, se ha escogido como objeto del presente estudio al polímero de silicón porque presenta un alto grado de rigidez dieléctrica lo cual hace que tenga extendida aplicación en la parte de aislamiento de los transformadores de potencia y líneas de transmisión aérea de alta tensión.

Se describe en la presente tesis, el análisis y la simulación del circuito eléctrico que modela al Generador de Impulso, identificando sus más importantes características y los más relevantes criterios de diseño que se deben tener en cuenta al momento de dimensionar el generador. Para la simulación y modelamiento del circuito eléctrico se empleó el software académico llamado SPICE ICAP/4 de INTUSOFT.

También se describe la Fuente de Alimentación que usará el Generador de Impulso, con sus principales características, se incluye además, la descripción de una propuesta de seguridad o protección tanto para la Fuente como para el Generador, y se hace mención sobre aspectos de seguridad tanto para la persona que realice o supervise un ensayo de este tipo, como para el lugar o ambiente donde se lleve a cabo el mismo.

Es importante mencionar que al respecto, ninguna de las normas mencionadas en esta presente tesis hace referencia o mención alguna sobre aspectos de seguridad o protección para equipos, personas y lugar o ambiente donde se efectúe el ensayo o prueba.



FACULTAD
DE CIENCIAS
E INGENIERÍA



90
AÑOS

PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRÓNICO

Título : Diseño de un Generador de Impulso de Alta Tensión Basado en las Normas ASTM-D3426 e IEC-60243-3 para Ensayos de Rigidez Dieléctrica de Materiales Poliméricos Sólidos

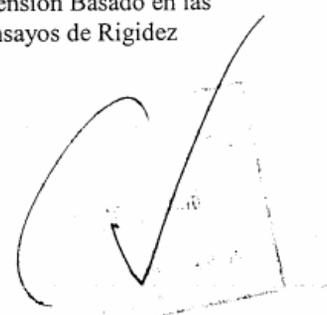
Área : Electricidad # 401

Asesor : Ing. Ricardo Tantas Oblitas

Alumno : Augusto Jesús Lora Rubiños

Código : 19989028

Fecha : 27 de Noviembre del 2006



Descripción y Objetivos

En la actualidad los materiales poliméricos poseen variadas aplicaciones en la industria y otros campos de actividad humana. Uno de sus más amplios usos se sitúa en la industria eléctrica debido a que estos materiales son usados como aislantes ya que no conducen la corriente eléctrica, y se emplean en la fabricación de cubiertas, cintas aislantes, carcasas, etc. de equipos eléctricos. Dichas fabricaciones deben ser hechas con un buen material, pues una fabricación hecha con un material de calidad deficiente no es garantía de que sea un buen aislante y la persona que usa equipos o cables eléctricos puede sufrir choques de electricidad, por lo que es importante realizar ensayos que nos indiquen el grado de confiabilidad de estos materiales como parte de pruebas de calidad del mismo.

El tema de estudio se centra en las pruebas de alta tensión a los que estos materiales son sometidos para comprobar o verificar unas de sus propiedades físicas como lo es la rigidez dieléctrica, y dentro de estas pruebas se encuentran las denominadas pruebas de esfuerzo dieléctrico o de comprobación; que es de lo que se ocupa el presente tema de estudio. La presente tesis tiene como objetivo presentar una propuesta de diseño de un equipo eléctrico denominado generador de impulso de alto voltaje, que es con lo que se realizan las pruebas de rigidez dieléctrica de los materiales poliméricos, basándose en los estándares establecidos por la American Society for Testing of Materials (ASTM) y la Internacional Electrotechnical Commission (IEC). El presente trabajo incluye además: conocer los diferentes materiales poliméricos de uso eléctrico e identificar su rigidez dieléctrica, diseño y simulación de circuitos eléctricos, identificar los tipos de electrodos adecuados, identificar los métodos de aplicación de las pruebas de acuerdo a los estándares establecidos.

NUMERO 100 PÁGINAS

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU
SECCION ELECTRICIDAD Y ELECTRONICA

Ing. ANDRÉS FLORES ESPINOZA
Coordinador de la Especialidad de Ingeniería Electrónica



FACULTAD
DE CIENCIAS
E INGENIERÍA



90
AÑOS

PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRÓNICO

Título : Diseño de un Generador de Impulso de Alta Tensión Basado en las Normas ASTM-D3426 e IEC-60243-3 para Ensayos de Rigidez Dieléctrica de Materiales Poliméricos Sólidos

Índice

Introducción

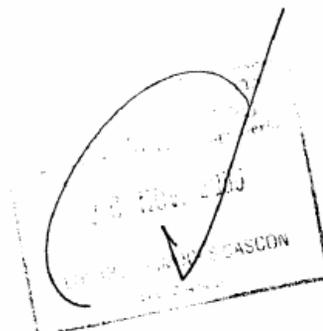
1. Descripción de la situación actual acerca de las pruebas de alto potencial.
2. Marco Teórico.
3. Diseño del Generador de Impulso.
4. Presupuesto.

Conclusiones

Recomendaciones

Bibliografía

Anexos



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU
SECCION ELECTRICIDAD Y ELECTRONICA

Ing. ANDRES FLORES ESPINOZA
Coordinador de la Especialidad de Ingeniería Electrónica



*A mis padres Aquiles y María, porque
les debo mi carrera profesional y lo que soy,
a ellos les dedico este humilde trabajo.
Simplemente, muchas gracias.*

Agradecimientos:

- A Dios, por darme la fortaleza y voluntad para siempre seguir adelante.
- Al Ingeniero Óscar Melgarejo, por su valiosa ayuda, opiniones y tiempo que me otorgó.
- A mi asesor, Ingeniero Ricardo Tantas, por sus importantes sugerencias, consejos y orientaciones que me brindó.
- A mis amigos y a todos los que me apoyaron de una u otra forma en todo este camino.

INDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1: DESCRIPCIÓN DE LA SITUACIÓN ACTUAL ACERCA DE LAS PRUEBAS DE ALTO POTENCIAL.....	2
1.1 Panorama Global.....	2
1.1.1 Normas Internacionales.....	2
1.1.2 Tendencias.....	2
1.1.3 Entorno Representativo.....	2
1.1.3.1 Política.....	2
1.1.3.2 Usuario.....	3
1.1.3.3 Cliente.....	3
1.1.3.4 Fabricante.....	3
1.1.3.5 Estadísticas.....	3
1.1.3.6 Ámbito Estructural.....	3
1.1.3.6.1 Infraestructura.....	3
1.1.3.6.2 Comportamiento.....	3
1.1.3.6.3 Recursos Humanos.....	4
1.1.3.6.4 Interés.....	4
1.1.4 Diagrama Representativo.....	5
1.2 Factores Influyentes en las Pruebas de Alto Potencial de tipo Rigidez Dieléctrica.....	6
1.2.1 Descripción.....	6
1.2.2 Diagrama de Flujo.....	7
1.2.3 Hechos y Razones.....	8
1.3 Declaración del Marco Problemático.....	8

CAPÍTULO 2:	MARCO TEÓRICO.....	10
2.1.	Estado del Arte.....	10
2.1.1	Presentación del asunto de estudio.....	10
2.1.2	Estado de la Investigación.....	10
2.1.3	Síntesis sobre el asunto de estudio.....	16
2.2.	Conceptos Formales.....	17
2.2.1.	Introducción.....	17
2.2.1.1	Materiales Poliméricos.....	18
2.2.1.1.1	Definición.....	18
2.2.1.1.2	Composición.....	18
2.2.1.1.3	Clasificación.....	18
2.2.1.1.4	Usos.....	19
2.2.1.1.5	Ejemplos.....	19
2.2.1.2	Rigidez Dieléctrica.....	20
2.2.1.2.1	Definición.....	20
2.2.1.2.2	Características.....	20
2.2.1.2.3	Tipos.....	21
2.2.1.3	Pruebas de Alto Potencial.....	21
2.2.1.3.1	Definición.....	21
2.2.1.3.2	Clasificación.....	21
2.2.1.3.3	Tipos.....	22
2.2.1.3.4	Características.....	22
2.2.1.3.5	Aplicaciones.....	22
2.2.1.4	Generadores de Impulsos.....	22
2.2.1.4.1	Definición.....	22
2.2.1.4.2	Tipos.....	23
2.2.1.4.3	Características.....	23
2.2.1.4.4	Usos.....	23
2.3.	Desarrollo Teórico.....	23
2.3.1	Descripción.....	23
2.3.2	Representación Gráfica.....	24

2.3.3	Forma de Onda establecida para el ensayo.....	25
2.3.4	Indicadores.....	27
2.3.4.1	Cualitativos.....	27
2.3.4.1.1	Opinión del Usuario.....	27
2.3.4.1.2	Producción del Fabricante.....	27
2.3.4.2	Cuantitativos.....	27
2.3.4.2.1	Descripción.....	27
2.3.4.2.2	Valor corregido del impulso de voltaje aplicado.....	28
2.3.4.2.3	Forma y Tamaño de los electrodos.....	28
2.3.4.2.4	Especímenes de Prueba.....	28
2.3.4.2.5	Seguridad.....	29
2.4	Fundamentación.....	29
2.4.1	Teórico académica.....	29
2.4.2	Realidad.....	29
2.4.3	Personal.....	30
2.5	Hipótesis.....	30
2.5.1	Hipótesis principal.....	30
2.5.2	Hipótesis secundarias.....	31
2.6	Objetivos.....	31
2.6.1	Objetivo general.....	31
2.6.2	Objetivos específicos.....	31
CAPÍTULO 3:	DISEÑO DEL GENERADOR DE IMPULSO.....	33
3.1	Diagrama de Bloques de la propuesta de diseño.....	33
3.1.1	Introducción.....	33
3.1.1.1	Selección del material a ensayarse: El polímero de silicón.....	33
3.1.1.2	Forma física para su ensayo y justificación.....	34
3.1.1.3	Rigidez dieléctrica del polímero de silicón.....	36
3.1.2	Diagrama.....	36

3.2	Descripción de la propuesta de diseño.....	37
3.2.1	Descripción de la Fuente de Alimentación.....	37
3.2.1.1	Elevador de Tensión.....	37
3.2.1.2	Rectificador.....	38
3.2.1.3	Filtrado.....	40
3.2.1.4	Circuito de Protección.....	42
3.2.1.5	Diagrama esquemático de la Fuente de Alimentación.....	45
3.2.2	Descripción del Generador de Impulso tipo Marx de cuatro etapas.....	46
3.2.2.1	Revisión de la posible solución y Justificación de la técnica escogida.....	46
3.2.2.1.1	El método de la Bobina de Tesla.....	46
3.2.2.1.2	El Generador de Impulso tipo Marx.....	47
3.2.2.2	Circuito RC.....	47
3.2.2.3	Electrodos: Esferas Espinterométricas.....	52
3.2.2.4	Protección: Línea de Tierra.....	56
3.3	Diagrama esquemático total de la propuesta.....	57
CAPÍTULO 4:	SIMULACIONES Y COSTOS.....	59
4.1	Simulaciones.....	59
4.1.1	Consideraciones.....	59
4.1.2	Simulación: Impulso de Tensión Positivo.....	62
4.1.3	Simulación: Impulso de Tensión Negativo.....	64
4.1.4	Simulación: Corriente de Descarga.....	65
4.1.5	Energía de Salida entregada por el Generador.....	66
4.2	Resumen y Consideraciones.....	67
4.2.1	Resumen de las características de la propuesta de diseño.....	67
4.2.2	Consideraciones prácticas de diseño.....	68
4.3	Costo de componentes para la Fuente de Alimentación.....	70
4.4	Costo de componentes para el Generador de Impulso.....	71

CONCLUSIONES.....72

RECOMENDACIONES.....73

FUENTES.....74



INTRODUCCIÓN

Los materiales poliméricos tienen diversas aplicaciones y usos, en la vida diaria, en la industria y en cualquier otro campo. De lo anterior, también uno de los más notables inventos del hombre continúa siendo los polietilenos, comúnmente llamados plásticos. Estos materiales poliméricos tienen su más extendida aplicación y empleo en la industria de los materiales en general, estos pueden ser: sólidos como por ejemplo las resinas, láminas, películas; o líquidos como por ejemplo los aceites industriales.

Una de sus más amplias gamas de uso de estos materiales, es el hecho de que sean empleados como aislantes eléctricos, ya que no conducen fácilmente la electricidad, lo cual es ideal por ejemplo en la fabricación de cubiertas o de cintas aislantes para los cables conductores en la industria del mismo, o también en la elaboración de depósitos, carcasas y accesorios de equipos que requieran ser aislados eléctricamente.

El tema de estudio se centra en las pruebas de rigidez dieléctrica, también llamadas pruebas de comprobación, ya que estos materiales son sometidos para comprobar o verificar una de sus propiedades físicas más importantes, como lo es la rigidez dieléctrica, pues la importancia de estos ensayos es que indican el grado de confiabilidad de estos materiales, como parte de las diversas pruebas de calidad a los que son sometidos.

CAPÍTULO 1: DESCRIPCIÓN DE LA SITUACIÓN ACTUAL ACERCA DE LAS PRUEBAS DE ALTO POTENCIAL.

1.1 Panorama Global.

El entorno global de la problemática en estudio, abarca lo concerniente a los estándares internacionales para las pruebas de alto potencial y hacia donde se orienta actualmente la investigación, las mejoras de los equipos y sus formas de aplicación.

1.1.1 Normas Internacionales.

Son establecidas y publicadas por instituciones acreditadas mundialmente, las cuales muestran metodologías y procedimientos de ensayo para todos los tipos de materiales, para este caso los materiales serán los polímeros de estado sólido para aplicaciones eléctricas. Durante el presente tema de estudio, las instituciones a la que se harán referencia a lo largo de esta tesis son la: American Society for Testing of Materials (A.S.T.M.) y la International Electrotechnical Commission (I.E.C.).

1.1.2 Tendencias.

Actualmente la tendencia de la investigación en las pruebas de alto potencial se enfoca en optimizar y buscar mejoras de los equipos que realizan estas pruebas, apuntando a obtener una mayor eficiencia y vida útil de los equipos.

1.1.3 Entorno Representativo.

El entorno representativo que circunscribe al proceso de realización de pruebas de alto potencial, son esencialmente características de los factores involucrados en este entorno, tales como: normas locales que se toman al respecto de las pruebas de alto potencial, usuarios, clientes, fabricantes y estadísticas de pruebas de alto potencial realizadas anteriormente.

1.1.3.1 Política.

El Estado Peruano al respecto promueve el cumplimiento de sus propias normas, establecidas en el Código Nacional de Electricidad, aunque sólo se indique parámetros a respetarse, mas no procedimientos a seguir.

1.1.3.2 Usuario.

El usuario característico es una persona especializada en el área de electricidad o electrónica, quien es el que finalmente maneja el equipo (generador de impulsos) y supervisa la realización de las pruebas de alto potencial.

1.1.3.3 Cliente.

Son los representantes de las industrias de materiales poliméricos sólidos, quienes pueden solicitar la realización de pruebas de alto potencial a sus productos como indicador de calidad antes de usar su producto en alguna aplicación o antes de comercializarlo.

1.1.3.4 Fabricante.

Es el que desarrolla y produce los equipos (generadores de impulsos) y demás accesorios necesarios para realizar las pruebas de alto potencial.

1.1.3.5 Estadísticas.

Se realizan con los datos tomados de los ensayos hechos, se hacen análisis estadísticos con la finalidad de hacer comparaciones de las pruebas llevadas a cabo en laboratorios y evaluar el grado de precisión o confiabilidad de las pruebas de alto potencial.

1.1.3.6 Ámbito Estructural.

Está referido a la organización y como se presentan los factores que lo conforman este ámbito, relacionados con el proceso de pruebas de alto voltaje en materiales poliméricos sólidos, entre los cuales tenemos por ejemplo: tipo de infraestructuras, recursos humanos e interés por el proceso en sí.

1.1.3.6.1 Infraestructura.

El tipo de infraestructura son laboratorios adecuados para el desarrollo de las pruebas de alto potencial.

1.1.3.6.2 Comportamiento.

Es la debida atención y solicitud necesaria para la realización de pruebas de alto potencial en materiales poliméricos sólidos que son usados como elementos aisladores.

1.1.3.6.3 Recursos Humanos.

Deben contar con la debida capacitación y entrenamiento para poder manejar adecuadamente los equipos y llevar a cabo los ensayos.

1.1.3.6.4 Interés.

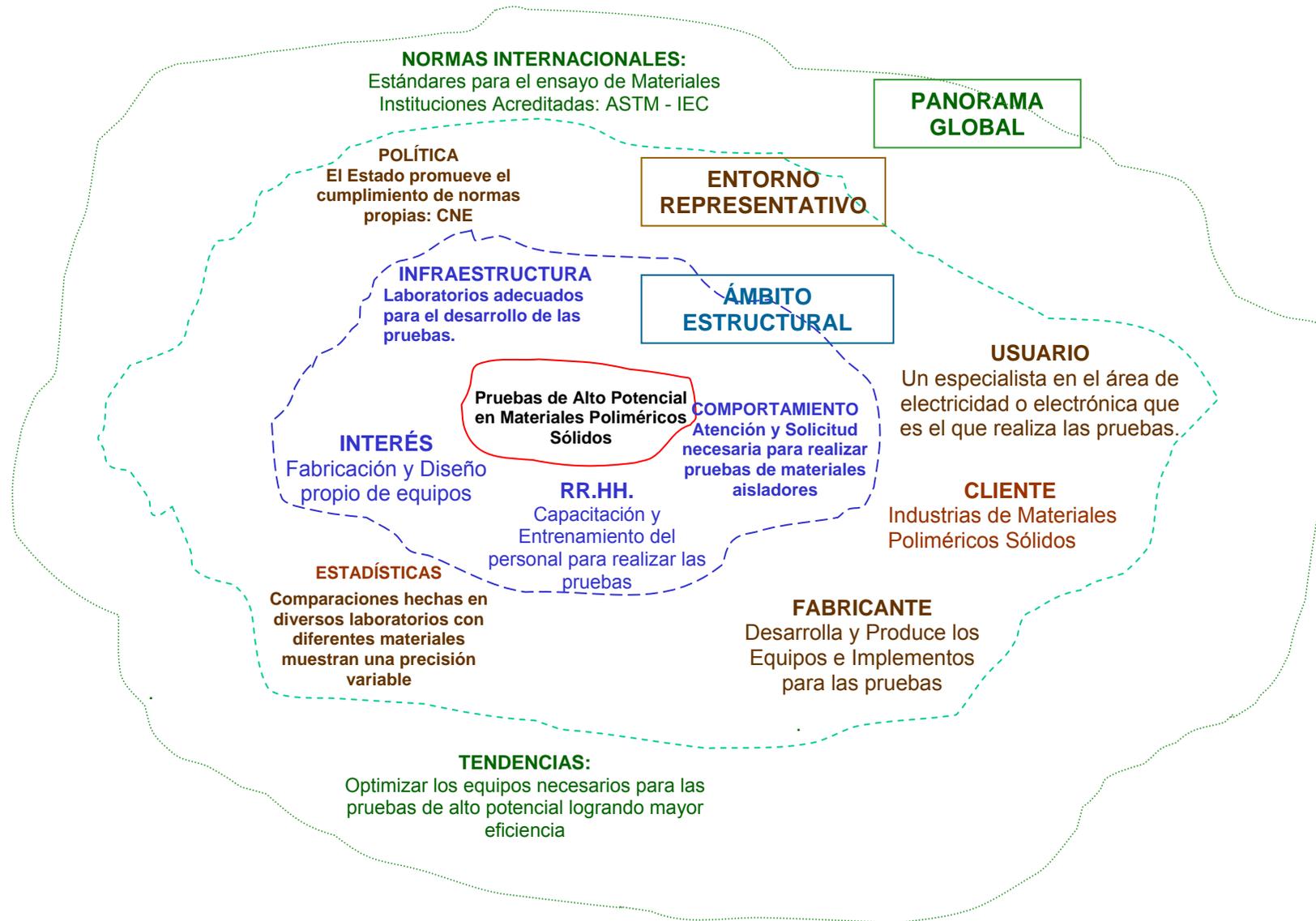
Es visto como la motivación por el diseño, desarrollo y fabricación de equipos en nuestro país.

Todos los ítems explicados anteriormente, forman parte de la descripción actual en que se encuentra el contexto de las pruebas o ensayos de alta tensión; reuniendo todos estos ítems, conforman una representación general de las variables externas presentes en el marco problemático del presente tema de estudio.

Para apreciar mejor esto último, se han agrupado los ítems anteriores en forma de conjuntos inclusivos. A continuación, en el ítem 1.1.4 se muestra un diagrama de tipo Ven – Euler, que representa en forma general la relación entre las variables externas existentes.

