

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**MODELACIÓN, SIMULACIÓN Y PRUEBAS DE AISLADORES EN
EL SOFTWARE EMTP-RV**

**MODELACIÓN, SIMULACIÓN Y PRUEBA DEL AISLADOR TIPO
PIN PARA 6.3 kV EN EL SOFTWARE EMTP-RV.**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA ELÉCTRICA**

DIANA CRISTINA LÓPEZ ESPINOZA

DIRECTOR: FABIÁN ERNESTO PÉREZ YAULI

DMQ, febrero, 2023

CERTIFICACIONES

Yo, DIANA CRISTINA LÓPEZ ESPINOZA declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.



DIANA CRISTINA LÓPEZ ESPINOZA

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por DIANA CRISTINA LÓPEZ ESPINOZA, bajo mi supervisión.



DR. FABIÁN ERNESTO PÉREZ YAULI

DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

DIANA CRISTINA LÓPEZ ESPINOZA

DR. FABIÁN ERNESTO PÉREZ YAULI

DEDICATORIA

A mis padres, mis hermanos y mi hermana.

AGRADECIMIENTO

A todas las personas que nunca me dejaron rendirme y confiaron en mi, este es nuestro resultado. ¡Gracias!

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
RESUMEN.....	VII
ABSTRACT.....	VIII
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 OBJETIVO GENERAL	2
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
1.3 ALCANCE.....	3
1.4 MARCO TEÓRICO	4
1.4.1 INTRODUCCIÓN AL AISLADOR ELÉCTRICO	4
1.4.1.2 Modelo estático de un aislador.....	8
1.4.1.3 Modelo dinámico del aislador eléctrico.....	11
1.4.1.4 Curva voltaje vs tiempo.....	11
1.4.1.5 Efecto corona en aisladores	12
1.4.2 PRUEBAS Y ENSAYOS	13
1.4.3 ESTÁNDARES DE FABRICACIÓN Y ENSAYOS ELÉCTRICOS A AISLADORES.....	15
1.4.4 CRITERIOS DE ACEPTACIÓN	15
1.4.4.1 Estándar ANSI C29.6 y NTC-ISO 28591	15
1.4.4.2 Método de Montecarlo.....	16
2 METODOLOGÍA	18
2.3 SOFTWARE EMTP-RV	18
2.4 INTERPRETACIÓN DEL ESTÁNDAR ANSI C29.6 Y ANSI 29.1	18
2.5 MODELACIÓN DEL AISLADOR.....	22
2.5.1 MODELACIÓN DEL AISLADOR EN UNA RED ELÉCTRICA	22
2.5.2 MODELACIÓN DEL CIRCUITO EXPUESTO A ENSAYOS ELÉCTRICOS.....	22
2.6 ENSAYOS A AISLADORES	26
2.6.1 CUMPLIMIENTO E INCUMPLIMIENTO DE LOS AISLADORES ANTE ENSAYOS ELÉCTRICOS.....	26
2.6.2 RESULTADOS PROVENIENTES DE EMTP-RV	27
3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	29
3.1 Resultados.....	29

3.1.1	Resultados del sistema de prueba en la red de medio voltaje	29
3.1.2	Resultados del sistema para ensayos de flameo a baja frecuencia en seco, según ANSI C29.6	30
3.1.3	Resultados del sistema para ensayos de flameo a baja frecuencia en húmedo según ANSI C29.6	35
3.1.4	Análisis comparativo de resultados obtenidos según ANSI C29.6 y según Montecarlo.....	38
3.2	Conclusiones.....	42
3.3	Recomendaciones.....	44
4	REFERENCIAS	45
5	ANEXOS.....	47

RESUMEN

En el presente Trabajo de Integración Curricular (TIC) se desarrolla la simulación de ensayos eléctricos “TIPO” como son el ensayo de flameo a baja frecuencia en seco y el ensayo de flameo a baja frecuencia en húmedo, empleando los lineamientos definidos por el Instituto Nacional Estadunidense de Estándares (ANSI), aplicado a aisladores tipo PIN, utilizando el software EMTP-RV.

En el marco teórico se encuentra la información que permite el modelado del aislador en redes de medio voltaje y ante ensayos eléctricos, una breve descripción de los tipos de aisladores, las diferentes pruebas o ensayos que se efectúan para la validez de la calidad de estos dispositivos, las normativas o estándares que plantean el procedimiento en los que se debe basar al momento de realizar las pruebas, así como también el criterio de aceptación del aislador o lote de aisladores.

En la sección de metodología se aborda la descripción del proceso de simulación del comportamiento del aislador bajo dos condiciones que son: al estar instalado en una red de medio voltaje y al estar expuesto ante ensayos eléctricos “TIPO” en base a dos criterios de aceptación.

En la sección de resultados se exponen finalmente los valores de voltaje y corriente provenientes de cada uno de los circuitos descritos en el párrafo anterior. En esta sección se realiza el contraste de los valores obtenidos en EMTP-RV comprobados con los del método Montecarlo.

PALABRAS CLAVE: Aislador, ensayos eléctricos, EMTP-RV, ANSI C29.6, ANSI C29.1, método Montecarlo.

ABSTRACT

In the present Curricular Integration Work (CIW) the simulation of electrical tests "TYPE" is developed, such as the dry low-frequency flashover test and the wet low-frequency flashover test, using the guidelines defined by the National Institute American Standards (ANSI), applied to PIN type insulators, using the EMTP-RV software.

In the theoretical framework is the information that allows the modeling of the insulator in medium voltage networks and in electrical tests, a brief description of the types of insulators, the different tests that are carried out for the validity of the quality of these devices, the regulations or standards that establish the procedure on which it should be based when carrying out the tests, as well as the acceptance criteria of the insulator or batch of insulators.

The methodology section deals with the description of the process of simulating the behavior of the insulator under two conditions: when it is installed in a medium voltage network and when it is exposed to "TYPE" electrical tests based on two acceptance criteria.

In the results section, the voltage and current values coming from each of the circuits described in the previous paragraph are finally exposed. In this section, the contrast of the values obtained in EMTP-RV verified with those of the Monte Carlo method is carried out.

KEYWORDS: Insulator, electrical tests, EMTP-RV, ANSI C29.6, ANSI C29.1, Montecarlo method.

1. INTRODUCCIÓN

Los aisladores tienen gran relevancia en el sector eléctrico a nivel mundial pues entre sus funciones está la de soportar al conductor eléctrico ya sea en la parte de la transmisión o distribución de la energía eléctrica, además, de jugar un papel importante en el sector industrial respecto a la calidad de la energía (cumplimiento de rangos de tensión y frecuencia además de no interferir en la continuidad del servicio) [1], [2].

El precio de compra de estos dispositivos no refleja la importancia que tienen en una instalación eléctrica a diferencia de lo que sí representaría la ausencia o una falla repentina de estos en la instalación [3].

Las principales causas que afectan a un aislador son las condiciones ambientales y problemas en la composición o estructura de este, los efectos que producen pueden ser [1]:

- Perforación del aislador (falla en propiedades dieléctricas del material)
- Conductividad interior (corriente de fuga)
- Descarga disruptiva a través del aire (humedad, lluvia, rigidez del aire)
- Conductividad superficial (contaminantes humedecidos)

Además, al estar expuesto a altas corrientes de forma permanente, los aisladores sufren un desgaste natural a través del tiempo. La calidad de estos dispositivos debe ser verificada antes de la instalación en el sector eléctrico o sector industrial, de esta forma se disminuye la presencia de los efectos mencionados, es por ello la importancia del componente desarrollado y su enfoque en el procedimiento a seguir para realizar ensayos eléctricos a los aisladores antes de la aceptación de un lote de estos. Estos procedimientos están regidos por estándares americanos tales como ANSI.

Los aisladores empleados en el distrito metropolitano de Quito (DMQ) se indican en “Normas para sistemas de distribución – parte B: Unidades de propiedad y de construcción” de la Empresa Eléctrica Quito (EEQ) y son especificado según el material y nivel de voltaje que se desee emplear, como se indica en la Tabla 1.1 a continuación [2].

Tabla 1.1 Aisladores Empleados En La Zona De Concesión De La EEQ [2].

AISLADOR TIPO	VOLTAJE NOMINAL DE LA RED (kV)	CLASE ANSI	NORMA ANSI
<i>Suspensión de porcelana</i>	22.8 – 13.2 y 6.3	52-1	C.29.2
<i>Suspensión Polimérico</i>	22.8 – 13.2 y 6.3	DS-28	C.29.13
<i>Espiga</i>	22.8 – 13.2 y 6.3	56-1	C.29.6
<i>Rollo</i>	0.25	53-2	C.29.3
<i>Retenida</i>	22.8 – 13.2 y 6.3	54-3	C.29.4

Este Distrito se encuentra alimentado por 29 subestaciones con 139 alimentadores primarios que se distribuyen, con 46 para la zona norte, 72 para la zona centro y 21 para la zona sur. De los alimentadores primarios se pueden distinguir que un 68% corresponden a redes de 6.3kV y un 32% a redes de 23 kV [2].

Por tal motivo el aislador sobre el cual se basarán los procedimientos de ensayos eléctricos será el aislado tipo PIN o Espiga para redes de 6.3kV.

1.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar la modelación, simulación y prueba del aislador tipo PIN para 6.3 kV (distribución), para la realización de ensayos de voltaje de flameo en seco y en húmedo a baja frecuencia en aisladores de porcelana según el estándar ANSI C29.6 y ANSI C29.1, en el software EMTP-RV.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Realizar una revisión bibliográfica de las diferentes formas de modelar el comportamiento de un aislador ante ensayos de voltaje de flameo en seco a baja frecuencia y ensayo de voltaje de flameo en húmedo a baja frecuencia.
2. Proponer un procedimiento para la realización de ensayos TIPO que serán ensayos de voltaje de flameo en seco y en húmedo a baja frecuencia en aisladores de porcelana.

3. Simular el comportamiento de los aisladores ante ensayos de voltaje de flameo en seco y en húmedo, a baja frecuencia en aisladores de porcelana en el software EMTP-RV.
4. Analizar los resultados de simulación para determinar si el modelo implementado del aislador cumple con las características técnicas establecidas en la norma.

1.3 ALCANCE

El presente Trabajo de Integración Curricular analizará el modelado del comportamiento del aislador tipo "PIN" de la clase ANSI 56-1, con capacidad de soportar un voltaje de fase de hasta 23 kV. Se interpretarán los lineamientos para efectuar el ensayo de flameo en seco a baja frecuencia y el ensayo de flameo en húmedo a baja frecuencia (pruebas TIPO) definidas en el estándar ANSI C29.1-1982 y en base a ello dar el criterio de aceptación de un lote de aisladores según ANSI C29.6.

Las fases que se verán involucradas en este estudio serán:

- A. Fase teórica: Se estudiarán los conceptos que derivaron en el desarrollo de la metodología utilizada para la resolución de la modelación del aislador y el desarrollo de los ensayos de flameo en seco y en húmedo, a baja frecuencia. Además, se investigará sobre el software EMTP-RV para implementar la modelación del aislador en este programa. Esta fase permitirá detallar los aspectos importantes a considerar para simular el comportamiento del aislador en un circuito eléctrico.
- B. Fase de desarrollo metodológico: Se detallará el modelo del aislador utilizado en este trabajo, características físicas y eléctricas que se deben considerar en el modelo ante la exposición a los ensayos eléctricos. Se describe la metodología utilizada para llevar a cabo la modelación en el software EMTP-RV.
- C. Fase de simulación: En esta fase se explicará cómo se modelan los circuitos equivalentes de un aislador en operación normal y de un aislador expuesto a los ensayos de flameo en seco a baja frecuencia y ensayo de flameo en húmedo a baja frecuencia, en el software EMTP-RV. Se describe el proceso para la realización de los ensayos y la forma de exportar los resultados.
- D. Fase de experimentación: En esta fase se simularán en EMTP-RV los ensayos de voltaje de flameo en seco y húmedo a baja frecuencia, a aisladores de diferentes

valores nominales, esto con el objetivo de comprobar la correcta modelación del circuito.

- E. Fase de análisis de resultados: Se compararán los resultados obtenidos versus los esperados, explicando los criterios de aceptación que los validarán.

Al finalizar las fases mencionadas se realizará un análisis comparativo entre los resultados obtenidos con el método Montecarlo y los de ANSI C29.6.

1.4 MARCO TEÓRICO

En esta sección se exponen los fundamentos teóricos que respaldan la modelación del comportamiento de un aislador, mediante su circuito equivalente, los lineamientos definidos por ANSI 29.6 y ANSI 29.1 para la realización de dos pruebas TIPO para aisladores de porcelana y la modelación de algunas condiciones tanto ambientales como físicas a las que se expone el aislador al momento de realizar las pruebas.

1.4.1 INTRODUCCIÓN AL AISLADOR ELÉCTRICO

El aislador es un dispositivo cuya función es proveer un soporte y sujeción a conductores eléctricos (en líneas aéreas son conductores desnudos). Su geometría es aprovechada para evitar desplazamientos longitudinales o transversales de los conductores eléctricos, al mismo tiempo que los mantiene aislados eléctricamente de tierra o de todo elemento por el que no se desee transmitir energía eléctrica [2].

Los aisladores se encuentran instalados en los soportes o crucetas de los postes o a su vez en equipos y dispositivos energizados [3].

Están formados por cuerpos aislantes ensamblados a partes conductoras (como herrajes metálicos para facilitar la sujeción o con laminados metálicos al interior para evitar microdescargas) que sirve como punto de acople entre la estructura de soporte de conductores y la estructura del aislador, como se observa en la Figura 1.1 y 1.2 [2].

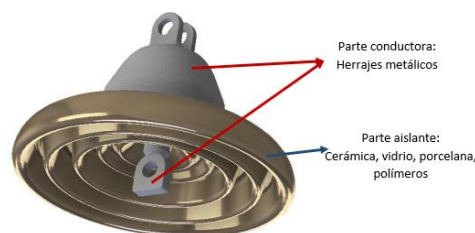


Figura 1.1. Partes de un aislador tipo Clevis con herrajes metálicos [4].

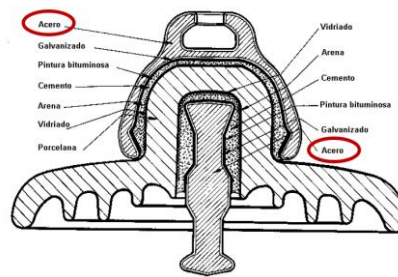


Figura 1.2. Partes de un aislador (galvanizado con pintura bituminosa forma la parte conductora) [4].

1.4.1.1 Tipos de aisladores

La elección del aislador a utilizar depende principalmente del nivel de voltaje y las condiciones ambientales a las que se encontrará expuesto. Existen diferentes tipos de aisladores, mismos que tienen una determinada norma ANSI bajo la cual se fabrican y realizan ensayos eléctricos y mecánicos para verificar la funcionalidad del dispositivo y calidad del material (vidrio, cerámica o porcelana). Los tipos son:

Aisladores tipo Carrete. – De forma cilíndrica con un hueco axial y ranuras periféricas en donde hace contacto con los conductores. Utilizado para bajo y medio voltaje. Fabricados con cerámica o porcelana según ANSI C29.3 [5], [6].

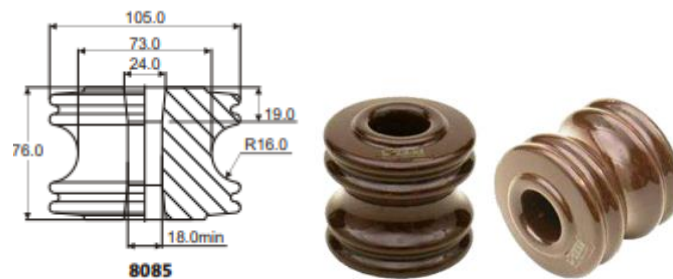


Figura 1.3. Aislador tipo carrete (clase 53) [5], [12].

Aisladores tipo espiga o PIN. – Formado por uno o más cuerpos aislantes que se encuentran enlazados entre sí, en su centro requieren de una espiga enroscada de forma que brinde un soporte estable entre la cruceta de un poste y las líneas eléctricas. El material utilizado puede ser cerámica o porcelana y son fabricados en base a ANSI C29.5 y ANSI C29.6 [5].

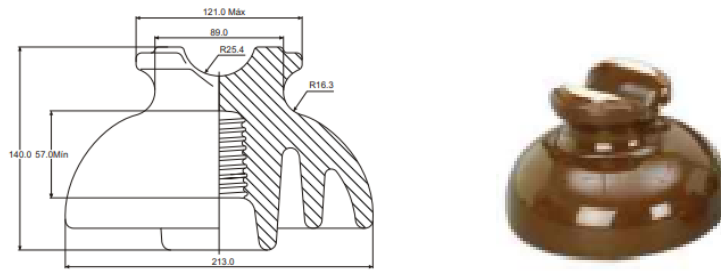
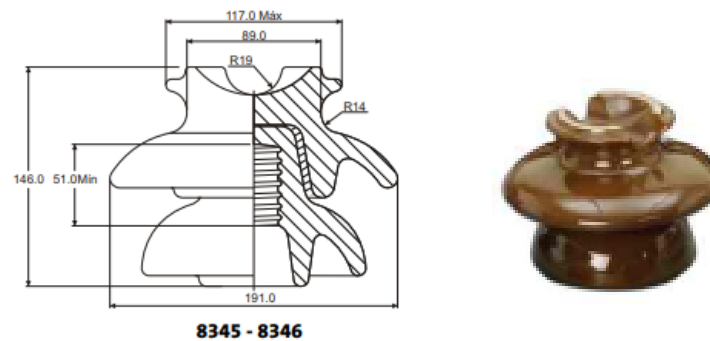


Figura 1.4. Aislador tipo PIN sencillo (clase 55) [12].



8345 - 8346

Figura 1.5. Aislador tipo PIN doble (clase 56) [12].

Aislador tipo poste. – También conocido como de tipo columna o line post, tiene un extremo con base plana metálica con espiga y una de agarre con grapa o herrajes de sujeción. Fabricados en porcelana según ANSI C29.7 y ANSI C29.1 [5], [6].

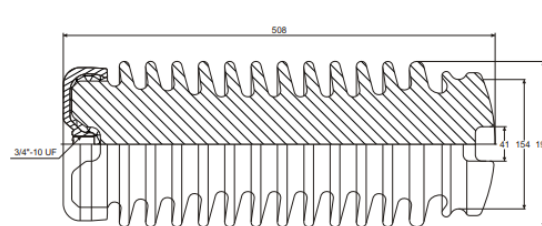


Figura 1.6. Aislador tipo poste [12].

Retenedor/ Retenida o tipo Tensor. – Con forma de pera con un agujero transversal por donde se asegura al conductor mediante un tornillo o PIN de montaje. Empleado en bajo y medio voltaje. Son fabricados con cerámica o porcelana según ANSI C29.4 [5], [6].

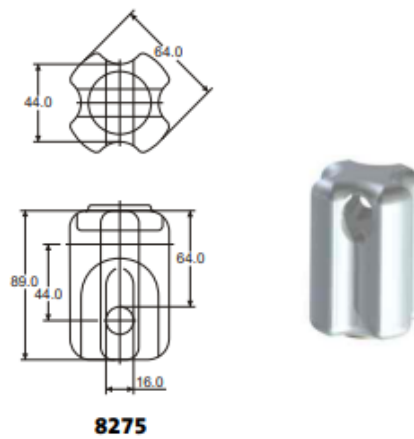


Figura 1.7. Aislador tipo Tensor (clase 54) [12].

Aisladores de suspensión. - Formado por partes metálicas. Brinda un soporte no rígido a los conductores eléctricos. Son fabricados con porcelana según ANSI C29.2 y ANSI C29.1 [5], [6].

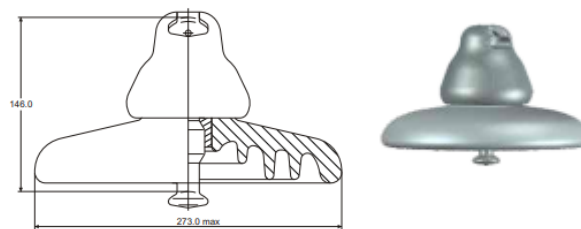


Figura 1.8. Aislador de suspensión tipo cuenca y bola (clase 52) [12].

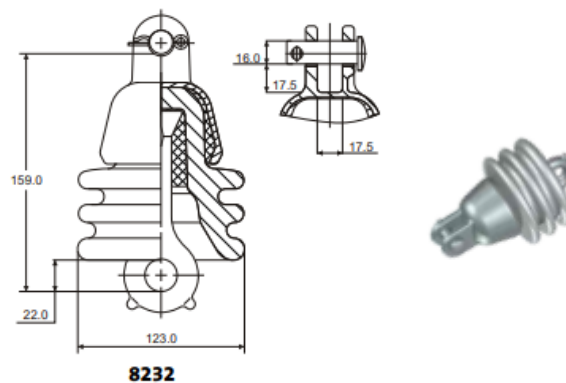


Figura 1.9. Aislador de suspensión tipo clevis (clase 52) [12].

Otros tipos de aisladores. – Existen más tipos aisladores poco usados como de tipo caperuza y espiga, aisladores para equipos eléctricos, tipo espiga poste, para barraje, etc., [5], [6].

1.4.1.2 Modelo estático de un aislador

El modelo estático de un aislador puede ser representado a través de una fuente de alimentación de voltaje en paralelo a un capacitor [7].

Como se muestran las Figuras 1.1 y 1.2, se tiene dos materiales conductores (superficies equipotenciales con cargas de igual magnitud y signos opuestos) con un polo conectado a tierra mediante su estructura de soporte, separadas por un material aislante (dieléctrico) que soporta una diferencia de potencial de fase a tierra. En esta separación se almacena energía en forma de campo eléctrico. Esta es la razón por la cual un aislador se modela con un capacitor [8].

Dadas las condiciones ambientales a las que se exponen los aisladores es necesario representar, a través de una resistencia, la influencia de la contaminación en el funcionamiento de estos, pues esta facilita o dificulta en cierta medida al aislamiento del aislador [7].

En la Figura 1.10, se observa el modelo de un aislador ideal representado por un capacitor y a la derecha se tiene un aislador con influencia de la contaminación representado por una resistencia en paralelo.

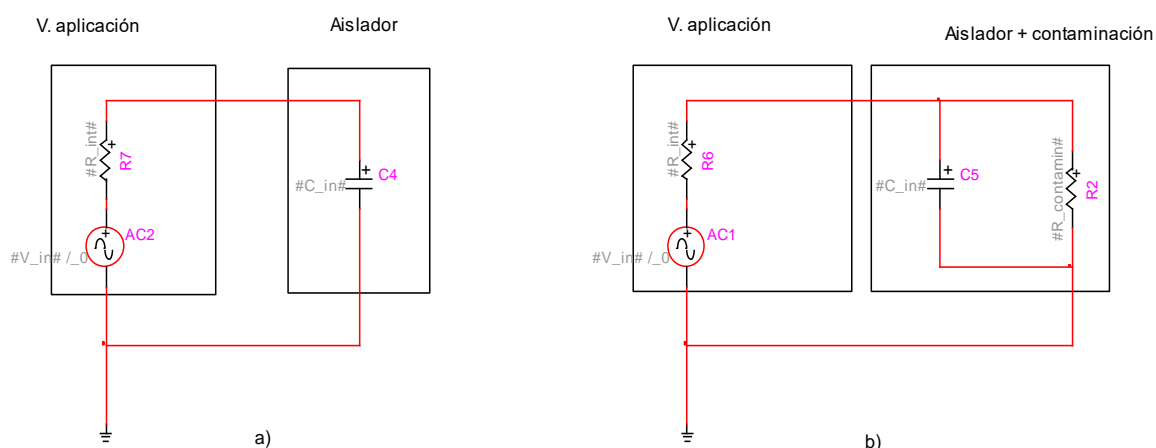


Figura 1.10. Representación de un aislador a) ideal, b) considerando la contaminación ambiental (Fuente: autor).

En condiciones estáticas, el aislador puede definirse eléctricamente por la distancia de fuga a través de una resistencia [7].

Resistencia de fuga (R): Relacionada a la corriente de fuga que se genera por conductividad interior del material del aislador. Se encuentra en función de la “distancia de fuga (L)” y la influencia de la contaminación (r_{pu}). Su valor se obtiene como indica la ecuación 1. Su representación se observa en la Figura 1.11 [7].

$$R = L \times r_{pu} \quad (1)$$

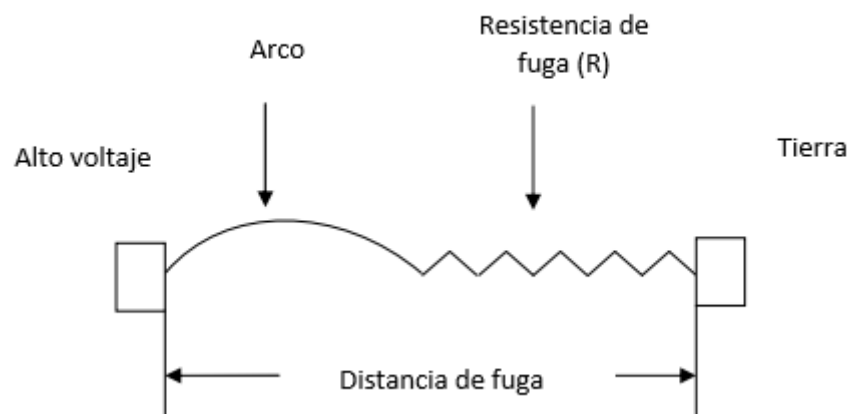


Figura 1.11. Representación de la influencia de la contaminación en el aislamiento [7].

Algunos valores experimentales de resistencia en función del nivel de contaminación obtenidos por [7] se observan en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2. Medidas experimentales de resistencia de superficies vs diferentes niveles de contaminación [7].

Material	r_{pu} ($Mohm/cm$)	Nivel de contaminación (mg/cm^2)
Etileno Propileno - EPDM	0.29	0.175
	0.22	0.185
	0.15	0.255
	0.125	0.275
Silicona/goma/caucho	0.77	0.175
	0.65	0.185
	0.58	0.255
	0.46	0.275
Porcelana	0.5	0.1
	0.046	0.3

En donde el nivel de contaminación puede tomar rango de valores como se observa en la Tabla 1.3.

Tabla 1.3. Nivel de contaminación en función del valor de densidad del depósito de sal (mg/cm^2) [7].

Nivel de Contaminación ambiental	Densidad de depósito de sal, mg/cm^2
No significativa	0.0075 – 0.0150
Muy poco significativa	0.0150 – 0.0300
Poco significativa	0.0300 – 0.0600
Promedio	0.0600 – 0.1200
Alta	0.1200 – 0.2400
Muy alta	0.2400 – 0.4800
Excepcional	> 0.48

1.4.1.3 Modelo dinámico del aislador eléctrico

Este modelado implica la aparición de un arco eléctrico o flashover, el cual es modelado por el accionar de un interruptor ideal en serie a una resistencia de arco, por donde fluirá la corriente de arco en el momento que se produzca el flashover (cierre del interruptor). Su representación se observa en la Figura 1.12 [9].

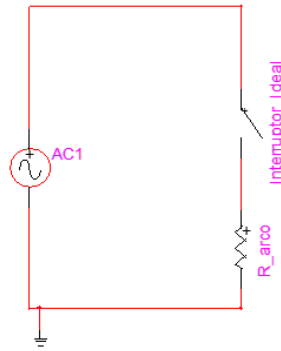


Figura 1.12. Representación del aislador mediante interruptor ideal en serie con una resistencia de arco (Fuente: autor).

Resistencia de arco: Relacionada a la corriente que se genera al momento en que se produce un arco eléctrico a través del aislador. Su valor depende de la “distancia de arco” que es la separación que existe entre el extremo superior y el inferior de este [7].

La influencia de este valor se refleja en la curva voltaje vs tiempo que se abordará en la siguiente sección.

1.4.1.4 Curva voltaje vs tiempo.

Al utilizar ambos modelos de aislador, se obtiene el comportamiento general de uno ante la exposición de una diferencia de potencial variable. El resultado es representado mediante curvas de voltaje – tiempo como la que se observa en Figura 1.13. La curva provee la premisa de que, si esta curva es cortada o atravesada por una onda de voltaje, se provocará una descarga eléctrica o flashover [9], [10].