1.1.4

Diagrama Representativo.



1.2 Factores Influyentes en las Pruebas de Alto Potencial de tipo Rigidez Dieléctrica.

1.2.1 Descripción.

Los factores influyentes son vistos como variables internas que están involucradas en lo que comprende la realización de pruebas de alto voltaje, para este caso, serán las de tipo rigidez dieléctrica. Seguidamente se describen las principales variables internas:

- ¿Se fabrica en Perú, un producto con alguna clase de polímero?
- ¿Este producto será de uso o aplicación eléctrica?
- Si el producto es de aplicación eléctrica, ¿Requiere algún ensayo previo a su venta?
- Si requiere de un ensayo previo, ¿De qué tipo es y que norma o estándar se usará?
- ¿Con que equipos se realiza dicho ensayo, qué clase de equipos son, dónde se efectúa el ensayo, y qué características tiene el ensayo?
- ¿El equipo cumple con alguna norma que se usa para dicho ensayo?
- ¿Qué especificaciones tiene el equipo?
- ¿Cómo debe realizarse la prueba o ensayo?
- ¿Existen consideraciones especiales a tomar en cuenta para hacer las pruebas?
- ¿Cómo verificar si la prueba o ensayo hecho es válido?

Los puntos mencionados anteriormente (variables internas), siguen una secuencia o lógica de pasos, similar a un algoritmo. Estos puntos o ítems se presentan dentro de todo lo que concierne a la realización de pruebas de alto voltaje, y en particular las de tipo rigidez dieléctrica para materiales poliméricos.

Para apreciar mejor esta secuencia de pasos en la que aparecen los ítems o variables internas dentro de este proceso, se ha elaborado un diagrama de flujo u ordinograma, tal como se muestra en el ítem 1.2.2.

1.2.2 Diagrama de Flujo.

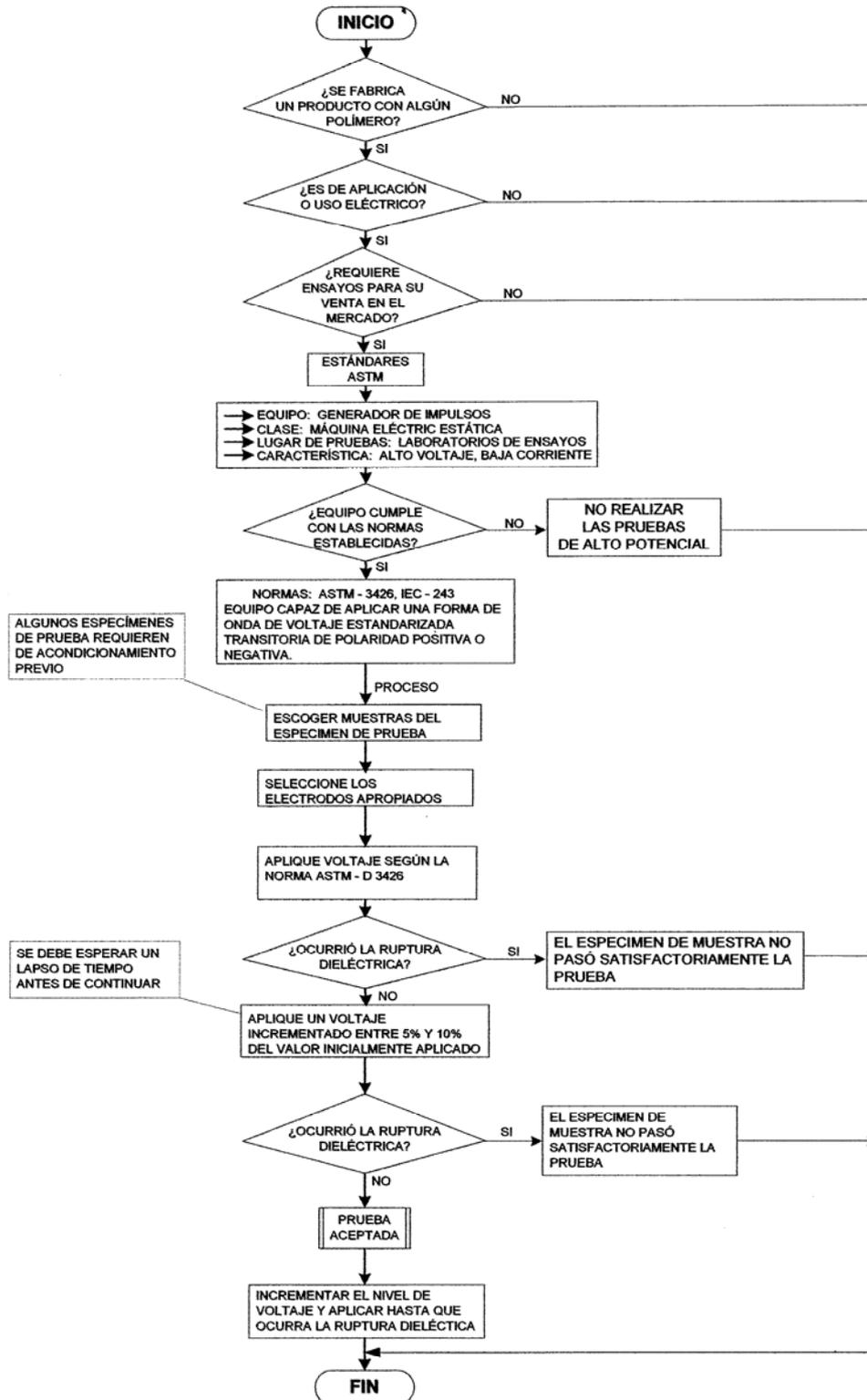


Figura 1.1 Diagrama de Flujo de los factores influyentes.

1.2.3 Hechos y Razones.

Los hechos son vistos como consideraciones particulares que aparecen dentro del diagrama de flujo de la secuencia de pasos o lógica de las variables internas que siguen el proceso anteriormente mostrado. Las razones son vistas como justificaciones o sustentos de estos hechos que aparecen; tal como se muestra a continuación en la tabla 1.1.

Tabla 1.1 Hechos y Razones que aparecen en el Diagrama de Flujo del proceso.

Hechos	Razones
1) PRE - ENSAYO: Algunos especímenes de prueba requieren acondicionamiento previo.	Se debe preparar los especímenes de prueba (en caso de ser necesario) usando procedimientos según lo mencionado en la norma específica para dicho material, los materiales se deben probar a condiciones de temperatura y humedad indicadas en la normas ASTM: D-149 – IEC: 60243-1 [1] [10].
2) POST – ENSAYO: Se debe esperar un lapso de tiempo antes de continuar.	Tal como lo indica las normas ASTM: D-3426 – IEC 60243-3 [2] [11]; el tiempo mínimo entre aplicaciones sucesivas de voltaje es dependiente de la constante de tiempo de carga del generador y debe ser tres veces dicha constante de tiempo.

1.3 Declaración del Marco Problemático.

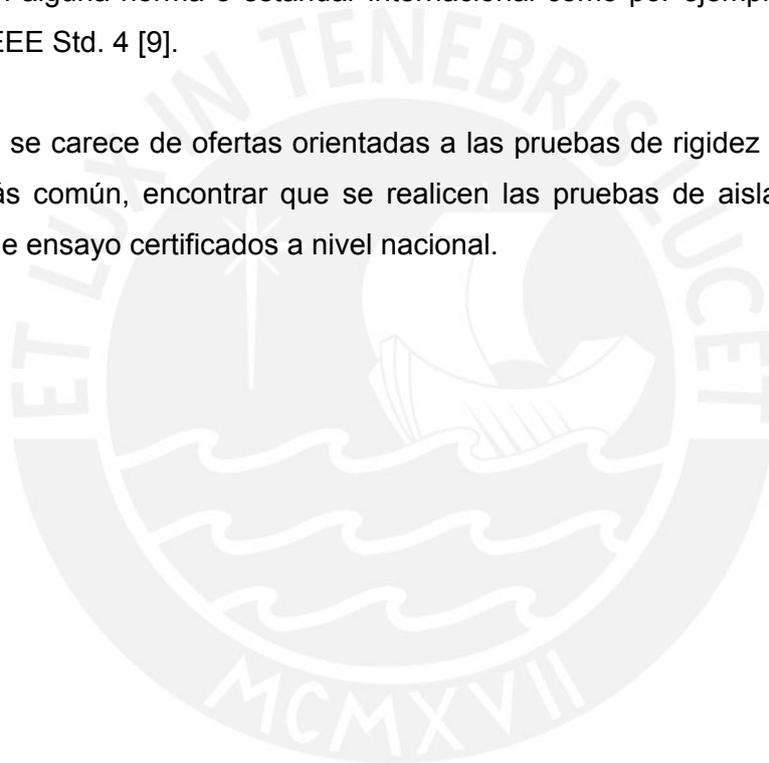
Las Pruebas de Alto Potencial constituyen parte de los estándares de calidad a los que son sometidos diferentes tipos de materiales poliméricos y equipos eléctricos antes de su puesta en operación o su venta en el mercado.

Actualmente existen instituciones acreditadas internacionalmente, por ejemplo: La American Society for Testing of Materials (ASTM) que se ocupa de fijar y publicar normas y procedimientos referidos al ensayo de diversos materiales.

Dentro de las pruebas de alto potencial tenemos dos grandes clasificaciones: las pruebas de aislamiento en la que su finalidad es medir un valor de resistencia o impedancia; y las pruebas de rigidez dieléctrica que tienen como objetivo medir o comprobar la fuerza dieléctrica máxima [2] [11] que puede soportar un determinado material aislante antes de que ocurra el fenómeno de disrupción eléctrica.

En nuestro país también se realizan este tipo de pruebas siguiendo procedimientos basándose en alguna norma o estándar internacional como por ejemplo: la ASTM D-149 [1] o la IEEE Std. 4 [9].

Sin embargo, se carece de ofertas orientadas a las pruebas de rigidez dieléctrica, por lo que es más común, encontrar que se realicen las pruebas de aislamiento en los laboratorios de ensayo certificados a nivel nacional.



CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO.

2.1 Estado del Arte.

2.1.1 Presentación del Asunto de Estudio.

El presente documento trata acerca de los equipos actuales que se usan para comprobar dichos materiales y verificar si son confiables en cuanto a ser capaces de soportar altas descargas eléctricas por breves lapsos de tiempo, así como también, mostrar otras técnicas relacionadas con estos tipos de pruebas o ensayos que demandan alto voltaje, asimismo indicando algunas ventajas y desventajas en el tipo de técnica a emplear.

Los ensayos de rigidez dieléctrica que se hacen a estos materiales, forman parte de las pruebas o ensayos de calidad que se encuentran difundidos y aceptados internacionalmente, y están sujetos a normas o estándares establecidos y publicados por las instituciones correspondientes, tales como la ASTM e IEC.

2.1.2 Estado de la Investigación.

Según JONES, David ; JOWERR, Jeffrey ; THOMSON, S. Graeme y DANNER, David [14] en su **Guía para Pruebas de Diagnóstico de Aislamiento**, afirman que las pruebas de aislamiento se estimulan eléctricamente y se deben medir la respuesta, también indican que dependiendo del tipo de prueba unas requieren equipos portátiles y otras requieren equipos fijos. Ellos indican que existen 5 tipos de pruebas que emplean CC y que cada prueba da información diferente sobre las condiciones del aislamiento, el panorama completo se da sólo cuando se ha completado todas las pruebas, entre estas tenemos:

a).- Pruebas Puntuales de Tendencia.- Son las más simples de las pruebas de aislamiento y la más asociada con los probadores de aislamiento de bajo voltaje, el voltaje de prueba se aplica durante un lapso corto de tiempo (casi 1 minuto) y se toma una lectura que se puede comparar con las condiciones mínimas de instalación.

b).- Constante de Tiempo.- Es la más sencilla y básica de todas que consiste en tomar lecturas sucesivas a tiempos especificados, se basa en magnitudes relativas de corrientes de fuga y de absorción en aislamientos limpios y secos, versus aislamientos

sucios y húmedos. Este tipo de prueba es relativamente independiente de la temperatura y puede dar información final sin tener registro de pruebas anteriores.

c).- Índice de Polarización (IP).- Esta prueba bastante popular, requiere de la toma de dos lecturas seguidas por una división simple, la lectura de un minuto se divide por la lectura de diez minutos, en la que se obtiene un número o coeficiente llamado IP (independiente de la temperatura), y establecen rangos para este número:

Si $IP < 1$ → aislamiento pobre.

Si $1 < IP < 2$ → aislamiento cuestionable.

Si $2 < IP < 4$ → aislamiento aceptable.

Si $IP > 4$ → aislamiento bueno.

Además señalan que este tipo de prueba no es apropiada para transformadores que usan aceites para su refrigeración.

d).- Voltaje de Paso.- Se puede usar como una prueba de bajo voltaje o de sobrevoltaje, el procedimiento usual es incrementar el voltaje en cinco pasos iguales en lapsos de un minuto y registrar el aislamiento al final de cada nivel. Al igual que la prueba anterior, esta es una prueba repetible, auto-evaluable y que por su corta duración, está libre de influencias extrañas como el efecto de la temperatura, y en la que se puede usar 2500 V CC o más.

e).- Descarga Dieléctrica.- Un método actual que fue desarrollado por “Electricité de France”, en esta prueba señalan que a diferencia de las pruebas anteriores en las que miden las corrientes que fluyen en el proceso de carga, esta prueba en cambio mide la corriente que circula durante la descarga, señalan que estrictamente no es una prueba de aislamiento, sino un complemento a las pruebas rutinarias. Al igual que el caso de la prueba de Índice de Polarización definen un coeficiente llamado DD y exponen los siguientes resultados:

Si $DD > 7$ → aislamiento malo.

Si $4 < DD < 7$ → aislamiento pobre.

Si $2 < DD < 4$ → aislamiento cuestionable.

Si $DD < 2$ → aislamiento bueno.

Dichos autores describen además que no existe una definición única para las pruebas de potencial elevado, más bien la señalan como una prueba de fatiga eléctrica conducida a un voltaje dos o más veces el voltaje nominal y a veces la llaman pruebas

de resistencia o pruebas de comprobación., y como tal, puede contribuir al envejecimiento del aislamiento del material en prueba, como es el caso en la que ciertas normas requieren que se eleve el voltaje hasta que la muestra se destruya, los autores recomiendan aplicar una prueba de Índice de Polarización (IP) de bajo voltaje (que va de 500 a 1000 V CC) para pre-calificar el aislamiento antes de aplicar alto voltaje (a partir de 5 KV CC). Los autores también exponen el hecho que estas pruebas se pueden realizar con CC o CA según sea lo necesario y que en varios casos es mejor usar pruebas de CC como sustituto equivalente a las pruebas de CA.

Para **LEÓN Ojeda, Jaime** [13], en su documento: **Ensayos HiPot. : Tensión Alterna vs. Tensión Continua**; estos ensayos se usan en equipos eléctricos con el fin de evaluar su condición de aislamiento y que estas pruebas son de carácter destructivo, indicando que el equipo será bueno si no sufre ruptura durante la prueba, además propone usar voltaje continuo o alterno en las que en cada caso describe sus pro y contra; señalando además que esta prueba debe durar regulares periodos de tiempo (hasta 90 minutos según sea el equipo como lo plantea el autor). Seguidamente el autor hace un listado de ventajas y desventajas de usar en la prueba CC o CA, como se muestra:

a).- Ventajas de la prueba HiPot-CA

- Representa de manera más confiable los esfuerzos eléctricos.
- No produce cargas parciales: Pueden ocasionar ruptura de aislamiento una vez que el material entra en funcionamiento.
- La fuente de alimentación de este tipo de prueba puede usarse en otras aplicaciones como la medición del factor de disipación y detección de descargas parciales.

b).- Desventajas de la prueba HiPot-CA

- El equipo de prueba es voluminoso y costoso, y esto hace que este tipo de prueba no sea frecuentemente usada.
- Proporciona muy poca información adicional que permita hacer un diagnóstico más extensivo.

c).- Ventajas de la prueba HiPot-CC

→ El equipo de prueba es de tamaño reducido y de bajo costo, y esto hace que este tipo de prueba sea bastante usada.

→ Proporciona mayor información de la condición de aislamiento y se puede además determinar el índice de polarización.

e).- Desventajas de la prueba HiPot-CC

→ No representa de manera confiable los esfuerzos eléctricos del equipo.

→ Este ensayo fue discontinuado desde 1996 porque en un ensayo hecho a los cables aislados de tipo XLPE, generó cargas espaciales en este tipo de dieléctrico, lo que ocasionó que falle cuando entró en funcionamiento.

→ En el caso de grandes generadores que usan agua como refrigerante, el usar tensión continua provoca un camino a tierra de baja impedancia y esto puede sobrecargar la fuente de alimentación para esta prueba HiPot. CC. El autor señala también que actualmente se han desarrollado técnicas HiPot. con aplicación de tensiones a muy baja frecuencia (0.1 Hz) que pretender combinar las ventajas de las pruebas HiPot. CC y CA con el fin de suprimir las desventajas de ambas.

Según las normas: **ASTM D-3426: Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage and Dielectric Strength of Solid Electrical Insulating Materials Using Impulse Waves** [2], y la **IEC 60243-3 Rigidez dieléctrica de los materiales de ensayo Parte 3: Requisitos complementarios para los ensayos de impulsos de 1.2/50 μ s** [11], especifican que para el tipo de ensayos de rigidez dieléctrica en materiales sólidos, se debe usar generadores de impulsos (de voltaje); la prueba debe reunir una condición de impulso de simulación-relámpago (lightning); en la que debe usarse el estándar actual de 1.2 por 50 μ s – impulsos de onda completa, enfatizan que éste método de prueba no debe usarse en las pruebas de impulsos de equipos (aparatos) eléctricos. En su terminología señalan que la clase de impulso a aplicar es el de tipo transitorio no periódico, en el cual se eleva rápidamente a un valor máximo y luego desciende menos rápidamente a cero, comentando que es posible que en la forma de onda del impulso a aplicar puedan presentarse oscilaciones de alta frecuencia o sobreimpulsos de magnitud limitada. Si estas oscilaciones tienen una magnitud de no más del 5% del valor máximo y con una frecuencia por debajo de 0.5

MHz, entonces se puede emplear el método de prueba y graficar la forma de onda del impulso; si no se cumple tales condiciones entonces la onda de impulso de voltaje no es aceptable para este tipo de prueba. En la explicación del método de prueba, muestra que la capacidad de los materiales aislantes de soportar voltajes transitorios son importantes en establecer la confiabilidad de los aparatos (equipos) aislados con estos materiales, estos voltajes transitorios pueden ser de polaridad positiva o negativa y recomiendan usar electrodos diferentes y asimétricos empleando ambas polaridades, todo esto con el fin de empezar haciendo pruebas comparativas y especialmente en personas que no tienen experiencia previa en estos ensayos. Respecto al equipo a usar (Generador de Impulsos), éste debe tener la prestación de poder aplicar al espécimen de prueba, voltajes de ambas polaridades y que el voltaje máximo con la capacidad de almacenamiento de energía debe ser lo suficientes para proporcionar las ondas de impulso de forma adecuada al espécimen que se probará, hasta que ocurra la disrupción eléctrica del material, además los parámetros eléctricos del material como p.e. la capacitancia pueden influir significativamente en la magnitud y forma de onda aplicada sobretodo si el generador que se usa tiene bajo almacenamiento de energía, por lo que señalan que debe tomarse provisiones para supervisar y ajustar la forma de onda del voltaje. Además, a no ser que se indique lo contrario, el medio circundante en el cual se desarrolla la prueba, es el aire; y si es otro medio, pues uno debe remitirse a la norma correspondiente para este tipo de prueba con dicho medio circundante. En su procedimiento de prueba se indica que la aplicación del voltaje debe ser de una polaridad fijada y que el voltaje máximo inicial debe ser cerca del 70% del voltaje de disrupción previsto, además las ondas aplicadas deben darse en juegos (sets) de tres, y en cada una sucesiva debe incrementarse nivel de voltaje hasta que ocurra la ruptura dieléctrica, estas normas [2] [11] recomiendan 5 a 10% más del voltaje pico del nivel inicial; establecen también que el lapso de tiempo mínimo entre aplicaciones sucesivas debe ser de al menos 3 veces la constante de tiempo de carga del generador; seguidamente indican que una prueba es válida si después de aplicar al menos 2 niveles no ha ocurrido la ruptura dieléctrica sino hasta que ocurra en un tercero o posterior con un nivel más alto de voltaje.

KLAUS SCHWENK, Michael Gamlin [12], en su trabajo: **Load range extension methods for lightning impulse testing with high voltage impulse generators.**, no dice que hay limitaciones de parámetros de circuitos de prueba para las descargas (impulsos) del tipo rayo (lightning), dichos circuitos son establecidos por la misma IEC para estas aplicaciones, por lo que investiga las mejoras que se pueden hacer a

dichos circuitos de prueba, a lo que él llama *redes de compensación RLC*, analizando ejemplos, ventajas y desventajas de dichos tipos de compensación (compensación serie y compensación paralelo), explica además que dándole una nueva revisión al estándar propuesto por la IEC se puede introducir un nuevo método de evaluación y corrección del factor “k” que es un factor que corrige el valor final de voltaje de la descarga, nos dice además que las posibles limitaciones de los circuitos de prueba se deben posiblemente a los transformadores de potencia debido a su bobinado o que existan internamente resonancias. Concluye asimismo que una compensación en serie resulta mejor que una en paralelo y lo muestra en términos de eficiencia porcentual.

Para **HAEFELY** [8], los generadores de impulsos se utilizan para realizar pruebas de voltajes de impulsos en equipos eléctricos de alto voltaje, las pruebas se realizan por métodos diferentes, tales como: impulsos de descarga tipo rayo, tipo descargas parciales y tipo impulsos de conmutación.

Además señalan que sus equipos (generadores de impulsos) cuentan con sistemas de seguridad que aseguran la protección del personal y de la prueba. Para HAEFELY, los sistemas actuales que involucran pruebas de impulso son generalmente sistemas ya existentes que han sido modificados para requisitos o prestaciones particulares. Seguidamente se expone sus principales generadores que lo clasifican en:

i.- Generadores de Impulso de Voltaje

a).- *Generador Ligero*: La energía de la etapa de salida es de 5 KJ y la tensión de carga máxima es 800 KV.

b).- *Generador Medio*: La energía de la etapa de salida es de 5 o 10 KJ y la tensión de carga máxima es de 3 MV

c).- *Generador Grande*: La energía de la etapa de salida es de hasta 30 KJ y la tensión de carga máxima es de hasta 10 MV.

ii.- Generadores de Impulso de Corriente

a).- *Generador Universal (200KV, 180 KJ)*: Usa el impulso de tipo exponencial IEC de estándar 1/20, 4/10, 8/20 μ s y actualmente incorpora el de tipo LCI 10/350 μ s con una amplitud de hasta 200 KA. Este equipo es usado en pruebas de control de calidad en dispositivos de protección en el Instituto de Metrología en China.

b).- *Alto Sistema Universal (100 KV, 150 KJ)*: Al igual que el caso anterior usa el estándar IEC (1/20, 4/10, 8/20 μ s) pero ahora incorpora impulsos rectangulares de corriente (RCI) y en su funcionamiento es capaz de entregar amplitudes de corriente de hasta 100 KA.

Este último es usado para ensayar pararrayos siguiendo las normas IEC, ANSI, IEEE, este equipo está instalado en Bangalore (India).

2.1.3 Síntesis sobre el asunto de estudio.

- ▶ Las pruebas de aislamiento y de rigidez dieléctrica no son estrictamente lo mismo, varían en cuanto al nivel de energía que demanden, siendo esta última la que requiere mayor nivel de energía.
- ▶ El tipo de tensión con que se apliquen estas pruebas puede ser CC como CA, y dependiendo de las ventajas, desventajas, el equipo eléctrico y material a probarse se escoge la que más convenga.
- ▶ Existen diversas normas y estándares que especifican condiciones o prácticas que deben seguirse para seguir los diversos ensayos, pero existen más para lo que es pruebas y ensayos de equipos eléctricos, por ejemplo la ASTM y la IEC son unas de las contadas instituciones que se ocupan de publicar estándares para las pruebas de rigidez dieléctrica de materiales específicos.
- ▶ Existen diversas técnicas y clasificaciones para las pruebas de impulso; entre las más importantes resaltan: de corriente y de voltaje; y dependiendo de la forma de onda del tipo de impulso o descarga tenemos: impulso tipo rayo (forma exponencial), tipo descargas parciales, tipo conmutación de impulsos, tipo impulsos rectangulares (de corriente).
- ▶ Actualmente la investigación se orienta a mejorar los circuitos de prueba con los que trabajan los generadores de impulsos, que buscan de cierta manera mejorar la calidad de la prueba a la que se somete una muestra de material; se trata de redes eléctricas pasivas (componentes RLC) que buscan compensar ciertos inconvenientes que puedan presentarse durante el ensayo en cuestión; de allí que reciben el nombre de compensadores.

2.2 Conceptos Formales.

2.2.1 Introducción.

Los materiales poliméricos en la actualidad están ampliamente difundidos y siendo usados en diversas aplicaciones y usos tanto industriales como domésticos, estos materiales son muy importantes pues conforman una gran parte de lo que trata la llamada industria e ingeniería de los materiales, debido a sus diversas propiedades, características y usos.

Estos materiales pueden ser tanto sólidos como líquidos, ambos tienen igualmente extensas aplicaciones en la industria, particularmente en el área energía son usados como aislantes eléctricos, pues no conducen fácilmente la corriente eléctrica; ya que estos materiales aislantes deben ser confiables en su uso, es por ello que se someten a pruebas o ensayos para determinar su confiabilidad, basándose en normas y estándares aceptados a nivel mundial.

Una característica importante de estos tipos de materiales es lo que se conoce como la rigidez dieléctrica, que es el valor límite máximo de intensidad de campo eléctrico en la cual el material pierde su propiedad aisladora y pasa a ser un conductor. Por ejemplo los aisladores, deben poseer una gran rigidez dieléctrica que determina su grado de confiabilidad y además deben ser capaces de soportar condiciones críticas o extremas de voltaje por breves instantes de tiempo.

Las pruebas de alto potencial o de alto voltaje se dan mediante el uso de los llamados generadores de impulsos, que son equipos capaces de proveer una forma de onda de impulso de voltaje o corriente según sea lo establecido por una norma o estándar como la ASTM D-3426 [2] o la IEC 60243-3 [11] bajo condiciones de nivel o magnitud y de tiempo de duración de la misma. El objetivo general es el de presentar una propuesta de diseño, basándose en las normas anteriormente mencionadas, de un generador de impulso de voltaje que permita realizar este tipo de prueba a la que son sometidos estos materiales poliméricos usados como aislantes.

2.2.1.1 Materiales Poliméricos. [16]

2.2.1.1.1 Definición.

Son materiales compuestos químicamente de polímeros, que son grandes moléculas (por lo general orgánicas) formadas por la unión de moléculas más pequeñas llamadas monómeros, la naturaleza química de estos últimos así como sus propiedades físicas y estructuras moleculares, determinan las diferentes características de cada polímero.

2.2.1.1.2 Composición.

Puesto que los polímeros en su mayoría son orgánicos aún cuando pueda constituirse de varios elementos, están compuestos químicamente en su mayoría de:

- Carbono (C)
- Hidrógeno (H)
- Oxígeno (O)
- Nitrógeno (N)

2.2.1.1.3 Clasificación.

Se pueden clasificar de acuerdo al proceso de obtención del polímero; o de acuerdo a la estructura del polímero.

► Por su proceso de obtención:

- Naturales.- Existen en la naturaleza muchos polímeros y las biomoléculas que forman los seres vivos son macromoléculas de polímeros; como ejemplo podemos mencionar: las proteínas, la celulosa, el hule o caucho natural, la quitina, la lignina, etc.
- Semisintéticos.- Se obtienen por transformación de polímeros naturales, por ejemplo: la nitrocelulosa, el caucho vulcanizado, etc.
- Sintéticos.- Muchos polímeros se obtienen a partir de los monómeros, por ejemplo: el nylon, el poliestireno, el policloruro de vinilo (PVC), el polietileno, etc.

► Por su estructura o propiedades químicas:

■ Plásticos.- Normalmente se incluyen dentro del término genérico de “plásticos” los termoplásticos, que son polímeros que tienen la capacidad de ser “fundidos” y por encima de cierta temperatura pueden fluir y regresar a su estado sólido al disminuir su temperatura.

■ Termoestables.- Son polímeros que no pueden ser fundidos y si son calentados hasta cierta temperatura, comienzan un proceso químico de degradación.

■ Elastómeros.- Son polímeros que tienen la característica de ser resistentes y además elásticos.

■ Fibras, recubrimientos, adhesivos

2.2.1.1.4 Usos.

Principalmente difundidos en la industria de diversos rubros, entre los principales destacan:

- | | |
|----------------------------|------------------------|
| √ Envases. | √ Fibras. |
| √ Recubrimientos (forros). | √ Adhesivos. |
| √ Aislantes. | √ Carcasas (chasises). |

2.2.1.1.5 Ejemplos.

Podemos destacar los siguientes polímeros:

- | | | |
|--------------------------|-----------------|-------------------|
| • Acetato de Polivinilo. | • Metacrilato. | • Polipropileno. |
| • Ciclodextrina. | • Nylon. | • Poliuterano. |
| • Estireno. | • Plexiglás. | • Poliéster. |
| • Hule. | • Plástico. | • Resina Epóxica. |
| • Kevlar. | • Poliamida. | • Teflón. |
| • Lignina. | • Poliestireno. | |
| | • Polietileno. | |

2.2.1.2 Rigidez Dieléctrica. [3]

2.2.1.2.1 Definición.

A diferencia de los materiales ferromagnéticos que pueden ser sometidos a elevados valores de inducción sin que se alteren sus características estructurales, en un aislante inmerso en un campo eléctrico, este puede ser soportado hasta un cierto límite, más allá del cual se verifica el fenómeno de descarga, con pérdida permanente o temporal (descargas parciales) de las cualidades del aislante.

La descarga puede ser autorregenerativa (aislamientos en aire o aceite) o no autorregenerativa, cuando se produce un daño irreversible del aislante.

Se denomina rigidez dieléctrica de un determinado material, al gradiente de campo eléctrico máximo que puede soportar. Su valor se puede determinar experimentalmente mediante los procedimientos e indicaciones establecidos por normas.

2.2.1.2.2 Características.

- Cada material tiene su propia rigidez dieléctrica, pero su valor depende de las dimensiones de los electrodos de ensayo, de las condiciones ambientales en las cuales se realiza la prueba, y la duración en tiempo de la tensión aplicada.
- Para los materiales estratificados, a igualdad de espesor, la rigidez aumenta con el número de estratos o capas que conforman el aislamiento propiamente dicho.
- La rigidez dieléctrica no es proporcional al espesor del material.
- La humedad reduce fuertemente el valor de rigidez dieléctrica y los aislantes son tanto más eficaces cuanto menos higroscópicos son.
- La temperatura actúa de manera diversa según se trate de aislantes sólidos o líquidos.
- En los aislantes sólidos la rigidez decrece con el aumento de la temperatura, en cambio para los líquidos ocurre generalmente lo contrario.

- La duración de la prueba, a igualdad de otras condiciones, influye notablemente en la magnitud de la rigidez, disminuye para tiempos crecientes y alcanza valores elevados para tiempos muy breves (sobretensiones de impulso).
- La frecuencia de la tensión aplicada afecta el valor de rigidez, para una misma duración se tienen valores de rigidez más altos para frecuencias más bajas y viceversa.

2.2.1.2.3 Tipos.

Cuando el campo eléctrico aplicado es perpendicular al material ensayado, se define un valor de rigidez de masa; en cambio cuando el campo eléctrico es paralelo a la superficie del material se define rigidez superficial.

La rigidez superficial depende del estado en que se encuentra la superficie del material aislante, más que de su naturaleza, es decir, superficies lisas, pulidas y secas presentan valores de rigidez superiores.

2.2.1.3 Pruebas de Alto Potencial. [14]

2.2.1.3.1 Definición.

Rigurosamente no existe una definición única de la prueba de alto potencial (voltaje), pero su definición es situacional (lo que se observa in situ) pero básicamente una prueba de alto potencial, es una prueba de fatiga eléctrica llevada a un voltaje dos o más veces el voltaje nominal, a veces se le conoce como prueba de resistencia o prueba de comprobación.

2.2.1.3.2 Clasificación.

Se pueden clasificar según el tipo de corriente eléctrica que usa, y también de acuerdo a la forma de aplicación del voltaje.

→ Según el tipo de corriente eléctrica que se usa:

- Prueba de Alto Potencial - Corriente Continua (C.C.)
- Prueba de Alto Potencial - Corriente Alterna (C.A.)

→ De acuerdo a la forma de aplicación del voltaje:

- Estable o Fijo.
- Transitorio o Impulsivo

2.2.1.3.3 Tipos.

Según sea el efecto que tiene en el objeto a probar pueden ser de dos tipos:

- Destructiva.
- No Destructiva

2.2.1.3.4 Características.

- Aplican sobrevoltajes mayores al nominal.
- Alteran las propiedades del objeto a probar.
- En algunos casos simulan condiciones extremas o críticas.
- Consumen buenas cantidades de energía y potencia.

2.2.1.3.5 Aplicaciones.

- Pruebas de calidad de diversos materiales.
- Medición de resistencias de aislamiento.
- Medición de rigidez dieléctrica.
- Pruebas de aislamiento.
- Ensayos de equipos eléctricos.

2.2.1.4 Generadores de Impulsos.

2.2.1.4.1 Definición. [2] [11]

Es un instrumento o equipo de laboratorio capaz de aplicar a un objeto de prueba, una forma de onda transitoria de polaridad positiva o negativa, con un alto nivel de magnitud de la misma.

2.2.1.4.2 Tipos.

Dependiendo del parámetro eléctrico a aplicarse, pueden ser dos tipos:

- Generador de Impulso de Voltaje o Tensión.
- Generador de Impulso de Corriente o Intensidad.

2.2.1.4.3 Características.

- Son equipos que consumen buenas cantidades de potencia y energía.
- Dependiendo de la capacidad que tengan, estos pueden ser medianos o grandes en tamaño.
- Sus componentes funcionales son algo costosos.

2.2.1.4.4 Usos.

- Pruebas de Alto Potencial.
- Pruebas de Aislamiento.
- Mediciones de Rigidez Dieléctrica.
- Evaluación del desempeño de equipos eléctricos.
- Ensayos de materiales.

2.3 Desarrollo Teórico.

2.3.1 Descripción.

Para el desarrollo de esta prueba, se hace necesario contar con una tensión alterna de 220 V Eficaces a 60 Hz que provea una onda sinusoidal; un equipo generador de impulsos de voltaje, que sea capaz de aplicar al espécimen de prueba una forma de onda impulsiva, establecida por el estándar correspondiente; equipos de medición y lectura de parámetros eléctricos debidamente acondicionados; electrodos seleccionados apropiadamente para poder aplicar correctamente la prueba al objeto de muestra ; un medio circundante que en este caso es el aire, ya que se trata de materiales sólidos y una muestra del espécimen que se ensayará.

Además, es importante mencionar que para una realización óptima de la prueba, debe contarse con condiciones normales de temperatura, presión y humedad, puesto que estos parámetros alteran significativamente la prueba, por ejemplo : No es lo mismo llevar a cabo la prueba en el departamento de Lima, que realizarla en algún

departamento de la Sierra, en la que su altura sobre el nivel de mar es significativa, como consecuencia los datos de la prueba, no proporcionarán información completa del resultado de la experiencia.

Puesto que se estará trabajando con altos niveles de voltaje, y por consiguiente regulares consumos de energía y potencia eléctrica, se hace necesario contar con las debidas precauciones, tales como: un aislamiento y espacio adecuado para la prueba, protección para los equipos de medición y lectura, contar con un equipo de extinción de fuego, por el hecho de que la norma que especifica esta clase de pruebas, establece que el material debe llevarse a disrupción (ruptura) de su rigidez dieléctrica, lo que podría ocasionar que se originen llamas.

2.3.2 Representación Gráfica.

En la figura 2.1, se muestra en forma gráfica, cada ítem mencionado anteriormente en la descripción del modelo teórico y ver su importancia como elementos conformadores que se requieren para las pruebas de alto potencial.

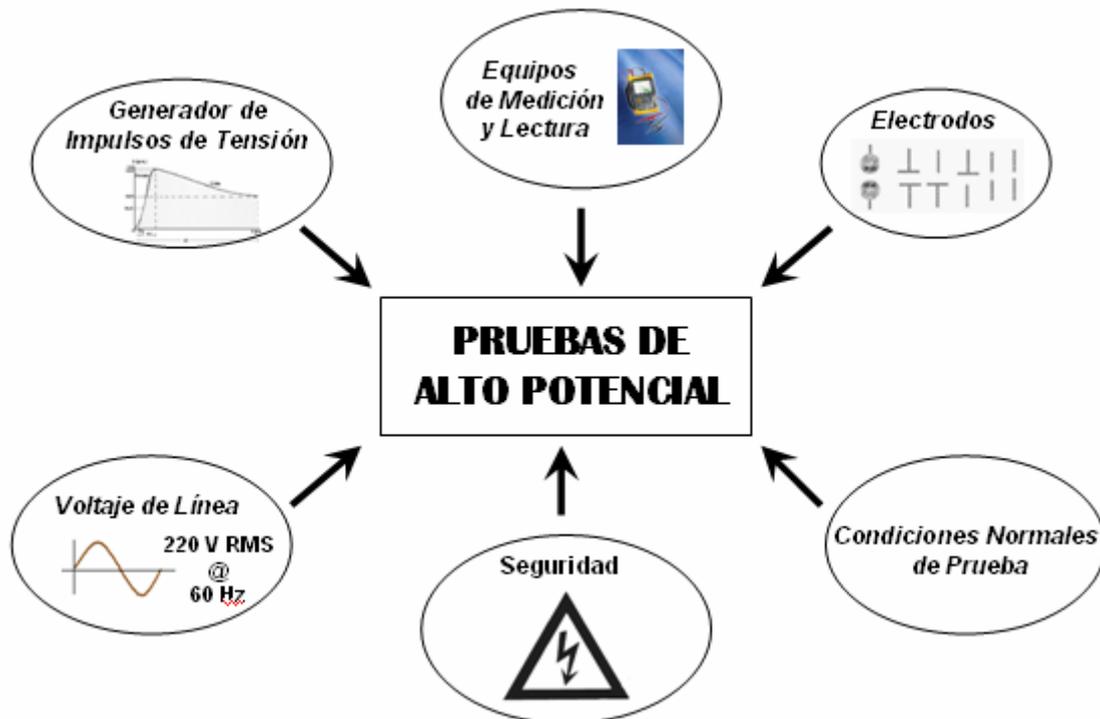


Figura 2.1 Modelo Teórico en forma gráfica.

2.3.3 Forma de Onda establecida para el ensayo.

La forma de onda de tensión de impulso completa normalizada 1.2/50 μs que establecen las normas ASTM D-3426 [2] - IEC 60243-3 [11], para ensayos que reproduzcan la caída de un rayo, con lo que se prueban transformadores, materiales aislantes, etc. se muestra a continuación en la figura 2.2.

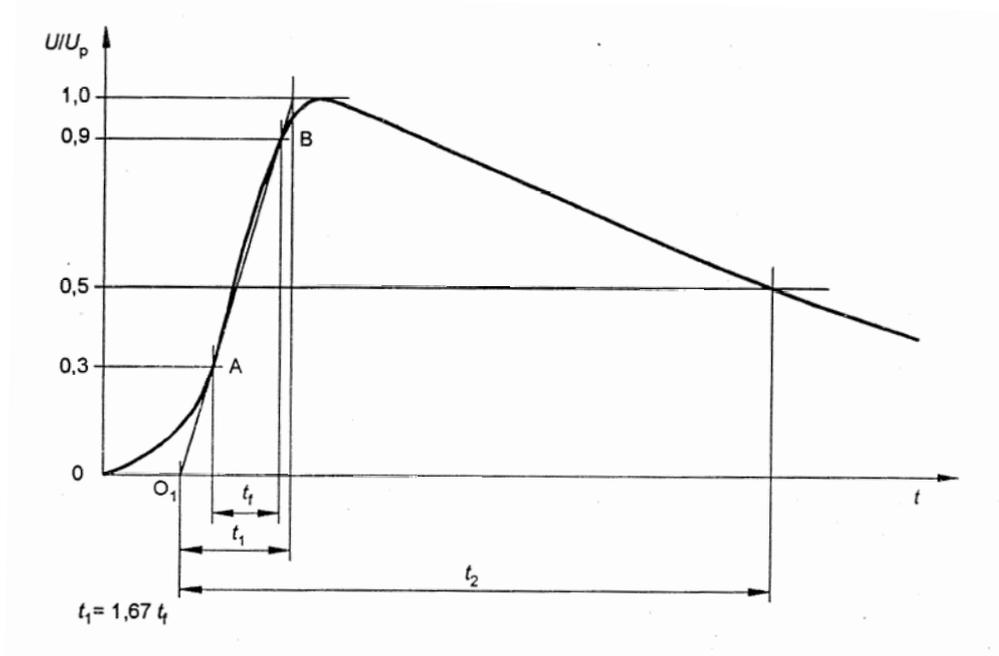


Figura 2.2 Onda de tensión tipo rayo normalizada 1.2/50 μs .