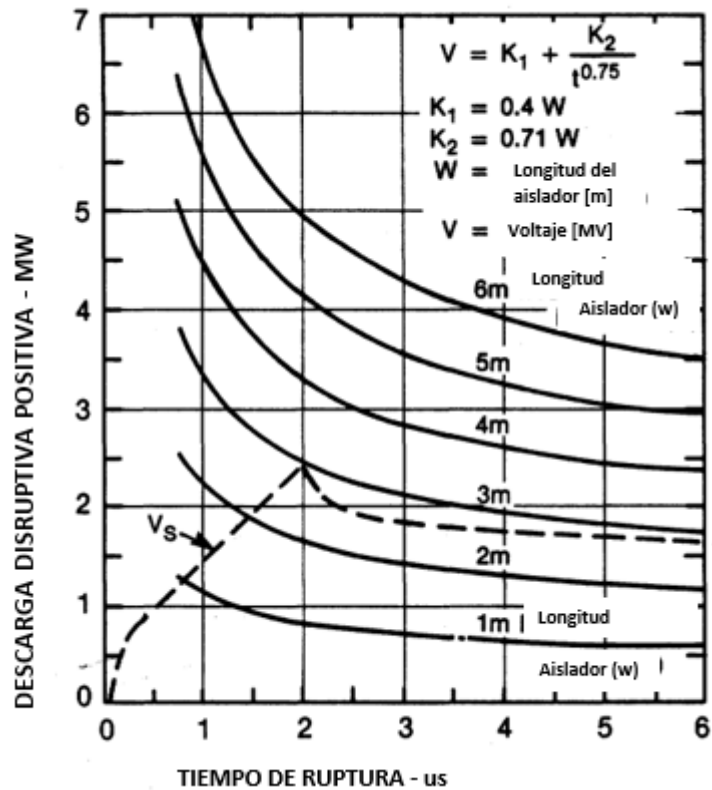


Figura 1.13. Curvas de Voltaje – Tiempo para aisladores de línea [10].

El comportamiento del aislador se refleja con la ecuación 2.

$$V = k1 + \frac{k2}{t^{0.75}} \tag{2}$$

Donde:

- $k1 = 0.4 \times W$
- $k2 = 0.72 \times W$
- $W =$ longitud del aislador [m]
- $V =$ Voltaje [MV]

1.4.1.5 Efecto corona en aisladores

El efecto corona es una descarga eléctrica provocada por la ionización del gas que rodea al conductor. Este efecto no tiene influencia en el modelamiento del aislador pues ante sobretensiones temporales y de frente lento su influencia es muy pequeña debido a que su magnitud no alcanza el umbral de ionización del aislador. Cuando se trata de sobretensiones de frente rápido es posible considerar el efecto en el modelo de una línea de transmisión, debido a la ionización del aire alrededor del conductor, sin embargo, se

especifica en ANSI C29.1 que para realizar los ensayos eléctricos sobre un mismo aislador se debe esperar un tiempo no menor que 15s, ni mayor que 5min, de forma tal que dicha ionización en este intervalo de tiempo se encuentre ya disipada [9].

En caso de que se desee realizar ensayos eléctricos sobre aisladores en los que sí influyera el efecto corona, puede hacerlo basándose en el “modelo de componentes discretos” de la norma IEC 60071.4 sección 7.6.4.1 mediante el circuito que se observa en la Figura 1.14.

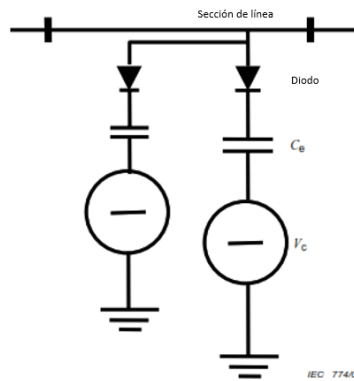


Figura 1.14. Ejemplo del modelo del efecto corona [9].

La corriente esperada a través del aislador, en el modelo de componentes discretos, se representa como se observa en la Figura 1.15.

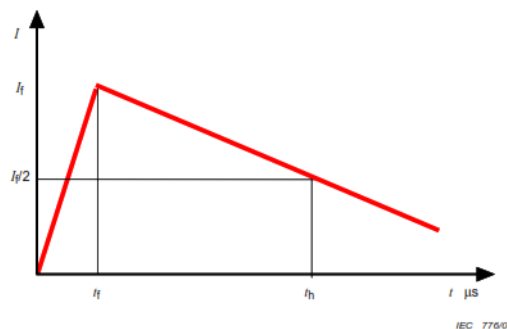


Figura 1. 15. Curva de doble rampa, con I_f hasta el tiempo de frente, t_h es la mitad de I_f e incrementa el valor de la cresta de la corriente [9].

1.4.2 PRUEBAS Y ENSAYOS

Se tiene diferentes tipos de aisladores que están diseñados y fabricados bajo una estandarización definida por ANSI el cual define capacidades, tolerancias, geometrías, tamaños, distancias, materiales, colores, etc., de estos elementos. Una forma de comprobar que un aislador o un lote de aisladores cumple con estos lineamientos es

mediante la realización de pruebas eléctricas, mecánicas, etc., que se detallan a continuación [11].

- *Pruebas de diseño:* Permiten verificar el diseño y los materiales empleados durante un correcto método de construcción.

Las pruebas en esta categoría son: de flamabilidad, de carga sostenida al núcleo ensamblado, de conexiones en los terminales metálicos, de tracking, pruebas al material del núcleo, etc., [12].

- *Pruebas TIPO:* permiten corroborar características dependientes de la forma y tamaño del producto. Verifican que los aisladores trabajen dentro de los rangos establecidos por el fabricante. En caso de ser solicitadas por el comprador, son efectuadas por el fabricante. Se las hace sobre aquellos aisladores que tengan nuevos diseños.

Las pruebas que se realizan dentro de esta categoría son: flameo en seco a frecuencia industrial o baja frecuencia, flameo en húmedo a frecuencia industrial, flameo a impulso crítico – positivo y negativo y ensayo de tensión de radio-influencia [12], [13].

- *Pruebas de conformidad:* Permiten validar la calidad de los materiales y métodos de fabricación. Estas pruebas se realizan a un lote de aisladores con diseños conocidos.

Las pruebas en esta categoría son: validación de dimensiones, del sistema de bloqueo y de la carga mecánica garantizada (SML) [12], [13].

- *Pruebas de recepción y rutina:* Las pruebas de rutina y recepción se realizan antes de la entrega del producto y permiten descartar a aquellos que presenten defectos de fábrica. El comercializador tiene la obligación de exponer el nombre del laboratorio en el que se realizaron estas pruebas. Los costos implicados son cubiertos por el fabricante. Este tipo de pruebas se las realiza sobre cada aislador siguiendo la norma ANSI C29.1-1982 [5], [14].

Entre las pruebas que puede escoger el receptor del producto son: ensayo dimensional, visual, de porosidad, de verificación del roscado para la espiga, de perforación, de resistencia de voladizo (cantiléver), de tensión aplicada, de resistencia a la tracción o combinados de resistencia mecánica y eléctrica [13], [14].

1.4.3 ESTÁNDARES DE FABRICACIÓN Y ENSAYOS ELÉCTRICOS A AISLADORES.

Los estándares que se aplican en el diseño, fabricación y ensayos eléctricos a un aislador dependen del tipo y material de dicho aislador, estos han sido mencionados en la sección de “Tipos de aisladores”.

Se destaca entre estos el estándar ANSI C29.1-1982/NTC 1285 (versión colombiana) es un manual en el que se explica la disposición del aislador bajo prueba, criterios de tiempo, de magnitud, etc., para la realización de todos los tipos de ensayos eléctricos para aisladores de potencia [5].

ANSI C29.6 es un estándar que trata temas de muestreo, inspección y ensayos que se realizan sobre los aisladores tipo PIN de porcelana. En este se definen los ensayos que se hacen sobre un aislador o lote de aisladores con un nuevo diseño o con una modificación en el diseño anterior [11].

Las pruebas que se realizan a los nuevos modelos de aisladores ya sea individuales o por lotes, son las pruebas TIPO y se especifican en la sección 8 de ANSI C29.6, en este se indican los lineamientos para la selección y aceptación del aislador o lote de aisladores para estos ensayos [11].

Ambos estándares se complementan y describen el proceso completo para la realización de los ensayos eléctricos y mecánicos a aisladores tipo PIN de porcelana.

1.4.4 CRITERIOS DE ACEPTACIÓN

1.4.4.1 Estándar ANSI C29.6 y NTC-ISO 28591

Según ANSI C29.6, para que un lote de aisladores con nuevos diseños sea considerado como “aprobado”, en cada ensayo realizado se deben elegir tres aisladores al azar y ponerlos a prueba, el resultado del promedio de estos definirá el resultado del lote.

Por otra parte, estableciendo un Nivel de Calidad Aceptable (NCA) del 4%, es decir aceptando que un 4% del total del lote de aisladores es el máximo número de aisladores defectuosos y haciendo referencia a la norma Colombiana NTC-ISO 28591, se puede indicar que en función del tamaño del lote y del criterio de aceptación buscado, se establece el tamaño de la muestra, como se indica en la Tabla 1.4 [14].

Tabla 1.4. Plan de muestreo para pruebas de recepción (Nivel de inspección I, NCA=4%) [14].

TAMAÑO DEL LOTE (m)	TAMAÑO DE LA MUESTRA (n)	CRITERIO DE ACEPTACIÓN
2 a 15	2	0
16 a 25	3	0
26 a 90	5	0
91 a 150	8	1
151 a 280	13	1
281 a 500	20	2
501 a 1200	32	3
1201 a 3200	50	5
3201 a 10000	80	7
10001 y más	125	10

Una forma de corroborar que el resultado de los tres aisladores del estándar ANSI C29.6 representa correctamente a todo el lote, es a través del método de Montecarlo, el cual se explica en la siguiente sección.

1.4.4.2 Método de Montecarlo

El método de Montecarlo es un modelo estocástico artificial por medio del cual se pueden resolver problemas complejos determinísticos mediante datos producidos de muestras aleatorias. Se reemplaza el modelo matemático de un problema, por uno probabilístico [15].

Consiste en reemplazar los datos que generalmente se obtienen de forma física, por valores aleatorios y con ellos determinar cuál es la respuesta con mayor probabilidad a ser obtenida en dicho proceso físico [16].

El procedimiento tiene como objetivo obtener una estimación del valor que puede tomar una variable con comportamiento desconocido, y en base a ello tomar una decisión o predicción de resultados [15].

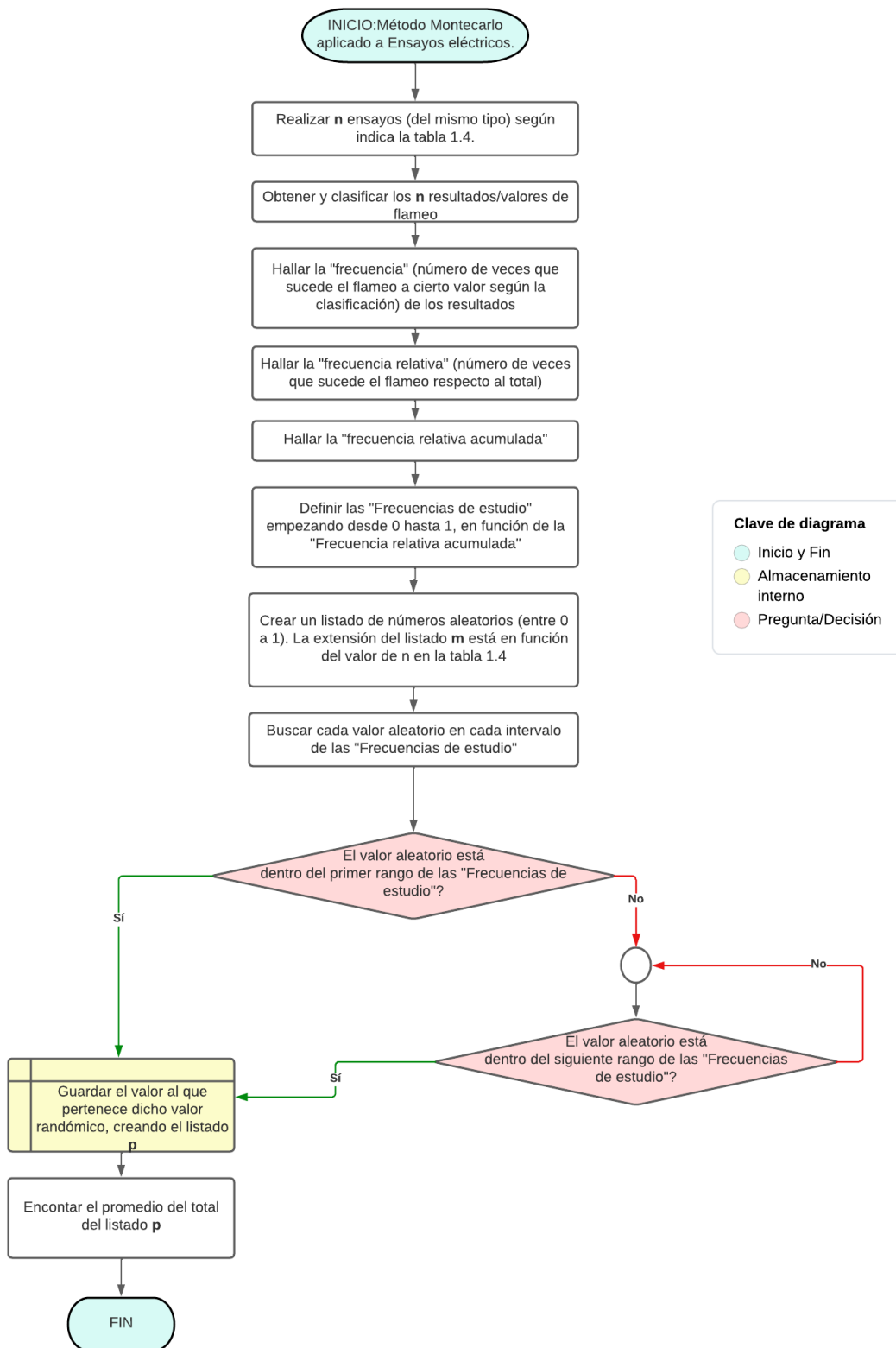


Figura 1.16. Diagrama de flujo del método de Montecarlo aplicado a ensayos eléctricos (Fuente: autor).