Dicha onda puede ser representada matemáticamente en forma aproximada como la resta de dos funciones exponenciales:

$$U_{(t)} = U_0 (e^{-at} - e^{-bt}) \dots\dots\dots(2.1)$$

Para el gráfico anterior, las normas ASTM D-3426 [2] - IEC 60243-3 [11], establecen las siguientes definiciones:

- a.- Onda de Tensión de Impulso Completa: Tensión transitoria aperiódica que crece rápidamente hasta un valor máximo, decreciendo después más lentamente hasta cero.
- b.- Valor de cresta (de una onda de tensión de impulso), U_p : Valor máximo de la tensión.

c.- Valor de cresta convencional (de una onda de tensión de impulso), U_1 : Valor obtenido a partir del registro de una tensión de impulso sobre la que pueden existir oscilaciones de alta frecuencia o descargas de amplitud limitada.

d.- Origen convencional (de una onda de tensión de impulso), O_1 : Punto de intersección O_1 de la recta de tensión nula con la recta de unión de los puntos correspondientes a 0.3 veces y 0.9 veces el valor de cresta convencional sobre el frente de una onda de tensión de impulso.

e.- Duración convencional del frente (de una onda de tensión de impulso), t_1 : Duración igual a 1.67 veces el intervalo de tiempo t_f que separa los instantes en que la tensión es igual a 0.3 veces y 0.9 veces el valor de cresta.

f.- Duración convencional hasta el valor medio t_2 : Intervalo de tiempo t_2 comprendido entre el origen convencional O_1 y el instante, situado sobre la cola, en que la tensión cae a la mitad del valor de cresta.

Asimismo las normas ASTM D-3426 [2] - IEC 60243-3 [11], indican lo siguiente:

i.- Las tensiones transitorias provocadas por el rayo pueden ser de polaridad positiva o negativa. En un campo simétrico creado entre electrodos idénticos, la polaridad no tiene ningún efecto sobre la rigidez dieléctrica. No obstante, con electrodos diferentes, puede existir un efecto de la polaridad pronunciado. Cuando se utilizan electrodos asimétricos para ensayar materiales, para los que el experimentador no tiene experiencia ni conocimiento con anterioridad, se recomienda que los ensayos comparativos se efectúen en los dos sentidos de la polaridad.

ii.- Esta forma de onda normalizada es una onda de 1.2/50 μs , que alcanza la tensión de cresta en alrededor de 1.2 μs y decrece hasta en un 50% del valor de cresta en alrededor de 50 μs desde el instante correspondiente a la cresta de la onda.

iii.- El generador debe permitir la adaptación de la forma de onda aplicada a la muestra de ensayo, a fin de obtener una duración convencional del frente t_1 de $1.2 \mu\text{s} \pm 0.36 \mu\text{s}$, y una duración convencional hasta el valor medio t_2 de $50 \mu\text{s} \pm 10 \mu\text{s}$ (véase figura 2.2)

2.3.4 Indicadores.

2.3.4.1 Cualitativos.

2.3.4.1.1 Opinión del Usuario.

Es importante ya que el usuario final es un especialista en el área de electricidad o electrónica, que va a usar el equipo generador de impulsos de voltaje para realizar las pruebas respectivas, porque brinda una opinión acertada sobre el desempeño del equipo y sugerencias que pueden tomarse para mejorar las prestaciones del mismo.

2.3.4.1.2 Producción del Fabricante.

El fabricante de materiales aisladores puede solicitar las pruebas para ver la calidad y confiabilidad sus productos que vende, pues de los resultados de las pruebas, depende si mejora la calidad de sus productos, o si aumenta o disminuye su producción, lo cual se ve reflejado en su inversión y la ganancia que pueda rendirle.

2.3.4.2 Cuantitativos.

2.3.4.2.1 Descripción.

El desempeño correcto en la prueba a la que se someterán los especímenes, incluye conocer formalmente los conceptos físicos que están involucrados, para que al final de la realización de la misma, el que realice la prueba debe saber si sus resultados son como se esperan, puesto que el equipo que realiza la prueba tiene especificaciones y ha sido diseñado basándose en normas, para ser usado en condiciones estándares y que es responsabilidad del que realiza la prueba, el prever las respectivas medidas de seguridad y tratar de reunir en lo posible todas las condiciones necesarias para el uso correcto del equipo. El conocer los indicadores cuantitativos nos informa como se presentarán realmente los parámetros de ensayo involucrados durante el desarrollo de la prueba, tales como: el valor real pico del impulso de voltaje que recibirá el espécimen, la geometría física de los electrodos, los especímenes de prueba con sus propias dimensiones físicas para el ensayo, y las consideraciones de seguridad que se deben tomar para realizar la prueba.

2.3.4.2.2 Valor Corregido del Impulso de Voltaje Aplicado.

Los cálculos y diseño se hacen teniendo en cuenta condiciones estándar, pero debido a que las condiciones atmosféricas afectan la prueba de alto potencial y que adecuar un ambiente especial para el desarrollo de solamente esta prueba no es muy práctico, se debe hacer una corrección al valor de voltaje que finalmente recibirá el espécimen, el cual consiste en hallar el valor máximo o pico de voltaje y multiplicarlo por un factor de corrección adimensional llamado “k” [4], en el que se observa que este factor depende inversamente de la altura sobre el nivel del mar del lugar geográfico donde se lleva a cabo la prueba.

Nota.- El factor de corrección adimensional “k” se obtiene de la siguiente expresión:

$$k = \frac{1}{1 + (1.25 \times 10^{-4}) \times H} \dots\dots\dots (2.2)$$

Donde:

H: Altura sobre el nivel del mar, en metros, del lugar donde se realiza la prueba.

2.3.4.2.3 Forma y tamaño de los electrodos.

Los electrodos son a través de los cuales se lleva a cabo la descarga (normalmente son 2 electrodos) y entre los cuales estará el espécimen de prueba, rodeados del medio circundante que en este caso es el aire. Igualmente indicado por las normas [1] [10], podemos encontrar tablas que muestran los tipos de electrodos típicos que se usan para este tipo de pruebas, su descripción, su forma física y el tipo de espécimen a probarse que está asociado al tipo de electrodo mencionado. El campo eléctrico que se forma entre estos electrodos y que recibe el espécimen de prueba, se verá afectado por la forma física de los electrodos y por el medio que los rodea, ya que el campo eléctrico se puede presentar de forma homogénea o no homogénea. Por lo tanto debe escogerse adecuadamente la forma y el material de los electrodos a usar, de acuerdo con las especificaciones indicadas la normas ASTM D-149 – IEC 60243-1 [1] [10].

2.3.4.2.4 Especímenes de Prueba.

Como es muy amplia la diversidad de polímeros sólidos, cada espécimen de prueba tiene sus propias características y como tal, es necesario tener en cuenta si hay recomendaciones específicas para cada tipo de espécimen a ser probado; por ejemplo, las normas ASTM D-149 [1] – IEC 60243-1 [10], indican como deben

preparase ciertos especímenes a ser sometidos en esta prueba y también las dimensiones físicas que deben tener para ser ensayados.

2.3.4.2.5 Seguridad.

Es importante señalar que siempre debe considerarse la seguridad de la red eléctrica, del equipo que se usa y del personal que realiza la prueba, puesto que se trabajará con altos niveles de energía, y pueden resultar peligrosos para el operador del equipo; las medidas de protección deben comprender el caso de un cortocircuito que pueda dañar a la red o a los equipos (p.e. : los equipos de medición) que se emplearán; además como la normas ASTM D-3426 [2] , IEC 60243-3 [11] especifican, los materiales en prueba se llevarán al caso límite de ruptura dieléctrica lo que puede ocasionar fuego, por eso se hace necesario contar con los equipos adecuados para afrontar estos casos, y también es muy recomendable contar con una red de tierra independiente para el generador.

2.4 Fundamentación.

2.4.1 Teórico Académica.

Dado que se tienen normas como las de la American Society for Testing of Materials (ASTM) o de la International Electrotechnical Comisión (IEC) para el ensayo de diversos tipos de materiales, y que el sector electricidad usa polímeros para sus aplicaciones, pero que al mismo tiempo no se cuenta con equipos nacionales para hacer dichos ensayos; entonces, es de interés desarrollar este tema de tesis para conocer el funcionamiento, el diseño de los equipos con los que se realizan estos ensayos y la importancia de las características dieléctricas de los materiales poliméricos sólidos, para poder ofrecer la realización de pruebas de rigidez dieléctrica como medio de certificación de calidad del material a usarse.

2.4.2 Realidad.

Actualmente en nuestro medio se hacen pruebas de alto voltaje de tipo aislamiento y son hechas en laboratorios acreditados a nivel nacional, estas pruebas lo pueden solicitar empresas o fabricantes de equipos eléctricos, por lo que no es común tener registro de que alguna empresa o fabricante de materiales poliméricos hayan solicitado hacer pruebas de rigidez dieléctrica para sus productos que se usen como

aislantes; además está el hecho de que en nuestro país no se cuenta con equipos propios para llevar a cabo ambos tipos de pruebas.

2.4.3 Personal.

Con la realización de esta tesis, se busca tener un punto de partida o base teórica y contar con criterios prácticos para conocer como es un ensayo de rigidez dieléctrica de tipo destructivo usando generadores de impulsos de alta tensión (de tipo Marx en este caso), sustentando su metodología de aplicación en las normas correspondientes, para una muestra de material polimérico sólido escogido (polímero de silicón en este caso) que es usado como aislante en la industria de transmisión eléctrica aérea; antes de su aplicación o su venta en el mercado, pues no es suficiente con importar éste tipo de material y asumir que ya ha sido probado previamente en el país de origen, sino que debe ensayarse en nuestro país bajo las normas respectivas [2] [11] en laboratorios acreditados para comprobar si satisface las características técnicas y requerimientos de su aplicación en nuestro medio.

2.5 Hipótesis.

2.5.1 Hipótesis Principal.

Dada la necesidad de ensayar la rigidez dieléctrica de los materiales poliméricos sólidos, cuya aplicación en el ramo eléctrico es muy frecuente, se hace necesario el desarrollo de capacidades que permitan realizar estas pruebas con eficiencia, y así poder determinar la calidad de estos materiales que son usados como aislantes, siguiendo normas o estándares de prueba publicados por la American Society for Testing of Materials (ASTM) o la International Electrotechnical Commission (IEC), y llevar a cabo las pruebas en los respectivos laboratorios que existen en el Perú. Al contar con los equipos y laboratorios que realicen estas pruebas ya se pueden ofertar servicios de certificación de calidad de los materiales poliméricos, haciendo pruebas de rigidez dieléctrica con ondas de impulso tal como lo establecen las normas ASTM: D-3426 – IEC 60243-3 [2] [11] de las instituciones antes mencionadas.

2.5.2 Hipótesis Secundarias.

- a.- Actualmente existe una falta de estrategia orientada a la realización de pruebas de rigidez dieléctrica, por falta de instituciones y laboratorios que lo realicen.
- b.- Se importan materiales poliméricos para ser usados como aislantes en la industria eléctrica, sin previamente verificar si han sido debidamente ensayados bajo las normas o estándares correspondientes y comprobar si satisfacen los requerimientos de su aplicación.
- c.- Con el desarrollo e implementación de equipos de pruebas para laboratorios hechos en nuestro país, se tendrá equipamiento necesario y adecuada certificación que respalde la calidad de este tipo de materiales ensayados.
- d.- Al realizar ensayos en laboratorios certificados, se validarán las metodologías de los mismos, que están especificadas en las normas respectivas [2] [11].

2.6 Objetivos.

2.6.1 Objetivo General.

Presentar el estudio de una propuesta de diseño de un generador de impulsos (tipo marx) de alta tensión para realización de ensayos de rigidez dieléctrica de materiales poliméricos sólidos (polímero de silicón para este caso), los cuales tienen extensa aplicación en la industria eléctrica usándolos como aislantes; llevándolos a disrupción eléctrica (ensayo de tipo destructivo), guiándose de la normas establecidas por la American Society for Testing of Materials (ASTM) y la International Electrotechnical Commission (IEC) [2] [11], ya que estos ensayos de alto voltaje constituyen parte de los estándares internacionales de calidad.

2.6.2 Objetivos Específicos

- a.- Revisar la posible solución para obtener ondas de impulsos para este tipo de ensayo y justificar la elección de la técnica escogida para la presente tesis.

- b.- Conocer los diferentes materiales poliméricos de uso eléctrico, identificar sus valores de rigidez dieléctrica y seleccionar una muestra de material específico, como punto de partida de la presente propuesta de diseño.
- c.- Descripción de la propuesta de diseño, simulación y análisis del circuito eléctrico usando el software académico SPICE ICAP/4 de INTUSOFT.
- d.- Identificación y selección adecuada de los electrodos que usará y formará parte del generador de impulso.
- e.- Presentar un resumen con las características de la propuesta y dar unas consideraciones prácticas que se deben en cuenta para el diseño de un Generador de Impulso tipo Marx.



CAPÍTULO 3: DISEÑO DEL GENERADOR DE IMPULSO.

3.1 Diagrama de Bloques de la propuesta de diseño.

3.1.1 Introducción.

3.1.1.1 Selección del material a ensayarse: El Polímero de Silicón.

Los materiales poliméricos de aplicación en la industria eléctrica son variados, ya que su función de aislamiento eléctrico que proporcionan estos materiales es fundamental, ya que garantiza el transporte y consumo de energía, además de proteger a las personas. Para el presente tema, se ha escogido como material de muestra para someterlo a ensayo de rigidez dieléctrica, un compuesto polimérico de silicón que se usa como cubierta de los polos de los sistemas y mecanismos de protección de transformadores para transmisión aérea de alta tensión, debido a que este tipo de material provee de un buen desempeño aun en ambientes de alta polución. En la figura 3.1, podemos apreciar a manera de ejemplo, un polo de un sistema de protección para transformadores.

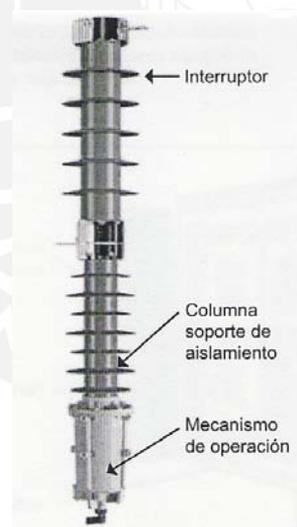


Figura 3.1 Polo de un sistema de protección para transformador.

En la figura 3.2, podemos apreciar un acercamiento, a manera de detalle, de este tipo de cubiertas, que en realidad es un forro que tiene forma corrugada con el fin de aprovechar mejor el material y de aumentar la distancia superficial entre los extremos de esta cubierta, haciendo un mejor uso del espacio disponible.



Figura 3.2 Cubierta corrugada de polímero de silicón.

3.1.1.2 Forma física para su ensayo y justificación.

De las figuras anteriores (figura 3.1 y figura 3.2), podemos ver la forma final o producto terminado hecho con este material (polímero de silicón); pero para el presente tema de estudio, no nos interesa el material como producto final, sino como materia prima, debido a que las normas respectivas: ASTM D-149 [1], IEC 60243-1 [10] establecen que debe ensayarse especímenes de muestra con una geometría determinada, que en este caso se trata de una plancha cuadrangular de 12.5 cm. de lado, y de 1 centímetro de espesor, tal como lo muestra a continuación la figura 3.3.

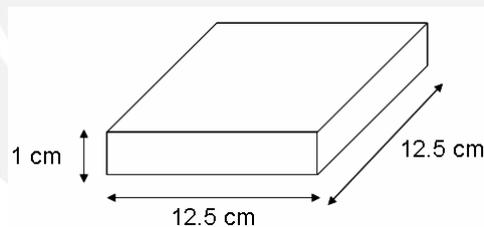


Figura 3.3 Forma del espécimen de prueba para el ensayo.

Se escoge este tipo de geometría pues está acorde con las normas respectivas [1] [10] (previamente mencionadas) para los ensayos de rigidez dieléctrica, la forma geométrica de plancha cuadrangular o rectangular en forma general, para espécimen de prueba, es bastante usada y se toma en cuenta el espesor de un centímetro pues en tablas de valores de rigidez dieléctrica de diversos materiales y polímeros aislantes [6], el valor de la rigidez dieléctrica está expresada generalmente en razón de kilovoltios por centímetro, tal como se puede ver en la tabla 3.1; debido a esto es que se tomará como base para el ensayo, un espesor referencial de 1 centímetro.

Tabla 3.1 Propiedades físicas y eléctricas de algunos materiales sólidos aisladores.

Table 52.2 Electrical and Physical Properties of Some Common Solid Insulating Materials [1, 4, 10] (continued)									
<i>Material</i>	<i>Specific Gravity</i>	<i>Maximum Operating Temperature (°C)</i>	<i>Dielectric Constant 20 °C</i>			<i>Disipation Factor 20 °C</i>			<i>Dielectric Strenght (KV/cm)</i>
			<i>60 Hz.</i>	<i>1 KHz.</i>	<i>1 MHz.</i>	<i>60 Hz.</i>	<i>1 KHz.</i>	<i>1 MHz.</i>	
EPR	0.86	300-350 °F		3.0-3.5		4×10^{-3}			354-413
Polypropylene	0.9	128-186	2.22-2.28	2.22-2.28	2.22-2.28	$2-3 \times 10^{-4}$	$2.5-3.0 \times 10^{-4}$	4.6×10^{-4}	295-314
PTFE	2.13-2.20	< 327	2	2	2	$< 2 \times 10^{-4}$	$< 2 \times 10^{-4}$	$< 2 \times 10^{-4}$	189
Glass-reinforced polyester premix	1.8-2.3	265	5.3-7.3		5.0-6.4	$1-4 \times 10^{-2}$		$0.8-2.2 \times 10^{-2}$	90.6-158
Thermoplastic polyester	1.31-1.58	250	3.3-3.8 (100 Hz.)			$1.5-2.0 \times 10^{-3}$			232-295
Polyimide polyester	1.43-1.49	480 °F		3.4 (100 KHz.)			$1-5 \times 10^{-3}$ (100 KHz.)		220
Polycarbonated	1.2	215	3.17		2.96	9×10^{-4}		1×10^{-2}	157
Epoxy (with mineral filler)	1.6-1.9	200 (descomposition temperature)	4.4-5.6	4.2-4.9	4.1-4.6	$1.1-8.3 \times 10^{-2}$	$0.19-1.4 \times 10^{-1}$	$0.13-1.4 \times 10^{-1}$	98.4-158
Epoxy (with silica filler)	1.6-2.0	200 (descomposition temperature)	3.2-4.5	3.2-4.0	3.0-3.8	$0.8-3.0 \times 10^{-2}$	$0.8-3.0 \times 10^{-2}$	$2-4 \times 10^{-2}$	158-217
Silicone rubber	1.1-1.5	700 °F	3.3-4.0		3.1-3.7	$1.5-3.0 \times 10^{-2}$		$3.0-5.0 \times 10^{-3}$	158-197

3.1.1.3 Rigidez Dieléctrica del Polímero de Silicón.

De la tabla 3.1, se observa que para este tipo de material polimérico (silicón) su rigidez dieléctrica está en un rango que va desde los 158 a 197 KV/cm . por esta razón el diseño de la fuente de alimentación y del generador de impulso se hará considerando el peor caso; vale decir, se tomará como punto de partida que el valor de rigidez dieléctrica de este material es de 197 KV/cm . , de esta manera nos aseguramos que el diseño cumpla con el caso donde se requiera la máxima cantidad de voltaje necesaria para llevar a disrupción dieléctrica este material, en una prueba de rigidez dieléctrica de tipo destructiva tal como lo indican los estándares respectivos [2] [11].

3.1.2 Diagrama.

El diagrama de bloques es el siguiente que se muestra a continuación en la figura 3.4.

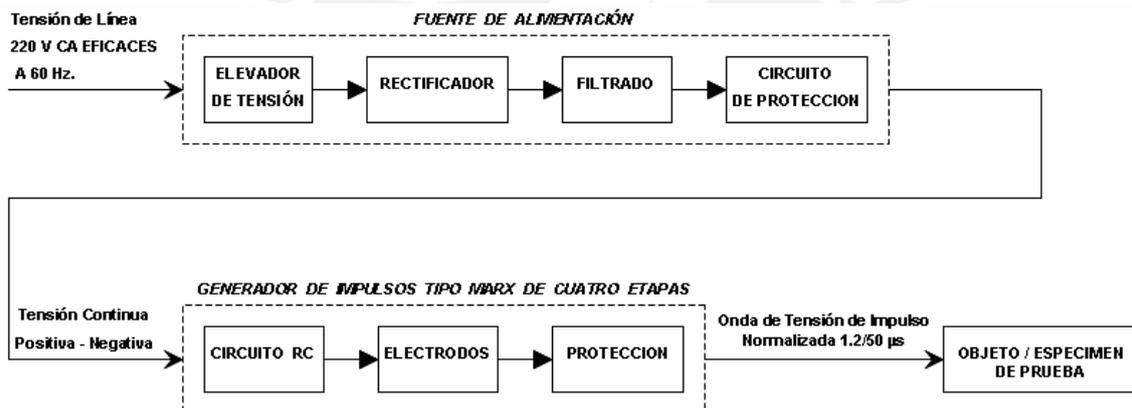


Figura 3.4 Diagrama de Bloques.

3.2 Descripción de la propuesta de diseño.

3.2.1 Descripción de la Fuente de Alimentación.

Para obtener la forma de onda de impulso de tipo rayo normalizada 1.2/50 μ s (véase figura 2.2), se debe alimentar el generador con tensión continua (positiva o negativa), por eso se parte de la tensión de línea (220 V CA Eficaces a 60 Hz), pasando por rectificación y filtrado de la misma (Ver figura 3.5).

3.2.1.1 Elevador de Tensión.

Del diagrama de bloques (figura 3.4) el sub bloque “Elevador de Tensión”, lo conforma un Transformador Elevador Variable Monofásico con los siguientes datos:

- ❖ $V_{\text{primario}} = 220$ V Eficaces C.A.
- ❖ $V_{\text{secundario}} = 39$ KV Eficaces C.A.
- ❖ $I_{\text{secundario}} = 50$ mA.
- ❖ Potencia Aparente (S) = 1.95 KVA.
- ❖ Frecuencia = 60 Hz.

Conforme a los datos anteriores, la corriente de salida del transformador es baja (50 mA), ya que nos interesa obtener a la salida de la fuente, es tensión mas no elevadas corrientes. El Generador de Impulsos tipo Marx es visto por la Fuente de Alimentación como una carga, y como lo que se busca finalmente es obtener, un impulso de alta tensión a baja corriente, entonces la fuente que lo alimente debe tener tal característica.

Se propone que sea un transformador elevador variable para poder aplicar correctamente el ensayo de rigidez dieléctrica de tipo destructivo, tal como lo establece las normas respectivas [2] [11], pues en este tipo de ensayo el nivel pico de tensión de prueba que se debe aplicar al material se debe ir aumentando en forma gradual según como esta descrito en las normas, y como el transformador que se propone es variable, entonces se puede fijar el nivel pico de tensión de prueba, variando la relación de vueltas en las bobinas del transformador (primario a secundario).

3.2.1.2 Rectificador.

El sub bloque “Rectificador” del diagrama de bloques mostrado (ver figura 3.4), lo conforma una cadena serie de diodos de alta tensión que constituyen un puente rectificador. Debido a que no es factible encontrar un sólo dispositivo semiconductor que sea capaz de soportar elevadas tensiones (en el orden de los kilovoltios) sin sufrir daños; se propone usar una cadena serie de diodos permitiendo así que la tensión pico inversa a la que estarán sometidos durante medio ciclo de la onda de entrada (tensión de línea) se reparta entre todos los diodos. De esta forma la tensión pico inversa total a la que estará sometida la cadena serie de diodos, será menor que la suma de las tensiones pico inversa que soporta cada diodo individualmente.

La mayoría de diodos rectificadores estándar comerciales para alto voltaje, son capaces de manejar asimismo, importantes cantidades de corriente. Pero dado que lo que se busca es manejo de voltaje y no de corriente, se escogerá un diodo comercial de alta tensión con la menor cantidad de manejo de corriente posible, aunque esto último no sea comercialmente tan factible.

De este modo, se tiene dos opciones para el diodo rectificador:

- Diodo 5SDD07D6000 de ABB
- Diodo SD500N/45 de IRF

De las hojas de datos proporcionadas por sus respectivos fabricantes, se muestra a continuación los datos correspondientes a cada diodo:

Diodo 5SDD07D6000 de ABB

- Voltaje Pico Inverso Máximo (Transitorio) = 6.2 KV.
- Voltaje Pico Inverso Máximo (Repetitivo) = 6 KV.
- Corriente de Conducción Máxima (Promedio) = 0.685 KA.
- Corriente de Conducción Pico Máxima (Transitoria) = 11 KA.
- Voltaje de Conducción (V_{γ}) = 0.92 V.

Diodo SD500N/45 de IRF

- Voltaje Pico Inverso Máximo (Transitorio) = 4.6 KV.
- Voltaje Pico Inverso Máximo (Repetitivo) = 4.5 KV.
- Corriente de Conducción Máxima (Promedio) = 0.475 KA.
- Corriente de Conducción Pico Máxima (Transitoria) = 7.85 KA.
- Voltaje de Conducción (V_{γ}) = 0.925 V.

Viendo los datos anteriores y comparando, se escogerá para la presente propuesta, el diodo 5SDD07D6000 de ABB, pues soporta mayor cantidad de voltaje pico inverso máximo (repetitivo y transitorio) y es capaz de manejar buenas cantidades de corriente de conducción tanto repetitiva como transitoria (aunque esto no sea demasiado relevante). Además, otra razón por la cual se escogió este diodo, es que al ser capaz de soportar mayor cantidad de voltaje pico inverso, el número de unidades del mismo que se requerirá para la aplicación, será menor que si se usara el otro diodo (SD500N/45 de IRF).

Cálculos:

Voltaje eficaz (RMS) en el lado secundario del transformador = 39 KV.

Voltaje máximo en el lado secundario del transformador = $39 \times \sqrt{2}$ KV. = 55.154 KV.

Para conocer el voltaje pico inverso de trabajo (P.I.V.) al que estará sometido la cadena serie de diodos, se usará la siguiente fórmula [5]:

$$\boxed{P.I.V. = 2 \times V_{\max} - n \times V_{\gamma}} \dots\dots\dots(3.1)$$

Donde:

V_{\max} : Voltaje máximo en el lado secundario del transformador

n : Número de diodos en serie.

V_{γ} : Voltaje de Conducción.

Luego:

$$P.I.V. = 2 \times 55.154 \times 10^3 - n \times 0.92 = 110.308 \times 10^3 - n \times 0.92$$

Como se trata de una cadena serie de diodos, entonces para calcular el número de diodos en cada rama del puente rectificador y que pueda soportar el nivel de P.I.V. encontrado anteriormente, debe cumplirse la siguiente desigualdad:

$$\boxed{n \times V.P.I.M. > P.I.V.} \dots\dots\dots(3.2)$$

Donde:

n : Número de diodos en serie.

V.P.I.M. : Voltaje Pico Inverso Máximo (Repetitivo) - dato del fabricante.

P.I.V. : Voltaje Pico Inverso (de trabajo).

Luego:

$$n \times (6 \times 10^3) > 110.308 \times 10^3 - n \times 0.92$$

$$n > 18.382 \rightarrow n = 19 \rightarrow \text{P.I.V.} = 110.291 \text{ KV.}$$

Comprobando:

$$\text{P.I.V. que recibirá cada diodo de la cadena serie} = \frac{110.291}{19} \text{ KV} = 5.805 \text{ KV.}$$

Voltaje pico inverso máximo que puede soportar cada diodo (hojas de datos) = 6 KV.

De esta forma se verifica para cada diodo que:

Voltaje pico inverso de trabajo < Voltaje pico inverso máximo (hojas de datos)

$$5.805 \text{ KV.} < 6 \text{ KV}$$

Luego, para conocer el valor de la corriente promedio que circulará en cada diodo, se usará la siguiente relación [5]:

$$I_{\text{prom}} = \frac{I_{DC}}{2} \dots\dots\dots(3.3)$$

Donde:

I_{DC} : Corriente constante que circula en la carga

Por diseño y por la característica de la aplicación que se está presentando, el interés es manejo de tensión y no de corriente. Por ello mismo, desde la selección del transformador elevador nos aseguramos que la salida de la fuente sea en alta tensión con baja corriente, de esta manera:

$$I_{DC} = 50 \text{ mA. (máxima corriente entregada por el transformador)} \rightarrow I_{\text{prom}} = 25 \text{ mA.}$$

Viendo este último resultado y comparándolo con el dato proporcionado por el fabricante, el diodo soportará las condiciones de trabajo en la aplicación.

3.2.1.3 Filtrado.

Remitiéndose al diagrama de bloques de la propuesta (figura 3.4), el sub bloque "Filtrado" lo conforma un condensador (C_f) de capacitancia igual a 1 μF para realizar el filtrado de la onda rectificada pulsante que se obtiene a la salida del puente rectificador.

Cálculos:

Se escoge este valor de capacitancia (1 μF) para el condensador de filtro, pues es el valor mínimo necesario que permite obtener a la salida de la fuente, un voltaje continuo promedio suficiente, para lograr el nivel de tensión de prueba final que se obtendrá a la salida del generador, y así poder llevar a ruptura dieléctrica al material seleccionado (polímero de silicón).

Para calcular el voltaje de rizado pico-pico en la salida de la fuente de alimentación, usaremos la siguiente relación [5]:

$$V_{r\text{p-p}} = \frac{I_{DC}}{2 \times f \times C} \dots\dots\dots(3.4)$$

Donde:

I_{DC} : Corriente constante que circula en la carga.

f : frecuencia eléctrica (60 Hz.)

C : Capacitancia del condensador de filtro (C_f)

Luego:

$$V_{r\text{p-p}} = \frac{50 \times 10^{-3}}{2 \times 60 \times 1 \times 10^{-6}} = 416.667 \text{ V.}$$

Nota: Si lo que se busca es obtener un menor voltaje de rizado pico-pico, bastaría con aumentar el valor de capacitancia del condensador de filtro (C_f), pues de lo anterior se puede apreciar que el voltaje de rizado y la capacitancia del condensador de filtro, varían inversamente; pero hacer esto implicaría aumentar significativamente los costos de implementación (componentes) para la fuente de alimentación y por ende, de la presente propuesta. Además, por la misma característica de esta aplicación, no es necesario reducir aun más el nivel de rizado en la tensión continua de salida (promedio) pues lo que se busca es tener un buen nivel alto de tensión promedio para la carga de los condensadores en el generador de impulso, y obtener un buen desempeño del mismo.

Ahora para calcular el nivel de tensión continua promedio que se obtendrá a la salida de la fuente de alimentación y que será la que reciba como entrada el generador de impulsos, se usará la siguiente fórmula [5]:

$$V_{DC} = V_{\max} - n \times V_{\gamma} - \frac{I_{DC}}{4 \times f \times C} \dots\dots\dots(3.5)$$

Donde:

V_{\max} : Voltaje máximo en el lado secundario del transformador

V_{γ} : Voltaje de Conducción.

n : Número de diodos.

I_{DC} : Corriente constante que circula en la carga.

f : frecuencia eléctrica (60 Hz.)

C : Capacitancia del condensador de filtro (C_f)

Luego:

$$V_{DC} = 55.154 \times 10^3 - 19 \times 0.92 - \frac{50 \times 10^{-3}}{4 \times 60 \times 1 \times 10^{-6}} = (\pm) 54.928 \text{ KV.}$$

3.2.1.4 Circuito de Protección.

Los aspectos de seguridad que se deben tomar en cuenta para la realización de las pruebas de rigidez dieléctrica de tipo destructiva, no son mencionados por las normas correspondientes: ASTM D-3426 [2] – IEC 60243-3 [11]; ya que estas establecen definiciones y metodologías para realizar el ensayo, mas no sugieren criterios de seguridad, pues es sólo responsabilidad del que realiza las pruebas, por ello a continuación se expone una propuesta de circuito de protección para la fuente de alimentación descrita anteriormente.

El sub bloque “Circuito de Protección” del diagrama de bloques mostrado en la figura 3.4, lo conforman dos elementos: un Interruptor termomagnético y un fusible, por la siguiente razón: La Fuente de Alimentación recibe como entrada la tensión de línea de la red eléctrica (220 V Eficaces C.A. a 60 Hz.) y entrega a la salida una tensión continua (positiva/negativa) de alto valor (54.928 KV.). Se ha considerado la protección tanto de la red eléctrica como en la salida de la fuente. Para la entrada (red eléctrica) se ha propuesto usar un Interruptor Termomagnético Monofásico (Fabricante: Merlin Gerin) de 15 A. , y para la salida, un Fusible de Alta Tensión Limitador de Corriente y Rango Completo de 100 mA. (EJO-1 9F64 Full Range – Fabricante: General Electric).

Cálculos y Justificación:

► Interruptor Termomagnético.

Como el Transformador Elevador Variable Monofásico es una máquina eléctrica estática, entonces los cálculos para seleccionar el Interruptor Termomagnético parten de la potencia eléctrica del transformador.

Datos del Transformador:

- $V_{\text{primario}} = 220 \text{ V Eficaces C.A.}$
- $V_{\text{secundario}} = 39 \text{ KV Eficaces C.A.}$
- $\text{Potencia Aparente (S)} = 1.95 \text{ KVA}$

Calculamos la corriente nominal en el lado primario del transformador según la siguiente fórmula:

$$I_{\text{nominal}} = \frac{S}{V_{\text{primario}}} \dots\dots\dots(3.6)$$

De esta forma se obtiene:

$$I_{\text{nominal}} = \frac{1.95 \cdot 10^3}{220} = 8.86 \text{ A.}$$

Para encontrar la corriente de selección del Interruptor Termomagnético, usamos la siguiente expresión:

$$I_{\text{selección ITM}} = 1.25 \cdot I_{\text{nominal}} \dots\dots\dots(3.7)$$

Obteniéndose:

$$I_{\text{selección ITM}} = 1.25 \cdot I_{\text{nominal}} = 1.25 \cdot 8.86 = 11.08 \text{ A}$$

Se escoge el valor de 15 A. tomando como referencia la tabla de valores comerciales de Interruptores Termomagnéticos del fabricante Merlin Gerin, pues además es el valor comercial más cercano a la corriente de selección calculada anteriormente para el Interruptor Termomagnético.

Se escogió un Interruptor Termomagnético porque combina la protección contra una sobrecarga (acción térmica) en la red eléctrica, y la protección ante un cortocircuito (acción magnética) en el caso que ocurra en el lado primario del transformador.

Otra de las razones por las que se optó por un Interruptor Termomagnético es porque la operación de la Fuente de Alimentación se realizará en forma manual por un especialista en el área de electricidad o electrónica; y de acuerdo a los criterios de diseño, cuando se trata de un conjunto o sistema eléctrico manual, se sugiere emplear un Interruptor Termomagnético en lo que a protección se refiere.

► Fusible.

Dado que el Generador de Impulso, es visto como una carga para la Fuente de Alimentación, entonces se protege la salida de la Fuente con un fusible para evitar que se dañe la misma en caso ocurra un cortocircuito entre la salida de voltaje continuo (V_{DC}) y la referencia (tierra).

Los cálculos para seleccionar el fusible parten por conocer la corriente de salida que entrega el transformador en su lado secundario y que a su vez será la máxima corriente que entregará a la salida la Fuente de Alimentación.

Valiéndonos de los datos del transformador (ver inciso 3.2.1.1) vemos que el dato que nos interesa es la corriente en el lado secundario (50 mA.)

Para encontrar la corriente de selección del fusible, usamos la siguiente relación:

$$I_{\text{selección FUSIBLE}} = 2 * I_{\text{nominal}} \dots\dots\dots (3.8)$$

Obteniéndose:

$$I_{\text{selección FUSIBLE}} = 2 * I_{\text{nominal}} = 2 * 50 * 10^{-3} = 100 \text{ mA}$$

Se escogió un Fusible de Alta Tensión Limitador de Corriente y Rango Completo, pues el voltaje de salida de la Fuente de Alimentación está el orden de los KV (C.D.) y un cortocircuito a ese nivel de tensión puede llegar a ser muy peligroso si el fusible no es capaz de responder adecuadamente.

Un Fusible de Alta Tensión Limitador de Corriente y Rango Completo, está diseñado para la interrupción en corrientes bajas, además de interrumpir un ratio (relación) máximo de corriente.

Para este caso específico se tomó de referencia el modelo comercial: EJO-1 9F64 Full Range, del fabricante General Electric y además este tipo de fusibles son de acción rápida y pueden ser usados interna o externamente sin que se requiera algún encapsulado de protección.

3.2.1.5 Diagrama Esquemático de la Fuente de Alimentación.

El diagrama esquemático de la fuente de alimentación descrita anteriormente, que usará el generador, es el que se muestra a continuación en la figura 3.5.

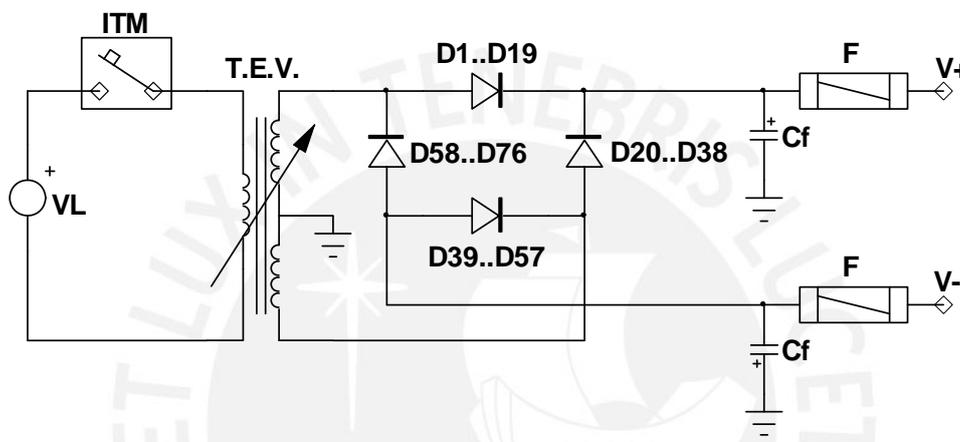


Figura 3.5 Fuente de Alimentación

Donde:

V_L : Voltaje de Línea 220 V Eficaces C.A. a 60 Hz.

T.E.V.: Transformador Elevador Variable 220 V / 39 KV, 2 KVA, 1 Φ .

D₁...D₁₉: Cadena Serie de Diodos de Alta Tensión (5SDD07D6000 de ABB)

D₂₀...D₃₈: Cadena Serie de Diodos de Alta Tensión (5SDD07D6000 de ABB)

D₃₉...D₅₇: Cadena Serie de Diodos de Alta Tensión (5SDD07D6000 de ABB)

D₅₈...D₇₆: Cadena Serie de Diodos de Alta Tensión (5SDD07D6000 de ABB)

C_f: Condensador para filtrado de 1 μ F a 56 KV.

ITM: Interruptor Termomagnético Monofásico de 220 V Eficaces C.A. a 60 Hz. de 15 A.

F: Fusible de Alta Tensión Limitador de Corriente y Rango Completo de 100 mA. (EJO-1 9F64 Full Range)

3.2.2 Descripción del Generador de Impulsos tipo Marx de cuatro etapas

3.2.2.1 Revisión de la posible solución y Justificación de la técnica escogida

3.2.2.1.1 El método de la Bobina de Tesla

Tradicionalmente, el método usado para generar alto voltaje era la Bobina de Tesla [7], cuyo circuito esquemático se muestra a continuación en la figura 3.6.

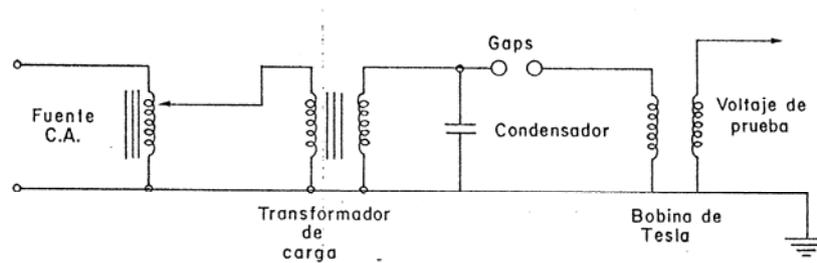


Figura 3.6 Bobina de Tesla.