2 METODOLOGÍA

2.3 SOFTWARE EMTP-RV

El software EMTP-RV es un programa de Transitorios Electromagnéticos y de análisis de sistemas eléctricos de potencia (SEP), tiene un lenguaje de programación basado en bloques y en lenguaje C/C++, con una interfaz gráfica que ayuda al usuario a manejar el programa de forma intuitiva. Algunas funciones que se destacan en el programa son la creación de subcircuitos, enmascaramiento de subcircuitos y almacenamientos de datos para el estudio de transitorios eléctricos debido a diferentes fallas, maniobras o cambios que puedan ocurrir en un SEP [17].

2.4 INTERPRETACIÓN DEL ESTÁNDAR ANSI C29.6 Y ANSI 29.1

Algunos ensayos eléctricos de gran importancia son los de flameo en seco y húmedo, a baja frecuencia.

Para aplicar los lineamientos de ANSI C26.1, se debe tomar tres aisladores de forma aleatoria, a cada uno se le aplicará los lineamientos definidos en ANSI C29.1 para cada ensayo. En cada aislador se practicará cinco veces el mismo ensayo. Los quince resultados de cada ensayo deberán ser promediados y en caso de que dicho promedio sea mayor al 95% del valor esperado, para el ensayo en seco y mayor al 90% para el ensayo en húmedo, se considerará que el lote cumple con el “*mínimo voltaje de aislamiento esperado*”, caso contrario el lote no aprobará las pruebas de este estándar.

Estos resultados serán el promedio del valor de voltaje en el que se produce la intersección de las curvas (flashover), bajo las condiciones mencionadas en ANSI C29.1 para cada ensayo que se exponen a continuación:

❖ *Voltaje de aplicación*

Los lineamientos establecidos en el estándar de ensayos eléctricos mencionan que se debe aplicar un voltaje de magnitud igual al 75% del valor esperado (valor dado por el fabricante, correspondiente para cada tipo de aislador y para cada tipo de ensayo).

❖ Intervalos de tiempos.

La aplicación del voltaje se divide en dos intervalos de tiempo, el primer intervalo (Δt_1) será desde cero hasta un instante de tiempo (t_1), con una pendiente que crece de forma rápida y continua. Su crecimiento (pendiente), es abierto a interpretaciones propias por lo que se sugiere considerar “rápido” cuando es igual

a 3 segundos (un décimo del tiempo total). En este intervalo el voltaje de alimentación alcanzará el 75% del valor esperado.

Una vez alcanzado este valor, la pendiente debe cambiar y ser tal que, inminentemente se produzca un flameo en el segundo intervalo de tiempo (Δt_2). Este Δt_2 tiene una duración de entre 5 a 30 segundos, tiempo que se cuenta a partir de t_1 .

❖ *Consideraciones*

Se tiene que tomar en cuenta dos condiciones variables: 1) el aislador deberá flamear en un intervalo de 5 a 30 [s] y 2) la característica probabilística de los aisladores (es la que indica que a pesar de que se trate de un mismo tipo de aislador, no se comportan igual ante las mismas condiciones), esta característica heredada del comportamiento estadístico de un interruptor, pues son estos una fuente importante de las sobretensiones que puede provocar un flameo en un aislador [9].

Es por esta razón que la pendiente de crecimiento del voltaje de aplicación en Δt_2 , es una pendiente que cambia de valor conforme se realice el ensayo hasta provocar el flameo, es decir para el primer ensayo, una vez alcanzado el 75% del valor esperado de flameo en seco a baja frecuencia con una pendiente m_1 que crece hasta este dicho porcentaje en 3 s, se tendrá una segunda pendiente (m_2) que provoca que el aislador flamee dentro de Δt_2 . En caso de que este no flamee en este intervalo, se debe modificar (incrementar o reducir) el valor de m_2 y repetir este ensayo.

Los resultados que se promediarán serán únicamente los voltajes que hayan provocado un flameo durante Δt_2 .

En las Figuras 2.1 y 2.2 se puede observar de forma completa el procedimiento para realizar el ensayo de flameo a baja frecuencia en seco según ANSI C29.6 y ANSI C29.1.

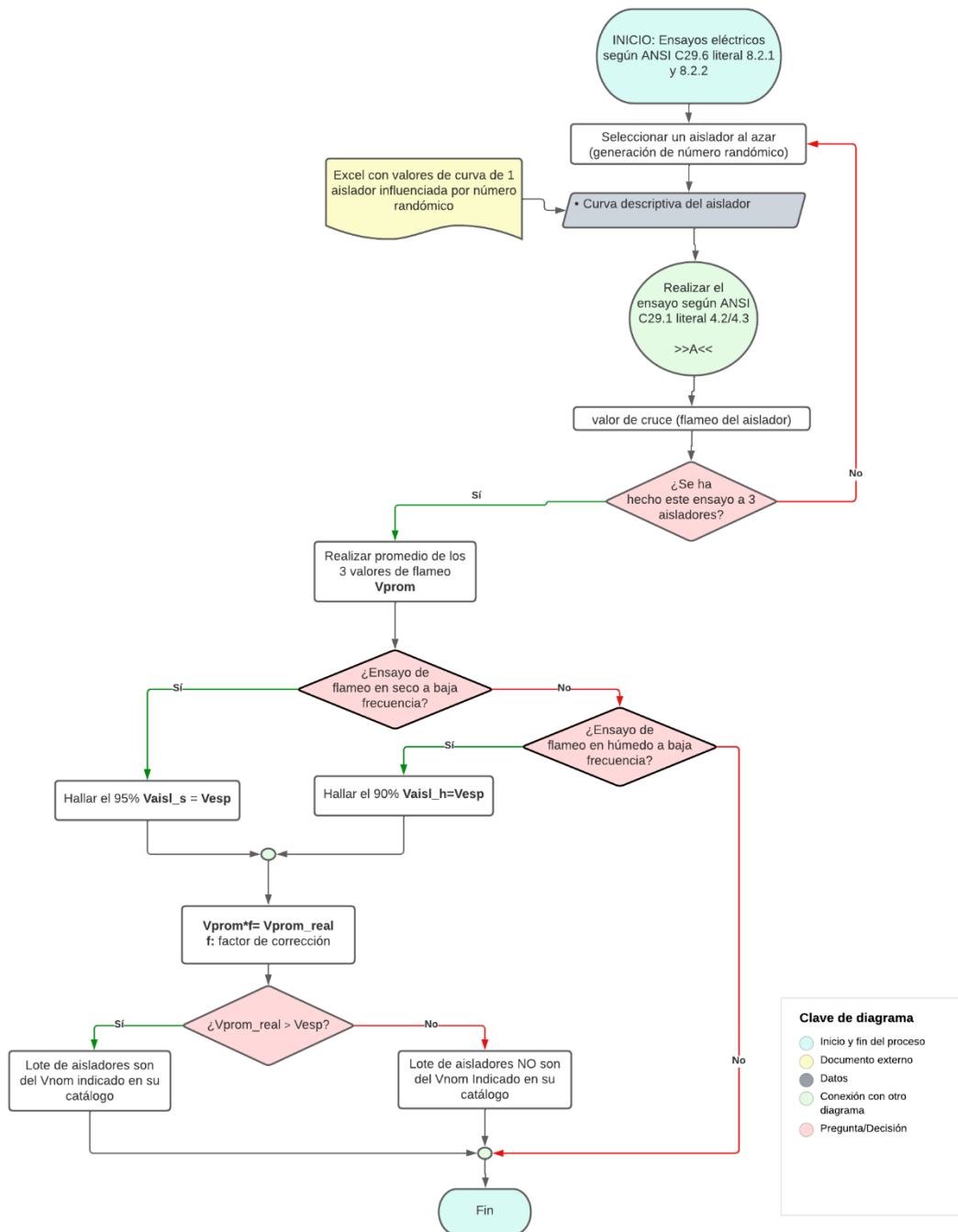


Figura 2.1. Diagrama de flujo del procedimiento para realizar ensayos de flameo en seco y en húmedo a baja frecuencia según ANSI C29.6. Parte 1/2 (Fuente: autor).

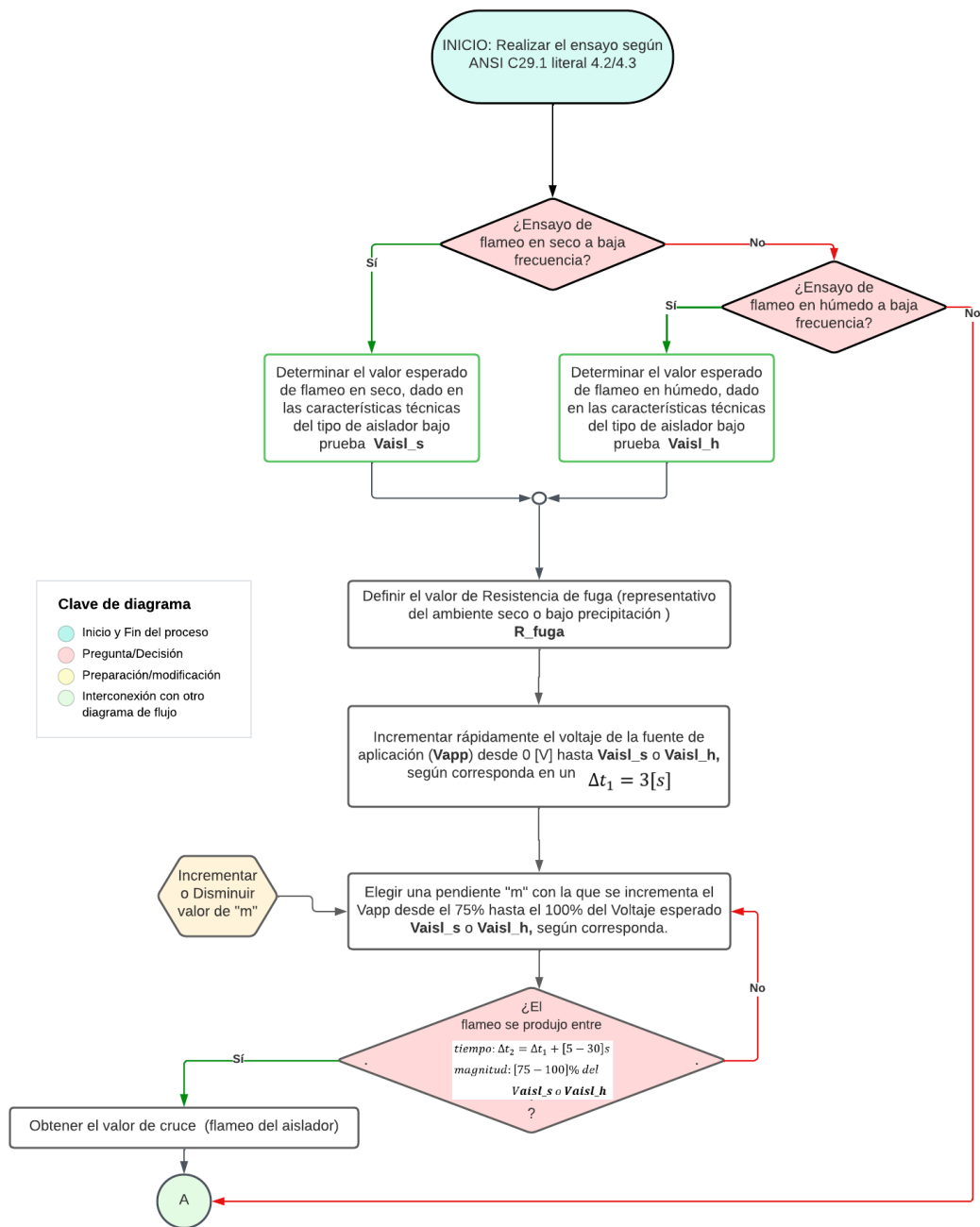


Figura 2.2. Diagrama de flujo del procedimiento para realizar ensayos de flameo en seco y en húmedo a baja frecuencia según ANSI C29.6. Parte 2/2 (Fuente: autor).

2.5 MODELACIÓN DEL AISLADOR

2.5.1 MODELACIÓN DEL AISLADOR EN UNA RED ELÉCTRICA

En la modelación del aislador instalado en una red eléctrica se considera su forma simple a través del modelo estático. En este sentido, la variable que traslada al circuito del plano ideal hacia el real es la resistencia de fuga, que representa la contaminación ambiental o fallas internas del material del aislador que provocan una mayor conductividad en su estructura. En [18] se han determinado valores para esta resistencia de forma experimental, los cuales se tomarán como referencia para el desarrollo de este capítulo.

El circuito eléctrico resultante es el observado en la Figura 2.3.

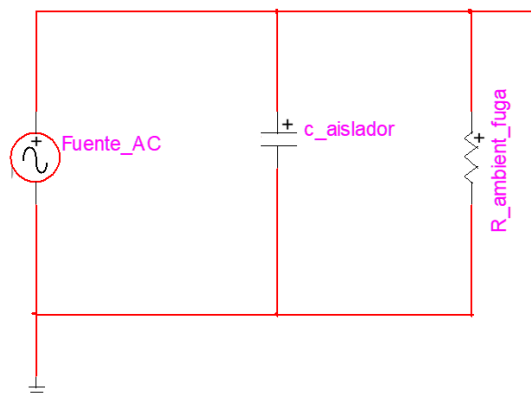


Figura 2.3. Modelo eléctrico de un aislador instalado en una red eléctrica (Fuente: Autor).

2.5.2 MODELACIÓN DEL CIRCUITO EXPUESTO A ENSAYOS ELÉCTRICOS

A diferencia del circuito relativamente sencillo de la Figura 2.3, el comportamiento del aislador expuesto a ensayos eléctricos se basa en el modelo dinámico, el cual a través de un interruptor ideal en serie con una resistencia de arco modela la aparición o ausencia del flashover en el aislador.

Como se describió en la sección 1.4.1.4 una forma de determinar si el aislador ha flameado es la comparación entre la curva Voltaje – Tiempo del comportamiento del aislador versus la de alimentación de voltaje.

La curva de alimentación de voltaje se obtiene al conectar en serie dos fuentes tipo rampa, en la primera se representa la inyección de voltaje durante el primer intervalo de tiempo Δt_1 y la segunda incluye el segundo intervalo Δt_2 además de que en esta se considera el valor de la pendiente como variable.