Durante el funcionamiento, el condensador se carga cada medio ciclo del voltaje de alimentación de la fuente de corriente alterna hasta un nivel en el que ocurre un arco eléctrico entre las esferas (gaps), y entonces el condensador se descarga sobre el arrollamiento primario de la Bobina de Tesla, teniendo como resultado en el punto de salida del arrollamiento secundario (voltaje de prueba), una onda de alto voltaje y de alta frecuencia que ocurre cada medio ciclo del voltaje de alimentación de la fuente de corriente alterna tal como se puede apreciar a continuación en la figura 3.7.



Figura 3.7 Forma de Onda en la Bobina de Tesla

Para el presente tema de estudio, no se usará ésta técnica descrita anteriormente, debido a que la forma de onda obtenida con este método, no se ajusta a la forma de

onda de impulso de tensión tipo rayo normalizada, que establecen las normas [2] [11] para un ensayo de rigidez dieléctrica en materiales poliméricos.

3.2.2.1.2 El Generador de Impulsos tipo Marx

La técnica escogida en la presente propuesta, para realizar las pruebas de alta tensión, es el uso de un generador de impulsos acorde con el ideado y desarrollado por E. Marx, que es con lo que actualmente se llevan a cabo estas pruebas recomendadas por las diferentes normas e instituciones internacionales como la ASTM [2] o la IEC [11]; el cual es un método para la obtención de altas tensiones de prueba a la salida, a partir de una entrada de tensión continua, mediante la carga de condensadores en paralelo y su respectiva descarga en serie por medio de esferas espinterométricas (sphere gaps o spark gaps). A manera de esquema se puede ver a continuación en la figura 3.8.

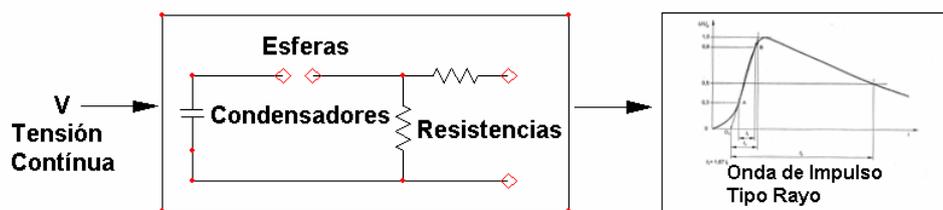


Figura 3.8 Generador de Impulsos tipo Marx.

La aparición del circuito de E. Marx permitió la generación de ondas de impulso de alta tensión con bastante aproximación y además cuenta con la ventaja de controlar la onda de impulso en magnitud y forma; en la actualidad la mayoría de los generadores de impulso que se usan en los laboratorios de alta tensión están contruidos de acuerdo con el circuito de Marx o con circuitos derivados de éste [7].

3.2.2.2 Circuito RC

Del diagrama de bloques (figura 3.4) el sub bloque “Circuito RC” lo conforma un arreglo convenientemente adecuado, de resistencias y condensadores (elementos pasivos) que es propiamente el Generador de Impulsos tipo Marx.

Para pruebas de alta tensión con voltajes elevados, los circuitos generadores de impulso de una sola etapa resultan insuficientes, principalmente por la dificultad y alto

costo que representa el obtener voltajes de corriente directa para carga a valores de voltaje elevados.

Para superar este inconveniente, se usa un circuito rc generador de impulso de cuatro etapas que va acorde con la propuesta original de E. Marx, el cual consta de un conjunto de condensadores (**C**) que se cargan en paralelo a través de resistencias de alto valor (**R**) y se descargan en serie por medio de Esferas Espinterométricas (**E.E.**) al producirse un arco eléctrico entre estas esferas. A continuación en la figura 3.9 se muestra el circuito rc generador de impulso tipo Marx de cuatro etapas.

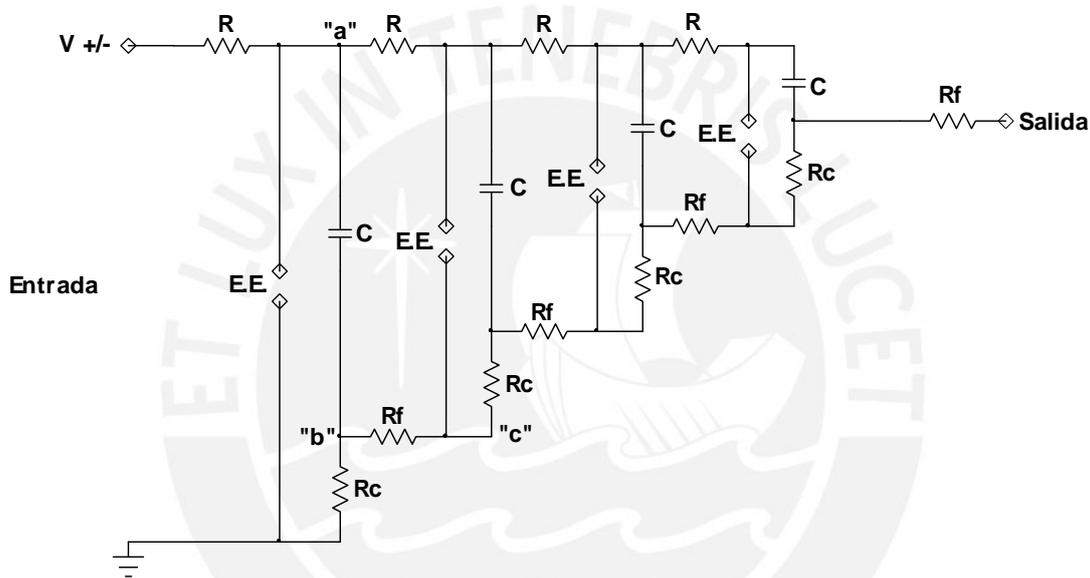


Figura 3.9 Generador de Impulso Tipo Marx de cuatro etapas.

Donde:

R: Resistencia de Carga de $10\text{ K}\Omega$, de alto voltaje y de baja inductancia

C: Condensador de Etapa de $0.75\ \mu\text{F}$ a 56 KV , de baja inductancia para descargas de elevadas corrientes, de tipo: papel impregnado en aceite o dieléctrico seco, montado en recipiente de porcelana o resina sintética.

R_f : Resistencia de frente, de $7.5\ \Omega$, de carbón, de baja inductancia.

R_c : Resistencia de cola, de $85\ \Omega$, de carbón, de baja inductancia.

E.E.: Esferas Espinterométricas (Sphere Gaps o Spark Gaps) de Cobre de 12.5 cm. de diámetro.

El funcionamiento de este circuito rc generador de impulso de cuatro etapas puede ser descrito como sigue a continuación. Todos los condensadores de etapa (**C**), uno en cada etapa, son cargados a un voltaje (**V**) en la entrada respecto a la referencia (tierra); el arco eléctrico que ocurre en el primer arreglo de esferas espinterométricas (**E.E.**), cerca de la entrada de voltaje (**V**), es producido por inyección de voltaje, descargándose así el condensador de etapa (**C**); seguidamente, en el resto de las demás esferas espinterométricas (**E.E.**) ocurren arcos eléctricos, descargando así cada condensador en cada etapa (**C**); el resultado es una acumulación de diferencias de potenciales que van de 0 a “n”.V donde “n” es el número de etapas del generador de impulso (n=4 en este caso), de esta forma idealmente a la salida se tiene la onda de tensión de impulso completa normalizada 1.2/50 μs de amplitud 4V.

Las esferas espinterométricas (**E.E.**) actúan como interruptores; una vez que ocurre el arco eléctrico en el primer par de esferas, el condensador (**C**) se descarga de un nivel de voltaje (**V**) a 0 (véase el nodo “a”); esto representa un cambio de potencial de **-V** y en ese instante el voltaje en el nodo “c” es aproximadamente **-V** dado que la Resistencia frontal **R_f** es baja comparada con la Resistencia de cola **R_c** (véase nodo “b”); dando como resultado una diferencia de potencial de **2V** a la que estará sometido el segundo par de esferas, causando otro arco eléctrico; esta acción descrita antes continúa en la siguiente etapa y arreglo de esferas (y así subsecuentemente si hubieran más etapas); el primer par de esferas es como un gatillo que es disparado por aplicación del pico de voltaje a la carga.

Para calcular el valor de las resistencias frontal **R_f** y de cola **R_c** que son las que fijan los tiempos de frente y de cola de la onda de impulso completa normalizada (véase figura 2.2) se pueden emplear las siguientes relaciones [7] como referencia que en realidad son aproximaciones hechas para el estudio y diseño de un Generador de Impulso tipo Marx.

$$\text{Tiempo de Cola: } t_c \text{ o } t_2 = 0.693 \cdot C \cdot R_c \dots\dots\dots(3.9)$$

$$\text{Tiempo de Frente: } t_f \text{ o } t_1 = f(C, C_g, C_o, R_f) \dots\dots\dots(3.10)$$

Donde:

C: Condensador de Etapa.

C_g: Capacitancia del propio generador.

C_o : Capacitancia del objeto de prueba.

R_f : Resistencia de frente.

R_c : Resistencia de cola.

Para hacer los cálculos se toma en cuenta las siguientes consideraciones:

a.- La resistencia de carga R , del generador de impulso se escogerá lo suficientemente alta en comparación con las otras 2 resistencias (de cola y de frente) de modo que solo cumpla su objetivo en la carga de los condensadores de etapa y no afecte en la descarga de los mismos.

b.- El valor del condensador de etapa C , es un valor fijo y que a partir de ahí debe hacerse los demás cálculos.

c.- El valor de la capacitancia del propio generador C_g es un valor inherente de todo generador de impulso que aparece a la salida del mismo debido a que se trabaja con tensiones del orden los kilovoltios, es de esperarse que aparezca una capacitancia entre la salida y el nivel de referencia o tierra; en forma práctica, es bastante común que esta capacitancia tome un valor del orden de decenas de nanofaradios [7].

d.- La capacitancia del objeto de prueba C_o depende de la aplicación final del generador de impulso, en este caso se trata de un material polímero aislante, el cual tiene una elevada impedancia (del orden de los Gigaohmios) y una alta rigidez dieléctrica, lo que hace complicado estimar exactamente el valor de esta capacitancia; es conocido que todo material tiene propiedades eléctricas y/o dieléctricas, tales como: resistencia, resistividad, conductancia, inductancia, capacitancia, rigidez, etc; muchas veces determinar estas propiedades en forma directa resulta bastante complicado por el mismo hecho de que se necesitaría de equipos especiales y costosos además de específicas condiciones para su medición, pero para el presente estudio se puede considerar que ya que es un material no conductor y no almacena energía significativa, entonces se puede considerar que su capacitancia C_o es lo suficientemente baja en comparación con la capacitancia propia del generador.

e.- Dado que las resistencias de frente R_f y de cola R_c , son las que fijan los tiempos de frente y de cola para la forma de onda estudiada, las fórmulas antes mencionadas son referenciales, el valor final que estas resistencias toman, son obtenidas mediante prueba y error que se hacen en simulaciones del circuito generador de impulso, ya que

debe calibrarse con estas resistencias los tiempos de frente y de cola, para que cumplan con las tolerancias para los tiempos de frente y de cola, dadas por las normas respectivas: ASTM D-3426 [2] - IEC 60243-3 [11], y otros criterios de diseño.

Cálculos:

Considerando lo siguiente:

C: Condensador de Etapa = $0.75 \mu\text{F}$. (por lo expuesto en el inciso b).

C_g : Capacitancia (típica) del propio generador = 15 nF . (por lo expuesto en el inciso c).

C_o : Capacitancia del objeto de prueba, en pF (por lo expuesto en el inciso d), de modo que: $C_g \gg C_o$, entonces: $C_g + C_o \approx C_g$

Se tiene:

Tiempo de Cola = $50 \mu\text{s} \pm 10 \mu\text{s}$; entonces:

Tiempo de Cola Máximo permitido = $60 \mu\text{s}$.

Tiempo de Cola Mínimo permitido = $40 \mu\text{s}$.

Luego, en la fórmula 3.9:

$$40 \cdot 10^{-6} = 0.693 \cdot 0.75 \cdot 10^{-6} \cdot (\text{Resistencia de Cola Mínima}); \text{ de donde:}$$

$$\underline{\text{Resistencia de Cola Mínima} = 76.96 \Omega.}$$

De igual forma, nuevamente en la fórmula 3.9:

$$60 \cdot 10^{-6} = 0.693 \cdot 0.75 \cdot 10^{-6} \cdot (\text{Resistencia de Cola Máxima}); \text{ de donde:}$$

$$\underline{\text{Resistencia de Cola Máxima} = 115.44 \Omega.}$$

Entonces se tiene que:

$$\text{Resistencia de Cola, } R_c \in [76.96 \Omega, 115.44 \Omega].$$

Además se tiene que:

Tiempo de Frente = $1.2 \mu\text{s} \pm 0.36 \mu\text{s}$; entonces:

Tiempo de Frente Máximo permitido = $1.56 \mu\text{s}$.

Tiempo de Frente Mínimo permitido = $0.84 \mu\text{s}$.

Viendo los rangos posibles para los valores que pueden tomar las resistencias de cola y de frente; se escoge un valor de resistencia de carga R, igual a $10 \text{ K}\Omega$, el cual se ve que es mucho mayor que cualquier posible valor que pueda tomar las resistencias mencionadas anteriormente; además está el hecho de que es un valor comercial para la resistencia de carga R.

Tomando como criterio de diseño el hecho de que la resistencia de cola R_c debe ser mucho mayor que la resistencia de frente R_f ($R_f \ll R_c$), para asegurar el correcto funcionamiento del generador de impulso, debido a que se basa en la acumulación de descargas en cada etapa, de modo que cuando ocurra la descarga del condensador de cada etapa por medio de sus respectivas esferas, la corriente fluya principalmente por la resistencia de frente y una pequeña parte de la corriente de descarga fluya a través de la resistencia de cola.

Con todo lo anteriormente descrito, después de hacer pruebas de simulación del circuito generador de impulsos, con los posibles valores que pueden tomar las resistencias de frente y de cola, mediante prueba y error se determinó los siguientes valores luego de varias iteraciones.

- R_f : Resistencia de frente = 7.5Ω .
- R_c : Resistencia de cola = 85Ω .

Cumpléndose así que:

$$R_f \ll R_c \quad (7.5 \Omega \ll 85 \Omega).$$

$$R_c = 85 \Omega \in [76.96 \Omega, 115.44 \Omega].$$

3.2.2.3 Electrodo: Esferas Espinterométricas

Del diagrama de bloques (figura 3.4) el sub bloque “Electrodos” lo conforman juegos de dos esferas espinterométricas convenientemente colocados en el circuito eléctrico, y que son parte importante del Circuito RC Generador de Impulso tipo Marx descrito anteriormente.

Para entender el funcionamiento de las esferas espinterométricas, se debe recordar que consiste en un arco eléctrico que ocurrirá entre estas en un medio gaseoso como es el aire en este caso; las descargas eléctricas en gases dependen de varios factores tales como: tipo de gas, forma de los electrodos, tipo de tensión aplicada, condiciones atmosféricas, entre otros.

En técnicas de alta tensión, el gas más usado es el aire para producir descargas ya que se encuentra libre en la naturaleza y no es necesario someterlo a procesos artificiales como otros dieléctricos.

El tipo de descarga depende de la forma de los electrodos ya que se encuentra directamente relacionada con la formación de campo eléctrico, este campo puede ser homogéneo como es el caso de las esferas o un arreglo de placas paralelas, o no homogéneo como el caso de un arreglo punta-placa, punta-punta o barra-barra, tal como se pueden apreciar seguidamente en la figura 3.10 [4].

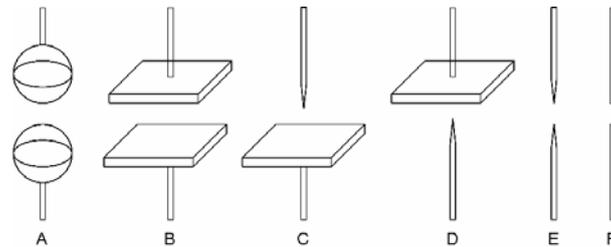


Figura 3.10 Tipos de electrodos.

Con relación a la figura 3.10, se puede distinguir los siguientes tipos de arreglos:

A: Esfera – Esfera
B: Placa – Placa

} Campo Eléctrico Homogéneo.

C: Punta – Placa
D: Placa – Punta
E: Punta – Punta
F: Barra – Barra

} Campo Eléctrico No Homogéneo (Disperso).

Debido a que las condiciones atmosféricas tales como: presión, temperatura, humedad, densidad relativa del aire y altura sobre el nivel del mar, afectan también las descargas eléctricas en un medio como el aire, al variar estos factores, varía también la formación de las descargas, al aumentar la altura sobre el nivel del mar disminuye la presión y aumenta la probabilidad de descarga.

Ya que las esferas espirométricas funcionan como interruptores en el circuito regenerador de impulsos (figura 3.9), estas deben operar en todos los casos (polaridad del impulso positiva o negativa) con una mínima dispersión respecto a un nivel de tensión dado., por ello es que se escoge el arreglo de las esferas porque se presenta una distribución homogénea de campo eléctrico. También puede lograrse con el uso el arreglo de placas paralelas siempre que la descarga se concentre en todo el centro de las placas y no hacia sus extremos; pero a niveles altos de tensión y significativas distancias entre electrodos, la concentración de campo eléctrico se hace notoria en los

extremos (efecto de borde) aumentando así la probabilidad de descarga en esa región y no en el centro, debido al campo eléctrico disperso, lo que conlleva a distorsión en la forma de onda de salida del generador.

El arreglo esfera-esfera no presenta problemas de concentración de campo eléctrico, siempre que la distancia de separación entre las esferas alineadas no supere la mitad del diámetro de las esferas [9], el campo eléctrico se presentará en forma homogénea.

Para encontrar el diámetro de las esferas, basta remitirse a las tablas que aparecen en la norma respectiva [9], pues estas tablas nos dan el diámetro de la esfera (en centímetros) en función de la separación que habrá entre estas (en milímetros) y la tensión de ruptura cuya probabilidad que aparezca es del 50%, según la máxima tensión suministrada por el generador.

Los valores estándar para el diámetro de las esferas fijadas por la norma IEE Std.4 – 1995 [9], se pueden apreciar a continuación en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Diámetros de las esferas.

Diámetros estándares de esferas espinterométricas para impulsos tipo rayo normalizado de polaridad positiva y negativa			
6.25 cm.	12.5 cm.	25 cm.	50 cm.
75 cm.	100 cm.	150 cm.	200 cm.

Cálculos:

Para buscar en las tablas el diámetro de las esferas, se debe comenzar por el cálculo de la tensión máxima que aparecerá en el lado secundario del transformador elevador variable que forma parte de la fuente de alimentación (figura 3.5).

Voltaje eficaz (RMS) en el lado secundario del transformador = 39 KV.

Voltaje máximo en el lado secundario del transformador = $39 \times \sqrt{2}$ KV. = 55.154 KV.

Voltaje continuo promedio en la salida de la fuente (V_{DC}) = ± 54.928 KV.

Partiendo del hecho de que se necesita un valor pico de 197 KV a la salida del generador para poder efectuar el ensayo de rigidez dieléctrica para el material en cuestión (polímero de silicón) basándose en la normas respectivas; se escogió este valor de tensión (39 KV) en el diseño del transformador elevador variable para la fuente de alimentación, pues el valor que se obtiene a la salida de la misma (54.928

KV) cumple con ser el voltaje necesario (en CD) que se requiere a la entrada del Generador de Impulso tipo Marx de cuatro etapas (Figura 3.9) - pues en esencia este generador es un multiplicador de tensión - para que al ser multiplicado este valor (54.928 KV) por cuatro (numero de etapas del generador) se logre con seguridad tener a la salida el valor deseado (197 KV) aún frente a las caídas de tensión que aparecen inevitablemente en todo circuito eléctrico.

Asimismo, cuanto más nivel de tensión se requiera a la salida del generador para efectuar un ensayo como el de rigidez dieléctrica, implica usar un mayor número de etapas en el generador de impulso, pero eso trae como consecuencia que aparezcan sobrepulsos y la consecuente distorsión en la forma de onda a la salida del generador, lo cual hace que esto no sea aceptable para un ensayo normalizado [2] [11] [15].

Se escoge el valor de 12.5 cm. para el diámetro de las esferas según las tablas dadas por la norma respectiva [9], para impulsos tipo rayo de polaridad positiva con una distancia de separación máxima entre las esferas de 20 mm. (2 cm.) y además cumple con que esta distancia de separación es menor que el radio de las esferas (6.25 cm.); otra razón por la que se escogió este diámetro para las esferas, es que en el diseño se considera además que la forma de onda normalizada a la salida del generador puede fijarse para que sea positiva o negativa, ya que por la misma configuración del generador de impulso, éste invierte la polaridad de la forma de onda a la salida, pues es importante señalar que existen tablas dadas por la misma norma [9] para escoger el diámetro de las esferas tanto para impulsos tipo rayo de polaridad positiva como de polaridad negativa, y los valores de tensión pico que aparecen en las tablas suelen diferir en ambos casos; pero para este caso particular coinciden.