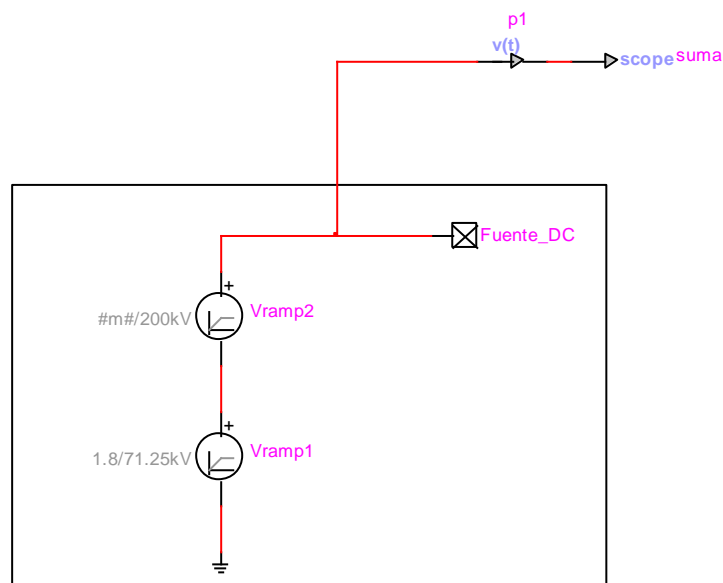


Figura 2.4. Conexión serie de las fuentes de voltaje de alimentación (Fuente: Autor).

La curva descriptiva del comportamiento de cada aislador se compara con el valor de esta fuente a través del tiempo mediante un bloque “compare”, que responde con valores de [1, 0,-1].

- 1: cuando la entrada 1 es mayor a la entrada 2
- 0: cuando ambas entradas son iguales
- -1: cuando la entrada 1 es menor a la entrada 2.

Esta señal de respuesta se utiliza como entrada a un interruptor controlado, que responde a su vez como:

- Interruptor cerrado cuando la señal de control es mayor a 0.
- Interruptor abierto cuando la señal de control es menor o igual a 0.

El resultado deseado en esta configuración es: cuando la salida del comparador sea 1, el interruptor se mantendrá abierto mientras que, cuando se produzca el cruce de las curvas e inmediatamente la curva de alimentación de voltaje supere a la característica del aislador el interruptor se cerrará, creando un camino para la corriente, a través de la resistencia de arco “*R_arco*”. El recorrido de esta corriente termina 2 ms después de su aparición, gracias al bloque “delay” que enlaza a “*R_arco*” con un bloque “STOP” que termina la simulación.

Este proceso se implementa en el software EMTP-RV, como se observa en la Figura 2.5. La forma de modelar cada parte del circuito se observa paso a paso en el Anexo I.

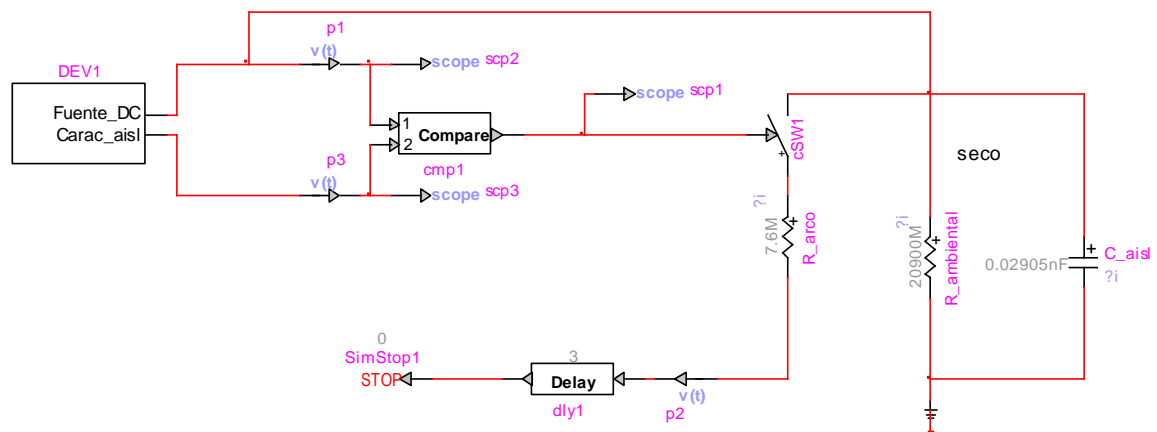


Figura 2.5. Circuito representativo del aislador ante ensayo eléctrico de flameo a baja frecuencia (Fuente: autor).

Generación de Valores de entrada

La curva descriptiva de cada aislador será generada en base a la ecuación (1), afectada por un número aleatorio, para contribuir a la característica probabilística que posee cada aislador. Esta curva cambiará por cada aislador y no por cada prueba. Los datos son generados en un documento Excel exportado a un block de notas para ser guardado como archivo “.dat” e importarlo al software EMTP-RV, el proceso se detalla en el diagrama de flujo de la Figura 2.6.

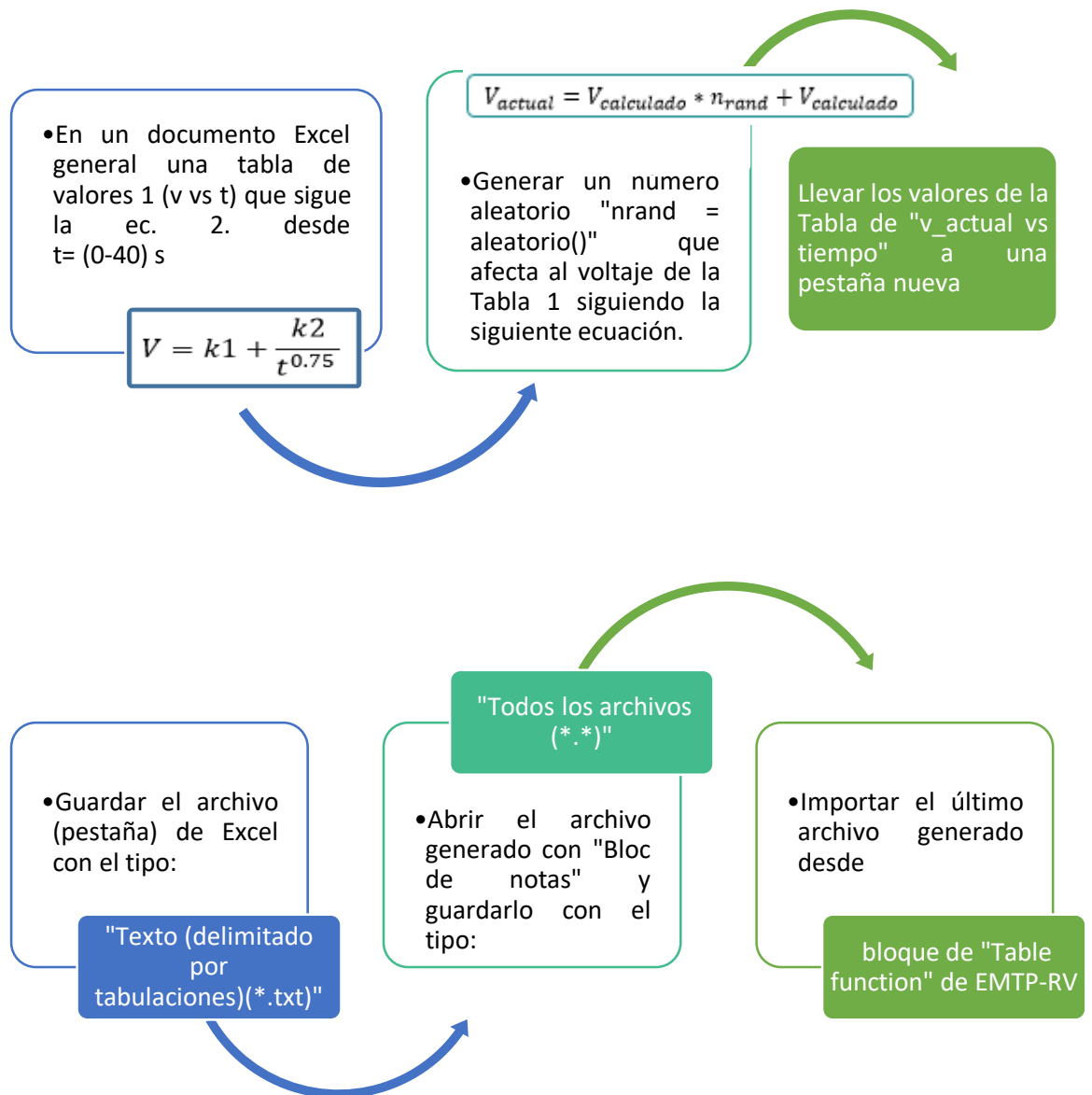


Figura 2.6. Procedimiento para ingresar valores de la curva EMTP-RV desde Excel.
(Fuente: autor)

El resultado de este procedimiento se observa en el bloque "Table function" como se observa en la Figura 2.7.

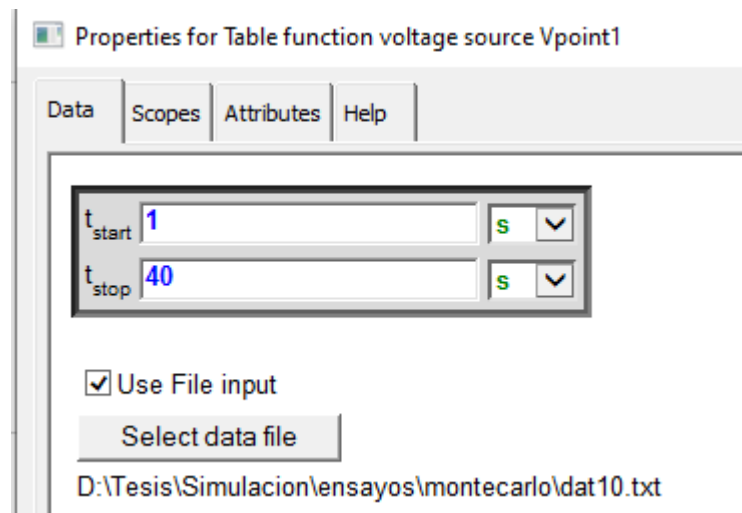


Figura 2.7. Correcto ingreso de datos al bloque de descripción del comportamiento del aislador (Fuente: autor).

Los valores a ingresar en este y en cada bloque del circuito se visualizan en el Anexo II.

2.6 ENSAYOS A AISLADORES

Una forma de calibrar al circuito eléctrico de la Figura 2.5 y verificar que los resultados sean correctos, se plantean los ensayos eléctricos de flameo en seco y en húmedo, a baja frecuencia para un aislador tipo PIN de determinado voltaje nominal X kV. Por lo que, al realizar la prueba a aisladores de un menor voltaje nominal, se espera que estos últimos no aprueben el ensayo, es decir no cumpla con “*el mínimo nivel de voltaje de aislamiento esperado*”, que en este caso será de X kV.

2.6.1 CUMPLIMIENTO E INCUMPLIMIENTO DE LOS AISLADORES ANTE ENSAYOS ELÉCTRICOS

El procedimiento para realizar los ensayos a aisladores que cumplan con “*el mínimo nivel de voltaje de aislamiento esperado*” se describe en el literal 2.2 del presente trabajo. En este se ingresan curvas que siguen la Ecuación 1. Para agregar la característica probabilística propia del aislador se le adiciona la influencia de un valor aleatorio, uno diferente en cada nuevo ensayo eléctrico para cada aislador.

La diferencia entre los aisladores que cumplen y no cumplen el estándar, es precisamente la curva característica de cada uno, el cual a su vez depende de la distancia de fuga, valor relacionado a la forma y configuración de dichos aisladores.

Este valor se ve reflejado en la Ecuación 1, a través de “L”, observándose que el valor aumenta cuando el voltaje nominal incrementa, de tal forma que: $L_{aislador\ 1} > L_{aislador\ 2}$, tal que: $V_{nominal\ de\ aislador\ 1} > V_{nominal\ de\ aislador\ 2}$.

Inicialmente se empleará el modelo (circuito que simula las condiciones de las pruebas en un laboratorio) en el software EMTP-RV dos veces, con esto se pretende calibrar al modelo, es decir al ingresar una curva característica de un aislador con capacidad nominal igual a la esperada se obtendrán valores de flameo dentro de un rango establecido, mientras que con un aislador de diferente capacidad nominal tendrá resultados con resultados fuera de dicho rango.

Una vez comprobado y calibrado el circuito de ensayos eléctricos, se puede ingresar curvas características de diferentes valores nominales. Para generar diferentes curvas descriptivas de aisladores, la variable a modificar es únicamente “L”, aplicado solo para aisladores tipo PIN de porcelana [11].

2.6.2 RESULTADOS PROVENIENTES DE EMTP-RV

Una vez realizados los ensayos a cada aislador, se obtienen los resultados en EMTP-RV, en estos se puede observar:

- El corte entre las curvas del voltaje de aplicación y la descriptiva de cada aislador: Instante en el cual comienza el flameo en el aislador bajo prueba, como se indicó en la sección 1.4.1.4.
- La señal de cierre del interruptor ideal que representa el camino para el paso de la corriente de arco, al producirse el flameo.
- Las corrientes de fuga, de arco y a través del capacitor: Corrientes que se tendrán incluso en condiciones normales. Su valor está en el orden de los μA [7].

Para poder exportar los resultados a una hoja de trabajo de Excel se debe seguir el diagrama de flujo que se presenta en la Figura 2.8.

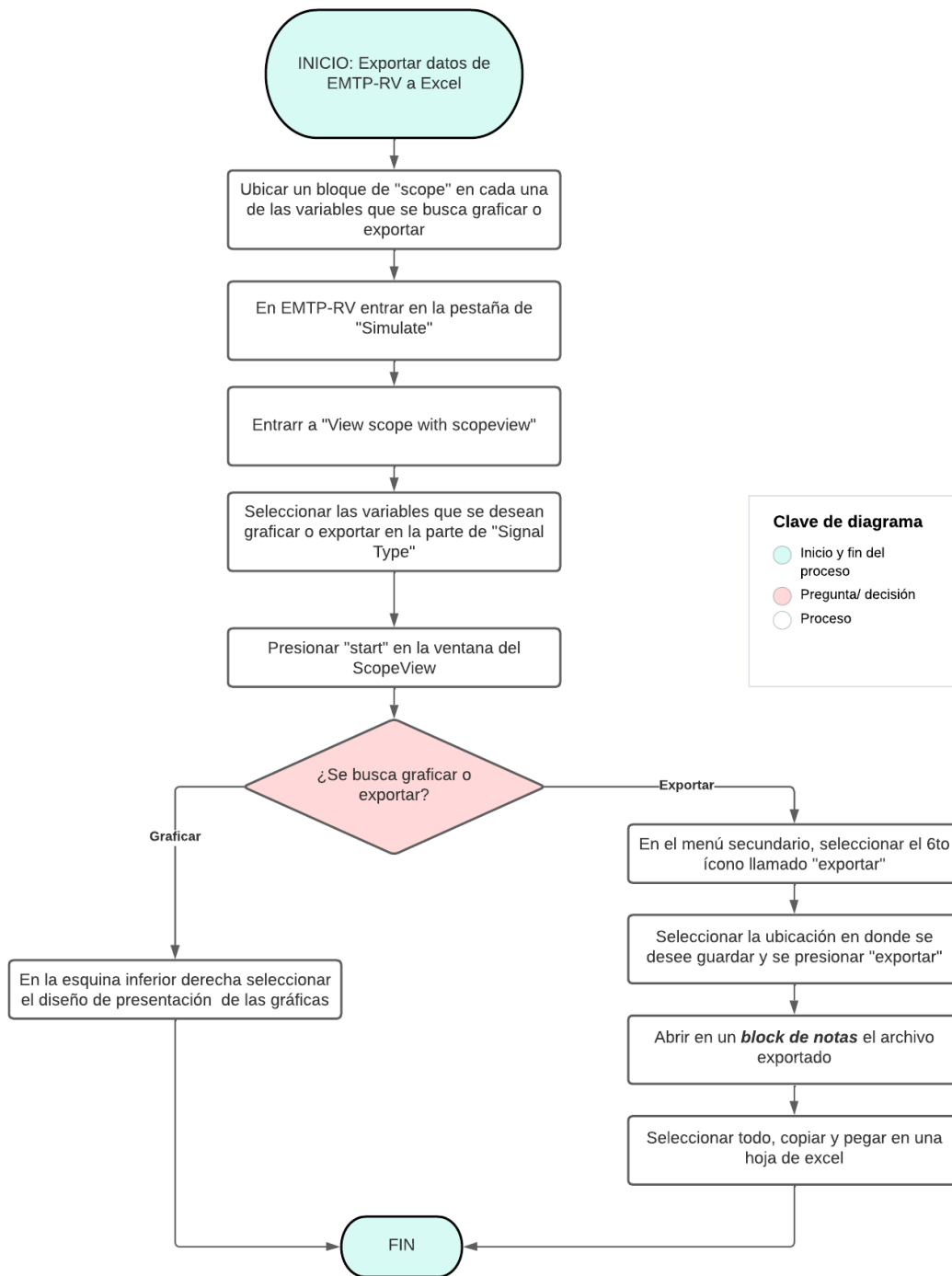


Figura 2.8. Diagrama de flujo para exportar datos desde EMTP-RV hacia Excel (Fuente: autor).

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los ensayos eléctrico se hicieron en un aislador tipo PIN de porcelana de la clase ANSI 56-1, con voltaje nominal de 23 kV, tal como el que se usa dentro del DMQ por la EEQ. Los resultados se presentan en las siguientes secciones del documento.

3.1 Resultados

3.1.1 Resultados del sistema de prueba en la red de medio voltaje

Los resultados del circuito implementado siguiendo la metodología de 2.5.1 (Figura 2.3) son los valores de corriente de fuga que atraviesa la resistencia de fuga (o contaminación) y la corriente que fluye a través del capacitor debido a la conductividad del material.

Los valores ingresados en el modelo se obtuvieron de [7] y [18] para un aislador tipo PIN de porcelana para una red eléctrica de 6.3 [kV] en “condiciones normales”, estos son:

- $C = 0.02905 [nF]$
- $V_{fuenteAC} = 6.3 [kV] a 60[Hz]$
- $R_{ambiental} = 2\ 640\ 000 [M\Omega]$

Los valores de la corriente de fuga obtenidos en EMTP-RV son comparados con los obtenidos en [18] para el mismo tipo de aislador obteniendo los resultados que se observan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Comparación de valores obtenidos en EMTP-RV vs [18]

Valores obtenidos de forma:			
Experimental en base a [18] [A]	Usando EMTP-RV [A]	Diferencia [A]	Error (%)
1.39E-09	2.10E-09	7.13E-10	34

Los valores de capacitancia y resistencia de fuga en este modelo de circuito son tales que cumplen con la función de aislador e impiden el paso de la corriente, dando como resultado la Figura 3.1 con valores de corriente de fuga en el orden de 10^{-9} . La fuente de voltaje de alimentación tiene una forma de onda como se observa en la Figura 3.2.

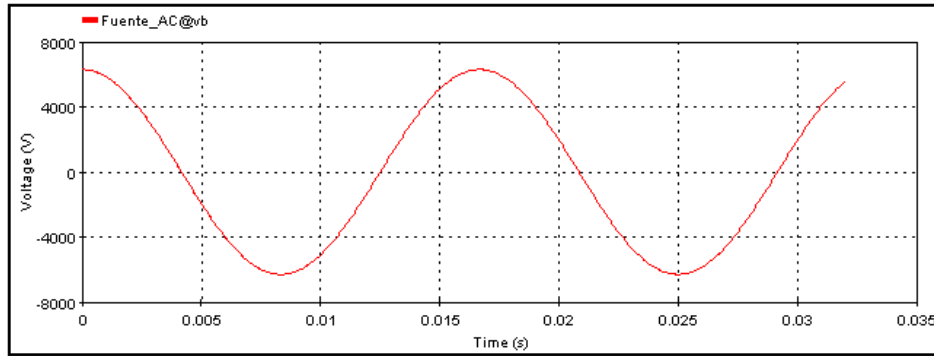


Figura 3.1. Forma de onda de fuente de voltaje de alimentación al aislador en condiciones estáticas (Fuente: autor).

La forma de onda de la fuente de alimentación en el caso de la instalación del aislador en una red eléctrica de 6.3 [kV] es la que se muestra en la Figura 3.1.

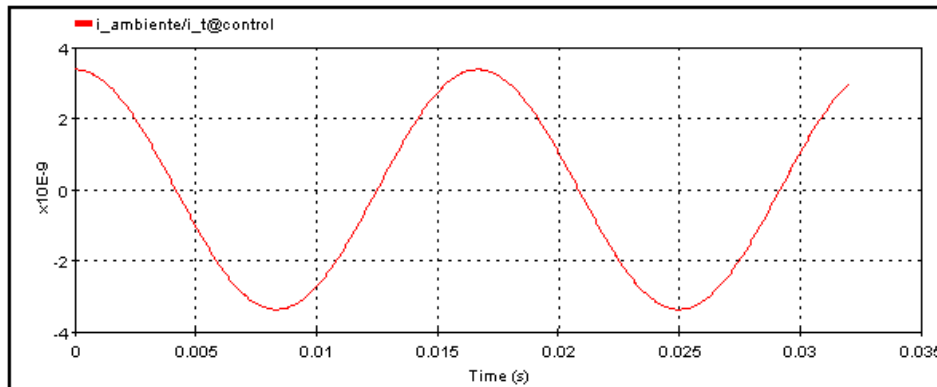


Figura 3.2. Forma de onda de la corriente de fuga en el modelo del aislador en condiciones estáticas (Fuente: autor).

Se puede observar en la Figura 3.2 la forma de onda de la corriente que pasa a través de la resistencia de fuga. Al ser un circuito alimentado por una fuente de voltaje alterno (AC), la corriente adquiere la misma forma de onda con valores en el orden de nano amperios. Este valor representa la magnitud de la corriente que se pierde constantemente en un aislador en condiciones normales, con ayuda de este valor se determina el desgaste natural de la capa de esmalte del aislador y se define su tiempo de vida útil.

3.1.2 Resultados del sistema para ensayos de flameo a baja frecuencia en seco, según ANSI C29.6

En el primer ensayo que es el de flameo a baja frecuencia en seco, se considera el circuito mostrado en la Figura 2.5, en el cual se ingresan los valores obtenidos de [7] para un aislador tipo PIN de porcelana para 6.3 kV en un ambiente con contaminación tipo "Polvo".

- $C = 0.02905 [nF]$
- $R_{ambiental} = 20900 [M\Omega]$
- $R_{arco} = 7.6 [M\Omega]$
- $V_{esperado\ de\ flameo\ en\ húmedo\ a\ baja\ frecuencia} = 95 [kV]$

Con el aislador que sigue la curva descrita en la Tabla 3.2, Figura 3.3 y el valor de distancia de arco $d = 0.178 [m]$, se obtienen las corrientes de fuga que se visualizan en la Figura 3.4.

El valor aleatorio que afecta a la curva y le da la característica aleatoria, se obtiene de la función "Aleatorio ()" en el mismo Excel, este valor afecta a la curva según la ecuación 3.

$$C_{Aleat} = C_{orig} * Val_{random} + C_{orig} \quad (3)$$

Donde:

- C_{Aleat} , son los valores de la tabla de la curva aleatoria [kV].
- C_{orig} , son los valores de la tabla de la curva característica original [kV].
- Val_{random} , valor aleatorio generado.

Tabla 3.2. Valores para curva característica aleatoria.

Tiempo [s]	V [MV]
1	250712.22
2	185700.63
3	160697.69
4	147044.50
5	138307.21
6	132177.67
7	127610.56
8	124059.44
9	121209.10
10	118864.21
11	116896.86
12	115219.56

13	113770.33
14	112503.95
15	111386.59
16	110392.43
17	109501.40
18	108697.61
19	107968.36
20	107303.33
21	106694.06
22	106133.54
23	105615.90
24	105136.21
25	104690.27
26	104274.49
27	103885.79
28	103521.50
29	103179.28
30	102857.11
31	102553.20
32	102265.98
33	101994.05
34	101736.17
35	101491.23
36	101258.24
37	101036.30
38	100824.62
39	100622.47
40	100429.19

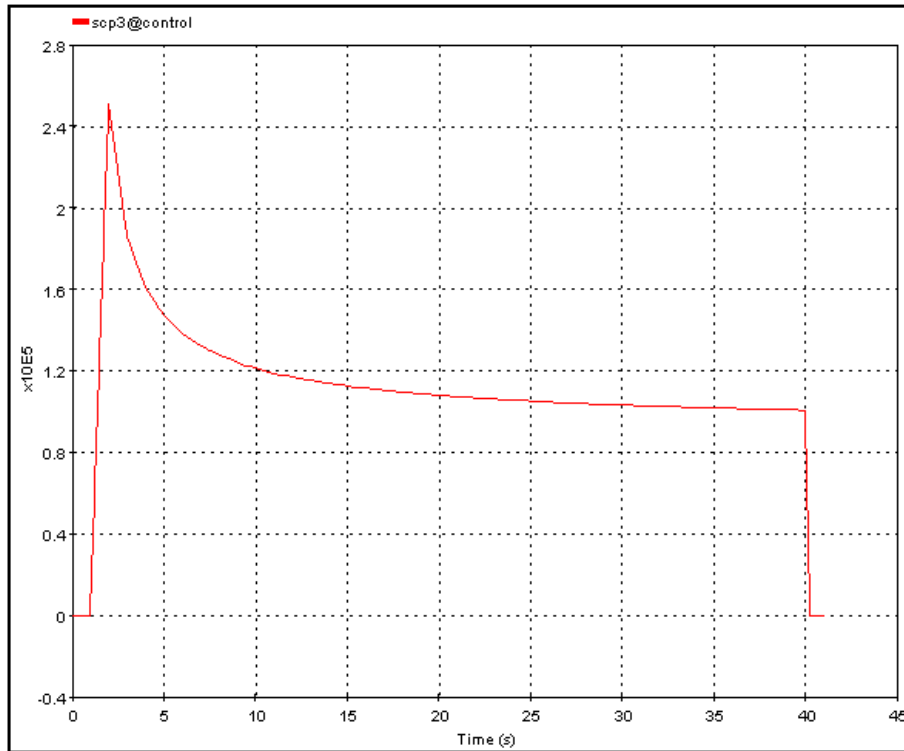


Figura 3.3. Curva Aleatoria de un aislador que sigue la ecuación 2) con $d=0.178$ [m].

La curva característica es una onda exponencial decreciente según se indicó en 1.4.1.4, al seguir la Ecuación 1 y 2 se obtiene la Figura 3.3. Para esta curva se establece un intervalo de tiempo total de 40 [s] en donde se producirá el flameo del aislador representado por la Figura 3.5.

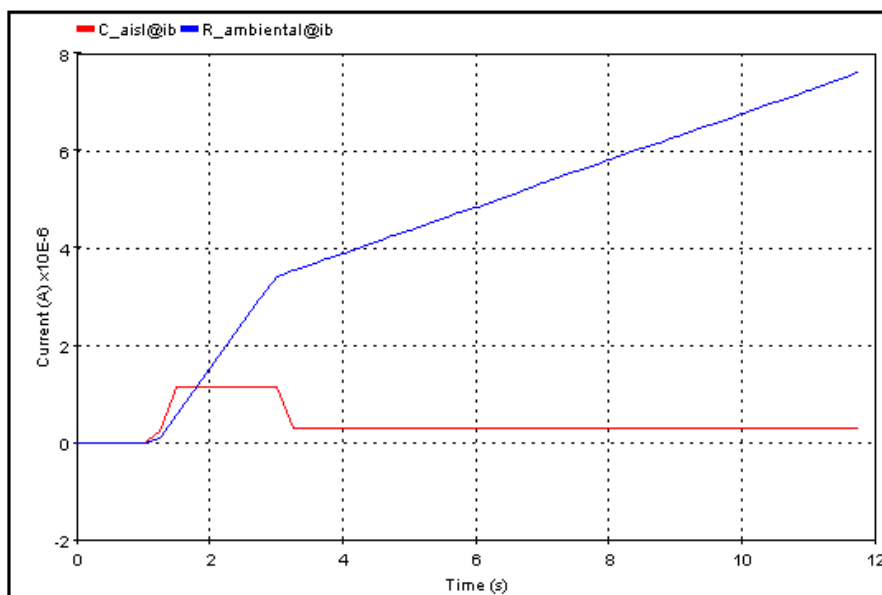


Figura 3.4. Formas de onda de las corrientes de fuga a través del capacitor (rojo) y de la resistencia de fuga (azul) en el ensayo de flameo en seco a baja frecuencia.