A continuación, la figura 3.11 nos da una idea de la forma y disposición física de las esferas espinterométricas que conforman el circuito Generador de Impulso.

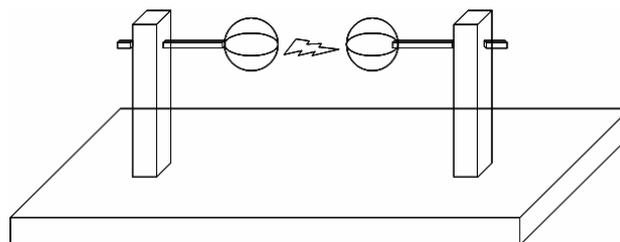


Figura 3.11 Esferas Espinterométricas.

3.2.2.3 Protección: Línea de Tierra

El sub bloque “Protección” del diagrama de bloques (figura 3.4) para el Generador de Impulso (ver figura 3.9), lo conforma una línea de tierra que une el chasis o masa del equipo y que va a un pozo de tierra de muy baja impedancia (menor o igual a 5Ω), este pozo de tierra no debe ser el mismo que el de la instalación, ambiente o laboratorio donde se realice esta prueba. En la figura 3.12 se muestra en forma esquemática, la puesta a tierra del Generador de Impulsos.

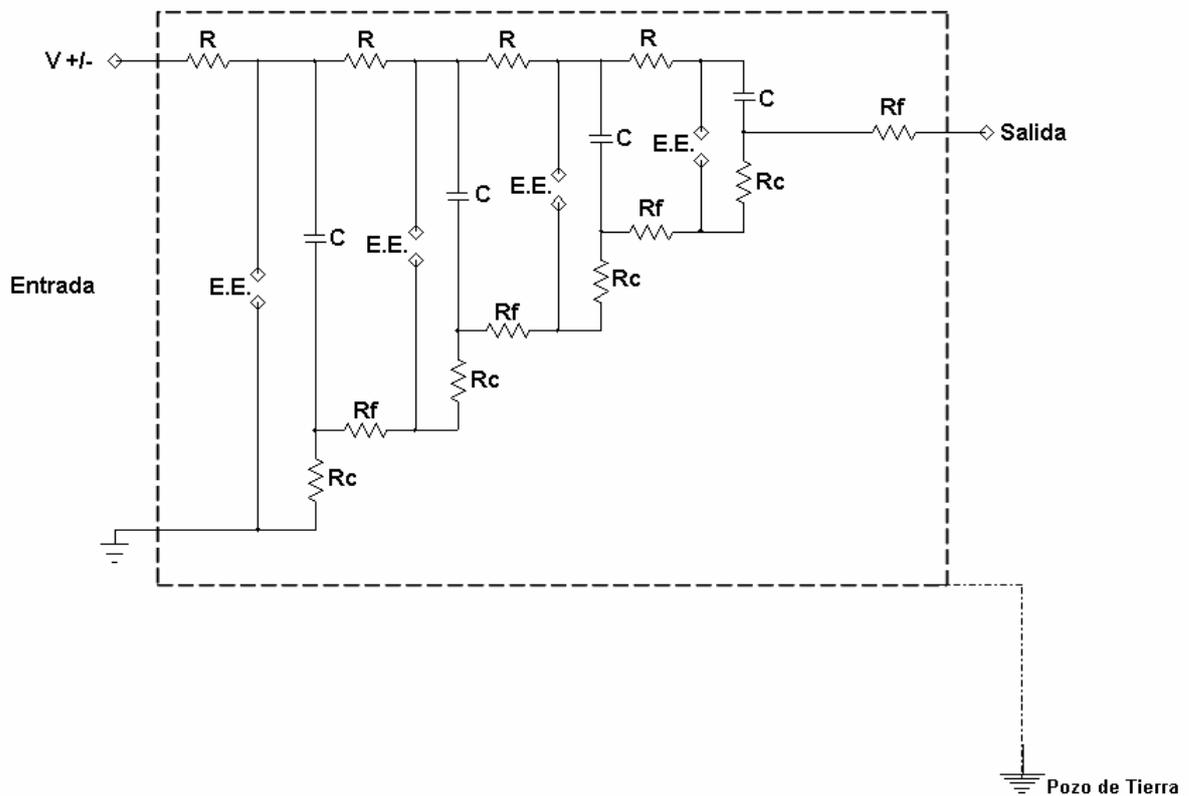


Figura 3.12 Generador de Impulso con línea de puesta a tierra.

Nota:

Debido a que el generador trabaja con elevadas tensiones (en el orden los KV.), es preciso contar con un pozo a tierra independiente y de baja impedancia como se menciona en el párrafo anterior, si este pozo fuese el mismo que para los demás equipos del laboratorio o ambiente donde se efectúa el ensayo, podría resultar perjudicial en caso de que ocurra una descarga, pues ésta puede propagarse también a través de las demás líneas de puesta a tierra que comparten el mismo pozo.

3.3 Diagrama esquemático total de la propuesta.

A continuación en la figura 3.13, se muestra el diagrama esquemático completo de toda la propuesta de diseño, la cual lo conforman la Fuente de Alimentación y el Generador de Impulso tipo Marx de cuatro etapas.

Es importante mencionar que el laboratorio o sala donde se efectúe este tipo de prueba/ensayo, debe contar con su pozo o malla de tierra independiente, además de tener su respectivo tablero de distribución para los demás equipos que se usen en el mismo, y contar con extintores de fuego.



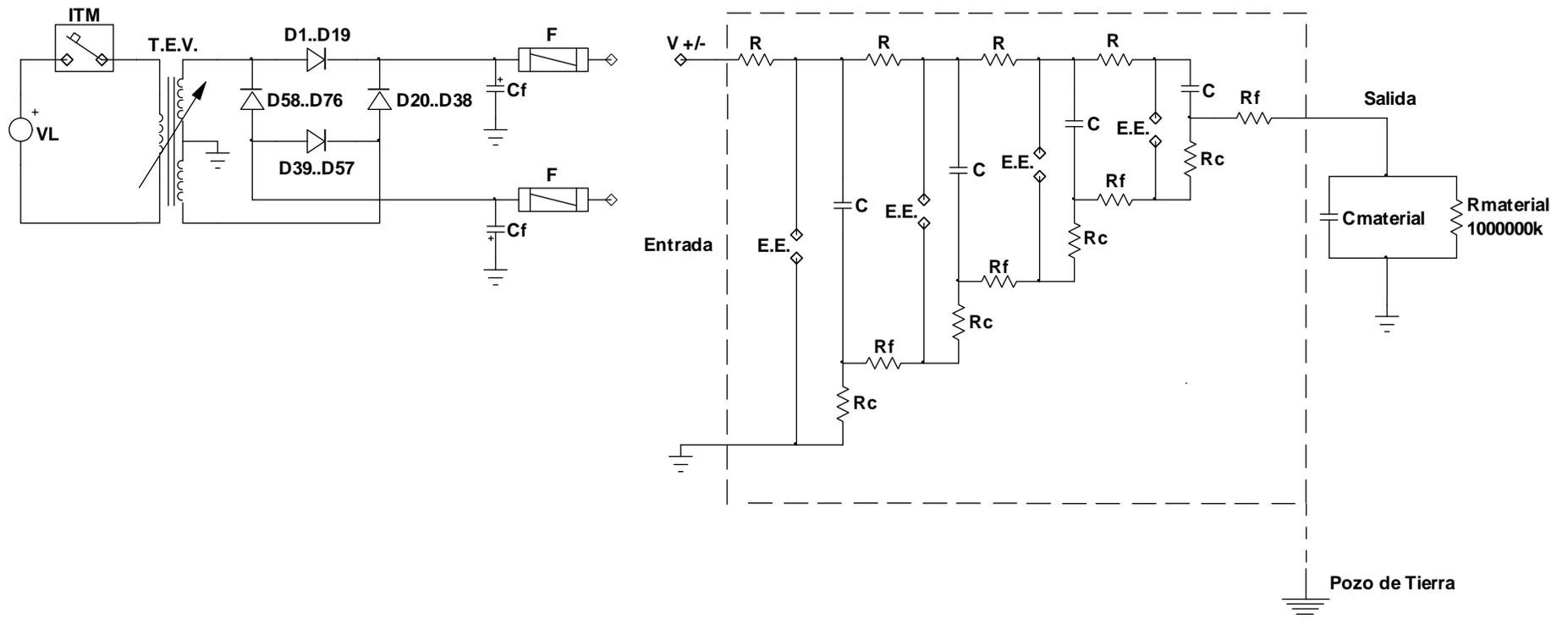


Figura 3.13 Diagrama Esquemático Completo: Fuente de Alimentación y Generador de Impulsos tipo Marx de cuatro etapas.

CAPÍTULO 4: SIMULACIONES Y COSTOS.

4.1 Simulaciones.

4.1.1 Consideraciones.

El Circuito RC Generador de Impulso tipo Marx de cuatro etapas (figura 3.9) fue simulado usando el software académico SPICE ICAP/4 de INTUSOFT. Para efectos de simulación, las esferas espinterométricas (“sphere gaps” o “spark gaps”) han sido representadas como un cable o cortocircuito con el fin de representar el instante de las descargas de los condensadores de etapas (arcos eléctricos), considerando como condición inicial las cargas de los condensadores de etapas, pues como se describió anteriormente cada condensador de etapa se carga a un nivel de voltaje de entrada (“V” positivo o negativo) y esto se hace durante un tiempo grande (varios segundos) que viene a ser como una suerte de “cebado” de los condensadores de etapa, para que después se descarguen mediante los arreglos de esferas en cada etapa y tener a la salida la forma de onda deseada con el nivel pico de tensión de prueba requerido.

Para la simulación también se ha incluido la capacitancia propia del generador C_g y a la salida del mismo se ha representado a la carga, que en este caso es un espécimen de prueba del material escogido (polímero de silicón), como una resistencia de valor muy grande en paralelo con su capacitancia propia de objeto, tal como lo muestra a continuación la figura 4.1.

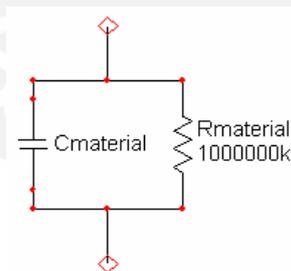


Figura 4.1 Modelo eléctrico del espécimen de prueba.

Se hará la simulación tanto para una entrada de voltaje (carga inicial de los condensadores) positiva como negativa para apreciar que por la forma misma del generador, éste a la salida invierte la polaridad de la tensión continua con la que se cargan sus condensadores de etapas, es decir: si se cargan los condensadores a un voltaje positivo, la polaridad de la forma de onda tipo rayo normalizada $1.2/50 \mu\text{s}$ a la salida será negativa y viceversa.

A continuación en la figura 4.2, se muestra el circuito rc esquemático del generador de cuatro etapas incluyendo la capacitancia propia del generador (típicamente toma un valor de 15 nF.) [7] y el modelo eléctrico del espécimen de prueba a manera de carga, a la salida del generador.

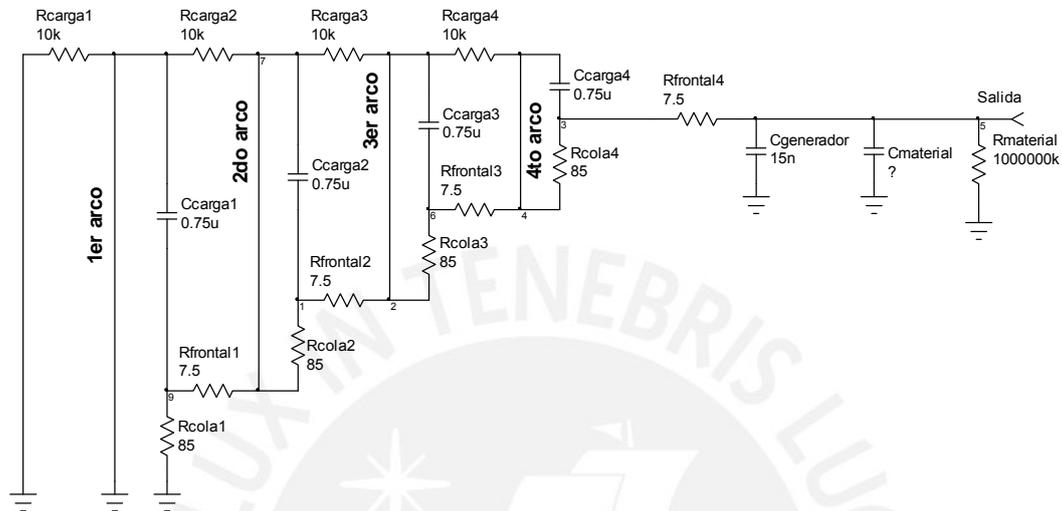


Figura 4.2 Circuito esquemático en SPICE incluyendo el modelo eléctrico completo del espécimen de prueba.

Debido a que estimar el valor de la capacitancia del espécimen de prueba del material (polímero de silicón) en forma directa resulta complicado por el hecho de requerir equipos y condiciones especiales de prueba, se usará el hecho de que como esta capacitancia está en paralelo con la capacitancia propia del generador y que además la capacitancia del espécimen de prueba, es mucho menor que la capacitancia propia del generador, por las consideraciones expuestas en los cálculos de los componentes del generador, entonces por asociación de condensadores en paralelo, la que predomina y la que queda para efectos de simulación, es la capacitancia propia del generador.

En la figura 4.3, se muestra el diagrama esquemático del Generador de Impulso tipo Marx de cuatro etapas hecho en SPICE incluyendo la simplificación anteriormente descrita, con las condiciones iniciales de carga de condensadores de etapa igual a -54.928 KV, que es la tensión continua obtenida a la salida de la Fuente de Alimentación (figura 3.5), y que viene a ser la entrada "V" en el generador.

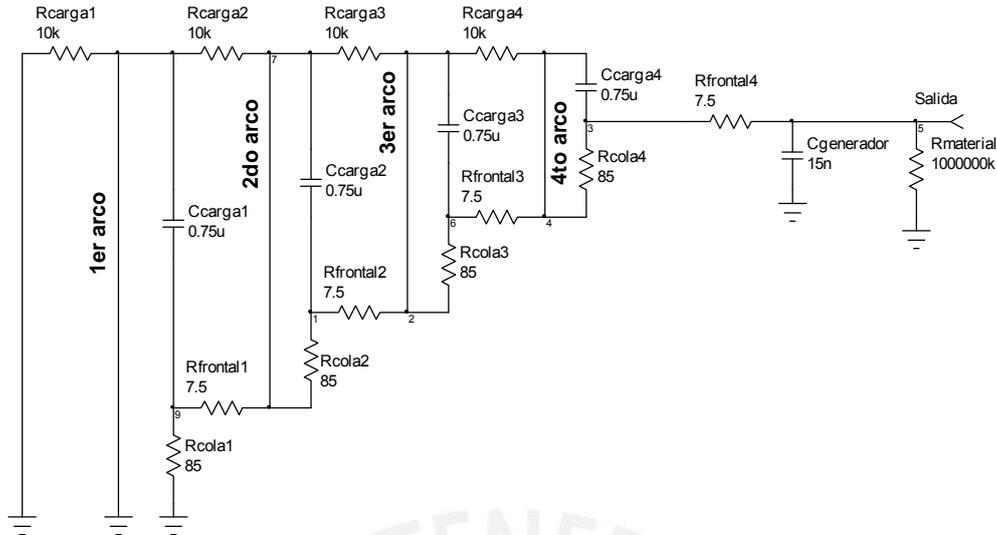


Figura 4.3 Circuito esquemático en SPICE incluyendo la simplificación de las capacitancias para la simulación.

Nota:

Tal como ya se describió anteriormente en las figuras 4.2 y 4.3, se han representado a los arcos eléctricos que ocurren entre las esferas espirométricas, como cables o cortocircuitos, sólo para fines de simulación y representar el instante en que los condensadores se descargan por medio de estas esferas.

4.1.2 Simulación: Impulso de Tensión Positivo.

Luego de hacer la simulación respectiva, se obtuvo la gráfica que se muestra a continuación en la figura 4.4.

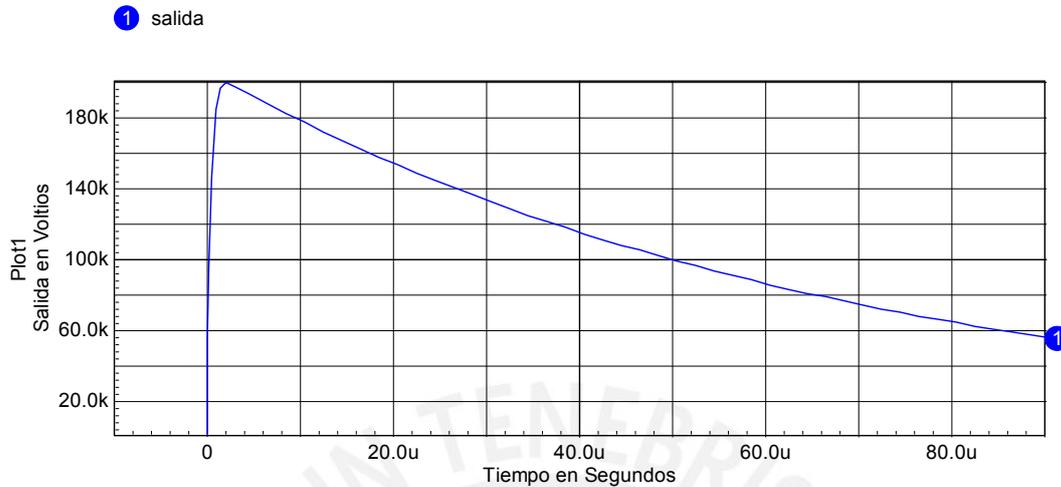


Figura 4.4 Gráfica de Salida en la simulación para tensión de alimentación negativa.

De este gráfico obtenemos los siguientes valores:

Nivel de Voltaje Máximo = 197.766 KV.

Tiempo de Cola, t_c o t_2 , al 50% del Nivel de Voltaje Máximo (98.883 KV.) = **49.731 μ s.**

Tiempo al 90%, $t_{90\%}$ del Nivel de Voltaje Máximo (177.989 KV.) = 882.578 ns.

Tiempo al 30%, $t_{30\%}$ del Nivel de Voltaje Máximo (59.330 KV.) = 145.852 ns.

Ahora calculamos el tiempo de frente t_f o t_1 , tal como lo establece las normas [2] [11]:

$$\text{Tiempo de frente} = 1.67 \cdot (t_{90\%} - t_{30\%}) \dots\dots\dots(4.1)$$

$$\text{Tiempo de frente} = 1.67 \cdot (882.578 \cdot 10^{-9} - 145.852 \cdot 10^{-9}) = \mathbf{1.230 \mu s.}$$

De lo anterior se ve que tanto los tiempos de cola y de frente son lo bastante aproximados a los que fijan las normas [2] [11], y están dentro de los rangos permitidos para una onda tipo rayo normalizada.

Idealmente se espera que en un Generador de Impulso tipo Marx de “n” etapas, si la entrada de voltaje de carga es de V, la salida sea “n”V, viendo los resultados anteriores podemos apreciar que siempre se presentan caídas de tensión propias en todo circuito.

En este caso si la entrada es $V = 54.928 \text{ KV}$. (olvidándonos del signo momentáneamente), se esperaría a la salida del generador, un nivel de tensión igual a cuatro veces el valor anterior, osea de 219.712 KV ., pero vemos que el nivel de tensión máximo a la salida es igual a 197.766 KV ., entonces se ve que ha habido una caída de tensión de 21.946 KV .

De esto último, calculemos la eficiencia de este generador de cuatro etapas como:

$$\eta = \left(\frac{\text{Tensión de Salida Máxima}}{\text{Tensión de Salida Ideal}} \right) \times 100\% \dots\dots\dots(4.2)$$

Con los datos obtenidos, al reemplazar se obtiene que:

$$\eta = \left(\frac{197.766 \text{ KV}}{219.712 \text{ KV}} \right) \times 100\%$$

$$\eta = 90.011 \%$$

Esto quiere decir que el Generador de Impulso tipo Marx de cuatro etapas propuesto tiene una eficiencia del 90.01%, lo cual es de esperarse pues la eficiencia de los generadores de impulso modernos están en el orden de 90% para pruebas de impulso tipo rayo y 75% para pruebas de impulso tipo maniobra de interruptores [7].

Nota: Las condiciones atmosféricas afectan las descargas eléctricas en un medio como el aire, debe introducirse un factor de corrección adimensional “k” [4] que afecta el valor final de voltaje de descarga a la salida del generador y que es finalmente lo que recibe la carga, que en este caso es un espécimen de prueba del material escogido (polímero de silicón).

Como la ciudad de Lima esta ubicada en la costa centro del Perú, prácticamente su altura sobre el nivel del mar no afecta muy significativamente el valor final de la descarga, pues su altura sobre el nivel del mar es aproximadamente 25 metros, el factor de corrección adimensional “k” [4] es muy cercano a la unidad. También se debe tener en cuenta que como el clima en la ciudad de Lima es predominantemente húmedo, favorece a las descargas eléctricas como lo que trata este presente estudio, pues las moléculas de agua están libres en el aire, no siendo el caso si se tratase de un clima seco como ocurre en la sierra peruana.

Entonces, remitiéndonos a la fórmula 2.2, se tiene que:

$$k = \frac{1}{1 + (1.25 \times 10^{-4}) \times 25} = 0.997$$

De donde:

→ Valor corregido de Tensión Máxima Final = $197.766 \text{ KV} \times 0.997 = \underline{197.173 \text{ KV}}$.

Ahora se hará la simulación para una entrada de voltaje (carga inicial de los condensadores) positiva con el mismo circuito esquemático de la figura 4.3, para comprobar que por la misma forma del generador, a la salida se tendrá una forma de onda tipo rayo normalizada 1.2/50 μs de polaridad negativa.

4.1.3 Simulación: Impulso de Tensión Negativo.

La figura 4.5 muestra el resultado de la simulación del Generador de Impulso tipo Marx de cuatro etapas, con las condiciones iniciales de carga de condensadores de etapa igual a 54.928 KV, que es la tensión continua obtenida a la salida de la fuente de alimentación, y que es la entrada "V" del generador.

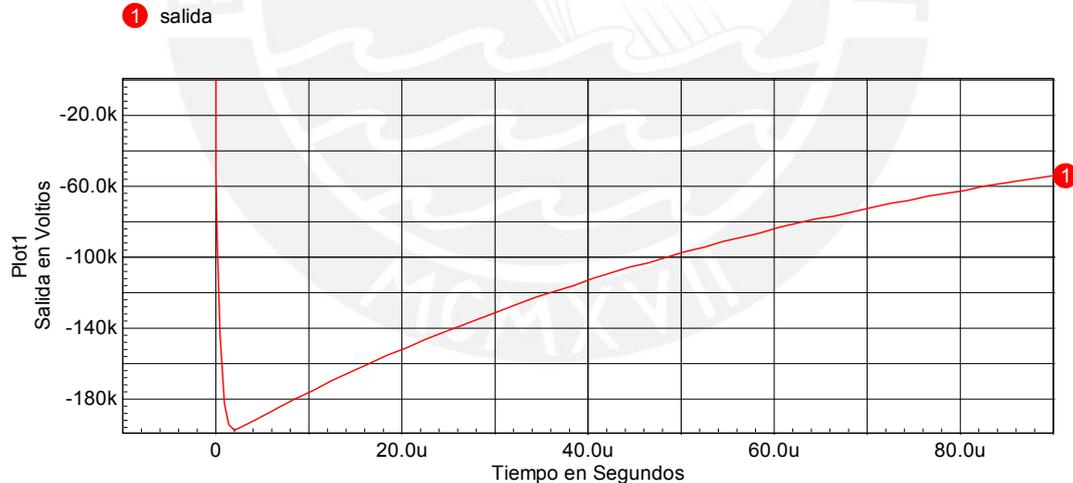


Figura 4.5 Gráfica de Salida en la simulación para tensión de alimentación positiva.

Análogamente al caso anterior, de este gráfico obtenemos los siguientes valores:

Nivel de Voltaje Máximo Negativo = -197.766 KV

Tiempo de Cola, t_c o t_2 , al 50% del Voltaje Máximo Negativo (-98.883 KV .) = $49.731 \mu\text{s}$.

Tiempo al 90%, $t_{90\%}$ del Nivel de Voltaje Máximo Negativo (-177.989 KV) = 882.578 ns.

Tiempo al 30%, $t_{30\%}$ del Nivel de Voltaje Máximo Negativo (-59.330 KV) = 145.852 ns.

Similarmente al caso anterior, calculamos el tiempo de frente t_f o t_f , tal como lo establecen las normas [2] [11], valiéndonos de la fórmula 4.1, se obtiene que:

$$\text{Tiempo de frente} = 1.67 \cdot (882.578 \cdot 10^{-9} - 145.852 \cdot 10^{-9}) = \underline{\underline{1.230 \mu\text{s}}}.$$

De lo anterior también se ve que tanto los tiempos de cola y de frente son lo bastante aproximados a los que fijan las normas [2] [11], y están dentro de los rangos permitidos para una onda tipo rayo normalizada al igual que el caso anterior.

Igual que el caso anterior, la eficiencia es: $\eta = 90.01\%$ y el factor de corrección adimensional "k" es 0.997, por lo que el valor corregido de tensión negativa máxima final es: $-197.766 \text{ KV} \cdot 0.997 = -197.173 \text{ KV}$.

4.1.4 Simulación: Corriente de Descarga.

Luego de ver y analizar las gráficas de simulación para ambos casos de impulso de tensión (positivo y negativo), ahora se analizará como se presenta la corriente durante el funcionamiento (descarga) en el generador. Antes se mencionó que aunque la corriente entregada la fuente de alimentación (por diseño) es baja (en el orden de los miliamperios), las corrientes que se presentan justo en el instante en el que los condensadores de etapas se descargan por medio de las esferas espinterométricas (spark gaps o sphere gaps) en forma de arcos eléctricos, son bastante elevadas.

Debido a esto, los componentes del circuito rc generador de impulso (resistencias y condensadores) son diseñados y fabricados específicamente para poseer bajos niveles de inductancia [7] y así buscar que no se produzcan sobrevoltajes (en el orden los KV.) en el circuito ya que puede ser muy riesgoso.

Para mostrar lo que se viene describiendo, se toma nuevamente como circuito para la respectiva simulación el de la figura 4.3, y se elige (por ejemplo) el caso de impulso de tensión positivo, con las condiciones iniciales de carga de condensadores de etapa igual a -54.928 KV. Luego de hacer la simulación, se obtuvo la gráfica que se muestra a continuación en la figura 4.6.

1 iy2



Figura 4.6 Corriente en el condensador de etapa en el instante de su descarga

Del gráfico anterior, se puede ver que el nivel pico transitorio de corriente que alcanza el condensador de etapa justo en el instante de su descarga, es de 9.216 KA. Tal intensidad de corriente aunque de muy corta duración, resulta bastante peligrosa si no se cuenta con un condensador de buena calidad y específico para una aplicación como esta.

4.1.5 Energía de Salida entregada por el Generador.

Adicionalmente calcularemos la cantidad de Energía de Salida que entrega el Generador [7], pues en el caso de los Generadores de Impulso tipo Marx, se acostumbra a expresar este parámetro en Joules y no en Watts. En forma práctica se puede calcular como:

$$E = \frac{1}{2} \cdot C_g \cdot V^2 \tag{4.3}$$

Donde:

C_g: Capacitancia Propia del Generador.

V: Tensión Corregida Máxima.

Con los datos anteriores se obtiene:

$$E = \frac{1}{2} \cdot (15 \cdot 10^{-9}) \cdot (197.173 \cdot 10^3)^2 = 291.579 \text{ J.}$$

Nota: Las normas respectivas: ASTM D-3426 [2] – IEC 60243-3 [11], no hacen referencia alguna a niveles de energía.

4.2 Resumen y Consideraciones.

4.2.1 Resumen de las características de la propuesta de diseño.

Seguidamente, elaborando un resumen de la propuesta de diseño y de las simulaciones hechas en el presente tema de estudio para el caso del polímero de silicón; queda tal como se muestra a continuación en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Resumen.

FUENTE DE ALIMENTACIÓN	
Tipo	C.A. / C.D.
Características	Variable – Bipolar
Voltaje de Entrada	220 V Eficaces a 60 Hz.
Voltaje Máximo de Salida	54.928 KV C.D.
Corriente Máxima de Salida	50 mA.
Potencia Máxima Disipada	1.7 KW.
Protección a la Entrada	I.T.M. 220 V Eficaces a 60 Hz. 15 A.
Protección a la Salida	Fusible de Alta Tensión Limitador de Corriente y Rango Completo de 100 mA.
GENERADOR DE IMPULSO TIPO MARX	
Tipo	Bipolar
Característica	Inversor de Polaridad
Tensión Continua de Carga	54.928 KV C.D.
Número de Etapas	4
Tipo de Electrodo	Esferas
Diámetro de las Esferas	12.5 cm.
Separación máxima entre Esferas	20 mm. (2 cm.)
Tensión Máxima de Impulso	197.766 KV
Factor de Corrección ("k")	0.997
Tensión Corregida Máxima de Impulso	197.173 KV
Capacitancia Propia	15 nF.
Eficiencia (η)	90.011%
Energía de Salida	291.579 J
Protección	Línea de Tierra

Tabla 4.1 Resumen (Continuación)

SIMULACIONES	
Tipo de Onda	Impulso
Forma de Onda	Exponencial
Característica	Rayo Normalizada: 1.2/50 μ s
Tiempo de Frente de la Onda, Mínimo Fijado	0.84 μ s
Tiempo de Frente de la Onda, Máximo Fijado	1.56 μ s
Tiempo de Cola de la Onda, Mínimo Fijado	40 μ s
Tiempo de Cola de la Onda, Máximo Fijado	60 μ s
Tiempo de Frente de la Onda, Obtenido	1.230 μ s
Tiempo de Cola de la Onda, Obtenido	49.731 μ s
Tensión Ideal a la salida del Generador	+/- 219.712 KV
Tensión Obtenida a la salida del Generador	+/- 197.766 KV

4.2.2 Consideraciones prácticas de diseño.

Algunas consideraciones prácticas [7] que se deben tener en cuenta para el estudio y diseño de un Generador de Impulso tipo Marx de “n” etapas son las siguientes:

a.- La cantidad de energía disponible a la salida de un generador depende del propósito para el cual será usado, por ejemplo, un generador de impulso para prueba de cables de poder, deberá tener una energía mucho mayor que uno usado en pruebas de esfuerzos dieléctricos de aisladores.

b.- En general, los condensadores de etapas usados en generadores de impulso son diseñados especialmente para éste propósito, esto se debe a que las etapas de carga pueden ser tan altas en el orden de KV. y el comportamiento de rápida descarga requiere de condensadores de alta calidad. El tipo de condensador más frecuentemente usado es el condensador de papel impregnado en aceite montado en un recipiente de porcelana o resina sintética.

c.- Las resistencias dentro del generador de impulso están diseñadas para tener una baja inductancia y en generadores de impulso grandes se usan resistencias de carbón, en caso de requerir resistencias externas al generador puede usarse también carbón o bobinas de alambre sobre asbesto.

d.- Con voltajes que se elevan a razón de $KV/\mu s$, la corriente se eleva a razón de $KA/\mu s$, con tales variaciones hasta los pequeños valores de inductancia en el circuito producen voltajes del orden los KV. por esta razón se recomienda que tanto los condensadores como las resistencias del generador de impulso sean de baja inductancia para una aplicación como esta.



4.3 Costo de componentes para la Fuente de Alimentación.

Tabla 4.2 Costes para la Fuente de Alimentación.

DESCRIPCIÓN	UNIDADES	PRECIO UNITARIO	SUB-TOTAL
Transformador Elevador Variable Monofásico 220 V/39 KV Eficaces C.A., 60 Hz.,2 KVA	1	\$ 400.00	\$ 400.00
Diodo de Alta Tensión (5SDD07D6000 - ABB)	76	\$ 95.00	\$ 7220.00
Condensador para filtrado de 1 μ F - 56 KV	2	\$ 50.00	\$ 100.00
Interruptor Termomagnético Monofásico 220 V Eficaces C.A. - 60 Hz. - 15 A.	1	\$ 10.00	\$ 10.00.
Fusible de Alta Tensión-Limitador de Corriente-Rango Completo de 100 mA.	2	\$ 35.00	\$ 70.00
			TOTAL
			\$ 7800.00

4.4 Costo de componentes para el Generador de Impulso.

Tabla 4.3 Costes para el Generador de Impulso tipo Marx.

DESCRIPCION	UNIDADES	PRECIO UNITARIO	SUB-TOTAL
Resistencia de carga de 10 K Ω , de baja inductancia	4	\$ 245.00	\$ 980.00
Condensador de etapa de 0.75 μ F , 56 KV, de baja inductancia para descargas de elevadas corrientes de tipo: papel impregnado en aceite o dieléctrico seco, montado en recipiente de porcelana o resina sintética	4	\$ 475.00	\$ 1900.00
Resistencia de 7.5 Ω , de carbón, de baja inductancia	4	\$ 85.00	\$ 340.00
Resistencia de 85 Ω , de carbón, de baja inductancia	4	\$ 185.00	\$ 740.00
Esfera Espinterométrica (Sphere Gap o Spark Gap) de Cobre de 12.5 cm. de diámetro	8	\$ 100.00	\$ 800.00
			TOTAL
			\$ 4760.00

- Costo del estudio.- \$ 1000.00

➔ Costo total: \$ 13 560.00 (Dólares Americanos).

Nota: Tanto para la Fuente de Alimentación como el Generador de Impulso tipo Marx, los precios no incluyen IGV, porque la mayoría de los componentes en ambos casos son importados y costosos por el mismo hecho de que son de aplicación específica y no muy comerciales.

CONCLUSIONES.

1.- Se ha expuesto y explicado formalmente el estudio de una propuesta de diseño de un Generador de Impulso de Tensión tipo rayo normalizado $1.2/50 \mu\text{s}$ acorde con la Teoría de E. Marx, y tomando como consideraciones de diseño lo estipulado en las normas respectivas: ASTM D-3426 [2] – IEC 60243-3 [11] para un ensayo de rigidez dieléctrica de tipo destructivo para un material polímero de silicón.

2.- Tal como se vio en la sección 3.2.2.3, hay más de un tipo de electrodos que puede ser usado en el diseño del generador de impulso, pero el más adecuado es el de las esferas espinterométricas, por que proporciona menos dispersión y más concentración de campo eléctrico, evitando así tener mayores inconvenientes en cuanto a distorsión de la forma de onda establecida por las normas ASTM D-3426 [2] – IEC 60243-3 [11].

3.- De lo mostrado en la sección 4.1.2, los tiempos de frente y cola de la forma de onda de salida del generador, obtenidos de la simulación, son respectivamente: $1.230 \mu\text{s}$ y $49.731 \mu\text{s}$; estos son lo bastante aproximados y están dentro de los rangos establecidos para los tiempos de frente y cola que fijan las normas ASTM D-3426 [2] – IEC 60243-3 [11] ($1.2 \pm 0.36 \mu\text{s}$ y $50 \pm 10 \mu\text{s}$ respectivamente). Asimismo, el valor de tensión a la salida del generador, también obtenido de simulación, es 197.766 KV. , y es suficiente para llevar a ruptura dieléctrica al polímero de silicón.

4.- Según lo expuesto en la sección 4.1.4, aún cuando se diseñó la fuente de alimentación, para entregar un nivel promedio alto de tensión (54.928 KV) con baja salida en corriente (50 mA.), y así poder cargar el generador, en la simulación se obtiene que la corriente pico de descarga que aparece justo en el instante en que los condensadores del generador se descargan, es de 9.216 KA . Tal intensidad de corriente, aún cuando es de muy corta duración, es muy riesgosa si los componentes del generador no se diseñan para poseer bajos niveles de inductancia, pues podrían producir mayores sobrevoltajes.

5.- La mayoría de los componentes para este proyecto son importados, costosos y no muy comerciales por el hecho de que son para aplicaciones muy específicas, siendo esto la mayor desventaja (elevados costes de implementación). La principal ventaja de la presente propuesta es que el Generador de Impulso tipo Marx es modular y escalable, es decir: Que si se desea tener a la salida del generador, una tensión de prueba mayor o menor, basta con aumentar o disminuir etapas en el generador.



RECOMENDACIONES.

1.- Para obtener una adecuada forma de onda a la salida del generador y consecuentemente ensayos cada vez mejores, se recomienda alimentar la Fuente de Alimentación del Generador de Impulso, con una tensión de línea (C.A.) preferentemente con baja cantidad de armónicos, ya que estos pueden distorsionar la forma de onda que se desea obtener a la salida, pudiéndose presentar oscilaciones o sobreimpulsos, lo cual hace que no sea aceptable en un ensayo de rigidez dieléctrica tal como lo indican las normas ASTM e IEC respectivas.

2.- Aunque ninguna de las normas ASTM e IEC mencionadas lo señalan, al momento de hacer este tipo de ensayo destructivo, deben tomarse las respectivas medidas de seguridad en el laboratorio donde se lleve a cabo la prueba; como el hecho de que sea un ambiente amplio, que los especialistas que realizan y/o supervisan las pruebas usen vestimenta apropiada, que cuando el equipo este funcionando las personas estén distanciadas prudencialmente del mismo puesto que se está trabajando con descargas eléctricas. Además también debe considerarse aspectos de seguridad para los equipos de medición y lectura, por ejemplo: En el caso de un osciloscopio que registre la forma de onda a la salida del generador, este no debe ser conectado directamente a los electrodos de salida, sino que debe usarse un divisor de tipo resistivo – capacitivo, para reducir el nivel de tensión de salida a una escala tolerable para el osciloscopio y así evitar daños al instrumento de medición.

FUENTES

[1] American Society for Testing and Materials (ASTM)

2005 Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage and Dielectric Strength of Solid Electrical Insulating Materials at Commercial Power Frequencies
Standard N°: D 149

[2] American Society for Testing and Materials (ASTM)

2005 Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage and Dielectric Strength of Solid Electrical Insulating Materials Using Impulse Waves
Standard N°: D 3426

[3] Apéndice 4

Aislamiento de Máquinas Eléctricas

<http://www.ing.unlp.edu.ar/sispot/libros/cme/vol-03/2apend4/cm-a04a.htm>

[4] BEDOYA, Duvier y ABEL, Francisco
(2004) Diseño

y Construcción de un Espinterómetro para un Generador de Impulso de Alta Tensión.

Parte I: Fundamentos. Scientia et Technica Año X. No 26

UTP. ISSN 0122-1701

<http://www.utp.edu.co/php/revistas/ScientiaEtTechnica/docsFTP/958257-11.pdf>

[5] Boylestad, Robert L.

L. Nashelsky

(1999)

Electrónica: Teoría de Circuitos

Prentice-Hall Hispanoamericana S.A.

México

[6] Dorf, R. C.

(1993)

The electrical engineering handbook

CRC Press

U.S.A

[7] Enríquez Harper, G.

(1990)

Técnica de las altas tensiones

Limusa

México

[8] HAEFELY

Haefely Test Ag, Premium Solutions in High-Voltage, Electrical Engineering and Electronics. Products.

http://www.haefely.com/10_products/10_impulse_voltage_testing.php

[9] Institute of Electrical and Electronics Engineers

Standard 4 – 1995

Standard Techniques for High-Voltage Testing.

[10] International Electrotechnical Commission (IEC)

Electrical strength of insulating materials

Test Methods

Part 1: Tests at power frequencies

IEC 60243-1

1998-01 Second Edition

[11] International Electrotechnical Commission (IEC)

Electrical strength of insulating materials. Test Methods.

Part 3: Additional requirements for 1.2/50 μ s impulse test.

IEC 60243-3

2001-07 Second Edition

[12] Klaus, M. G.

2005 Load range extension methods for lightning impulse testing with high voltage impulse generators.

Haefely Test AG, Basel, Switzerland

www.haefely.com

[13] León Ojeda, J.

Ensayos HiPot. : Tensión Alterna vs. Tensión Continua

ENSAYOS AC VS DC.doc

<http://orbita.starmedia.com/~leonojeda/hipot.htm>

[14] MEGGER

JONES, D.

JOWERR, J.; THOMSON, S.; DANNER, D.

2003 Guía para Pruebas de Diagnóstico de Aislamiento
5kVTestingBook_AG_sp_V01.pdf

<http://www.megger.com>

[15] Rodewald, A.

E. Haefely

Transient Phenomena in the Marx Multiplying Circuit after Firing the First Coupling Spark Gap

Haefely Publication

Vol. 60, N° 2, p. 37 – 44.

[

16] Wikipedia: La Enciclopedia Libre

<http://www.wikipedia.com>