En la Figura 3.4 se observa las corrientes de fuga a través de la resistencia de contaminación y del capacitor, como se observa su valor está en el orden de los micro amperios (μA), estos valores son menores a los que se obtienen en el caso anterior (red eléctrica), debido a que en este caso y como se menciona en la sección 2.1 del presente TIC, los voltajes de alimentación en los ensayos son mucho más elevados que el voltaje nominal del aislador bajo prueba.

Reiterando lo mencionado en la sección 1.4.1.4, el corte de las curvas de aplicación de voltaje versus la del aislador significa la producción del flashover, por lo que es importante visualizar dicho corte en el aislador elegido al azar en la Figura 3.5 para comprender la aparición de la corriente de arco observada en la Figura 3.6.

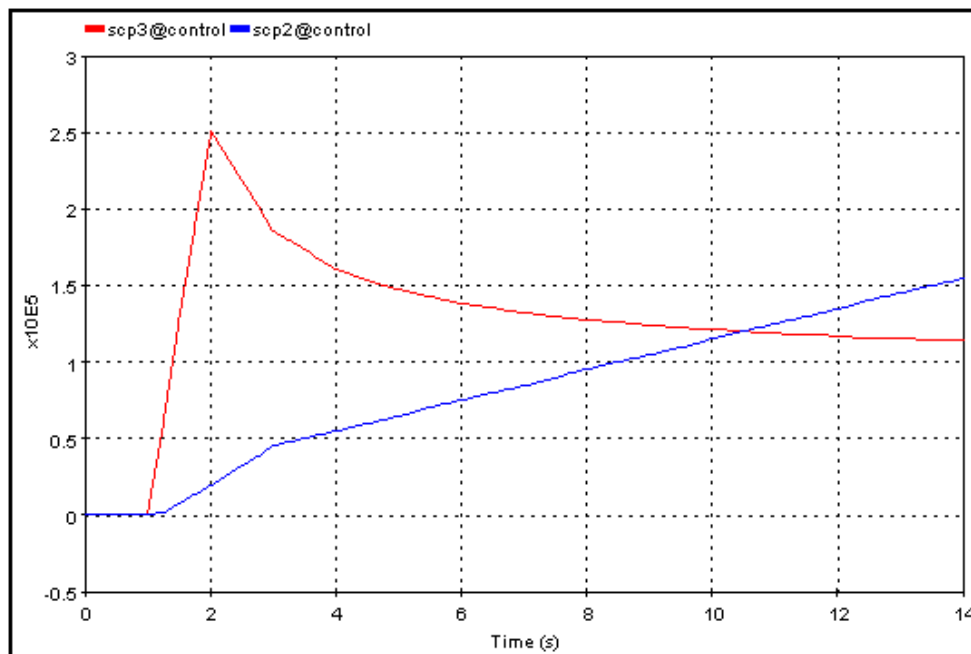


Figura 3.5. Corte (flashover) de las curvas de voltaje de aplicación y curva característica del aislador en el ensayo de flameo en seco a baja frecuencia.

Se observa en la Figura 3.5 que el voltaje de alimentación (onda azul) se divide en los dos intervalos de tiempo con dos pendientes distintas (se ignora el intervalo de tiempo desde cero hasta la primera pendiente, pues este tiempo se usa como artificio para no producir el corte debido a propiedades de la tabla de la curva característica que asume un punto inicial de cero, tanto en el tiempo como en la magnitud), en el primer intervalo una pendiente muy inclinada con una tasa de crecimiento bastante alta para denotar el “rápido” crecimiento que solicita ANSI C29.1. El segundo intervalo con una pendiente variable y menos inclinada, esta será la que se cruzará con la curva característica para producir el flameo.

En la Figura 3.6 se observa la corriente de arco que se produce por el cierre del interruptor ideal del modelo del aislador.

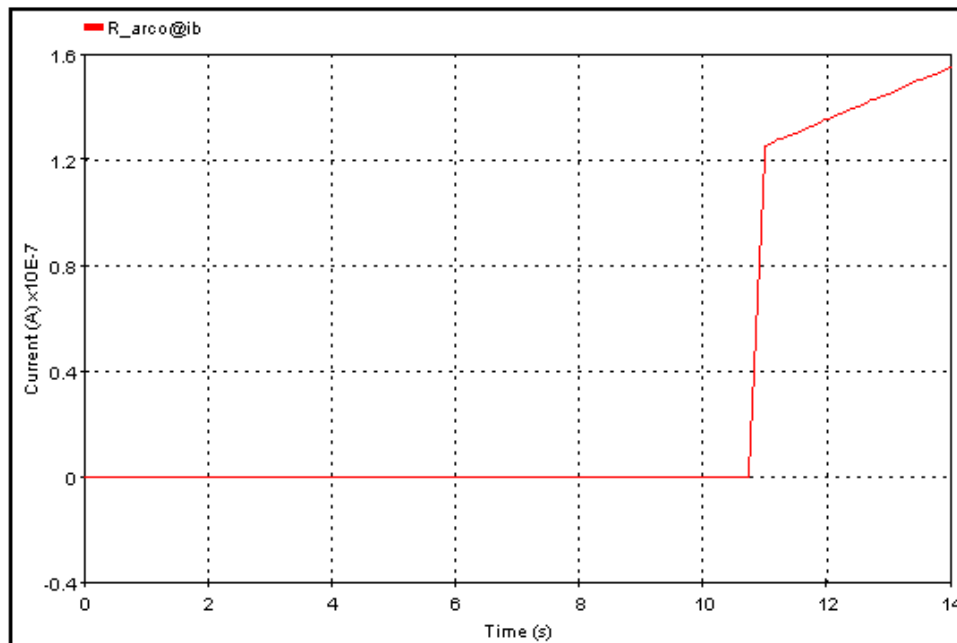


Figura 3.6. Aparición de la corriente de arco después del flashover en el ensayo de flameo en seco a baja frecuencia.

3.1.3 Resultados del sistema para ensayos de flameo a baja frecuencia en húmedo según ANSI C29.6

Para la realización del segundo ensayo se procede de la misma forma como para el primer ensayo con una variación en la resistencia de fuga o contaminación y el valor del voltaje esperado. Los valores que se tomaron de [7] para este caso son para un aislador tipo PIN de porcelana en un ambiente con contaminación tipo “polvo-húmedo” para 6.3 kV.

- $C = 0.02905 \text{ nF}$
- $V_{fuenteAC} = 6.3 \text{ kV a } 60\text{Hz}$
- $R_{ambiental} = 4\,820 \text{ M}\Omega$
- $R_{arco} = 7.6\text{M}\Omega$
- $V_{esperado \text{ de flameo en húmedo a baja frecuencia}} = 60 \text{ kV}$
- $d = 0.178 \text{ m}$

Para el mismo aislador descrito por la Tabla 3.2 expuesto a este ensayo, se tienen diferentes resultados, como los que se observan en la corriente de fuga a través del

capacitor y resistencia de fuga en la Figura 3.7, notándose que tienen una misma forma que en el ensayo anterior pero una magnitud más elevada alcanzando su pico decorriente en 14 s.

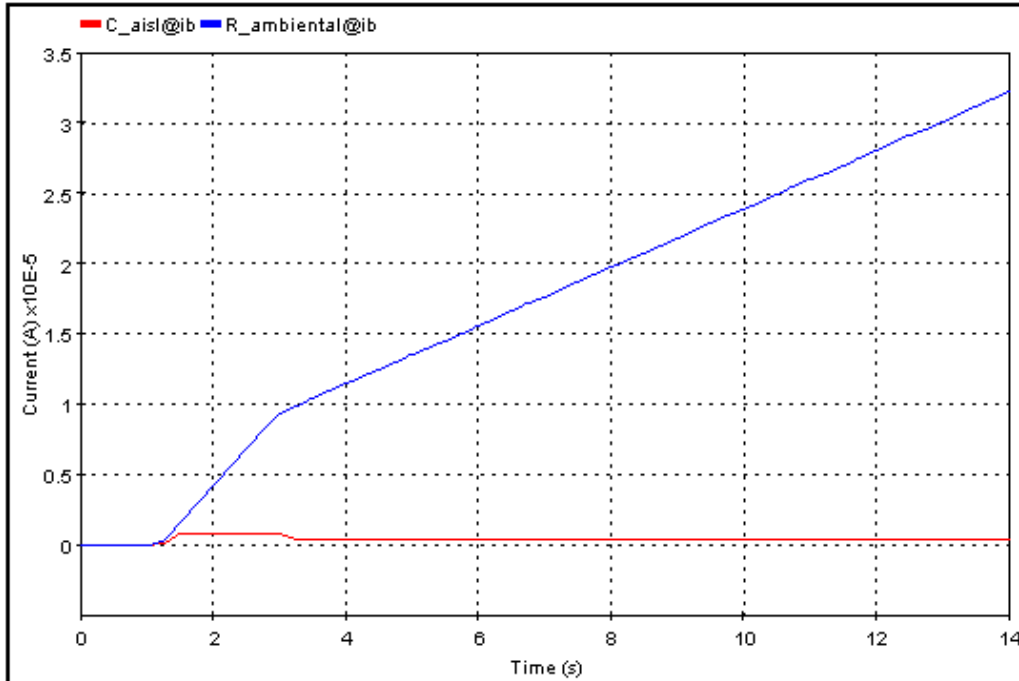


Figura 3.7. Formas de onda de las corrientes de fuga a través del capacitor (rojo) y de la resistencia de fuga (azul) en el ensayo de flameo en húmedo a baja frecuencia.

En la Figura 3.7 se observan las corrientes de fuga que aparecen en el caso del ensayo en húmedo. El comportamiento es similar al caso del ensayo en seco con corrientes un poco inferiores, debido a que en el presente caso, el flameo se produce en menor tiempo en comparación con el caso en seco, lo que evita que las corrientes alcancen valores más altos.

El flameo del aislador conserva el principio mencionado en 1.4.1.4, obteniendo un flameo con un valor menor que en el caso del ensayo en seco, como se observa en la Figura 3.8.

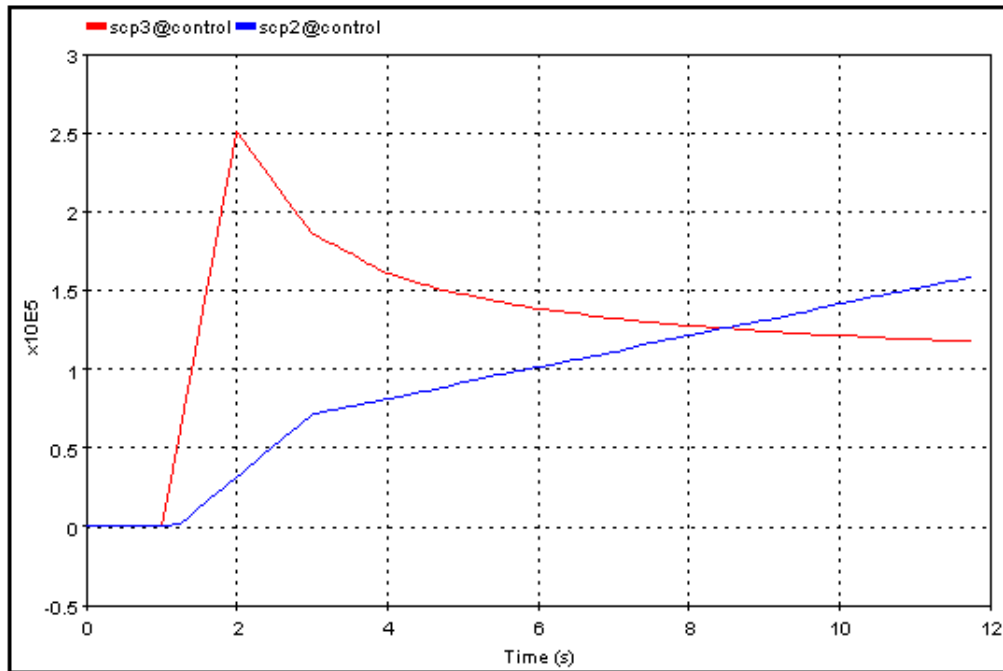


Figura 3.8. Corte (flashover) de las curvas de voltaje de aplicación y curva característica del aislador en el ensayo de flameo en húmedo a baja frecuencia.

En la Figura 3.9 se observa el paso de la corriente a través del aislador debido al cierre del interruptor ideal. Se puede destacar tiempo de activación del ensayo en húmedo versus el caso en seco sucede en menor tiempo.

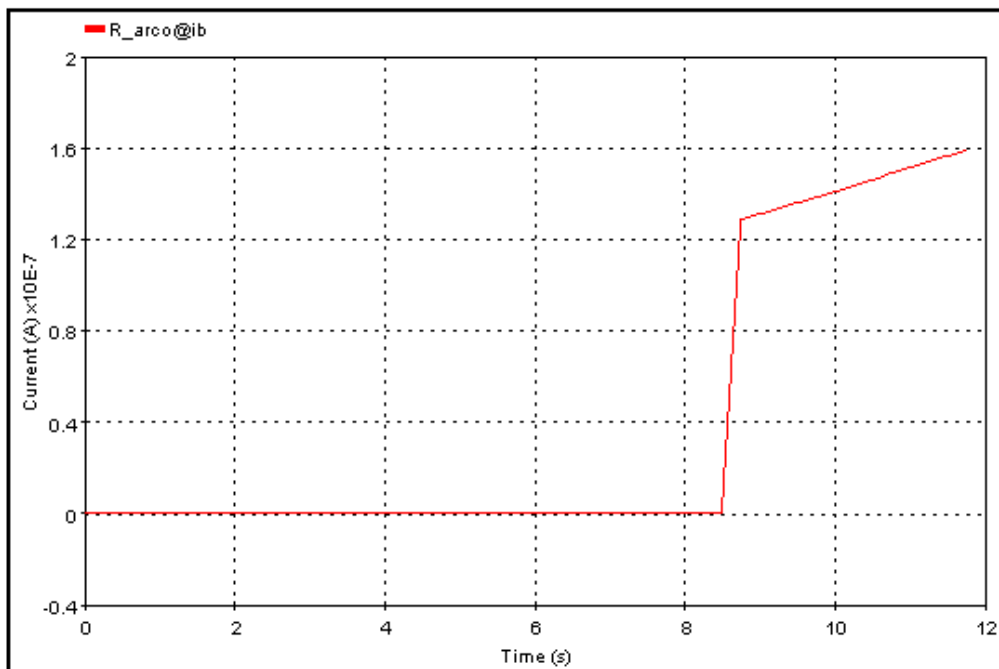


Figura 3.9. Aparición de la corriente de arco después del flashover en el ensayo de flameo en húmedo a baja frecuencia.

Al comparar las Figuras 3.4 con la 3.7, puede destacar la forma de onda de la corriente que en ambos casos son similares, pues este comportamiento es el resultado de operación del aislador en condiciones normales, en donde no influye el flameo.

3.1.4 Análisis comparativo de resultados obtenidos según ANSI C29.6 y según Montecarlo.

Este análisis consiste en la comparación de los resultados obtenidos según ANSI C29.6 y ANSI C29.1., los cuales nos indican que luego de llevar a cabo los diagramas de flujo de las Figuras 2.1 y 2.2, se determina si el lote de aisladores cumple o no con “*el mínimo nivel de aislamiento esperado*”.

Montecarlo por su parte determina cual es el resultado más probable para en función de ello tomar una decisión sobre el aislador, y en este caso decidir si cumple o no con el “*mínimo nivel de aislamiento esperado*”.

El resultado de realizar ambos ensayos eléctricos se puede observar finalmente en la Tabla 3.3, en esta se puede hacer la comparación del valor promedio de los 5 ensayos en cada uno de los 3 aisladores. Dicho valor es comparado con el voltaje mínimo aceptable que es el 95% para el ensayo en seco y el 90% para en húmedo, porcentaje del valor de voltaje esperado de flameo tal como se mencionó en la sección 2.4.

Tabla 3.3. Resultados de ensayos de flameo a baja frecuencia en seco y en húmedo según ANSI C29.6 para el Lote 1 de aisladores.

PROM. DE LOS 5 ENSAYOS EN 1 MISMO AISLADOR N°	VOLTAJE DE FLAMEO EN SECO A BAJA FRECUENCIA [V]	VOLTAJE DE FLAMEO EN HÚMEDO A BAJA FRECUENCIA [V]
1	118 683	113 300
2	143 983	138 500
3	101 560	96 600
Promedio	121 409	116 133
Voltaje esperado de flameo (100%)	95 000	60 000
Voltaje mínimo aceptable	(95%) 90 250	(90%) 54 000
Criterio Prom > Vmin	Cumple	Cumple

El Lote 1 involucra a aisladores con curvas de voltaje que de acuerdo a las especificaciones eléctricas, los que si pasarían los ensayos eléctricos realizados. Es decir, con esto se comprueba que el modelo del circuito detecta cuando un aislador si cumple con el criterio solicitado.

El resultado de realizar ambos ensayos para el lote 2, cuyos aisladores corresponden a un diferente nivel de voltaje (clase 55-2), se observa en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Resultados de ensayos de flameo a baja frecuencia en seco y en húmedo según ANSI C29.6 para el Lote 2 de aisladores.

PROM. DE LOS 5 ENSAYOS EN 1 MISMO AISLADOR N°	VOLTAJE DE FLAMEO EN SECO A BAJA FRECUENCIA [V]	VOLTAJE DE FLAMEO EN HÚMEDO A BAJA FRECUENCIA [V]
1	74 464	48 840
2	83 316	37 858
3	78 058	43 219
Promedio	78 613	43 306
Voltaje esperado de flameo	95 000	60 000
Voltaje mínimo aceptable	90 250	54 000
Criterio Prom > Vmin	No cumple	No cumple

Con los resultados de dos lotes diferentes uno de clase 56-1 y otro de clase 55-2, se pudo “calibrar” el modelo del circuito y comprobar que las pruebas dan resultados como los esperados.

Como en el presente TIC se plantea realizar ensayos a un lote de aisladores de la clase 56-1, al circuito se ingresan los valores de dicho aislador como se indica en el diagrama de flujo de las Figura 2.1 y 2.2.

Si se ingresan los valores (curva característica) correspondiente a otro aislador de menor voltaje nominal como el de la clase 55-2 se presentarán los valores de la tabla 3.4 que al

comparar con los esperados (clase 56-1), se tendrá la conclusión que todo el Lote “no cumple con el mínimo nivel de aislamiento esperado que es de 23 [kV]”.

Tabla 3.5. Comparación de valores de los aisladores clase 56-1 versus 55-2.

	Aislador 56-1: Tipo pin doble	Aislador 55-2: Tipo pin sencillo
Valor nominal [kV]	23	7.2
Flameo de baja frecuencia en seco [kV]	95	50
Flameo de baja frecuencia en húmedo [kV]	60	25

Para la colaboración del método Montecarlo se sigue el diagrama de flujo de este método de la Figura 1.16 y se procede a ingresar los valores obtenidos en cada ensayo de un mismo Lote. En función de estos se creará un “histórico” sobre el cual se basa este método para predecir de forma probabilística el resultado de un numeroso lote de aisladores.

De los flameos obtenidos en varios ensayos del Lote 1, se clasifican por el nivel de voltaje al que flamearon para determinar la primera y segunda columna de la Tabla 3.6.

Tabla 3.6. Aplicación del método Montecarlo tomando como referencia varios resultados de flameos en ensayos de flameo en húmedo a baja frecuencia para aisladores del Lote

1.

Flameos hasta [kV]	Frecuencia de flameo	Frecuencia relativa	Frecuencia relativa Acumulada	Frecuencia de ubicación
100	7.00	0.35	0.35	0
120	5.00	0.25	0.60	0.35
140	7.00	0.35	0.95	0.60
160	1.00	0.05	1.00	0.95

Se desarrolla el método como se indicó en el diagrama de flujo del método, en este caso en función de la Tabla 1.4 para un lote de hasta 500 aisladores se toma una muestra de 20 ensayos en seco a baja frecuencia.

En excel se genera un listado de 500 valores aleatorios y con ayuda de la función Buscar(), se encuentra el rango al que pertenece el valor aleatorio.

$$\text{Nueva Columna} = \text{Buscar}(X, Y, Z)$$

Donde:

- X, valor aleatorio.
- Y, tabla de valores de la “Frecuencia de ubicación”.
- Z valores de “Flameos hasta [kV]”.

Al finalizar se hace un promedio de los valores de la nueva columna y se obtiene el valor con mayor probabilidad de flameo.

En el presente TIC se obtuvo como el valor con mayor probabilidad de flameo es de 123.3 [kV], por lo que se puede concluir que dicho Lote 1 cumple con “*mínimo valor de aislamiento esperado*”, pues este valor supera los 54 [kV] esperado del flameo en húmedo de este estudio.

La resolución del mismo Lote 1 para ensayos de flameo en seco, y para el Lote 2 para ensayos de flameo en seco y en húmedo a baja frecuencia se desarrollan en el Anexo III.

3.2 Conclusiones

Se desarrolló un modelo por el cual se puede representar el comportamiento de un aislador frente a condiciones normales y otro modelo para los ensayos eléctricos, ensayos como de flameo en seco a baja frecuencia y el ensayo de flameo en húmedo a baja frecuencia a aisladores eléctricos caracterizando a cada uno mediante su distancia de arco.

Se comprendió el procedimiento a seguir para realizar ensayos eléctricos a aisladores de la clase 56-1 (ensayos de flameo en seco a baja frecuencia y ensayos de flameo en húmedo a baja frecuencia) siguiendo estándares ANSI C29.6 y ANSI C29.1 y criterios de aceptación adicionales como el estándar NTC-ISO 28591 adicional al método Montecarlo.

Se implementó el modelo del circuito eléctrico en el software EMTP-RV para el caso de condiciones normales y caso ante ensayos eléctricos como flameo en seco a baja frecuencia y flameo en húmedo a baja frecuencia.

Se observó la principal diferencia entre los ensayos de flameo en seco y flameo en húmedo, la cual fue la influencia que tiene la humedad o la cantidad de agua en un aislador, pues los valores obtenidos denotan que la rapidez y magnitud de flameo cambian inversamente proporcional, dando como resultado que a mayor humedad el tiempo en el que flameará el aislador es menor, como menor será la magnitud del voltaje de flameo.

El objetivo de los estándares aplicados en este TIC es brindar lineamientos para realizar ensayos eléctricos a aisladores y determinar si un lote cumple o no, con *“el mínimo nivel de aislamiento esperado”* para dicho lote de aisladores.

El método Montecarlo facilita el llevar a cabo numerosas pruebas repetitivas como las que se propusieron en el presente TIC que fue analizar un lote de hasta 500 aisladores, basándose en las 20 respuestas de ensayos anteriores, dando un valor promedio final esperado para cada Lote sobre el cual se basa para tomar una decisión sobre si cumple o no cumple con *“el mínimo nivel de aislamiento esperado”*.

Al tener el aislador una resistencia de arco constante e inherente a cada tipo de aislador, se produce una corriente de arco de iguales valores para ambos casos de ensayos eléctricos presentados.

Un aislador de cierto voltaje nominal puede ser instalado en una red eléctrica en donde se manejen voltajes menores o iguales a dicho voltaje de aislador y nunca al revés, como se ejemplificó en este trabajo utilizando un aislador clase 56-1 con voltaje nominal de 23kV para una red de 6.3kV, que es como se instala y se especifica en la Tabla 1.1 de las normas para sistemas de distribución de la EEQ.

Como se detalló en la subsección de “pruebas y ensayos”, cada tipo de aislador tiene un estándar sobre el cual basarse para la fabricación y realización de ensayos, tanto eléctricos como mecánicos, de esta forma asegurar la calidad y composición de cada uno de estos. Sin embargo, varios de estos estándares hacen referencia a uno mismo llamado “ensayos eléctricos” (C29.1), cuyo contenido no difiere en gran medida con otras referencias como con C29.11 que es aplicado a cadena de aisladores, con un procedimiento idéntico y diferencias en la parte del número de aisladores a considerar para realizar el promedio o la forma de calcular los factores de corrección entre otras.

3.3 Recomendaciones

En base a los resultados obtenidos en el TIC se recomienda aplicar diferentes métodos de verificación de flameo de un aislador como aplicar los métodos mencionados en [9] en lugar de la curva voltaje – tiempo y comparar resultados.

Es recomendable llevar a cabo los ensayos eléctricos desarrollado en este TIC para hacer una comparativa con los que se obtendrían en un laboratorio físico de alto voltaje.

Se recomienda realizar cualquier ensayo o prueba a un Lote de menos de 90 aisladores, pues como se puede observar en la Tabla 1.4., se obtendría un nivel de aceptación de 0 (se esperan que del lote de 90, 0 estén dañados), a diferencia de hacer un ensayos a un lote de hasta 500 aisladores con un criterio de aceptación de 2 (de un lote de 500 aisladores, se espera que 2 unidades estén dañadas).

4 REFERENCIAS

- [1] M. Castro, «Safety and reliability of electrical insulation,» *Journal of Engineering and Technology for Industrial Applications*, vol. 04, nº 13, p. 7, 2018.
- [2] Dpto. P.T - EEQ, «Plan de expansión 2011 - 2021 del sistema eléctrico de la EEQ,» Quito, 2011 - 2021.
- [3] J. C. Flores Yucra, «Montaje de estructuras y tendido de líneas aéreas de baja tensión para la carrera de electricidad,» Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, 2019.
- [4] GAMMA, «Catálogos y Brochures aisladores,» Enero 2021. [En línea]. Available: https://www.gamma.com.co/catybro_aisladores/. [Último acceso: 10 Enero 2022].
- [5] ANSI, *American national standard for electrical power insulators - Test Methods*, United States of America: American National Standard, 1982.
- [6] G. Rojas, «Aisladores - Líneas de transmisión y distribución - Boletín 13,» GEDISA, Caracas, 2017.
- [7] L. Bo y R. S. Gorur, «Modelling flashover of AC outdoor insulators under contaminated condition with dry band formation and arcing,» *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. vol. 19 no. 3, pp. 1037-1043, Junio 2012. doi: 10.1109/TDEI.2012.6215110.
- [8] W. Hayt, *Teoría electromagnética - 5b: Edición*, MC Graw Hill, 2000.
- [9] IEC, *Insulation co-ordination. Part 4: Computational guide to insulation co-ordination and modelling of electrical networks*, Suecia: IEC TR 60071-4:2004, 2004.
- [10] «A simplified methods for estimating lightning performance of transmission lines,» *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. vol. PASS-104, no. 4, pp. 918-932., Julio 1985. Doi: 10.1109/TPAS.1985.319093..
- [11] ANSI, *American National Standard for wet process Porcelain Insulators - High - voltage pin type*, EE.UU: ANSI C29.6, 1996.
- [12] GAMMA, «Aisladores poliméricos: Pruebas y diseño GAMMA: Catálogo,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.gamma.com.co/>. [Último acceso: 10 enero 2023].
- [13] E. Endesa, «Especificación Técnica: Aisladores de poercelana, vidrio y poliméricos para redes de media tensión.,» 2008. [En línea]. Available: https://www.eneldistribuicao.com.br/rj/documentos/E-MT-011_R-02.pdf. [Último acceso: 10 Enero 2023].
- [14] CELEC EP, «Instructivo para pruebas de aisladores de vidrio templado y porcelana,» 2017. [En línea]. [Último acceso: 14 Enero 2023].
- [15] P. Otero, L. Mera y E. Calle, «Aplicación de la Simulación de Montecarlo para el Análisis de la Implementación de Estaciones de Carga Rápida para Vehículos

Eléctricos en la Provincia de Galápagos,» re, vol. 17, n.º 2, pp. 143-152, Enero 2021. Doi.org/10.37116/revistaenergia.v17.n2.2021.434.

- [16] Chacon, *Investigación operativa. Método de Montecarlo*, Boletín de Estudios Económicos, 1958.
- [17] J. Manhseredjian y C. Dewhurst, «User manual 4ª ed. EMTP,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.emtp.com/>. [Último acceso: 10 Enero 2023].
- [18] E. Garcés, *Análisis matemático de aislamiento aplicado a aisladores de porcelana, polímero y vidrio, a nivel de 13.8 kV*, Guayaquil: Universidad Politécnica Salesiana, 2015.

5 ANEXOS

ANEXO I. Manual de usuario

ANEXO II. Especificaciones y valores de ingreso

ANEXO III. Resolución del método Montecarlo para ensayos en seco y en húmedo para el Lote 1 y Lote 2.